ZIRKUITU ELEKTRIKO ETA ELEKTRONIKOEN OINARRIZKO ANALISIA

Olatz Arbelaitz Gallego
Txelo Ruiz Vazquez

Udako Euskal **Unibertsitatea**
Bilbo, 2001

EUSKO JAURLARITZA
GOBIERNO VASCO

HEZKUNTZA, UNIBERTSITATE
ETA IKERKETA SAILA
DEPARTAMENTO DE EDUCACIÓN
UNIVERSIDADES E INVESTIGACIÓN

«Liburu hau Hezkuntza, Unibertsitate eta
Ikerketa Sailaren laguntzaz argitaratu da»

© Olatz Arbelaitz, Txelo Ruiz
© Udako Euskal Unibertsitatea

ISBN: 84-8438-018-1
Lege-gordailua: BI-2346-01

Inprimategia: RGM, Bilbo
Azalaren irudia: Elena Lazkano
Azalaren diseinua: Iñigo Ordozgoiti
Hizkuntza-zuzenketen arduraduna: Jose Ramon Etxebarria BIlbao

Banatzaileak: UEU. Erribera 14, 1. D BILBO telf. 946790546
Helbide elektronikoa: argitalpenak@ueu.org www.ueu.org

Zabaltzen: Igerabide, 88 DONOSTIA

Pertsonen lana jakintza dugu
ezagutuz, aldatzea

Xabier Leteren “Izarren hautsa”,
Mikel Laboak musikatua

Irakurleari: ezetz igarri
zer dagoen alderantziz azaleko irudian

Aurkibidea

Hitzaurrea

Helburuak

Eskuartean duzun liburu honetan zirkuitu elektriko eta elektronikoen oinarrizko kontzeptuak aztertzen dira. Ezer baino lehen, azpimarratu behar dugu, oinarrizkoak direla liburuan barrena azaltzen diren kontzeptu guztiak: hasi zirkuituen osagaietatik, bakar-bakarrik oinarrizkoenak hartu baitira aintzakotzat (erresistentziak, kondentsadoreak, diodoak eta transistoreak); segi osagai horien portaera matematikoki tratatzeko moduarekin, soilik portaera lineala edo linealizatua hartu baita aintzakotzat; eta bukatu zirkuituak analizatzeko metodoekin, hauen artean ere oinarrizkoenak soilik aurkeztu baitira liburuan.

Horren guztiaren arrazoia liburuaren hartzaile-motan datza. Izan ere, liburua EHUko Informatika Fakultateko Informatikan Ingeniaritza eta Sistemen Informatikan Ingeniaritza Teknikoa deritzen ikasketetako lehenengo mailan irakasten den "Elektronika Digitalaren Oinarriak" (lehen "Konputagailuen Teknologiaren Oinarriak" zena) irakasgaia gainditu behar duten ikasleen lana erraztearren pentsatuta dago: hori izan da egileon lehenengo helburua.

Horrexegatik, informatikari batek gaur egungo konputagailuen oinarrian dagoen teknologia elektronikoari buruz eskuratu behar dituen ezagutza minimoak aztertu dira liburuan. Ez dago pentsatuta, beraz, Ingeniaritza Elektronikoan edo horrelako ikasketetan jardungo dutenentzat, baina horiei ere benetan lagungarri gerta dakiekeelakoan gaude, bereziki oinarrizko kontzeptuak barneratzeko orduan, askotan ikasgai batzuen ur sakonetan murgiltzean ikasleak denbora baino lehen arnasik gabe geratzen baitira oinarrizko kontzeptuekin herrenka ibiltzeagatik.

Bigarren helburua —baina bigarrena izan arren ez garrantzi txikiagokoa— euskaraz ikasten duten ikasleek euskaraz idatzitako testu liburua edukitzea izan da.

Liburuaren egitura

Gogoan izan, gorago aipatu den legez, liburua lehenengo mailako ikasgai bati buruzkoa dela, eta gainera, ikasgai hori lehenengo lauhilekoan irakasten dela (urritik otsailera arte, alegia), horrek berekin dakartzan baldintza guztiekin, batez ere ikasleen hasierako "despistea", zeren, oro har ikasle gehienek unibertsitatean ari direla barneratzeko denbora-tarte bat behar baitute. Sarri, otsaileko azterketen emaitzen ondoren konturatzen dira ikasgaia azterketa garaia baino dezente lehenago hasi behar zutela prestatzen, bereziki, kontzeptu teorikoak pixkanaka-pixkanaka barneratzen joateko, ariketak egunero egin behar direla.

Horrexegatik guztiagatik, liburua ariketa ebatzien bilduma zabal gisa abiatu genuen hasieratik bertatik, gehienetan ariketak baitira ikasleen buruhausterik handienak, batez ere gai ez direlako, salbuespenak salbuespen, ariketak sistematikoki edo metodologia bati jarraituz ebazteko. Hori izan da, beraz, gure hirugarren helburua: ariketak ebazteko metodologia sistematiko bat aurkeztea.

Hori dela eta, liburuaren kapituluak testu liburu batzuetan arras arrunta den honako egitura honi jarraituz idatzi ditugu: kapitulu guztiak hiru ataletan daude banatuta.

Lehenengo atalean kapituluan jorratuko diren kontzeptuen azalpen teorikoa aurkezten da (berriro ere azpimarratu nahi dugu, oinarrizko kontzeptuak baino ez direla aurkezten; horrexegatik saiatu gara teoria modu laburrean azaltzen, gehiegi sakondu gabe).

Bigarren atalean, kapituluan jorratzen diren kontzeptuen erabilpen praktikoa lantzen da, ariketa ebatzien bidez. Esan bezala, ariketak ebazteko metodologia da azpimarratu nahi izan duguna; horrexegatik, askotan ondoz ondoko ariketen azalpena errepikakorra gerta dakioke liburua modu jarraituan irakurtzen ari den irakurleari, metodologia berbera baita ariketetan etengabe lantzen dena. Aldez aurretik, barkamena eskatu nahi diogu irakurle horri irakurketa jarraitua aspergarria iruditzen bazaio, baina metodologia ikasteko behin eta berriro errepikatzeak onura dakarrelakoan gaude. Bestela, saia bedi irakurle hori tarteko ariketa bat irakurtzen aurrekoak irakurri gabe: batere arazorik gabe irakurriko du, metodologiaren errepikapena dela medio aurreko ariketen menpekotasuna saihesten saiatu baikara.

Azkenik, hirugarren atalean ariketa mordo bat proposatzen zaio ikasleari, kapituluan ikusi eta ikasitakoa bere kabuz lantzeko.

Gaur egun modan dauden estatistika eta zenbakiei amore emanez, esan dezagun liburuan, guztira, 119 ariketa ebatzi daudela, eta 139 direla proposatutakoak.

Liburuaren antolaketa

Liburuan zehar, gauza errazenetatik eta sinpleenetatik zailenetara urratu dugu bidea.

Liburuari hasiera egokia emateko, informatika-munduan zenbatzea 0tik hasteko ohitura dagoen legez, 0. kapitulua jarri dugu guk ere; bertan, liburuaren nondik norakoak eta mugak azaldu ditugu, hala nola, liburuan barrena korronte zuzeneko zirkuituak egoera egonkorrean soilik analizatuko direla adieraziz.

Ondorengo bost kapituluetan zirkuitu elektrikoak jorratzen dira. Hasteko, 1. kapituluan zirkuituetako magnitudeak; 2. kapituluan, zirkuitu elektrikoen osagaiak; 3. kapituluan, zirkuitu elektrikoen oinarrizko legeak eta horien aplikazioak; 4. kapituluan, zirkuituak analizatzeko oinarrizko metodoak. Azkenik, zirkuitu elektrikoekin amaitzeko, 5. kapituluan, labur bada ere, *RC* zirkuituen egoera iragankorrerako sarrera aurkezten da.

Azken hiru kapituluetan, zirkuitu elektronikoak jorratzen dira. Hain zuzen, 6. kapituluan, diododun zirkuituak; 7. kapituluan, transistoredun zirkuituak, eta azkenik, 8. kapituluan zirkuitu digitalen oinarrizko portaera.

Horren guztiaren osagarri gisa, lau eranskin gehitu ditugu, testuan azaldu ez diren hainbat gauza azaltzeko asmoz. Bereziki, E1 eranskinean magnitude elektrikoen unitateak eta gehien erabiltzen diren anizkoitzak eta azpianizkoitzak aurkezten dira. E2 eranskinean, seinale periodikoen ezaugarriak. E3 eranskinean, oinarrizko elektronika; eta, azkenik, E4 eranskinean diodoen aplikazio arrunt bat: artezgailua.

Eskerrak

Lehenik eta behin, zorretan gaude Elena Lazkanorekin, liburua idazteari ekin genionean azala lehenbailehen diseinatzeko eskatu baikenion, liburua idaztea kostatu zaiguna baino askoz gutxiago kostatuko zitzaigulakoan, eta berak, liburuaren argitalpena ez atzeratzeko, udako oporretan egin zuen liburuaren azalean ikus dezakezun marrazki liluragarri hori.

Eskerrak eman nahi dizkiegu, baita ere, gurekin batera irakasgai hori irakasten aritu diren Carlos Amuchastegui eta Amaya Ibarra irakasleei. Halaber Alexi, hainbat zuzenketa egin dituelako.

Urte hauetan guztietan KTO eta EDO ikasgaietan gure ikasle izandako guztiei ere eskerrak eman nahi dizkiegu, beraiengandik berek uste dutena baino gehiago ikasi dugulako geuk ere; esate baterako, hobeto uler dezaten gaia nola planteatu, metodologia agerian uzteko ariketei nola ekin, eta horrelakoak. Eta baita ere, banatu ditugun apunteei (liburu honen zirriborroak) "zorriak" kentzen lagundu digutelako.

Era berean, eskerrak eman nahi dizkiegu UEUko Nekaneri, pazientzia infinitua izan duelako gurekin, eta Joserrari, testua hobetzeko iradokizun eta zuzenketengatik.

Azkenik (kontuan izan ingelesez idatzitako liburuetako "*last but not least*" ospetsua), etxekoei ere eskertu behar diegu askotan liburuagatik utzitako ardurak beren gain hartu dituztelako: Juanitori eta amatxi Conchitari, Mikel zaindu dutelako ama liburuarekin lanpetuta zegoenean, eta Txusi.

Orain bai, azkena: egileok elkarri eman nahi dizkiogu eskerrak, lankidetza oparoa izan delako, baina harroputzak izan nahi ez dugunez gero, ez gara luzatuko honetaz.

0. Sarrera

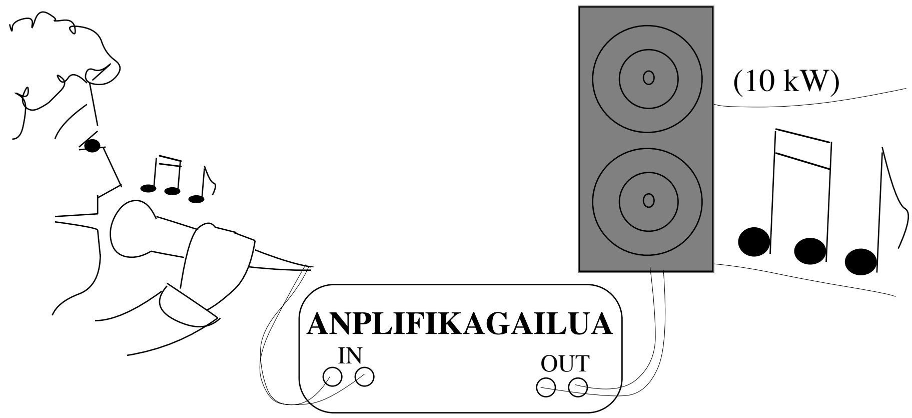
Liburu honen aztergaia zirkuitu elektriko eta elektronikoak dira, helburua zirkuituen portaeraren analisia egitea izanik; hots, zirkuituak matematikoki aztertu eta, kalkuluak egin ondoren, zirkuituaren "soluzioa" aurkitzea: zirkuitua osatzen duten elementu guztietako tentsio eta korronte elektrikoak kalkulatzea, hain zuzen ere.

Baina mamian sartu baino lehen, merezi du zenbait gauza argitzea, geure burua kokatzeko.

• Zer dira zirkuituak?

Zirkuituak mota bereziko sistemak dira, sistema izanik helburu jakin bat lortzeko asmoz elkarrekin funtzionatzen duten gailu edo osagaien multzoa.

Bereziki, zirkuitu elektriko edo elektronikoa hauxe da: energiaren edo informazioaren garraioa egiteko asmoz elkarrekin konektatu diren gailu edo osagai elektriko edota elektronikoen multzoa. Osagaien elkarketak baldintza bat bete behar du zirkuitua osatzeko: osagaiek ibilbide itxi bat (gutxienez) osatu behar dute, bertatik korronte elektrikoa igarotzeko modukoa. (Oharra: baldintza hori bete ezean, sare baten aurrean geundeke).



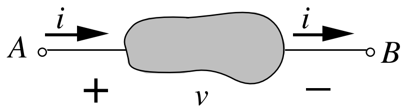
Baina errealitatean aurki ditzakegun zirkuituak konplexuak izan ohi dira; horrexegatik, benetako zirkuitu fisiko baten portaera teorikoki aztertzeko, zirkuituaren eredu teoriko bat sortu behar da, bertan zirkuitu fisikoko osagaiak beraien ereduez ordezkatuz.

Osagaien ereduak idealak izan ohi dira, osagai fisikoaren portaera era sinplifikatu batean islatzen baitute. Hau da, osagaien portaera fisikoaren hurbilketak egiten dira, oro har, portaeran parte hartzen duten magnitude fisikoak —tentsio eta korronte elektrikoak, normalean— ekuazio matematikoen bidez erlazionatuz, eta horrela abstrakzio- edo konplexutasun-maila desberdinetako eredu desberdinak lortzen dira, iritsi nahi den zehaztasunaren arabera. Dena den, hurbilketa baten ondorioa izan arren, osagaien ereduak zehazki definituta daude.

Horretan oinarriturik, zirkuitu-elementuen ereduek erlazio matematiko finkoa betetzen dute beren portaeran parte hartzen duten magnitudeen artean. Horixe izan daiteke zirkuitu-elementuaren definizioa.

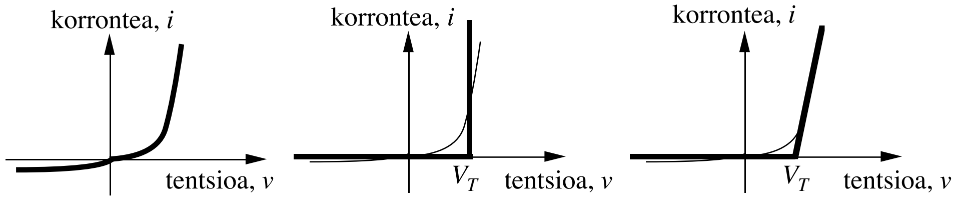
Adibidez:

zirkuitu-elementua edo osagaia:



i eta *v*-ren arteko erlazio matematiko finkoa, $i = f(v)$

portaera erreala **hurbilketa** **hurbilketa zehatzagoa**



$i = k_1 \cdot \exp(k_2 v)$

$$\begin{cases} i = 0, \text{ baldin } v \le V_T \\ v = V_T, \text{ baldin } i \ge 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} i = 0, \text{ baldin } v \le V_T \\ v = V_T + i \cdot R, \text{ baldin } i \ge 0 \end{cases}$$

Beraz, hemendik aurrera zirkuitu hitza ikusten dugunean, oso garbi izan behar dugu eredu teoriko batez ari garela, eta ez zirkuitu fisiko batez. Dena den, ereduak baliagarriak dira oso, zirkuitu fisikoaren portaera aurreikustea bideratzen dutelako, eta, halaber, zirkuitu fisiko hobeak egitea.

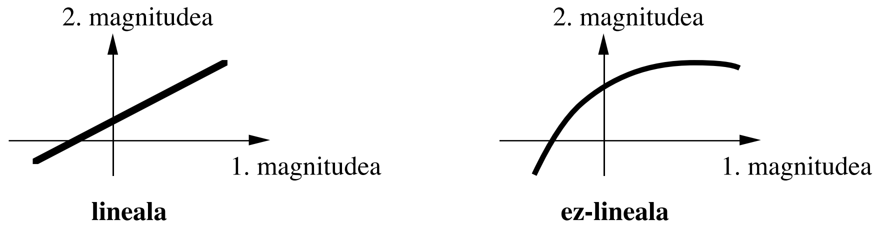
Laburbilduz, liburu honetan zirkuitu elektriko eta elektronikoak teorikoki aztertu nahi ditugunez gero, zirkuitu-ereduak hartuko ditugu aintzakotzat. Zirkuitu horietako osagaiak ere ereduak izango dira, hala nola erresistentziak, kondentsadoreak, tentsio- edota korronte-sorgailuak, diodoak, transistore bipolarrak, eta abar.

Baina gaia oso zabala izanik, erabat beharrezkoa da mugak jartzea, interesatzen zaiguna soilik aztertzeko. Hona hemen muga horiek.

• Sailkapen bat: zirkuitu linealak eta ez-linealak

Esan dugun legez, zirkuituetako osagaien ereduak ekuazio matematikoetan oinarritzen dira eta ekuazio horiek errazak edo konplexuak izan daitezke, iritsi nahi den zehaztasunaren arabera. Horretan oinarriturik, lehenengo sailkapen bat egingo dugu: zirkuituak linealak edo ez-linealak izango dira, osagaien portaera islatzeko hartu diren ekuazio-moten arabera.

Osagaiak linealak dira beren portaeran garrantzitsuak diren magnitudeen arteko erlazio matematikoa lerro zuzen baten ekuazioa baldin bada (proportzionala, alegia). Ekuazio matematikoa konplexuagoa denean, osagaiak ez-linealak izango dira. Ondorioz, zirkuitu bat lineala izango da beraren osagai guztiak linealak direnean, bestela —osagairen bat lineala ez bada, alegia— zirkuitua ez-lineala izango da.



Liburu honetan, oro har, zirkuitu linealak aztertuko ditugu eta elementuren bat ez-lineala denean (diodoak eta transistoreak, esate baterako) hurbilketa linealak erabiliko ditugu.

• Beste sailkapen bat: zirkuitu bilduak eta banatuak

Zirkuitu elektriko eta elektronikoetan erabili ohi diren seinaleak (tentsioak eta korronteak), normalean periodikoak izan ohi dira, errepikakorrak alegia, seinalea segundo batean zenbat aldiz errepikatzen den adierazten duen parametroa maiztasuna edo frekuentzia izanik (maiztasunaren unitatea: 1 Hertz = 1 Hz = errepikapen bat segundoko).

Gaur egungo gailu eta aplikazio elektronikoetan oso maiztasun desberdinetako seinaleak erabiltzen dira: 0 Hz-etik (seinaleak konstante direnekoa, alegia) gigahertzetara (1 GHz = 10^9 Hz) telekomunikazio-aplikazioetan. Hori dela eta, zirkuituen portaera oso desberdina izango da maiztasun desberdinetan eta, ondorioz, zirkuitu fisiko bat aztertzeko erabiltzen den eredu teorikoa ere desberdina izango da.

Uhin elektromagnetiko baten uhin-luzera maiztasunaren alderantziz proportzionala dela kontuan hartuz, maiztasun baxuko seinaleei uhin-luzera handia dagokie (km) eta maiztasun oso altuko seinaleei, berriz, oso uhin-luzera txikiak (cm edo mm).

Zirkuitu batean prozesatzen diren seinaleen uhin-luzerarik txikiena zirkuituaren tamaina baino askoz handiagoa bada (beraz, maiztasun baxuko seinaleak erabiltzen badira), orduan elementu bakoitzaren portaera ongi bereiz daiteke besteenetik eta zirkuitu fisikoko elementuak beren eredu teorikoez ordezka daitezke: orduan esaten da zirkuitua bildua edo "kontzentratua" dela.

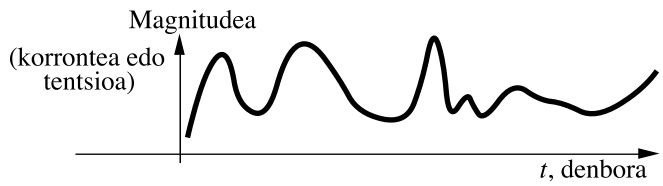
Maiztasunak oso altuak direnean (telekomunikazio-aplikazioak) edota zirkuituaren tamaina oso handia denean (energia elektrikorako garraio-sareak, esate baterako) berriz, zirkuituko elementuen eraginak bata besteari gainjartzen zaizkio, eta ezinezkoa da elementuen portaerak bereiztea. Kasu horretan esaten da zirkuitua banatua dela; eta teorikoki aztertzeko, Maxwell-en ekuazioak erabili behar dira edo elementu bilduen segida infinitu bat dela suposatu. Edozein kasutan, zirkuitu hauen analisia arras konplexua izan ohi da.

Liburu honetan, zirkuitu bilduak ditugu aztergai, beraien elementuak hauexek izanik: erresistentziak, kondentsadoreak...

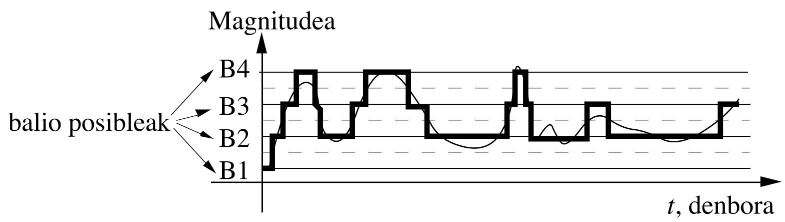
• Beste sailkapen bat: zirkuitu analogikoak eta digitalak

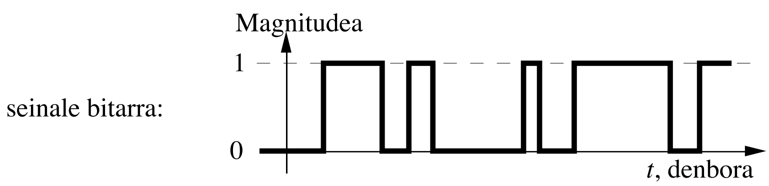
Zirkuituetan bi seinale-mota erabiltzen dira: seinale analogikoak edo seinale digitalak; eta hortik sortzen da zirkuituen sailkapen hau, zirkuituak prozesatzen dituen seinaleen arabera.

Zirkuitu analogikoek seinale analogikoak prozesatzen dituzte, hots, denboran zehar edozein balio har dezaketen seinaleak (konstanteak kasu partikularra izanik).



Zirkuitu digitalek seinale digitalak prozesatzen dituzte, hots, balio jakin batzuk besterik hartu ezin dituzten seinaleak (kasu partikularra, seinale bitarrak dira, bi balio besterik hartzen ez dutenak).





Liburu honetan, zirkuitu analogikoak aztertuko ditugu soilik.

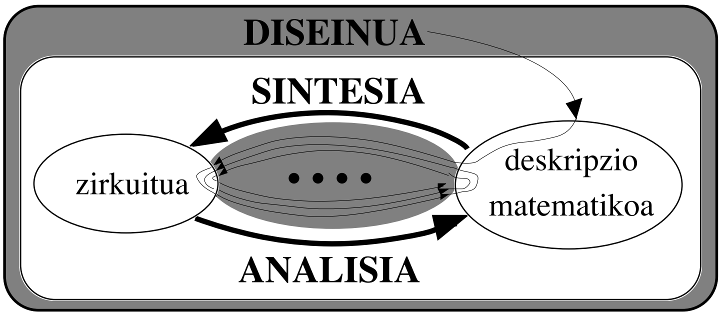
• Zirkuituen gaineko ikuspuntuak

Oro har, edozein sistemaren gainean hiru ikuspegi desberdin izan ditzakegu:

1) Analisia: Zirkuitu ezagun baten portaera matematikoki deskribatzean datza. Azken batean, gorago esan dugun legez, zirkuitu ezagun baten azterketa egin eta soluzioa bilatzea.

2) Sintesia: Zirkuitu baterako nahi den portaeraren deskripzio matematikotik abiatuz, zirkuitua osatuko duten osagaiak eta bilatzen den emaitza lortzeko nola konektatu behar diren finkatzeko prozesua.

3) Diseinua: Lortu nahi den portaeratik abiatuz, lehendabizi portaera horren deskripzio matematikoa lortu behar da, gero zirkuituaren sintesia egin eta, bukatzeko, horrela lortutako zirkuituaren analisia egin, ea nahi den portaera islatzen duen. Ezezkoan, prozesua behin eta berriro errepikatu behar da, analisiaren emaitza eta abiapuntuko portaera berdinak izan arte.



Liburu honetan zehar analisia da landuko dugun ikuspegia; hots, zirkuituen eskematik abiatuta, analisia egin nahi dugu: portaeraren ekuazio matematikoak bilatu, gero soluzioa emateko. Dena den, ariketa gutxi batzuetan, sintesia ere aurkeztuko da, interesgarria baita.

• Zirkuituen ezaugarriak eta egoera

Zirkuitu bat osorik definitzeko, beraren ezaugarriak ezagutarazi behar dira, honako hauek izanik:

- zirkuitua osatzen duten osagaiak (erresistentziak, kondentsadoreak, sorgailuak, diodoak, transistoreak, ...) eta dagozkien balioak (5 Ω, 47 μF, 10 V, ...);
- zirkuituaren topologia, hots, elementuak nola dauden konektatuta.

Ezaugarri horiek grafikoki adieraztean, zirkuituaren eskema lortzen da, hori izanik adierazpiderik arruntena, baina ez bakarra (konputagailuen bidezko simulazioak egitean, konexio-zerrendak ere erabiltzen baitira zirkuituak definitzeko, esate baterako).

Zirkuitua definitu ondoren, analisia egiten da, eta analisiaren emaitzak zirkuituaren egoera adierazten du; hots, zirkuitua "elektrikoki" nola dagoen. Egoera-aldagai izenez ezagutzen diren honako magnitude hauen bitartez adierazten da zirkuitu baten egoera:

- osagai guztietako tentsioa eta korrontea;
- energia edo potentzia osagai bakoitzean, energia hori metatua, emandakoa ala xurgatutakoa den esan behar delarik.

Normalean egoera-aldagai batzuk besteak baino garrantzi handiagokoak dira: batzuk zirkuituaren kitzikapena edo sarrerak direlako (hau da, zirkuituaren portaera baldintzatzen dutenak) eta beste batzuk zirkuituaren erantzuna edo irteerak direlako, hau da, zirkuitutik jaso nahi dena (energia dela, informazioa dela). Sarrerez eta irteerez gain, bitarteko egoera-aldagai asko izan ohi da zirkuituetan.

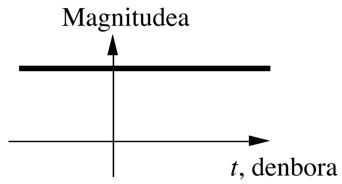
Matematikoki honelaxe adierazten da zirkuituaren egoera: osagai guztietako tentsioak (v_j = j osagaiko tentsioa) eta korronteak (i_j = j osagaitik igarotzen den korronte elektrikoaren intentsitatea) **X** izeneko bektore batean elkartzen dira, **X** egoera-aldagaien bektorea izanik. Ondoren, zirkuituaren portaera adierazten duten ekuazioak idazten dira, non egoera-aldagaiak eta horien denborarekiko deribatuak, zirkuituaren sarrerak (**W** sarrera-bektorea) eta denbora azaltzen diren. Matrizialki, honelaxe adierazten da:

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} = f(\mathbf{X}, \mathbf{W}, t)$$

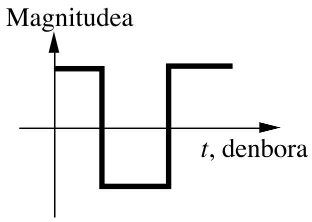
• Korronte-motak: zuzena eta alternoa

Zirkuitu baten sarrerak konstante edo aldakorrak izan daitezke denboran zehar. Lehenengo kasuan, konstante direnean alegia, korronte zuzena (k. z.) dela esaten da, (ingelesez, DC = *direct current*).

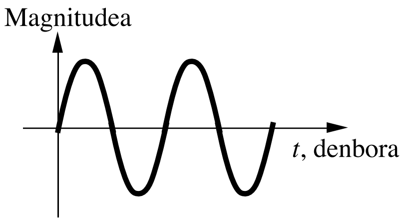
korronte zuzena:



Zirkuituari ezarritako sarrerak denboran zehar periodikoki aldatzen direnean, korronte alternoa (k. a.) dela esaten da (ingelesez, AC = *alternate current*). Korronte alternorik ezagunena sinusoidala da, horixe baita sare elektrikoetan erabiltzen dena, baina kasu partikularra besterik ez da.

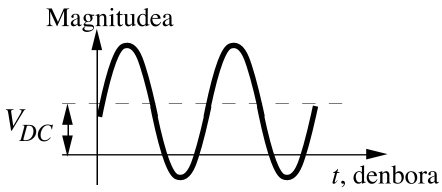


korronte alternoa



korronte alterno sinusoidala

Dena den, seinale alterno batek korronte zuzeneko osagaia (V_{DC}) izan dezake, seinale aldakorraren batez besteko balioa horixe izanik, hau da, ardatz horizontalarekiko desplazamendua.



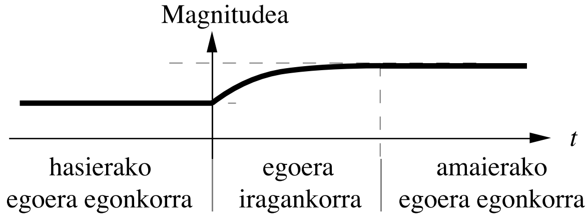
Liburu honetan, korronte zuzeneko zirkuituak aztertuko ditugu soilik.

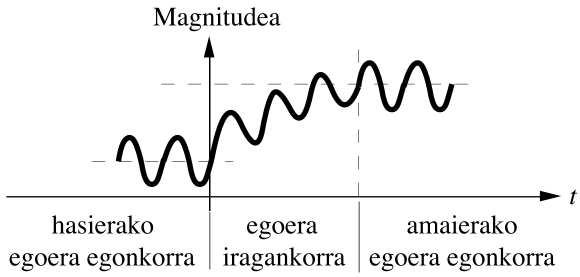
• Funtzionamendu-egoerak: egonkorra eta iragankorra

Ikusi berri dugunez, zirkuituaren egoera da zirkuituaren portaerari buruz informazioa ematen diguna. Oro har, bi funtzionamendu-egoera bereizten dira zirkuituetan: egoera egonkorra eta egoera iragankorra.

Zirkuitu bat egoera egonkorrean dagoela esaten da, zirkuituak denbora luzez baldintza ezagun batzuen menpe funtzionatzen duenean, baldintzek denboran zehar aldaketarik jasan gabe (adi egon, azken honek ez baitu esan nahi zirkuituaren egoera-aldagaiak konstante direnik). Liburu honetan, 5. kapituluan izan ezik, egoera egonkorraz arduratuko gara.

Zirkuitu bat egoera iragankorrean dago zirkuitua baldintza batzuetan funtzionatzetik beste baldintza batzuen menpe funtzionatzera igarotzen denean; beraz, aldaketak gertatzen dira denbora-tarte horretan zehar. Kasu honetan, zirkuitua analizatzean, kontuan hartu behar da denbora aldagaia. 5. kapituluan egoera iragankorrerako sarrera laburra aurkeztuko da.





• Liburuari buruzkoa

Gorago esan dugun legez, liburu honetan zirkuitu elektriko eta elektronikoak ditugu aztergai, ariketa ebatzien bilduma zabala dela medio. Dena den, zirkuitu baten portaera matematikoki bilatu ahal izateko, guztiz beharrezkoa da kontzeptu teorikoen ezagutza minimoa izatea. Hori dela eta, kapituluak hiru zatitan banatu ditugu: lehendabizikoan, kapitulu horretan jorratuko diren zirkuituetan berriak diren kontzeptu teorikoak azaltzen dira modu laburrean; bigarren zatian, kapituluari dagozkion ariketa ebatziak aurkezten dira. Kapituluei amaiera egokia emateko asmoz, proposaturiko ariketa-bilduma zabala gehitu dugu.

• Xedea

Argibidetxo honi bukaera eman baino lehen, honako hau azpimarratu nahi dugu: zirkuituen portaera aztertzeko zirkuitu-teorian erabiltzen diren metodo batzuk landuko ditugun arren, gure helburua ez da metodo horiek ikastea soilik; benetako xedea zirkuitu baten portaera aztertzeko gauza izatea da, erabilitako metodoa bitarteko bat besterik ez izanik.

1. Zirkuituetako oinarrizko magnitudeak

A) Jakin beharreko kontzeptuak

• Karga elektrikoa

Karga elektrikoa materiaren oinarrizko ezaugarrietako bat da, masaren antzera. Esperimentalki behatzen diren indar elektrikoak justifikatzeko erabiltzen da. Bi indar-mota behatzen direnez gero, erakarpen-indarrak eta aldarapen-indarrak, bi karga-mota daude, positiboak eta negatiboak.

Adierazpena: Q = karga konstantea
q = oro har, karga aldakorraren aldiuneko balioa
$q(t)$ = karga aldakorraren aldiuneko balioa, denboran zehar

Unitateak: coulomb, C

Zirkuituetan analizatzen dena ez da karga bera, baizik eta kargak elementuetan zehar duen mugimendua. Eta, oro har, mugitzen dena elektroia da, atomoetako oinarrizko partikula, karga negatiboduna. Elektroiaren karga: $e^- = -1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C.

• Korronte elektrikoa

Karga elektrikoak eroaleetan mugitzen direnean, korronte elektrikoa sortzen dute. Beraz, korronte elektrikoa kargen mugimendua besterik ez da. Korronte elektrikoaren intentsitatea da neur daitekeen balioa, eta balio honek denbora-tarte ezagun batean puntu batetik zenbat karga igarotzen diren adierazten du. Zehatz-mehatz:

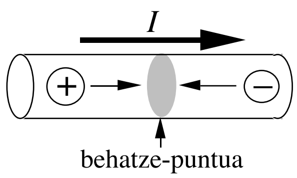
Definizioa: Eroale baten zeharkako azalera batetik (sinplifikatzeko, behatze-puntu batetik) denbora unitatean igarotzen diren karga elektrikoen kopurua da korrontearen intentsitatea.

Adierazpena: I = korronte konstantearen intentsitatea
i = oro har, korronte aldakorraren intentsitatearen aldiuneko balioa
$i(t)$ = korrontea denboran zehar aldatzen dela adierazteko

$$\boxed{I = \frac{\Sigma Q}{\Delta t}} \quad \text{edo} \quad \boxed{i = \frac{dq}{dt}}$$

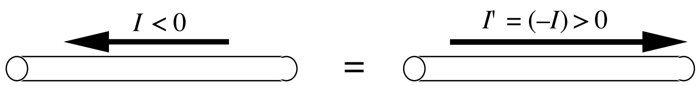
Unitateak: anpere, A (1 A = 1 C/1 s; 1 anpere = 1 coulomb/1 segundo)

Mugimenduaren noranzkoa eta kargaren zeinua oso garrantzitsuak dira korrontearen intentsitatea kalkulatzeko. Korrontearen noranzkoa gezi batez adierazten da. Hitzarmen historiko bat dela kausa, korrontearen geziak beti adierazten du karga positiboen mugimendua, karga negatiboak kontrako noranzkoan mugitzen direlarik.



$$I = \frac{\Sigma Q^{+} - \Sigma Q^{-}}{\Delta t} = \frac{\Sigma Q^{+} + \Sigma \left| Q^{-} \right|}{\Delta t}$$

Zirkuituetan, normalean, korrontearen noranzkoa arbitrarioki aukeratzen da eta, kalkuluak egin ondoren, bere intentsitatearen balioa positiboa edo negatiboa izan daiteke, biak baliokideak izanik: negatiboak positiboa kontrako noranzkoan doala adierazten du.



• Potentzial-diferentzia: tentsio elektrikoa

Eroaleetan karga elektrikoak mugi daitezen, bultzada antzeko zerbait behar dute: potentzial-diferentzia edo tentsio elektrikoa. Kargak potentzial-diferentzia bat dagoenean mugituko dira soilik; hots, zirkuitu batean korronte elektrikoa egon dadin, erabat beharrezkoa da potentzial-diferentziak izatea zirkuituko puntu desberdinen artean.

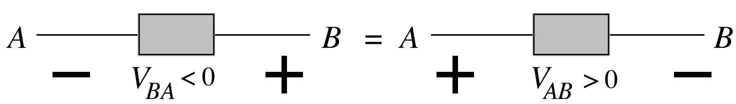
Adierazpena: V = tentsio konstantea
v = oro har, tentsio aldakorraren aldiuneko balioa
$v(t)$ = tentsioa denboran zehar aldatzen dela adierazteko

Definizioa: Potentzial-diferentzia bi punturen artean (A eta B), karga-unitate positiboa potentzial baxuko puntutik (B) potentzial altuko puntura (A) eramateko egin behar den lana da, edo beste hitzetan esanda, karga-unitate positiboari eman behar zaion energia-kantitatea:

$$\boxed{\Delta V_{AB} = V_{AB} = V_A - V_B = \frac{W_{BA}}{q}}$$

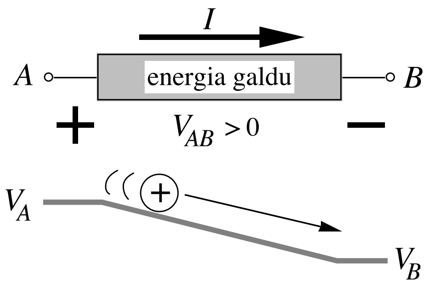
Unitateak: volt, V (1 V = 1 J/1 C; 1 volt = 1 joule/1 coulomb)

Bi punturen arteko potentzial-diferentzia edo tentsioa adierazteko, + eta – ikurrak erabiltzen dira, + ikurrak potentzial altuko puntua eta – ikurrak potentzial baxuko puntua adierazten dutelarik. Beraz, minus (–) ikurrak ez du esan nahi puntu horren potentziala negatiboa denik, bestearena baino baxuagoa dela eta bi puntuon arteko potentzial-diferentzia adierazteko erreferentziatzat hartua izan dela baizik. Ondorioz, tentsio elektrikoa magnitude erlatiboa da, beti bi punturen artekoa baita. Hori dela eta, V_{AB} adierazpenak A puntuaren tentsioa B puntuarekiko adierazi nahi du; hau da, A puntuari + ikurra dagokio eta B puntuari, berriz, – ikurra, erreferentzia gisa hartua izan baita B puntuaren tentsioa. Halaber, $V_{AB} = -V_{BA}$ betetzen da eta horren balioa positiboa edo negatiboa izan daiteke, biak baliokideak izanik:

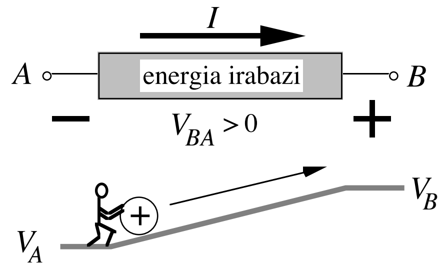


• Potentzial-diferentzia eta korrontearen noranzkoa

Zirkuitu bateko *A* eta *B* bi puntuen artean potentzial-diferentzia bat dagoenean, $V_{AB} = V_A - V_B > 0$, karga positiboak berez mugituko dira potentzial altuko puntutik (*A*) potentzial baxuko puntura (*B*) —"aldapan behera" erori pasiboki—, eta korronte elektrikoa sortuko dute *A* puntutik *B* punturako noranzkoan (adi! karga negatiboak alderantziz mugituko baitira). Berez gertatzen den mugimendu honetan, kargek energia galtzen dute.



Kontrako mugimendua —"aldapan gora" igotzea— ez da berez gertatzen, baizik eta zerbaitek behartuta (nolabait kargek aktibo izan behar dute); horrexegatik korronte elektrikoa potentzial baxuko puntutik (*B*) potentzial altuko puntura (*A*) igarotzeko, kargei energia eman behar zaie mugiarazteko, normalean beste energia-mota bat gastatuz. Kanpotik jasotako energia hori irabazi egiten dute kargek.



• Potentzia elektrikoa zirkuituetan

Oro har, Fisika arloan, potentziak adierazten du nola aldatzen den energia denboran zehar. Aurreko atalean ikusi berri dugunez, karga elektrikoak mugitzen direnean energia aldaketa bat gertatzen da, eta hori da, hain zuzen ere, potentziaren definizio orokorra. Hori dela eta, zirkuituetan potentzia elektrikoa kontzeptua erabiltzen da energia baino gehiago.

Potentzia elektrikoa kalkulatzeko, kontuan hartu behar ditugu aurreko ataletan tentsiorako eta korrontearen intentsitaterako emandako definizio matematikoak; sinplifikatuz:

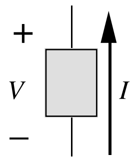
$$P_{AB} = \frac{W_{BA}}{t} = \frac{V_{AB} \cdot q}{t} = V_{AB} \cdot \left(\frac{q}{t}\right) = V_{AB} \cdot I_{AB}$$

Zirkuitu-elementu bateko potentzia elektrikoa: $\boxed{P = I \cdot V}$

Unitateak: watt, W (1 W = 1 A · 1 V; 1 watt = 1 anpere · 1 volt)

Aurreko atalean ikusi dugu, baita ere, karga elektrikoek energia galdu edo irabazi egin dezaketela. Beraz, bi aukera daude potentzia elektrikoa kalkulatzean, korrontearen noranzkoaren eta tentsioaren zeinuaren arabera. Hori dela eta, potentzia bi mota hauetakoa izan daiteke:

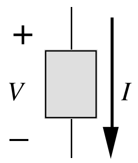
- **emandakoa**: elementuak energia elektrikoa sortzen du, beste energia-mota bat (mekanikoa, kimikoa...) energia elektriko bihurtuz; hau da, zirkuituan zehar mugitzen ari diren kargek irabazi egiten dute energia, elementu hori zeharkatzean. Beraz, elementuak energia ematen die kargei.



elementuak emandako potentzia:

$$P_e = I \cdot V$$

- **xurgatutakoa**: kargek elementuan energia elektrikoa galtzen dutenean. Beraz, elementuak energia hori hartzen du.



elementuak xurgatutako potentzia:

$$P_x = I \cdot V$$

Baina potentzia horiek positiboak zein negatiboak izan daitezke, tentsioaren eta korronte-intentsitatearen zenbakizko balioen zeinuen arabera:

emandako potentzia		**xurgatutako potentzia**	
$V > 0$ eta $I > 0$ edo $V < 0$ eta $I < 0$	$V > 0$ eta $I < 0$ edo $V < 0$ eta $I > 0$	$V > 0$ eta $I > 0$ edo $V < 0$ eta $I < 0$	$V > 0$ eta $I < 0$ edo $V < 0$ eta $I > 0$
⇩	⇩	⇩	⇩
$P_e = V \cdot I > \mathbf{0}$	$P_e = V \cdot I < \mathbf{0}$	$P_x = V \cdot I > \mathbf{0}$	$P_x = V \cdot I < \mathbf{0}$
⬇	⬇	⬇	⬇
osagai aktiboa	**osagai pasiboa** ($P_x > 0$)	**osagai pasiboa**	**osagai aktiboa** ($P_e > 0$)

Zirkuitu guztietan energiaren kontserbazioaren printzipioa betetzen da, hau da, elementu pasiboetan kargek galtzen duten energia osoa, elementu aktiboetan irabazten dutenaren berdina da. Hori dela eta, potentzien balantzea zero da, hots, elementu aktiboek emandako potentzia osoa elementu pasiboek xurgatuko dute, honako hau betetzen delarik:

$$\boxed{\sum_{\text{osagai aktiboak}} P_{emandakoa} = \sum_{\text{osagai pasiboak}} P_{xurgatutakoa}}$$

Beraz, zirkuitu guztietan elementu aktibo bat behar da gutxienez, elementu pasiboek energia jaso dezaten.

Baina bi potentzia-motak aldi berean kontuan hartu ordez, pentsa genezake zirkuitu bateko osagai guztiak mota berekoak direla, aktiboak esate baterako, eta, ondorioz, potentzia guztiak ere mota berekoak izango lirateke, emandako potentziak esate baterako. Hori dela eta, potentzien balantzea eginez, potentzia guztien baturak zero izan behar duela ondorioztatzen da, zirkuitu horretan beste motako potentzia guztiak zero baitira. Hau da, potentzia horietako batzuek negatiboak izan behar dute.

Adibidez, zirkuitu bateko elementu guztiak aktiboak direla suposatzen badugu, potentzia guztiak emandakoak izango dira. Potentzien balantzea egitean, emandako potentzia horietako batzuk negatiboak direla ikusiko dugu, benetan xurgatutakoak direlako. Matematikoki, honelaxe adieraz dezakegu:

$$\boxed{\sum_{\text{osagai guztiak}} P_{emandakoa} = 0}$$

Berdin-berdin egin daiteke, zirkuitu bateko osagai guztiak pasiboak direla suposatuz. Orduan ere, potentzien balantzea zero izango da; beraz:

$$\boxed{\sum_{\text{osagai guztiak}} P_{xurgatutakoa} = 0}$$

B) Ariketa ebatziak

1.1. Karga eta korronte elektrikoak

1. Eroale bateko puntu batetik eskuinerantz igaro den karga elektrikoaren kantitatea honako formula hauen bidez adieraz daiteke denboraren arabera (t segundotan, s; eta q coulombetan, C):

$$\begin{array}{rl} t \le -2 & q(t) = 0 \\ -2 \le t \le 1 & q(t) = 2t + 4 \\ 1 \le t \le 4 & q(t) = 7 - t \\ 4 \le t & q(t) = 3 \end{array}$$

a) Marraz ezazu $q(t)$ denboraren funtzioan. Zer azpimarratuko zenuke funtzio honi buruz?

b) Kalkula ezazu puntu horretatik igaro den korronte elektrikoaren intentsitatea, $i(t)$, eta marraz ezazu funtzio hori.

Ebazpena:

a) Ekuazio horiek adierazten duten kurba marraztu baino lehen, atera ditzagun ekuazioetatik kurba hori osatzen duten beste kurbetako puntu ezagunak.

1. zatia ($t \le -2$ s): lerro zuzena ardatz horizontalaren gainean ($q(t) = 0$ C)

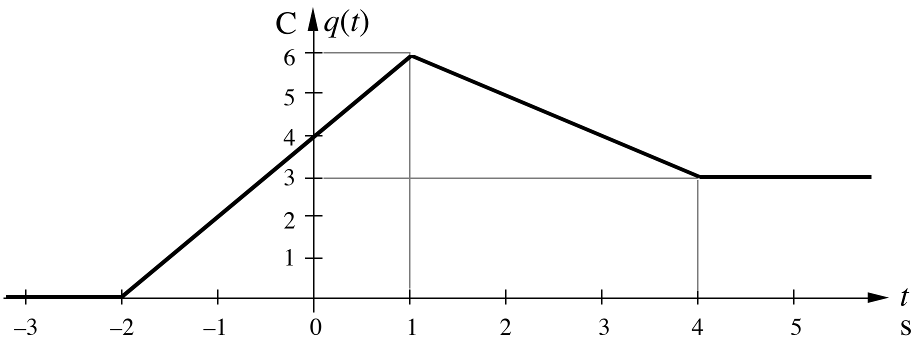
2. zatia (-2 s $\le t \le 1$ s): $(-2, 0)$ puntutik $(1, 6)$ puntura doan lerro zuzena

$$t = -2 \text{ s} \rightarrow q(-2) = 2 \cdot (-2) + 4 = 0 \rightarrow (-2, 0)$$
$$t = 1 \text{ s} \rightarrow q(1) = 2 \cdot (1) + 4 = 6 \rightarrow (1, 6)$$

3. zatia (1 s $\le t \le$ 4 s): $(1, 6)$ puntutik $(4, 3)$ puntura doan lerro zuzena

$$t = 1 \text{ s} \rightarrow q(1) = 7 - 1 = 6 \rightarrow (1, 6)$$
$$t = 4 \text{ s} \rightarrow q(4) = 7 - 4 = 3 \rightarrow (4, 3)$$

4. zatia (4 s $\le t$): lerro zuzen horizontala, 3 balio bertikalean ($q(t) = 3$ C)



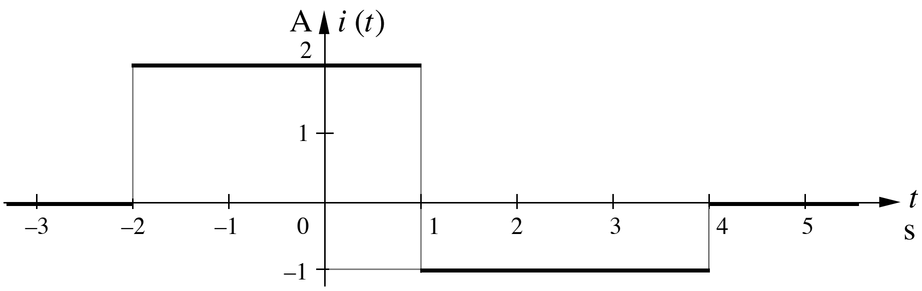
Funtzio hori jarraitua dela azpimarratu behar da.

b) Puntu horretatik igaro den korrontearen intentsitatea kalkulatzeko, kontuan hartu behar da korronte elektrikoa kargaren aldaketa dela, denboran zehar, $i(t) = dq(t)/dt$ alegia. Hori horrela izanik, korronte-intentsitatea adieraziko duen funtzioak ere hainbat zati desberdin izango ditu:

1. zatia ($t \le -2$ s): $i(t) = 0$ A ($q(t)$ konstante delako)
2. zatia (-2 s $\le t \le 1$ s): $i(t) = 2$ A ($q(t) = 2t + 4$ delako)
3. zatia (1 s $\le t \le 4$ s): $i(t) = -1$ A ($q(t) = 7 - t$ delako)
4. zatia (4 s $\le t$): $i(t) = 0$ A ($q(t)$ konstante delako)

Funtzio hori marrazteko:

1. zatia ($t \le -2$ s): lerro zuzena ardatz horizontalaren gainean ($i(t) = 0$ A)
2. zatia (-2 s $\le t \le 1$ s): $(-2, 2)$ puntutik $(1, 2)$ puntura doan lerro zuzen horizontala ($i(t) = 2$ A)
3. zatia (1 s $\le t \le 4$ s): $(1, -1)$ puntutik $(4, -1)$ puntura doan lerro zuzen horizontala ($i(t) = -1$ A)
4. zatia (4 s $\le t$): lerro zuzen horizontala ardatz horizontalaren gainean ($i(t) = 0$ A)



Nabaria da funtzio hori ez dela jarraitua.

2. Eroale bateko puntu batetik segundo-erdi bakoitzean +3 C-eko karga bat igarotzen da eskuinerantz eta, aldi berean, segundo-heren bakoitzean –5 C-eko karga bat igarotzen da ezkerrerantz. Zenbatekoa da korrontearen intentsitatea puntu horretan?

Ebazpena:

Korrontearen intentsitatea kalkulatzeko orduan, kontuan hartu beharreko parametroak honako hauek dira: mugitzen den kargaren balioa, mugimenduaren noranzkoa eta mugimenduaren abiadura.

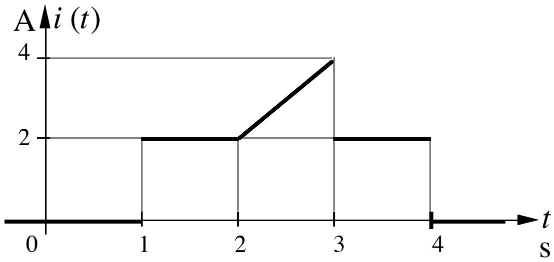
Jakin badakigu, karga positiboak eta negatiboak kontrako noranzkoetan mugitzen direnez gero, intentsitate osoa bien batura (balio absolutuan) dela. Baina kasu honetan mugimenduen abiadurak desberdinak direnez gero, ezin dugu formula orokorra erabili, honako aldaera hau baizik:

$$I = \frac{\Sigma Q^+}{\Delta t^+} + \frac{\Sigma |Q^-|}{\Delta t^-}$$

Ekuazio horretan balioak ordezkatuz:

$$I = \frac{3\ \mathrm{C}}{\left(\frac{1}{2}\right)\ \mathrm{s}} + \frac{|-5\ \mathrm{C}|}{\left(\frac{1}{3}\right)\ \mathrm{s}} = (6+15)\ \mathrm{A} \quad \rightarrow \quad \boxed{I = 21\ \mathrm{A}}$$

3. Irudiko korronte aldakorra, $i(t)$, aintzat hartuz, kalkula ezazu erreferentzia-puntutik $1 \le t \le 3$ denbora-tartean igaro den karga osoa (t segundotan, s; eta i anperetan, A).



Ebazpena:

Jakin badakigu korronte-intentsitateak erreferentzia-puntutik igaro den karga osoa denboran zehar nola aldatu den adierazten duela, hots:

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt}$$

Ondorioz, korrontea ezaguna izanik, karga matematikoki kalkula daiteke, korronte--intentsitatea integratuz:

$$\Delta q(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} i(t) \cdot dt$$

1 s < t < 3 s denbora-tartean bi zati desberdin bereizten dira intentsitatearen itxuran:

1. zatia (1 s < $t \le$ 2 s): lerro zuzen horizontala, $i(t) = 2$ A

2. zatia (2 s $\le t <$ 3 s): (2, 2) puntutik (3, 4) puntura doan lerro zuzena, $i(t) = (2t - 2)$ A

Orain, integratuz:

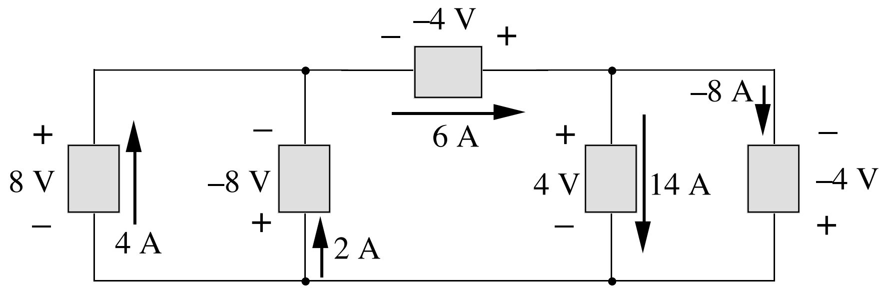
$$\Delta q(1,3) = \int_1^3 i(t) \cdot dt = \int_1^2 2dt + \int_2^3 (2t-2)dt$$

$$\Delta q(1,3) = \left[2t\right]_1^2 + \left[t^2 - 2t\right]_2^3 = (2 \cdot 2 - 2 \cdot 1) + \left[\left(3^2 - 2^2\right) - 2 \cdot (3-2)\right]$$

$$\boxed{\Delta q(1,3) = 5\ \mathrm{C}}$$

1.2. Potentzia elektrikoa zirkuituetan

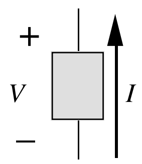
1. Kalkula ezazu irudiko zirkuituko osagai bakoitzak ematen duen potentzia. Zer ondorioztatzen da emandako potentzia guztiak kontuan hartuz gero?



Ebazpena:

Lehenik eta behin, komeni da zirkuituko korronteen noranzkoak edo tentsioen zeinuak egokitzea, osagai bakoitzari dagokion potentzia emandakoa izan dadin, horixe baita eskatzen dena.

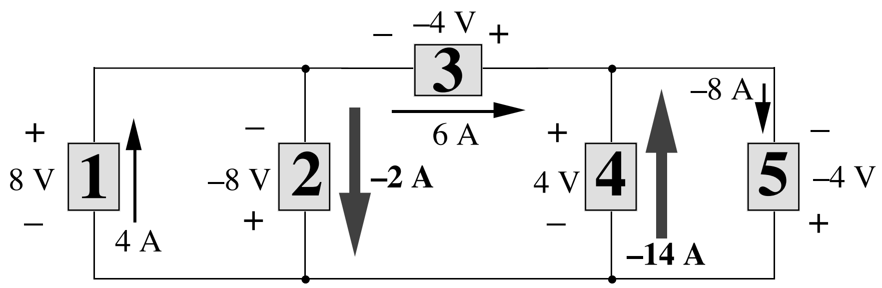
Horretarako, kontuan hartu behar da noiz ematen duen potentzia osagai batek: osagaitik igarotzen den korrontea osagaiaren tentsioaren mutur negatibotik osagaira sartu eta mutur positibotik zirkuiturantz irteten denean.



emandako potentzia:

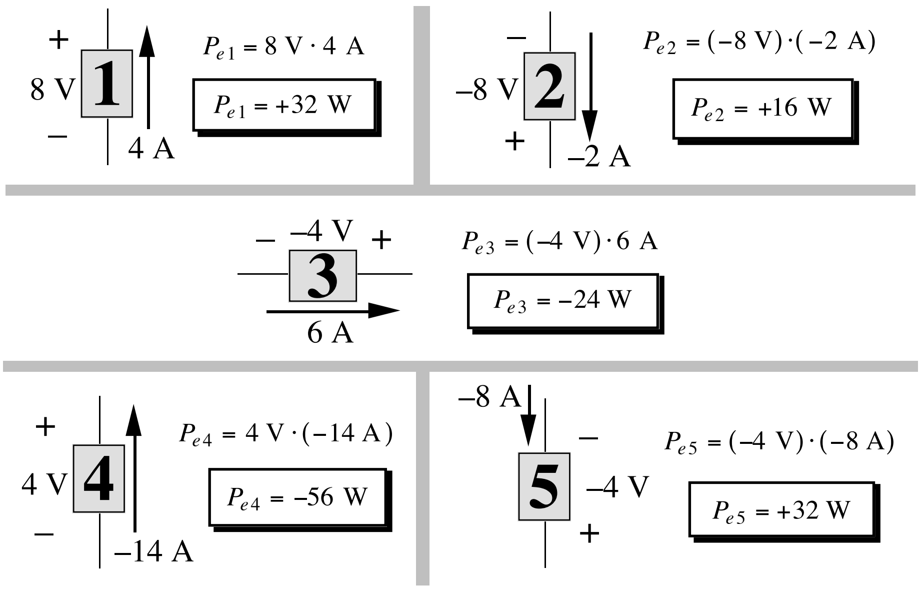
$P_e = V \cdot I$

Itzul gaitezen berriro jatorrizko zirkuitura, eta alda ditzagun korronteen noranzkoak osagai guztiek potentzia eman dezaten. Halaber, zenbaki bana egokituko diegu osagaiei.



Irudi berrian ikusten denez, bi korronte (I_2 eta I_4) besterik ez dugu aldatu behar izan, beste guztietan korrontea mutur negatibotik mutur positibora igarotzen baita osagaian barrena.

Kalkula ditzagun orain osagai guztien potentziak, emandakoak direla jakinik:



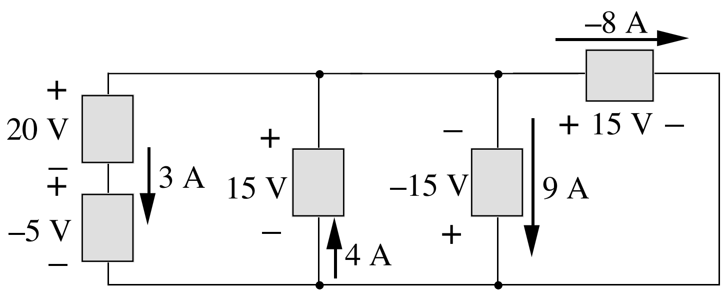
Emandako potentzia horiek guztiak kontuan hartuz gero, guztien batura zero dela ondorioztatzen da:

$$P_{osoa} = P_{e1} + P_{e2} + P_{e3} + P_{e4} + P_{e5} =$$

$$= (+32\ \mathrm{W}) + (+16\ \mathrm{W}) + (-24\ \mathrm{W}) + (-56\ \mathrm{W}) + (+32\ \mathrm{W}) = 0$$

Hau da, zirkuituak ez du potentziarik ematen, ez eta xurgatzen ere, potentzia osoa zero baita: 1, 2 eta 5 osagaiek emandako potentzia 3 eta 4 osagaiek xurgatzen dute (P_{e3} eta P_{e4} emandako potentziak negatiboak; beraz, xurgatutakoak positiboak).

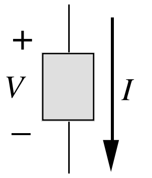
2. Kalkula ezazu irudiko zirkuituko osagai bakoitzak xurgatzen duen potentzia. Zer ondorioztatzen da xurgatutako potentzia guztiak kontuan hartuz gero?



Ebazpena:

Lehen bezala, komeni da zirkuituko korronteen noranzkoak edo tentsioen zeinuak egokitzea, osagai bakoitzari dagokion potentzia xurgatutakoa izan dadin, horixe baita eskatzen dena.

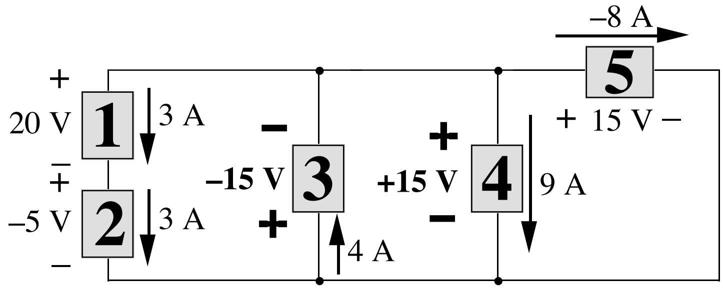
Horretarako kontuan hartu behar da noiz xurgatzen duen potentzia osagai batek: osagaitik igarotzen den korrontea osagaiaren tentsioaren mutur positibotik sartu behar da osagaira eta mutur negatibotik itzuli behar da zirkuiturantz.



xurgatutako potentzia:

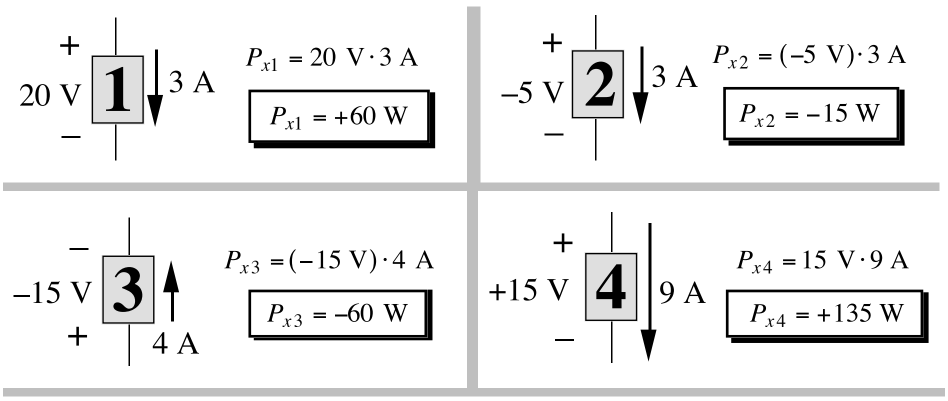
$P_x = V \cdot I$

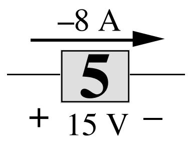
Jatorrizko zirkuitura itzuliz, osagai guztiek potentzia xurga dezaten, oraingo honetan korronteen noranzkoak aldatu ordez, tentsioen zeinuak aldatuko ditugu. Halaber, zenbaki bana egokituko diegu osagaiei.



Irudi berrian ikusten denez, bi tentsio (V_3 eta V_4) besterik ez dugu aldatu behar izan, beste guztietan korrontea mutur positibotik mutur negatibora igarotzen baita osagaian barrena.

Kalkula ditzagun orain osagai guztien potentziak, xurgatutakoak direla jakinik.





$P_{x5} = 15\ \text{V} \cdot (-8\ \text{A})$

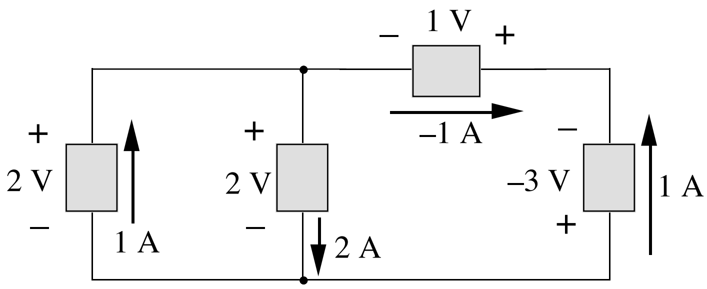
$\boxed{P_{x5} = -120\ \text{W}}$

Xurgatutako potentzia horiek guztiak kontuan hartuz gero, guztien batura zero dela ondorioztatzen da:

$$P_{osoa} = P_{x1} + P_{x2} + P_{x3} + P_{x4} + P_{x5} =$$
$$= (+60\ \text{W}) + (-15\ \text{W}) + (-60\ \text{W}) + (+135\ \text{W}) + (-120\ \text{W}) = 0$$

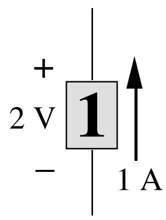
Hau da, zirkuituak ez du potentziarik ematen, ez eta xurgatzen ere, potentzia osoa zero baita: 1 eta 4 osagaiek xurgatzen duten potentzia, 2, 3 eta 5 osagaiek ematen dute.

3. Egin ezazu irudiko zirkuituko potentzien balantzea.



Ebazpena:

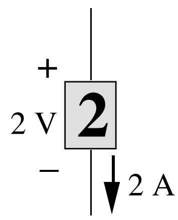
Oraingo honetan osagai bakoitzaren potentzia ezer aldatu gabe kalkulatuko dugu.



emandako potentzia:

$P_{e1} = 2\ \text{V} \cdot 1\ \text{A}$

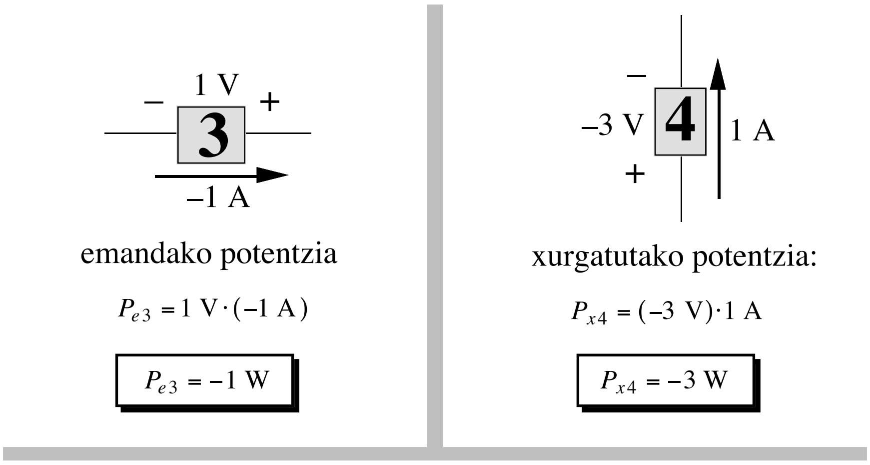
$\boxed{P_{e1} = +2\ \text{W}}$



xurgatutako potentzia:

$P_{x2} = 2\ \text{V} \cdot 2\ \text{A}$

$\boxed{P_{x2} = +4\ \text{W}}$



Potentzial-diferentzien eta korronteen noranzkoen arteko erlazioa kontuan hartuz, ageri da 1 eta 3 elementuek potentzia ematen dutela (P_{e1} eta P_{e3}) eta 2 eta 4 elementuek, berriz, potentzia xurgatzen dutela (P_{x2} eta P_{x4}). Orain, potentzien balantzea egin daiteke.

Potentzien balantzea: $\Sigma P_{emandakoa} = \Sigma P_{xurgatutakoa}$ betetzen al da?

$$P_{e1} + P_{e3} = P_{x2} + P_{x4}\ \mathbf{?}, \qquad (+2\ \mathrm{W}) + (-1\ \mathrm{W}) = (+4\ \mathrm{W}) + (-3\ \mathrm{W})\ \mathbf{?}$$

$$1\ \mathrm{W} = 1\ \mathrm{W}$$

Beraz, elementu batzuek emandako potentzia besteek xurgatu dute.

Dena den, potentzien zeinuak kontuan hartzen baditugu, agerikoa da 3 elementuak benetan potentzia xurgatzen duela ($P_{e3} = -1$ W $\rightarrow P_{x3} = +1$ W) eta 4 elementuak, berriz, potentzia ematen duela ($P_{x4} = -3$ W $\rightarrow P_{e4} = +3$ W). Hori dela eta, potentzien balantzea honako era honetan ere egin daiteke:

$$P_{e1} + P_{e4} = P_{x2} + P_{x3}\ ,$$

$$(+2\ \mathrm{W}) + (+3\ \mathrm{W}) = (+4\ \mathrm{W}) + (+1\ \mathrm{W})$$

Hau da, potentzien balantzea beti betetzen da, edozein izanda ere potentziak kalkulatzean jarraitutako irizpidea.

C) Proposaturiko ariketak

1.1. Karga eta korronte elektrikoak

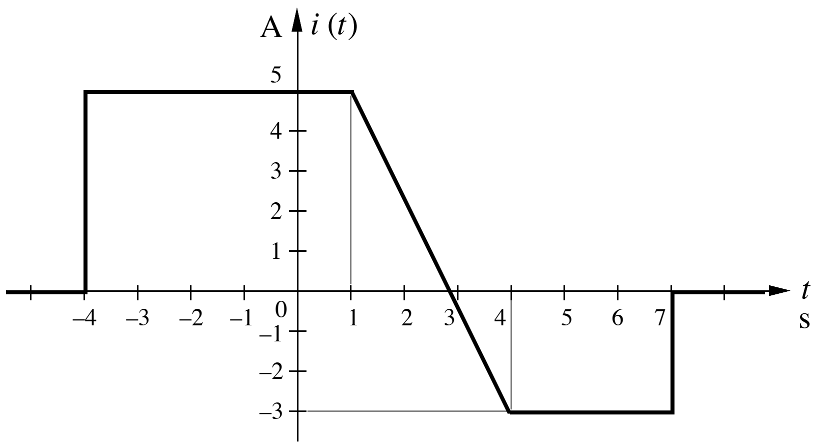
1. Eroale bateko puntu batetik eskuinerantz igaro den karga elektrikoaren kantitatea honako formula hauen bidez adieraz daiteke denboraren arabera (t segundotan, s; eta q coulombetan, C):

$$
\begin{array}{ll}
t \le -4 & q(t) = 0 \\
-4 \le t \le -2 & q(t) = 4t + 16 \\
-2 \le t \le 1 & q(t) = 2t^2 \\
1 \le t \le 6 & q(t) = 5\sqrt{(t+3)} - 8 \\
6 \le t & q(t) = 7
\end{array}
$$

a) Marraz ezazu $q(t)$ denboraren funtzioan. Zer azpimarratuko zenuke funtzio honi buruz?

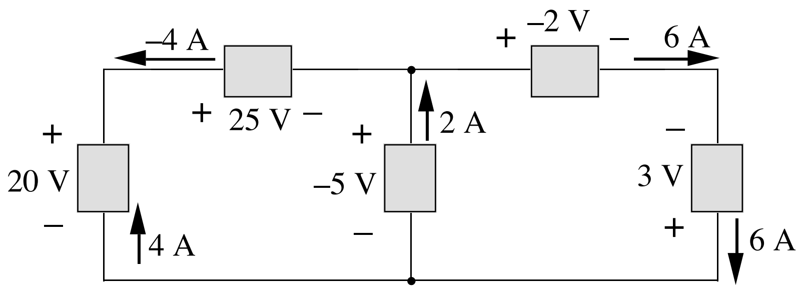
b) Kalkula ezazu puntu horretatik igaro den korronte elektrikoaren intentsitatea, $i(t)$, eta marraz ezazu funtzio hori.

2. Irudiko korronte aldakorra, $i(t)$, aintzat hartuz, kalkula ezazu erreferentzia-puntutik -2 s $\le t \le 5$ s denbora-tartean igaro den karga osoa (t segundotan, s; eta i anperetan, A).



1.2. Potentzia elektrikoa zirkuituetan

1. Kalkula ezazu irudiko zirkuituko osagai bakoitzak ematen duen potentzia. Zer ondorioztatzen da emandako potentzia guztiak kontuan hartuz gero?



2. Kalkula ezazu goiko irudiko zirkuituko osagai bakoitzak xurgatzen duen potentzia. Zer ondorioztatzen da xurgatutako potentzia guztiak kontuan hartuz gero?

2. Zirkuitu elektrikoen osagaiak

A) Jakin beharreko kontzeptuak

• Elementu-motak

Sarrerako atalean definitu genuen legez, zirkuituetako osagaiek erlazio matematiko finkoa betetzen dute beren portaeran parte hartzen duten magnitudeen artean; normalean, tentsioaren eta korrontearen artean adierazten da erlazio hori.

Beste alde batetik, aurreko atalean ikusi dugunez, zirkuitu bateko osagaiak bi motatakoak izan daitezke potentzia elektrikoari dagokionez:

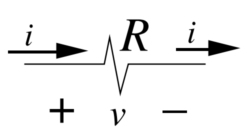
a) **Elementu aktiboak edo eraginkorrak**: zirkuituko beste elementuei energia edo potentzia ematen dietenak, horretarako beste energia-mota bat gastatuz (esaterako, pilek edo bateriek energia kimikoa energia elektriko bihurtzen dute).
Oro har, hauei sorgailu izena ematen diegu, energia elektrikoa sortzen baitute. Guk tentsio-sorgailuak eta korronte-sorgailuak erabiliko ditugu.

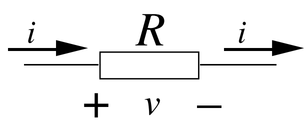
b) **Elementu pasiboak edo geldoak**: energia edo potentzia hartzen dutenak, energia hori guztiz beharrezkoa dutelarik funtzionatzeko. Batzutan energia hori metatzen dute (kondentsadoreetan, esaterako), baina, oro har, energia hori xurgatu eta galdu egiten da (erresistentzietan, esaterako, bero bihurtzen da).

• Erresistentzia linealak

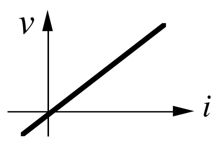
Elementu biterminalak dira, hots, bi mutur dituzte, eta Ohm-en legea betetzen dute. Zirkuituetan beti pasibo gisa jokatzen dute, potentzia xurgatuz.

Ikurrak:





Ezaugarri grafikoa (erresistentzia lineal batena):



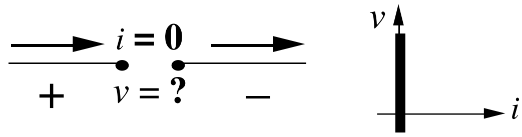
Ohm-en legea: Erresistentzia lineal baten borneen arteko tentsioa erresistentziatik igarotzen den korronte-intentsitatearen zuzenki proportzionala da, proportzionaltasun-koefizientea erresistentziaren balioa izanik (kontuz! zeinuak goiko irudietakoak dira beti!):

$$\boxed{v = R \cdot i}$$

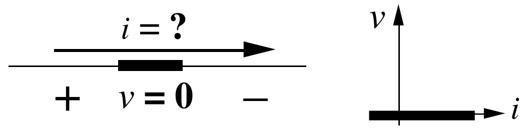
Unitateak: ohm, Ω (1 Ω = 1 V/1 A; 1 ohm = 1 volt/1 anpere)

Kasu bereziak:

a) zirkuitu irekia: $R = \infty$



b) zirkuitulaburra: $R = 0$



Potentzia eta energia erresistentzietan:

Hona hemen erresistentzia batean xurgatutako potentziaren adierazpen berezia:

$$p(t) = v(t)\cdot i(t) = \left[R\cdot i(t)\right]\cdot i(t) = R\left[i(t)\right]^2 \qquad \rightarrow \qquad \boxed{p = R\cdot i^2 = \frac{v^2}{R}}$$

Unitateak: $1\ \text{W} = 1\ \Omega\cdot 1\ \text{A}^2 = 1\ \text{V}^2/1\ \Omega$

Potentziaren adierazpen horretan oinarriturik, erresistentzia batek denbora-tarte jakin batean ($\Delta t = t_2 - t_1$, t_1 eta t_2 uneen arteko denbora-tartean, hain zuzen) xurgatuko duen energia kalkula daiteke. Energia hori bero bihurtzen da; horri *Joule efektua* deritzo.

$$p(t) = \frac{dW(t)}{dt} \qquad \rightarrow \qquad W(t_1,t_2) = \int_{t_1}^{t_2} p(t)\cdot dt = \int_{t_1}^{t_2} R\cdot i^2(t)\cdot dt$$

Baldin $i(t) = I$ = konstante $\rightarrow$ $W(t_1,t_2) = \left[R\cdot I^2\cdot(t_2 - t_1)\right]$ J (joule) =

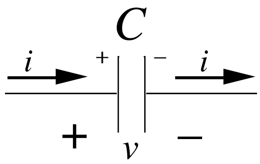
$$= 0{,}24\left[R\cdot I^2\cdot(t_2 - t_1)\right]\ \text{cal (kaloria)}$$

Bukatzeko, esan dezagun merkatuan tamaina desberdinetako erresistentziak aurkitzen direla, xurga dezaketen potentzia maximoaren arabera; esate baterako, badaude 1/4 W-ekoak, 1/2 W-ekoak, 1 W-ekoak, eta abar). Horrek adierazten du ezen, potentzia maximo hori gaindituz gero, erresistentzia erre egingo dela eta funtzionatzeari utziko diola.

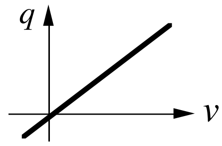
• Kondentsadoreak: kapazitate linealak

Hauek ere elementu biterminalak dira. Energia metatzen dute bi xaflen arteko eremu elektrikoan; hori dela eta, batzuetan, pasibo gisa jokatzen dute zirkuituetan, kargatzen ari direnean, energia metatuz; eta besteetan, aktibo gisa, deskargatzen direnean, metatu duten energia emanez. Dena den, osagai pasiboak dira, energia jaso behar baitute lehendabizi, gero kargatutakoa eman ahal izateko.

Ikurra:



Ezaugarri grafikoa (kapazitate lineal batena):



Portaera-ekuazioa: Kondentsadorean metatzen den karga (q) borneen artean ezarritako tentsioaren (v) zuzenki proportzionala da, proportzionaltasun-koefizientea kapazitatea (kondentsadorearen balioa, alegia) izanik:

$$\boxed{q = C \cdot v}$$

Ondorioz, kondentsadoretik igarotzen den korrontearen intentsitatea hauxe da:

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} = \frac{d\left[C(t) \cdot v(t)\right]}{dt} = C(t) \cdot \frac{dv(t)}{dt} + \frac{dC(t)}{dt} \cdot v(t)$$

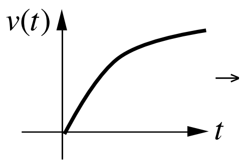
Gure ariketetan kapazitateak beti konstanteak izango direla kontuan hartuz, $C(t) = C$:

$$\boxed{i(t) = C \cdot \frac{dv(t)}{dt}}$$

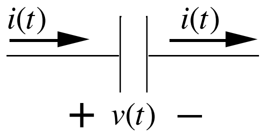
Unitateak: farad, F (1 F = 1 C/1 V; 1 farad = 1 coulomb/1 volt)

Bi portaera desberdin:

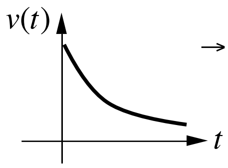
a) karga-prozesua
↓
energia hartu



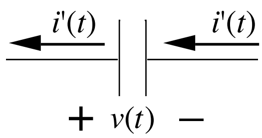
→ $i(t) > 0$ →



b) deskarga-prozesua
↓
energia eman



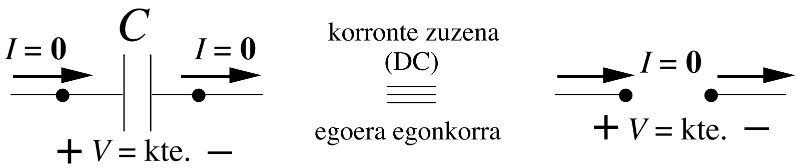
→ $i(t) < 0$
↓
$i'(t) > 0$ →



Kondentsadorearen portaera korronte zuzenean eta egoera egonkorrean:

Korronte zuzenaren (DC) ezaugarria magnitudeak konstanteak izatea da, egoera egonkorra lortu eta gero; beraz: $v(t) = V$ = konstante, eta $i(t) = I$ = konstante.

Hori dela eta, kondentsadorearen portaera-ekuaziotik honako hau ondorioztatzen da: I = 0; hots, kondentsadorea zirkuitu ireki batez ordezka daiteke.



Potentzia eta energia kondentsadoreetan:

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) = v(t) \cdot \left[C \cdot \frac{dv(t)}{dt} \right] = C \cdot v(t) \cdot \frac{dv(t)}{dt}$$

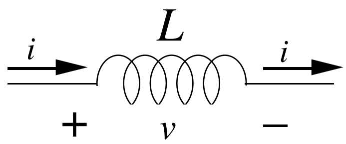
$$W(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} p(t) \cdot dt = \int_{v_1}^{v_2} C \cdot v \cdot dv \qquad \rightarrow \qquad \boxed{W(t_1, t_2) = \frac{1}{2} \cdot C \cdot \left[v_2^2 - v_1^2 \right]}$$

Horixe da kondentsadoreak denbora-tarte horretan metatu duen energia.

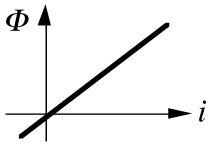
• Harilak: autoinduktantzia linealak

Hauek ere elementu biterminalak dira. Energia metatzen dute, beren barnean sortzen den eremu magnetikoan; hori dela eta, batzuetan, pasibo gisa jokatzen dute zirkuituetan, kargatzen ari direnean, energia metatuz; eta besteetan, aktibo gisa, deskargatzen direnean, metatu duten energia emanez. Dena den, osagai pasiboak dira, energia jaso behar baitute lehendabizi, gero kargatutakoa eman ahal izateko.

Ikurra:



Ezaugarri grafikoa (autoinduktantzia lineal batena):
(Φ = eremu magnetikoaren fluxua)



Portaera-ekuazioa: Harilean sortzen den eremu magnetikoaren fluxua (Φ), hariletik igarotzen den korrontearen (i) zuzenki proportzionala da, proportzionaltasun-koefizientea autoinduktantzia izanik:

$$\boxed{\Phi = L \cdot i}$$

Ondorioz, harilaren muturren artean agertzen den tentsioa, oro har, honako hau da:

$$v(t) = \frac{d\Phi(t)}{dt} = \frac{d\left[L(t)\cdot i(t)\right]}{dt} = L(t)\cdot\frac{di(t)}{dt} + \frac{dL(t)}{dt}\cdot i(t)$$

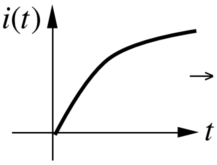
Gure ariketetan autoinduktantziak beti konstanteak izango direla kontuan hartuz, hots, $L(t) = L =$ konstante, orduan:

$$\boxed{v(t) = L\cdot\frac{di(t)}{dt}}$$

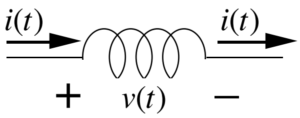
Unitateak: henry, H (1 H = 1 V · 1 s/1 A; 1 henry = 1 volt · 1 segundo/1 anpere)

Bi portaera desberdin:

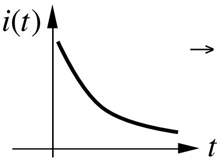
a) karga-prozesua
↓
energia hartu



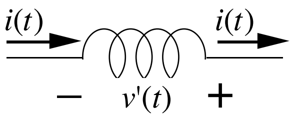
→ $v(t) > 0$ →



b) deskarga-prozesua
↓
energia eman

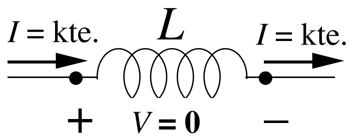


→ $v(t) < 0$
↓
$v'(t) > 0$ →

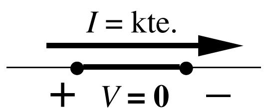


Autoinduktantziaren portaera korronte zuzenean eta egoera egonkorrean:

Korronte zuzenaren (DC) ezaugarria magnitudeak konstanteak izatea da, egoera egonkorra lortu eta gero; beraz: $i(t) = I =$ konstante eta $v(t) = V =$ konstante. Hori dela eta, autoinduktantziaren portaera-ekuaziotik honako hau ondorioztatzen da: $V = \mathbf{0}$, hots, harila zirkuitulabur batez ordezka daiteke.



korronte zuzena
(DC)
$\equiv$
egoera egonkorra



Potentzia eta energia hariletan:

$$p(t) = v(t)\cdot i(t) = \left[L\cdot\frac{di(t)}{dt}\right]\cdot i(t) = L\cdot i(t)\cdot\frac{di(t)}{dt}$$

$$W(t_1,t_2) = \int_{t_1}^{t_2} p(t)\cdot dt = \int_{i_1}^{i_2} L\cdot i\cdot di \quad\rightarrow\quad \boxed{W(t_1,t_2) = \frac{1}{2}\cdot L\cdot\left[i_2^2 - i_1^2\right]}$$

Horixe da harilak denbora-tarte horretan metatu duen energia.

• Sorgailuak

Hauek ere elementu biterminalak dira. Elementu aktiboak dira: energia elektrikoa sortzen dute beste energia-mota bat bihurtuz. Lehenago esan dugun legez, hauek dira zirkuituko beste elementuei energia ematen dietenak. Normalean, zirkuituetan aktibo gisa jokatzen duten arren, pasibo gisa ere joka dezakete zirkuituaren ezaugarrien arabera; honako hau da baldintza bakarra: zirkuitu guztietan elementu aktibo bat behar da gutxienez, hots, aktibo gisa jokatzen duen sorgailu bat.

Sorgailu-motak:

- Tentsio-sorgailua: energia elektrikoa potentzial-diferentzia gisa sortzen du.
- Korronte-sorgailua: energia elektrikoa korronte gisa sortzen du.

Portaeraren araberako sailkapena:

- Sorgailu independenteak:
  Sortzen duten magnitudea (tentsioa edo korrontea) beste edozein parametroren independentea da. Zehatz-mehatz:
  Tentsio-sorgailuaren kasuan, sortzen duen tentsioa bere barnetik igarotzen den korronte-intentsitatearen guztiz independentea da.
  Korronte-sorgailuaren kasuan, sortzen duen korrontearen intentsitatea bere borneen arteko tentsioaren guztiz independentea da.

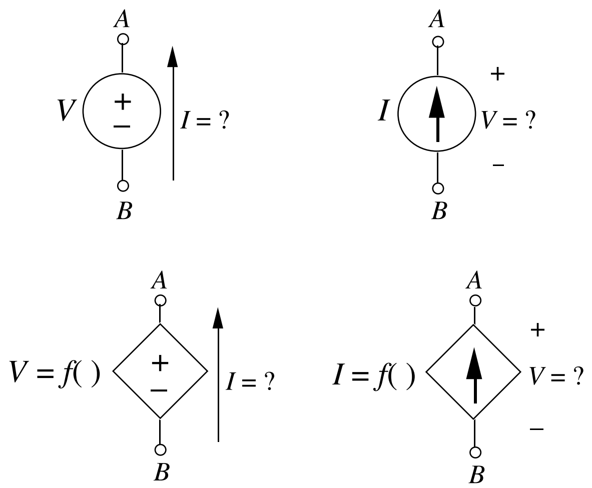
- Sorgailu menpekoak edo kontrolatuak:
  Sortzen duten magnitudea (tentsioa edo korrontea) zirkuituko beste elementu bateko tentsioaren zein korronte-intentsitatearen menpekoa da, normalean zuzenki proportzionala.

Ikurrak (korronte zuzeneko sorgailuenak):

tentsio-sorgailua korronte-sorgailua

sorgailu independenteak:

sorgailu menpekoak:

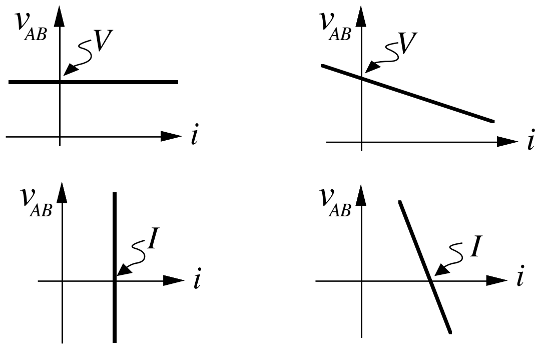


Sorgailu independenteen ezaugarri grafikoak:

ideala erreala

Tentsio-sorgailua:

Korronte-sorgailua:

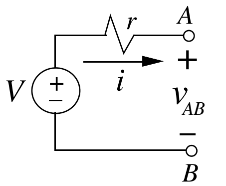


Portaera-ekuazioa:

	ideala	erreala
Tentsio-sorgailua:	$v_{AB} = V, \forall i$	$v_{AB} = V - r \cdot i$
Korronte-sorgailua:	$i = I, \forall v$	$i = I - \frac{v_{AB}}{r}$

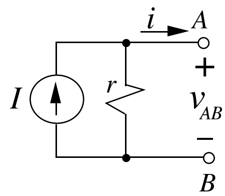
Sorgailu independente errealen zirkuitu-ereduak:

Tentsio-sorgailua:



r = barne-erresistentzia

Korronte-sorgailua:



r = barne-erresistentzia

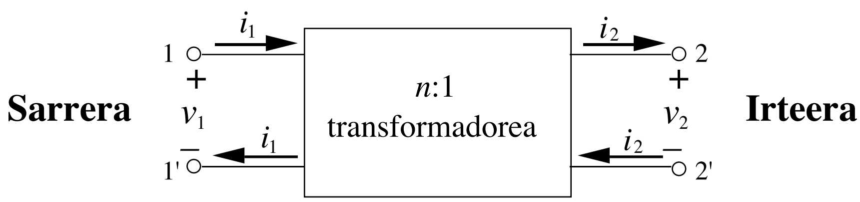
Sorgailu menpekoak. Kasu posible guztiak:

- Tentsioz kontrolatutako tentsio-sorgailua: Sortzen duen tentsioa zirkuituko beste elementu bateko tentsioaren menpekoa da: $V = f(V') = K \cdot V'$, K delakoa unitaterik gabeko konstante bat izanik.
- Korrontez kontrolatutako tentsio-sorgailua: Sortzen duen tentsioa zirkuituko beste elementu bateko korronte-intentsitatearen menpekoa da: $V = f(I') = K \cdot I'$, K delakoa Ω-etan dagoen konstante bat izanik.
- Tentsioz kontrolatutako korronte-sorgailua: Sortzen duen korrontearen intentsitatea zirkuituko beste elementu bateko tentsioaren menpekoa da: $I = f(V') = K \cdot V'$, K delakoa Ω^{-1}-etan dagoen konstante bat izanik.
- Korrontez kontrolatutako korronte-sorgailua: Sortzen duen korrontearen intentsitatea zirkuituko beste elementu bateko korronte-intentsitatearen menpekoa da: $I = f(I') = K \cdot I'$, K delakoa unitaterik gabeko konstante bat izanik.

• Beste elementu batzuk

Zirkuitu-elementuaren definizioa gogoan hartuz, jakin badakigu edozein elementutarako erlazio matematiko finko bat beteko dela elementutik igaroko den korronte-intentsitatearen eta elementuaren borneen arteko tentsioaren artean. Hori dela eta, aurreko ataletan landutako ikuspegi berdinak landu daitezke edozein elementu berritarako, asmatua bada ere. Bereziki, elementu elektronikoak aztertzen ditugunean, portaera elektrikoari dagokionez, besteen berdinak direla ikusiko dugu, eredu matematikoa baita erabiltzen dena, eta eredu horretan korronte eta tentsioak baino ez baitira agertzen.

Esate baterako, **transformadore** bat lau mutur edo terminaleko elementua da, sarrerako seinalea jasotzeko bi terminal eta irteerako seinalea emateko beste bi dituena, ondoko irudian erakusten den legez:



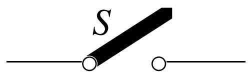
Idealki honelaxe defini daiteke matematikoki:

$$v_1 = n \cdot v_2 \qquad \text{eta} \qquad i_1 = \frac{i_2}{n}$$

Bi ekuazio horiek nahikoak dira transformadorearen portaera elektrikoa analizatzeko.

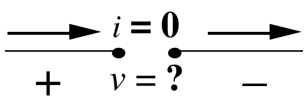
Zirkuituetan sarri erabili ohi den beste elementu bat **etengailu ideala** da, zirkuitua ireki edo ixteko gauza dena, korrontea igarotzea ahalbidetuz edo guztiz oztopatuz.

Ikurra:



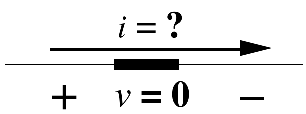
Posizioak: **ekuazioa:**

a) irekita:



$i = 0, \forall v$

b) itxita:



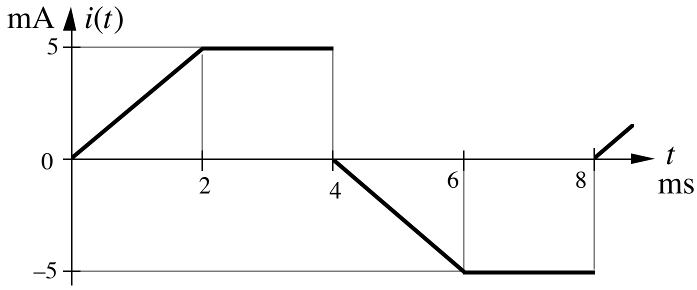
$v = 0, \forall i$

Era berean, edozein elementu berriren aurrean, bere portaera elektrikoa analizatzeko, nahikoa izango dugu dagozkion ekuazioak ezagutzea.

B) Ariketa ebatziak

2.1. Erresistentzia linealak

1. Irudiko intentsitate-funtzio periodikoa (periodoa T = 8 ms) 5 kΩ-eko erresistentzia lineal bati ezarri zaio:



a) Kalkula eta irudika itzazu erresistentziaren muturren arteko tentsioa, $v(t)$, eta erresistentziak xurgatutako potentzia, $p(t)$.

b) Kalkula itzazu seinaleen batez besteko balioak (I_b, V_b, P_b).

c) Kalkula itzazu seinaleen balio eraginkorrak (I_e, V_e, P_e).

d) Kalkula ezazu erresistentziak seinalearen periodo batean xurgatzen duen energia.

Ebazpena:

a) Lehenik eta behin, kalkuluak egiteari ekin baino lehen, irudiko funtzioa matematikoki adieraztea komeni da (i, mA-tan eta t, ms-tan).

1. zatia (0 ms ≤ t ≤ 2 ms): (0, 0) puntutik (2, 5) puntura doan lerro zuzena,

$$\text{ekuazioa: } i-0=\frac{5-0}{2-0}\cdot(t-0) \qquad \rightarrow \qquad i(t)=2{,}5t \text{ mA}$$

2. zatia (2 ms ≤ t ≤ 4 ms): lerro zuzen horizontala, 5 balio bertikalean,

ekuazioa: $i(t)$ = 5 mA (konstantea)

3. zatia (4 ms ≤ t ≤ 6 ms): (4, 0) puntutik (6, –5) puntura doan lerro zuzena,

$$\text{ekuazioa: } i-0=\frac{-5-0}{6-4}\cdot(t-4) \qquad \rightarrow \qquad i(t)=(-2{,}5t+10) \text{ mA}$$

4. zatia (6 ms ≤ t ≤ 8 ms): lerro zuzen horizontala, –5 balio bertikalean,

ekuazioa: $i(t)$ = –5 mA (konstantea)

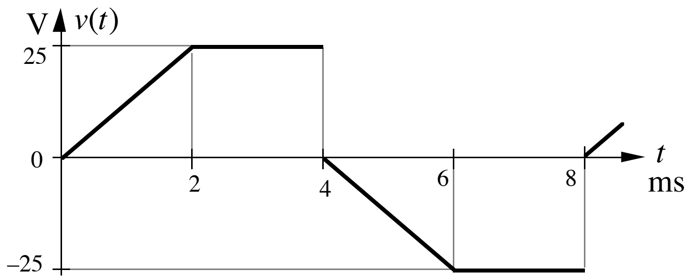
Funtzio hori erresistentzia lineal bati ezarri zaionez gero, kontuan hartu behar da erresistentziak Ohm-en legea betetzen duela: $v = Ri$. Beraz, erresistentziaren muturren arteko tentsioak korrontearen itxura bera izango du; matematikoki:

1. zatia (0 ms ≤ t ≤ 2 ms): $v(t)$ = 5 kΩ · 2,5t mA = 12,5t V
   (0, 0) puntutik (2, 25) puntura doan lerro zuzena

2. zatia (2 ms ≤ t ≤ 4 ms): $v(t)$ = 5 kΩ · 5 mA = 25 V (konstantea)
   lerro zuzen horizontala, 25 balio bertikalean

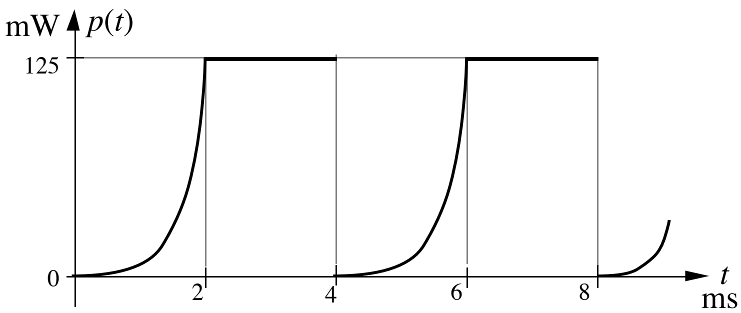
3. zatia (4 ms ≤ t ≤ 6 ms): $v(t)$ = 5 kΩ· (–2,5t + 10) mA = (–12,5t + 50) V
   (4, 0) puntutik (6, –25) puntura doan lerro zuzena

4. zatia (6 ms ≤ t ≤ 8 ms): $v(t)$ = 5 kΩ · 2,5t mA = –25 V (konstantea)
   lerro zuzen horizontala, –25 balio bertikalean



Erresistentziak xurgatutako potentziari dagokionez: $p(t) = i(t) \cdot v(t)$. Beraz, potentzia-funtzioak ere lau zati desberdin izango ditu:

1. zatia (0 ms ≤ t ≤ 2 ms): $p(t)$ = 2,5t mA · 12,5t V = 31,25t^2 mW
   (0, 0) puntutik (2, 125) puntura doan parabola
2. zatia (2 ms ≤ t ≤ 4 ms): $p(t)$ = 5 mA · 25 V = 125 mW (konstantea)
   lerro zuzen horizontala, 125 balio bertikalean
3. zatia (4 ms ≤ t ≤ 6 ms): $p(t)$ = (–2,5t + 10) mA · (–12,5t + 50) V =
   = (31,25t^2 – 250t + 500) mW
   (4, 0) puntutik (6, 125) puntura doan parabola
4. zatia (6 ms ≤ t ≤ 8 ms): $p(t)$ = (–5 mA) · (–25 V) = 125 mW (konstantea)
   lerro zuzen horizontala, 125 balio bertikalean



Funtzio hori aztertuz, honako hau ondorioztatzen da: erresistentziak xurgatutako potentzia beti positiboa dela. Hau da, erresistentziak beti xurgatzen du potentzia, nahiz eta korrontearen noranzkoa aldatu, tentsioaren zeinua ere aldatzen baita.

b) Erresistentziari ezarritako korrontea seinale periodikoa denez gero, periodoa $T = 8$ ms-koa izanik, erresistentziaren muturren arteko tentsioa eta erresistentziak xurgatutako potentzia ere periodikoak dira, goiko irudietan ageri den legez. Definizioz, seinale periodiko baten batez besteko balioa honelaxe kalkulatzen da (ikus 2. eranskina):

$$F_b = \frac{1}{T}\int_0^T f(t)dt$$

non F_b delakoa batez besteko balioa eta T delakoa $f(t)$ seinalearen periodoa diren. Eskuartean darabiltzagun seinaleen periodo batean lau zati desberdin bereizten direla kontuan hartuz , goiko integrala ere lautan banatu beharko dugu.

➪ **Batez besteko korronte-intentsitatea:**

$$I_b = \frac{1}{8}\left[\int_0^2 2,5t dt + \int_2^4 5dt + \int_4^6 (-2,5t+10)dt + \int_6^8 (-5)dt\right]$$

Integratuz,

$$\boxed{I_b = 0 \text{ mA}}$$

Intentsitatearen irudian, agerikoa da intentsitatea positiboa eta negatiboa dela periodo-erdi banatan, eta gainera balio bertsuekin: goiko azalera eta behekoa berdinak dira, baina zeinu desberdinetakoak; beraz, azalera osoa zero da.

➪ **Batez besteko tentsioa:**

$$V_b = \frac{1}{8}\left[\int_0^2 12,5t dt + \int_2^4 25dt + \int_4^6 (-12,5t+50)dt + \int_6^8 (-25)dt\right]$$

Integratuz,

$$\boxed{V_b = 0 \text{ V}}$$

intentsitatearen kasuan azaldutako arrazoi beragatik.

➪ **Batez besteko potentzia:**

$$P_b = \frac{1}{8}\left[\int_0^2 31,25t^2 dt + \int_2^4 125dt + \int_4^6 (31,25t^2 - 250t + 500)dt + \int_6^8 125dt\right]$$

Integratuz,

$$\boxed{P_b = 83,33 \text{ mW}}$$

Harrigarria izan badaiteke ere, erresistentziak xurgatutako batez besteko potentzia ez da zero, batez besteko korrontea eta tentsioa zero izan arren; arrazoia zeinuetan datza: korrontearen noranzkoa aldatzen denean (korronte negatiboa) tentsioa ere aldatzen da, Ohm-en legea dela eta, bien arteko biderkadura beti positiboa izanik.

Beraz, ez dago esaterik batez besteko potentzia batez besteko korronte-intentsitatea bider batez besteko tentsioa denik.

(Oharra: potentziaren kasuan emaitza bera lortzen da potentziaren periodoa, korrontearena eta tentsioarena ez bezala, $T = 4$ ms-koa dela kontuan hartuz, eta ez 8 ms-koa).

c) Definizioz, seinale periodiko baten balio eraginkorra honelaxe kalkulatzen da (ikus 2. eranskina):

$$F_e = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T \left[f(t)\right]^2 dt}$$

Lehen bezala, goiko integrala ere lautan banatu beharko dugu.

➪ **Korronte-intentsitate eraginkorra:**

$$I_e = \sqrt{\frac{1}{8}\left[\int_0^2 (2{,}5t)^2\,dt + \int_2^4 5^2\,dt + \int_4^6 (-2{,}5t+10)^2\,dt + \int_6^8 (-5)^2\,dt\right]}$$

Integratuz, $I_e = \sqrt{\dfrac{133{,}33}{8}}$ mA $\rightarrow$ $\boxed{I_e = 4{,}08 \text{ mA}}$

➪ **Tentsio eraginkorra:**

$$V_e = \sqrt{\frac{1}{8}\left[\int_0^2 (12{,}5t)^2\,dt + \int_2^4 25^2\,dt + \int_4^6 (-12{,}5t+50)^2\,dt + \int_6^8 (-25)^2\,dt\right]}$$

Integratuz, $V_e = \sqrt{\dfrac{3333{,}33}{8}}$ V $\rightarrow$ $\boxed{V_e = 20{,}41 \text{ V}}$

Orain, $I_e \cdot V_e$ egiten badugu, $\sqrt{\dfrac{133{,}33}{8}}$ mA $\cdot \sqrt{\dfrac{3333{,}33}{8}}$ V $= 83{,}33$ mW,

beraz, batez besteko potentzia: $\rightarrow$ $\boxed{P_b = I_e \cdot V_e = I_e^2 \cdot R}$

➪ **Potentzia eraginkorra:**

$$P_e = \sqrt{\frac{1}{4}\left[\int_0^2 (31{,}25t^2)^2\,dt + \int_2^4 125^2\,dt\right]}$$

Integratuz, $\boxed{P_e = 96{,}82 \text{ mW}}$

Balio honek ez du esanahi berezirik.

(Oharra: emaitza bera lortzen da $T = 8$ ms balioa erabiliz.)

d) Jakin badakigu t_1 eta t_2 uneen arteko energia honelaxe kalkulatzen dela potentziaren funtzioan:

$$W(t_1,t_2)=\int_{t_1}^{t_2}p(t)dt$$

Erresistentziak seinalearen periodo batean (T = 8 ms) xurgatutako energia kalkulatu nahi dugunez gero, lehenago lortutako potentzia-funtzioaren adierazpena kontuan hartu beharko dugu integrala egitean:

$$W(0,T=8\text{ ms})=\int_0^2 31{,}25t^2dt+\int_2^4 125dt+\int_4^6(31{,}25t^2-250t+500)dt+\int_6^8 125dt$$

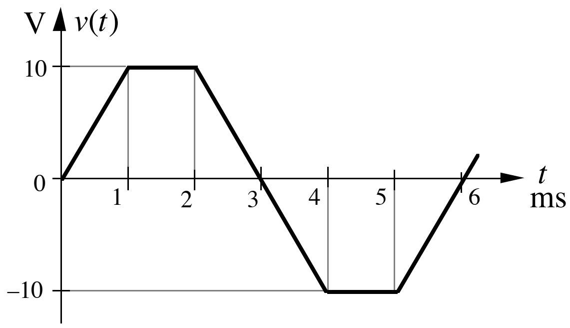
Adierazpen hau batez besteko potentziarenarekin alderatuz gero, honako hau ondorioztatzen da: $W_T=P_b\cdot T=I_e^2\cdot R\cdot T$. Beraz, $W_T=83{,}33\text{ mW}\cdot 8\text{ ms}$ $\rightarrow$

$$\boxed{W_T=666{,}67\ \mu\text{J}}$$

edo baita ere $W_T=0{,}24\cdot 666{,}67\ \mu\text{cal}$ $\rightarrow$ $\boxed{W_T=160\ \mu\text{cal}}$

2.2. Kondentsadoreak: kapazitate linealak

1. 100 μF-eko kapazitatea duen kondentsadore bati irudiko tentsio periodikoa (T = 6 ms) ezarri zaio:



a) Kalkula eta irudika itzazu kondentsadoretik igarotzen den korronte-intentsitatea, $i(t)$, eta kondentsadoreak xurgatzen duen potentzia, $p(t)$.

b) Kalkula itzazu seinaleen batez besteko balioak (V_b, I_b, P_b).

Ebazpena:

a) Lehendabizi, irudiko kurba matematikoki adieraziko dugu (v, V-etan eta t, ms-tan).

1. zatia (0 ms ≤ t ≤ 1 ms): (0, 0) puntutik (1, 10) puntura doan lerro zuzena,

ekuazioa: $v(t) = 10t$ V

2. zatia (1 ms ≤ t ≤ 2 ms): lerro zuzen horizontala, 10 balio bertikalean,

ekuazioa: $v(t)$ = 10 V (konstantea)

3. zatia (2 ms ≤ t ≤ 4 ms): (2, 10) puntutik (4, –10) puntura doan lerro zuzena,

ekuazioa: $v - 10 = \dfrac{-10-10}{4-2}(t-2) \quad \rightarrow \quad v(t) = (-10t + 30)$ V

4. zatia (4 ms ≤ t ≤ 5 ms): lerro zuzen horizontala, –10 balio bertikalean,

ekuazioa: $v(t)$ = –10 V (konstantea)

5. zatia (5 ms ≤ t ≤ 6 ms): (5, –10) puntutik (6, 0) puntura doan lerro zuzena,

ekuazioa: $v(t) = (10t - 60)$ V

Funtzio hori kapazitate lineal bati ezarri zaionez gero, kontuan hartu behar da kondentsadorearen portaera-ekuazioa:

$$i(t) = C\frac{dv(t)}{dt}$$

non C, farad-etan; v, volt-etan; t, segundotan eta i, anperetan dauden.

Aurreko adierazpen guztietan $C = 100\ \mu\text{F} = 100 \cdot 10^{-6}\ \text{F} = 10^{-4}$ F dela eta $\frac{dv}{dt}$ V/ms-tan dagoela kontuan hartuz, hots, 1000rekin biderkatu behar dela V/s-tan izateko, honelaxe geratuko da portaera-ekuazioa:

$$i(t) = 10^{-4}\ \text{F} \cdot 10^{3}\frac{dv}{dt}\ \frac{\text{V}}{\text{s}} = 0{,}1\frac{dv}{dt}$$

non $\frac{dv}{dt}$, V/ms-tan eta i, anperetan dauden.

Portaera-ekuazioa aplikatuz, kondentsadoretik igaroko den korrontearen intentsitatea kalkulatuko dugu, matematikoki:

1. zatia (0 ms ≤ t ≤ 1 ms): $i(t)$ = 0,1 · 10 V/ms = 1 A

lerro zuzen horizontala, 1 balio bertikalean

2. zatia (1 ms ≤ t ≤ 2 ms): $i(t)$ = 0,1 · 0 V/ms = 0 A

lerro zuzen horizontala, 0 balio bertikalean, hots, ardatz horizontalean

3. zatia (2 ms ≤ t ≤ 4 ms): $i(t)$ = 0,1 · (–10) V/ms = –1 A

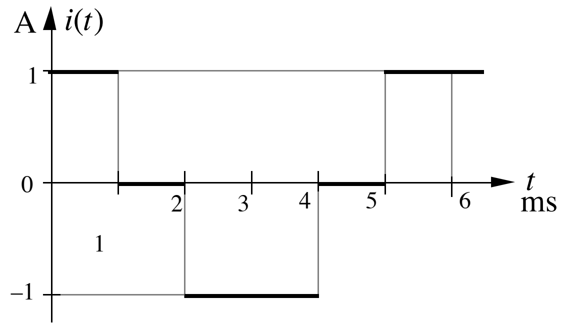
lerro zuzen horizontala, –1 balio bertikalean

4. zatia (4 ms ≤ t ≤ 5 ms): $i(t)$ = 0,1 · 0 V/ms = 0 A

lerro zuzen horizontala, 0 balio bertikalean, hots, ardatz horizontalean

5. zatia (5 ms ≤ t ≤ 6 ms): $i(t)$ = 0,1 · 10 V/ms = 1 A

lerro zuzen horizontala, 1 balio bertikalean



Kondentsadoreak xurgatutako potentziari dagokionez: $p(t) = v(t) \cdot i(t)$. Beraz, potentzia-funtzioak ere bost zati desberdin izango ditu:

1. zatia (0 ms ≤ t ≤ 1 ms): $p(t) = 10t$ V · 1 A = $10t$ W

(0, 0) puntutik (1, 10) puntura doan lerro zuzena

2. zatia (1 ms ≤ t ≤ 2 ms): $p(t) = 10$ V · 0 A = 0 W (konstantea)

lerro zuzen horizontala, 0 balio bertikalean, hots, ardatz horizontalean

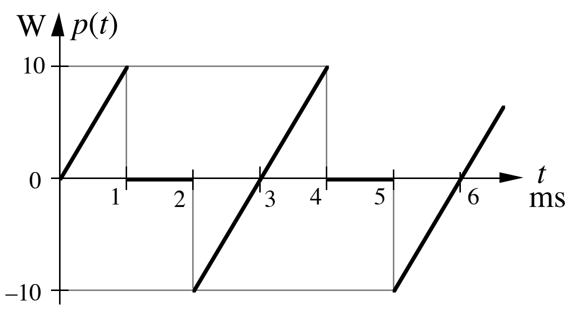
3. zatia (2 ms ≤ t ≤ 4 ms): $p(t) = (-10t + 30)$ V · (–1 A) = $(10t - 30)$ W

(2, –10) puntutik (4, 10) puntura doan lerro zuzena

4. zatia (4 ms ≤ t ≤ 5 ms): $p(t) = (-10$ V) · 0 A = 0 W (konstantea)

5. zatia (5 ms ≤ t ≤ 6 ms): $p(t) = (10t - 60)$ V · 1 A = $(10t - 60)$ W

(5, –10) puntutik (6, 0) puntura doan lerro zuzena



b) Aurreko ariketan azaldutako formula erabiliko dugu oraingo honetan ere batezbesteko balioak kalkulatzeko.

⇨ **Batez besteko tentsioa:**

Seinalearen periodo batean (T = 6 ms) bost zati desberdin bereizten direla kontuan hartuz, integrala ere bostetan banatu beharko dugu:

$$V_b = \frac{1}{6}\left[\int_0^1 10t\,dt + \int_1^2 10\,dt + \int_2^4 (-10t + 30)\,dt + \int_4^5 (-10)\,dt + \int_5^6 (10t - 60)\,dt\right]$$

Integratuz,

$$\boxed{V_b = 0 \text{ V}}$$

ateratzen da, tentsioaren irudian agerikoa dena baieztatuz, hots, tentsio positiboak eta negatiboak berdinak direla, alde positiboan zein negatiboan kurbaren azalera ardatz horizontalarekiko berdina izanik.

⇨ **Batez besteko korronte-intentsitatea:**

Hemen ere bost zati desberdin bereizten dira:

$$I_b = \frac{1}{6}\left[\int_0^1 1dt + \int_1^2 0dt + \int_2^4 (-1)dt + \int_4^5 0dt + \int_5^6 1dt\right]$$

Integratuz,

$$\boxed{I_b = 0 \text{ mA}}$$

hots, kondentsadorea kargatzen eta deskargatzen ari da etengabe, eta horrexegatik korronte-kantitate bera pasatzen da bi noranzkoetan.

⇨ **Batez besteko potentzia:**

Potentziaren irudian oinarriturik, periodoa $T = 3$ ms-koa dela eta periodo batean hiru zati desberdin bereizten direla ageri da. Ondorioz, integrala ere hirutan banatu beharko dugu:

$$P_b = \frac{1}{3}\left[\int_0^1 10t\,dt + \int_1^2 0dt + \int_2^3 (10t - 30)dt\right]$$

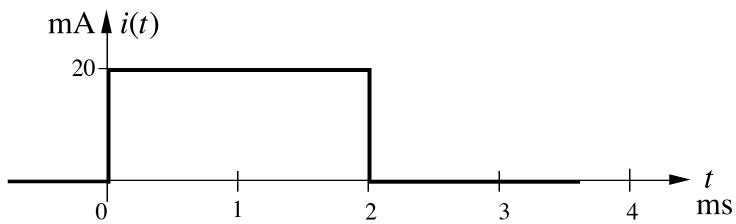
(Oharra: emaitza bera lortzen da potentziaren periodoa $T = 6$ ms-koa dela kontsideratuz).

Integratuz,

$$\boxed{P_b = 0 \text{ W}}$$

Lehenago esan denari jarraituz, kondentsadorea kargatzen ari denean, potentzia xurgatzen du; baina deskargatzen denean, potentzia ematen du. Horregatik, kondentsadoreak xurgatutako potentzia osoa zero da, kargatzean xurgatzen duena, gero deskargatzean ematen duelako.

2. 5 μF-eko kapazitatea duen kondentsadore bati irudiko korrontea ezarri zaio:



a) Kalkula eta irudika itzazu tentsioaren eta potentziaren aldiuneko balioak, $v(t)$ eta $p(t)$.

b) Kalkula ezazu kondentsadoreak metatu duen energia.

Ebazpena:

a) Lehen bezala, lehendabizi irudiko kurba matematikoki adieraziko dugu:

1. zatia ($t \leq 0$ ms): $i(t) = 0$ mA

2. zatia (0 ms $\leq t \leq$ 2 ms): lerro zuzen horizontala, 20 balio bertikalean,

ekuazioa: $i(t) = 20$ mA (konstantea)

3. zatia (2 ms $\leq t$): $i(t) = 0$ mA

Funtzio hori kapazitate lineal bati ezarri zaionez gero, kontuan hartu behar da kondentsadorearen portaera-ekuazioa:

$$i(t) = C\frac{dv(t)}{dt}$$

non C, farad-etan; v, volt-etan; t, segundotan eta i, anperetan dauden.

Kasu honetan, aurrekoan ez bezala, korrontea ezaguna da, eta tentsioa ezezaguna. Hori dela eta, portaera-ekuazioari buelta eman behar diogu:

$$\int_{v_0}^{v_t} dv(t) = \frac{1}{C}\int_{t_0}^{t} i(t)dt$$

Azken ekuazio hau aplikatuz, eta $\dfrac{1}{C} = \dfrac{1}{5 \cdot 10^{-6}\ \text{F}} = 2 \cdot 10^{5}\ \text{F}^{-1}$dela kontuan hartuz, kondentsadorearen muturren artean izango den tentsioa kalkulatuko dugu, matematikoki:

1. zatia ($t \leq 0$ ms): $v(t) - v(-\infty) = 0 \quad \rightarrow \quad v(t) = v(-\infty)$

Beraz, erabat beharrezkoa da jakitea zenbatekoa zen kondentsadorearen muturren arteko tentsioa korronte hori ezarri zaionean: hasierako tentsioa, alegia. Balio hori normalean eman behar digute edo bestela suposatu egin beharko dugu. Demagun, kasu honetan, kondentsadorea hasieran deskargatuta zegoela, hots $v(-\infty) = 0$ izan dela, korrontearen irudian agerikoa denez ez baita inoiz korronterik igaro kondentsadoretik, hau da, ez da inoiz kargatu. Hemendik, honako hau ondorioztatzen da: $v(0) = 0$ V.

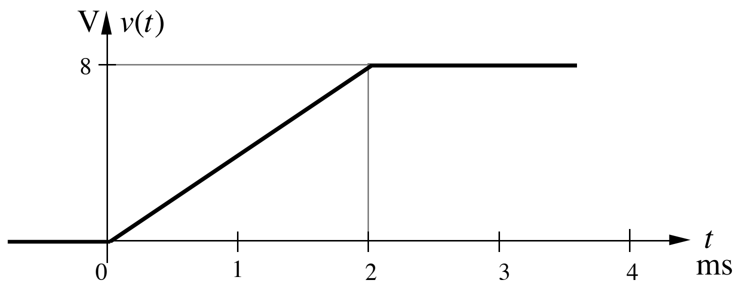
2. zatia (0 ms $\leq t \leq$ 2 ms): $\text{v}(t) - \text{v}(0) = 2 \cdot 10^5\ \text{F}^{-1} \cdot 20 \cdot 10^{-3}\ \text{A} \cdot (t - 0) \cdot 10^{-3}$ s

$\rightarrow\ v(t) = (v(0) + 4t)$ V $= 4t$ V

(0, 0) puntutik (2, 8) puntura doan lerro zuzena

3. zatia (2 ms $\leq t$): $v(t) - v(2) = 0 \ \rightarrow\ v(t) = v(2) = 8$ V

lerro zuzen horizontala, 8 balio bertikalean



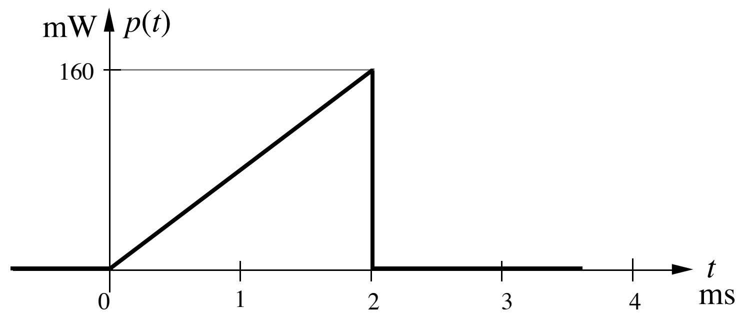
Kondentsadoreak xurgatutako potentziari dagokionez: $p(t) = v(t) \cdot i(t)$. Beraz, potentzia-funtzioak ere hiru zati desberdin izango ditu:

1. zatia ($t \leq 0$ ms): $p(t)$ = 0 V · 0 mA = 0 mW

2. zatia (0 ms $\leq t \leq$ 2 ms): $p(t)$ = $4t$ V · 20 mA = $80t$ mW

(0, 0) puntutik (2, 160) puntura doan lerro zuzena

3. zatia (2 ms $\leq t$): $p(t)$ = 8 V · 0 mA = 0 mW



b) Badakigu t_1 eta t_2 uneen arteko energia honelaxe kalkulatzen dela potentziaren funtzioan:

$$W(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} p(t)dt$$

Kondentsadoreak metatutako energia kalkulatu nahi dugunez gero, gorago lortutako potentzia-funtzioaren adierazpena kontuan hartu beharko dugu integrala egitean:

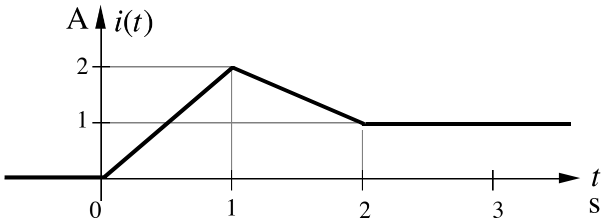
$$W(-\infty, +\infty) = \int_{-\infty}^{0} 0dt + \int_{0}^{2} 80tdt + \int_{2}^{+\infty} 0dt$$

Integratuz:

$$\boxed{W = 160\ \mu\text{J}}$$

2.3. Harilak: autoinduktantzia linealak

1. 2 H-ko autoinduktantzia duen haril bati irudiko korrontea ezarri zaio:



Kalkula eta irudika itzazu harilaren muturren arteko tentsioa, $v(t)$, eta xurgatzen duen potentzia, $p(t)$.

Ebazpena:

Lehendabizi, irudiko kurba matematikoki adieraziko dugu (i, A-tan; eta t, s-tan).

1. zatia ($t \leq 0$ s): lerro zuzen horizontala, 0 balio bertikalean,
   ekuazioa: $i(t) = 0$ A
2. zatia (0 s $\leq t \leq$ 1 s): (0, 0) puntutik (1, 2) puntura doan lerro zuzena,
   ekuazioa: $i - 0 = \dfrac{2-0}{1-0}(t-0) \quad \rightarrow \qquad i(t) = 2t$ A
3. zatia (1 s $\leq t \leq$ 2 s): (1, 2) puntutik (2, 1) puntura doan lerro zuzena,
   ekuazioa: $i - 2 = \dfrac{1-2}{2-1}(t-1) \quad \rightarrow \qquad i(t) = (-t+3)$ A
4. zatia (2 s $\leq t$): lerro zuzen horizontala, 1 balio bertikalean,
   ekuazioa: $i(t) = 1$ A (konstantea)

Funtzio hori autoinduktantzia lineal bati ezarri zaionez gero, kontuan hartu behar da harilaren portaera-ekuazioa:

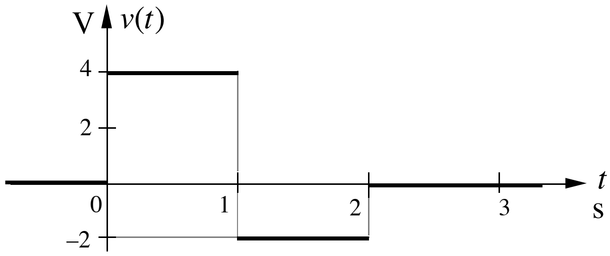
$$v(t) = L\frac{di(t)}{dt}$$

non L, henry-tan; v, volt-etan; t, segundotan eta i, anperetan dauden.

$L = 2$ H dela kontuan hartuz eta portaera-ekuazioa aplikatuz, harilaren muturren arteko tentsioa kalkulatuko dugu, matematikoki:

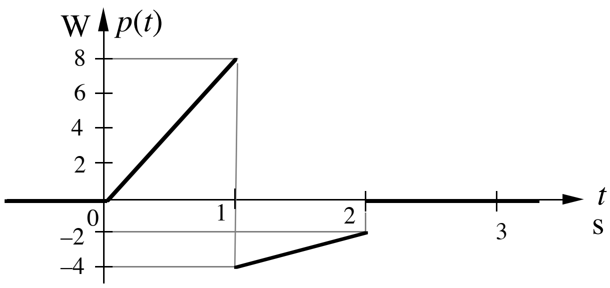
1. zatia ($t \leq 0$ s): $v(t) = 2 \cdot 0 = 0$ V
   lerro zuzen horizontala, 0 balio bertikalean, hots, ardatz horizontalean

2. zatia (0 s ≤ t ≤ 1 s): $v(t) = 2 \cdot 2 = 4$ V
   lerro zuzen horizontala, 4 balio bertikalean
3. zatia (1 s ≤ t ≤ 2 s): $v(t) = 2 \cdot (-1) = -2$ V
   lerro zuzen horizontala, –2 balio bertikalean
4. zatia (2 s ≤ t): $v(t) = 2 \cdot 0 = 0$ V
   lerro zuzen horizontala, 0 balio bertikalean, hots, ardatz horizontalean



Harilak xurgatutako potentziari dagokionez: $p(t) = v(t) \cdot i(t)$. Beraz, potentzia-funtzioak ere lau zati desberdin izango ditu:

1. zatia (t ≤ 0 s): $p(t) = 0$ V · 0 A = 0 W
   lerro zuzen horizontala, 0 balio bertikalean, hots, ardatz horizontalean
2. zatia (0 s ≤ t ≤ 1 s): $p(t) = 4$ V · $2t$ A = $8t$ W
   (0, 0) puntutik (1, 8) puntura doan lerro zuzena
3. zatia (1 s ≤ t ≤ 2 s): $p(t) = (-2)$ V · $(-t + 3)$ A = $(2t - 6)$ W
   (1, –4) puntutik (2, –2) puntura doan lerro zuzena
4. zatia (2 s ≤ t): $p(t) = 0$ V · 0 A = 0 W
   lerro zuzen horizontala, 0 balio bertikalean, hots, ardatz horizontalean



Irudi honetan agerikoa da, 0 s eta 1 s-ren arteko denbora-tartean xurgatutako potentzia positiboa dela; hots, harila kargatzen ari denean, korrontea handiagotzen delako. 1 s eta 2 s-ren arteko denbora-tartean, ordea, korrontea txikiagotzen doan heinean, harila deskargatu egiten da, eta horregatik xurgatutako potentzia negatiboa da, benetan metaturikoa ematen ari delako.

2.4. Sorgailuak

1. Tentsio-sorgailu erreal baten muturren arteko tentsioa neurtu dugu, voltmetro ideal batez, bi kasu desberdinetan, eta honako balio hauek lortu ditugu:

1. kasua: tentsio-sorgailuaren muturren artean ezer konektatu gabe voltmetroa izan ezik (zirkuitu irekian, beraz), 150 V neurtu dugu.

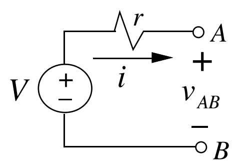
2. kasua: tentsio-sorgailuaren muturren artean, voltmetroaz gain, 600 Ω-eko erresistentzia bat konektatu ondoren, 100 V neurtu dugu.

Zenbatekoak dira tentsio-sorgailu erreal horren ereduari dagozkion *V* eta *r* parametroak?

(**Oharra**: Voltmetro idealaren eredua zirkuitu irekia da, hots voltmetrotik ez da inoiz korronterik pasatzen, eta, ondorioz, voltmetroak ez du eraginik zirkuituaren portaeraren gainean.)

Ebazpena:

Gogora dezagun zein den tentsio-sorgailu erreal baten eredua:



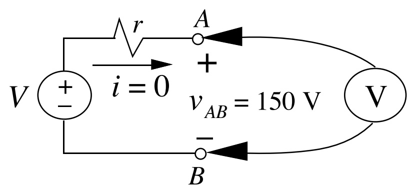
$$v_{AB} = V - r \cdot i$$

V delakoa tentsio-sorgailuak zirkuitu irekian emango duen tentsioaren balioa izanik, eta *r* delakoa, barne-erresistentzia.

Ereduko bi parametro horiek kalkulatzeko, kontuan hartu beharko ditugu lortutako bi neurriak:

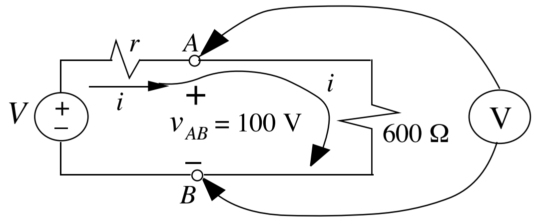
1. kasua: tentsio-sorgailuaren bi muturren artean zirkuitua irekita egonik, tentsio-sorgailuak ematen duen korrontea, *i*, zero da; eta goiko formularen arabera:

$$v_{AB} = V = \text{voltmetroak emandako balioa}$$



$\rightarrow$ $\boxed{V = 150\ \text{V}}$

2. kasua: tentsio-sorgailuaren bi muturren artean 600 Ω-eko erresistentzia konektatuta egonik, aldi berean beteko dira tentsio-sorgailuaren portaera islatzen duen formula eta 600 Ω-eko erresistentziari dagokiona, Ohm-en legeak emandakoa hain zuzen ere. Gainera, voltmetroak neurtutako tentsioa ere ezaguna da: v_{AB} = 100 V.



Beraz,

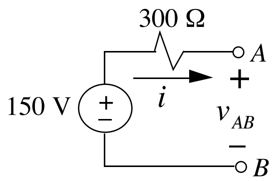
tentsio-sorgailuan: $v_{AB} = V - r \cdot i = 150 - r \cdot i = 100$ V

600 Ω-eko erresistentzian: $v_{AB} = R \cdot i = 600 \cdot i = 100$ V

Bigarren ekuaziotik tentsio-sorgailuak emango duen korronte-intentsitatearen balioa kalkulatzen da, eta hori lehenengo ekuazioan ordezkatuz:

$$150 - r \cdot \left(\frac{100}{600}\right) = 100 \text{ V} \qquad \boxed{r = 300\ \Omega}$$

Tentsio-sorgailuaren eredua, beraz, honako hau da:



2. Korronte-sorgailu erreal baten muturren arteko korrontea neurtu dugu anperemetro ideal batez bi kasu desberdinetan, eta honako balio hauek lortu ditugu:

1. kasua: korronte-sorgailuaren muturren artean ezer konektatu gabe anperemetroa izan ezik (zirkuitulaburra, beraz), 1 mA neurtu dugu.

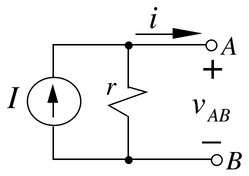
2. kasua: korronte-sorgailuaren muturren artean, anperemetroaz gain, 1 MΩ-eko erresistentzia bat konektatu ondoren, 500 μA neurtu dugu.

Zenbatekoak dira korronte-sorgailu erreal horren ereduari dagozkion *I* eta *r* parametroak?

(**Oharra**: Anperemetro idealaren eredua zirkuitulaburra da, hots anperemetroaren muturren arteko tentsioa beti zero da, eta, ondorioz, ez du eraginik zirkuituaren portaeraren gainean.)

<u>Ebazpena:</u>

Gogora dezagun zein den korronte-sorgailu erreal baten eredua:



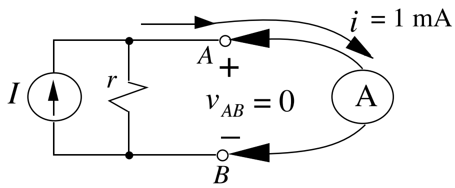
$$i = I - \frac{v_{AB}}{r}$$

I delakoa korronte-sorgailuak zirkuitulaburrean emango duen korrontearen balioa izanik, eta r delakoa, barne-erresistentzia.

Ereduko bi parametro horiek kalkulatzeko, kontuan hartu beharko ditugu lortutako bi neurriak:

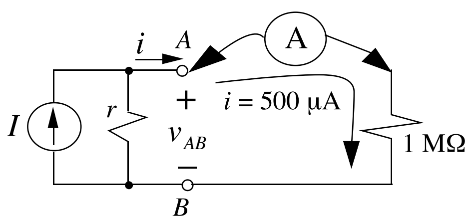
1. kasua: korronte-sorgailuaren bi muturren artean zirkuitulaburra egonik, v_{AB} tentsioa zero da, eta goiko formularen arabera:

$$i = I = \text{anperemetroak emandako balioa}$$



$\rightarrow$ $\boxed{I = 1 \text{ mA}}$

2. kasua: korronte-sorgailuaren bi muturren artean 1 MΩ-eko erresistentzia konektatuta egonik, aldi berean beteko dira korronte-sorgailuaren portaera islatzen duen formula eta 1 MΩ-eko erresistentziari dagokiona, Ohm-en legeak emandakoa hain zuzen ere. Gainera, anperemetroak neurtutako korronte-intentsitatea ere ezaguna da: $i = 500\ \mu\text{A}$. Beraz:



korronte-sorgailuan:

$$i = I - \frac{v_{AB}}{r} = 1000 - \frac{v_{AB}}{r} = 500\ \mu\text{A}$$

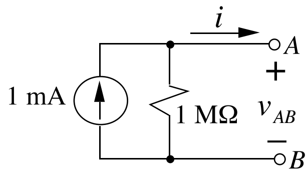
1 MΩ-eko erresistentzian:

$$v_{AB} = R \cdot i = 1\ \text{M}\Omega \cdot 500\ \mu\text{A} = 500\ \text{V}$$

Bigarren ekuaziotik lortutako tentsioaren balioa lehenengo ekuazioan ordezkatuz:

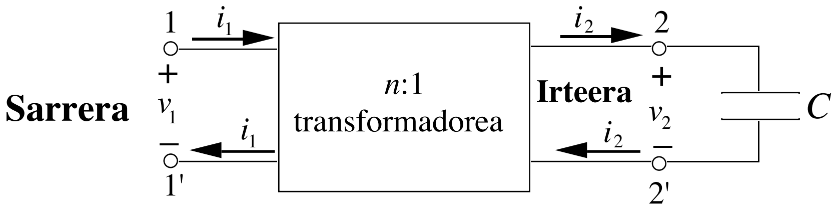
$$1000 - \frac{500}{r} = 500 \qquad \rightarrow \qquad \boxed{r = 1\ \text{M}\Omega}$$

Korronte-sorgailuaren eredua, beraz, honako hau da:



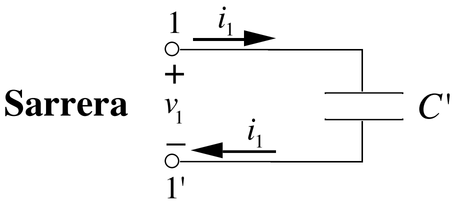
2.5. Beste elementu batzuk

1. Irudiko transformadore idealari irteeran C kapazitatea duen kondentsadore bat konektatzen badiogu, zein izango da sarreratik ikusiko den kondentsadore baliokidearen kapazitatea?



Ebazpena:

Laburbilduz, transformadoreak eta kondentsadoreak osaturiko sistema, kondentsadore baliokide bakar batez ordezkatu nahi dugu, hurrengo irudian erakusten den legez:



C' delakoa sistema osoaren kapazitate baliokidea izanik.

Gogora ditzagun elementu horiei dagozkien portaera-ekuazioak:

Transformadorea: $v_1 = n \cdot v_2$ eta $i_1 = \dfrac{i_2}{n}$

Kondentsadorea: $i(t) = C \cdot \dfrac{dv(t)}{dt}$

Orain, ekuazio horiek kasu bakoitzerako berridatziz, bilatzen ari garen kapazitate baliokidea lor dezakegu:

Jatorrizko sisteman (transformadorea gehi kondentsadorea), honako erlazio hauek betetzen dira sarrerako eta irteerako magnitudeen artean:

irteerako kondentsadorean: $i_2 = C \cdot \dfrac{dv_2}{dt}$

transformadorean: $i_1 = \dfrac{i_2}{n} = \dfrac{C}{n} \cdot \dfrac{dv_2}{dt}$ eta $\dfrac{dv_2}{dt} = \dfrac{1}{n} \cdot \dfrac{dv_1}{dt}$

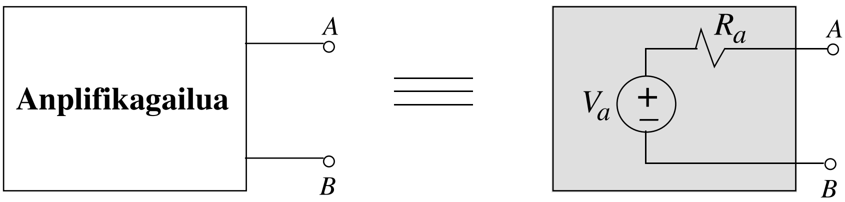
Ondorioz, hiru horiek kontuan hartuz: $i_1 = \dfrac{C}{n^2} \cdot \dfrac{dv_1}{dt}$

Kondentsadore baliokidean, honako hau betetzen da: $i_1 = C' \cdot \dfrac{dv_1}{dt}$

Azken biak berdinduz, C' kapazitate baliokidearen balioa lortzen da:

$$\boxed{C' = \frac{C}{n^2}}$$

2. Anplifikagailu baten irteeraren eredu bat, tentsio-sorgailu batek eta seriean konektaturiko erresistentzia batek osaturiko sistema izan daiteke, irudian erakusten den legez.



Ereduaren parametroak (V_a eta R_a) bilatzeko, anplifikagailuaren irteerako tentsioa esperimentalki neurtu da, voltmetro ideal batez (ikus 2.4.1 ariketako oharra), honako bi kasu hauetan:

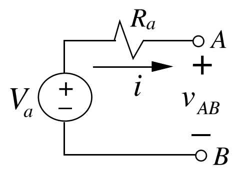
1. kasua: anplifikagailuaren irteerako muturren artean ezer konektatu gabe, voltmetroa izan ezik (zirkuitu irekia, beraz), 150 V neurtu dugu.

2. kasua: anplifikagailuaren irteerako muturren artean, voltmetroaz gain, 600 Ω-eko erresistentzia bat konektatu ondoren, 100 V neurtu dugu.

Zenbatekoak dira anplifikagailuaren ereduari dagozkion V_a eta R_a parametroak?

Ebazpena:

Anplifikagailuaren eredua tentsio-sorgailu errealaren eredu bera denez gero, bietarako ekuazio bera betetzen da irteerako terminaletako korrontearen eta tentsioaren artean, honako hau hain zuzen ere:



$$v_{AB} = V_a - R_a \cdot i$$

Lehen bezala, ereduko bi parametro horiek kalkulatzeko, kontuan hartu beharko ditugu lortutako bi neurriak:

1. kasua: anplifikagailuaren bi muturren artean zirkuitua irekita egonik, anplifikagailuak ematen duen korrontea, *i*, zero da, eta goiko formularen arabera:

$$v_{AB} = V_a = \text{voltmetroak emandako balioa}$$

$$\boxed{V_a = 150 \text{ V}}$$

2. kasua: anplifikagailuaren bi muturren artean 600 Ω-eko erresistentzia konektatuta egonik, aldi berean beteko dira anplifikagailuaren portaera islatzen duen formula eta 600 Ω-eko erresistentziari dagokiona, Ohm-en legeak emandakoa hain zuzen ere. Gainera voltmetroak neurtutako tentsioa ere ezaguna da: v_{AB} = 100 V. Beraz:

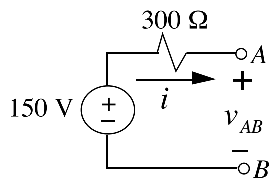
anplifikagailuan: $v_{AB} = V_a - R_a \cdot i = 150 - R_a \cdot i = 100 \text{ V}$

600 Ω-eko erresistentzian: $v_{AB} = R \cdot i = 600 \cdot i = 100 \text{ V}$

Bigarren ekuaziotik anplifikagailuak emango duen korronte-intentsitatearen balioa kalkulatzen da, eta hori lehenengo ekuazioan ordezkatuz:

$$150 - R_a \cdot \left(\frac{100}{600}\right) = 100 \quad \rightarrow \quad \boxed{R_a = 300\ \Omega}$$

Anplifikagailuaren eredua, beraz, honako hau da:



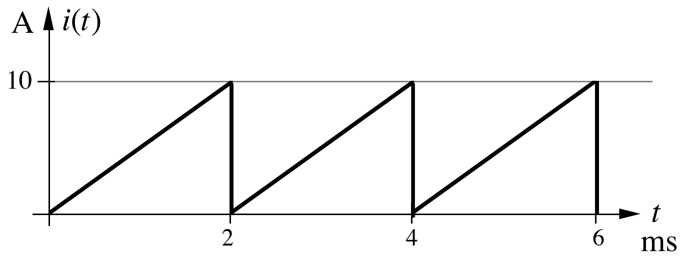
C) Proposaturiko ariketak

2.1. Erresistentzia linealak

1. Irudiko intentsitate-funtzio periodikoa 5 Ω-eko erresistentzia bati ezarri zaio.

a) Kalkula eta irudika itzazu erresistentziaren muturren arteko tentsioa, $v(t)$, eta erresistentziak xurgatutako potentzia, $p(t)$.

b) Kalkula itzazu seinaleen batez besteko balioak (I_b, V_b, P_b).

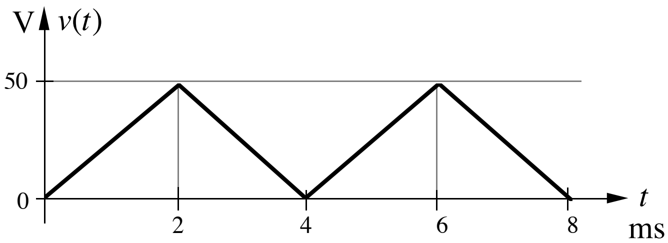


2.2. Kondentsadoreak: kapazitate linealak

1. 60 µF-eko kondentsadore bati irudiko tentsioa ezarri zaio.

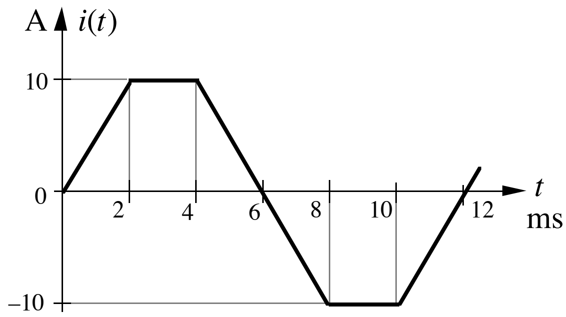
a) Kalkula eta irudika itzazu kondentsadoretik igarotzen den korronte-intentsitatea, $i(t)$, eta kondentsadoreak xurgatutako potentzia, $p(t)$.

b) Kalkula itzazu seinaleen batez besteko balioak (V_b, I_b, P_b).



2.3. Harilak: autoinduktantzia linealak

1. 3 mH-ko autoindukzio-koefizientea duen haril batetik igarotzen den korrontearen intentsitatea irudian azaldu da. Kalkula eta irudika itzazu aldiuneko tentsioa eta potentziaren adierazpen grafikoak. Zenbatekoa da batez besteko potentzia?



2.4. Sorgailuak

1. Tentsio-sorgailu erreal baten muturren arteko tentsioa neurtu dugu voltmetro ideal batez bi kasu desberdinetan, eta honako balio hauek lortu ditugu:

1. kasua: tentsio-sorgailuaren muturren artean ezer konektatu gabe, voltmetroa izan ezik, 5 V neurtu dugu.

2. kasua: tentsio-sorgailuaren muturren artean erresistentzia bat konektatu da, eta bere muturren artean 4 V-eko tentsioa neurtu dugu. Halaber, erresistentziak xurgatutako potentzia ere neurtu da, eta 1 W-eko balioa lortu da.

Zenbatekoak dira tentsio-sorgailu erreal horren ereduari dagozkion parametroak? Marraz ezazu eredua.

3. Zirkuituetako oinarrizko legeak eta horien aplikazioak

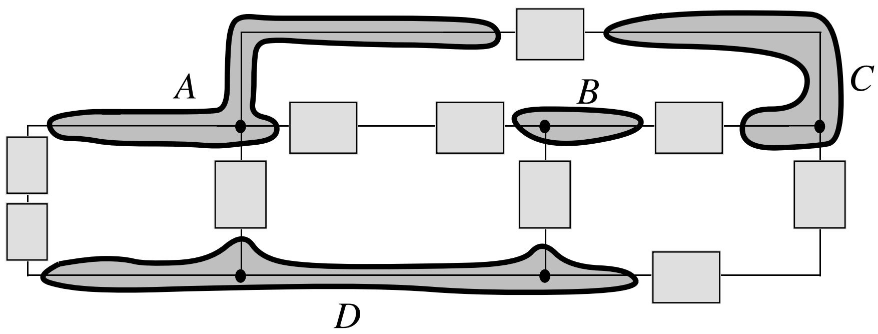
A) Jakin beharreko kontzeptuak

• Kirchhoff-en legeak

Kirchhoff-en bi legeak ulertu ahal izateko, aurretik zirkuituen ezaugarri batzuk definitu behar ditugu.

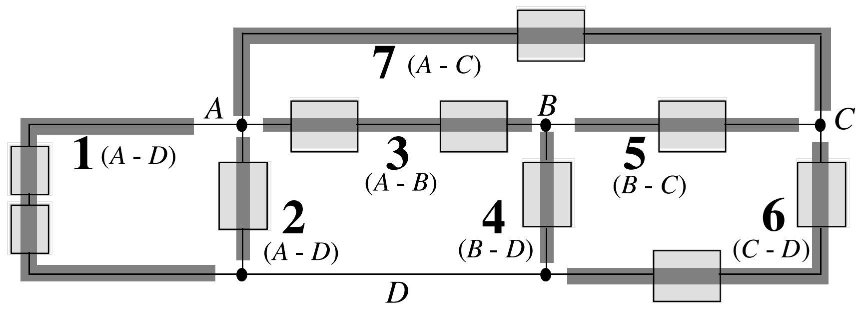
Korapiloa: Hiru elementu edo gehiago elkartzen direneko puntua.

Adibidez, irudiko zirkuituan lau korapilo daude: *A*, *B*, *C* eta *D*.



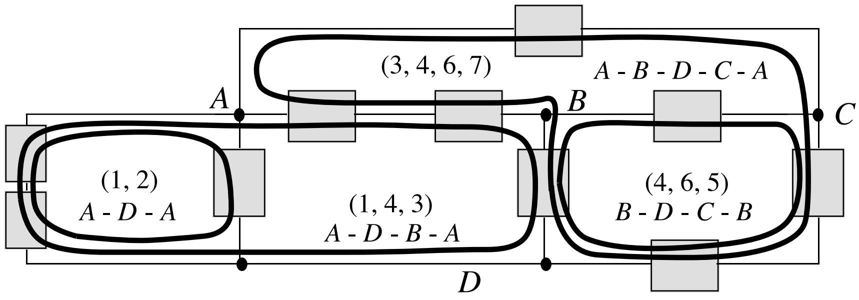
Adarra: Bi korapiloren arteko ibilbidea.

Adibidez, irudiko zirkuituan zazpi adar daude.



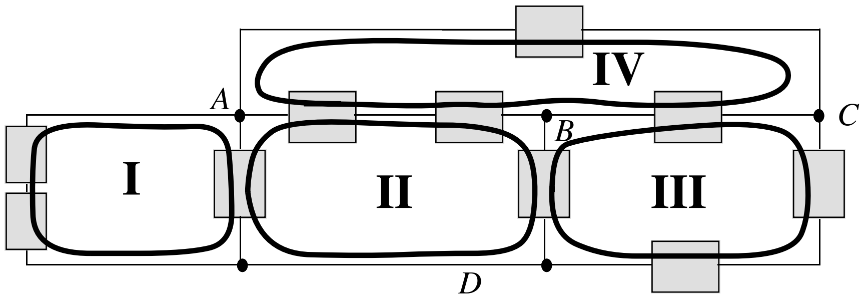
Begizta: Zirkuitu batean, adarrek osaturiko edozein ibilbide itxi.

Adibidez, irudiko zirkuituan lau begizta erakutsi dira (hamabi dauden arren).



Maila: Barruan adarrik barnehartzen ez duen begizta.

Adibidez, irudiko zirkuituan lau maila besterik ez dago.



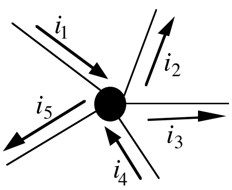
Kirchhoff-en Korronteen Legea (KKL) edo korapiloen legea:

Lege hau kargaren kontserbazioaren printzipioan oinarritzen da. Zirkuitu bateko korapilo guztietan eta une oro betetzen da. Honelaxe dio:

Korapilo batera iristen diren intentsitate guztien batura algebraikoa zero da.

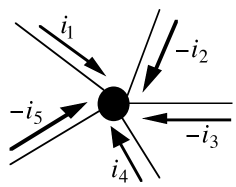
$$\boxed{\sum_{\text{guztiak}} i_{iritsi} = 0}$$

Adibidea:



→ korapilora iristen diren korronteak:

$i_1, -i_2, -i_3, i_4, -i_5$



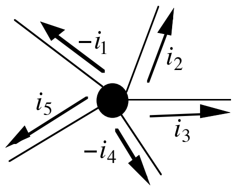
$$\sum_{\text{guztiak}} i_{iritsi} = i_1 + (-i_2) + (-i_3) + i_4 + (-i_5) = 0 \quad \rightarrow \quad i_1 - i_2 - i_3 + i_4 - i_5 = 0$$

Ekuazio hori beste era honetan ere idatz daiteke:

$$0 = -i_1 + i_2 + i_3 - i_4 + i_5$$

non korapilotik irteten diren korronteak azaltzen diren:

$$-i_1, i_2, i_3, -i_4, i_5.$$



Beste hitzetan:

Korapilo batetik irteten diren intentsitate guztien batura algebraikoa zero da.

$$\boxed{\sum_{\text{guztiak}} i_{irten} = 0}$$

Edo baita honela ere idatz dezakegu ekuazioa: $i_1 + i_4 = i_2 + i_3 + i_5$. Beste hitzetan:

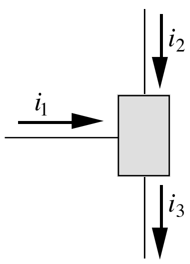
Korapilo batera iristen diren korronte-intentsitateen batura algebraikoa eta korapilotik irteten direnena berdinak dira.

$$\boxed{\sum i_{iritsi} = \sum i_{irten}}$$

Laburbilduz, lege honetatik honako hau ondorioztatzen da: kargak ez dira "bideetan galtzen", hots, kargak ez dira korapiloetan metatzen; beraz, puntu batera iristen diren karga guztiek beste bide batetik irten behar dute.

Agerikoa da, lege honen ondorioz, puntu batean bi elementu besterik elkartzen ez direnean, bietatik korronte bera igaroko dela (horrexegatik, hain zuzen ere, puntu hori ez dugu korapilotzat hartuko). Era berean, lege hau elementuetan ere aplikagarria da. Hori dela eta, elementu biterminaletan mutur batetik iristen den korrontea beste muturretik irteten da, aurreko kapituluan ikusi dugun legez.

Bi baino mutur gehiagoko elementuak korapilotzat hartzen dira muturretako korronteen arteko ekuazioa idaztean. Adibidez, elementu triterminal batean:



$$i_1 + i_2 = i_3$$

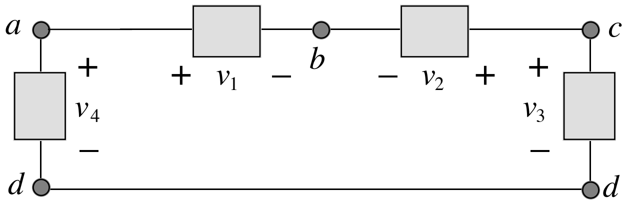
Kirchhoff-en Tentsioen Legea (KTL) edo mailen legea:

Lege hau energiaren kontserbazioaren printzipioan oinarritzen da. Zirkuitu bateko begizta guztietan eta une oro betetzen da. Honelaxe dio:

> Begizta batean, tentsio guztien batura algebraikoa zero da (tentsioen zeinuak kontuan hartuz!).

$$\sum_{\text{guztiak}} v = 0$$

Adibidea: Demagun irudiko maila (zirkuitu bateko edozein begizta izan daiteke); non a, b, c eta d, mailan dauden elementuen borneak edo muturrak diren (ez dute zertan izan korapiloak).



KTL aplikatzeko, lehendabizi mailan zehar ibiltzeko abiapuntua eta noranzkoa aukeratu behar ditugu; goiko irudiko zirkuituan, esaterako, a puntutik abiatuko gara eta erlojuaren orratzen arabera mugituko gara; hots, $a \to b \to c \to d \to a$ ibilbidea egingo dugu. Abiapuntua eta noranzkoaz gain, tentsioen zeinuei buruzko hitzarmena ere finkatu behar dugu aldez aurretik; aurreko adibidean, esate baterako, elementura mutur positibotik sartzen bagara, tentsioa positibotzat hartuko dugu, eta negatibotzat alderantzizko kasuan. Hori guztia aintzat harturik, idatz dezagun azkenik KTLri dagokion ekuazioa:

$$\sum_{\text{guztiak}} v = v_{a\to b} + v_{b\to c} + v_{c\to d} + v_{d\to a} = v_{a\to a} = 0 \quad \to$$

$$(+v_1) + (-v_2) + (+v_3) + (-v_4) = 0$$

$$\to \quad v_1 - v_2 + v_3 - v_4 = 0$$

(Egiazta daiteke ezen, maila berean beste edozein abiapuntu harturik, edota kontrako noranzkoa, edota kontrako hitzarmena harturik, ekuazio bera lortzen dela).

Ekuazio hori beste era honetan ere idatz daiteke: $v_1 - v_2 + v_3 = v_4$

Hots, $v_{a\to b} + v_{b\to c} + v_{c\to d} = v_{a\to d}$, edo, gauza bera dena: $v_{ab} + v_{bc} + v_{cd} = v_{ad}$

Beste hitzetan:

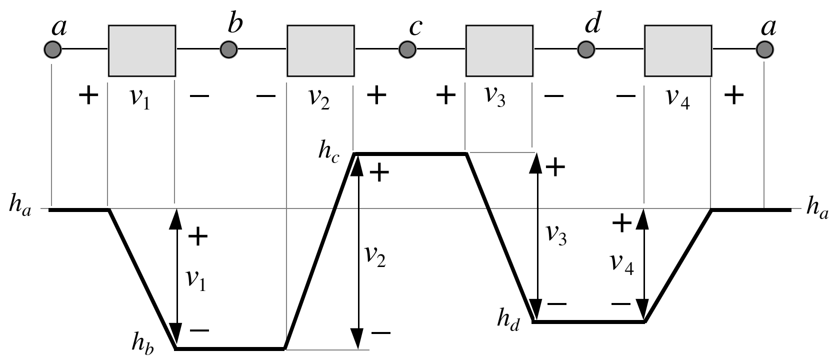
> Zirkuitu bateko bi punturen arteko tentsioa berbera da edozein izanda lehenengo puntutik bestera joateko aukeratutako ibilbidea.

Adibidez:

$$v_{b\to d} = v_{b\to a\to d} = v_{b\to c\to d} \quad \to \quad -v_1 + v_4 = -v_2 + v_3$$

$$v_{c\to d} = v_{c\to b\to a\to d} \quad \to \quad v_3 = v_2 - v_1 + v_4$$

Esandako hori guztia grafikoki ere ikus daiteke, bi punturen arteko tentsioa edo potentzial-diferentzia altuera-diferentzia gisa hartuz. Horretarako, aurreko irudiko begizta (definizioz itxia dena) "ireki" eta "zabaltzen" badugu, lerro batean marraztu ahal izateko, ondoko irudia lortuko dugu, lerroaren bi muturrak *a* puntua bera izanik. Orain ezker aldeko *a* puntutik abiatzen bagara, eskuin aldeko *a* puntura iristeko, elementuak zeharkatzean "behera" edo "gora" egin beharko dugu, elementuaren bi muturren arteko "altuera-diferentziaren" arabera.



Orain KTLri dagokion ekuazioa idazteko, zeinuei buruzko hitzarmena zehaztea baino ez zaigu falta. Agerikoa da "jaitsierak" positibotzat hartzen baditugu, "igoerak" negatibotzat hartu beharko ditugula nahitaez (hauxe da gorago erabili dugun hitzarmena: elementu batera tentsioaren zeinu positibotik sartzean —"jaitsiera", alegia— positibotzat hartu dugu tentsio hori, eta negatibotik sartzean —"igoera"—, berriz, negatibotzat):

$$v_1 - v_2 + v_3 - v_4 = 0$$

Kontrako hitzarmenak ondorio berdina du ekuazioei dagokienez.

Hori guztia dela eta, Kirchhoff-en tentsioen legea modu honetan ere adierazi ohi da:

> Zirkuitu bateko edozein ibilbide itxitan (begizta zein maila) tentsio-igoeren batura algebraikoa tentsio-jaitsieren batura algebraikoaren berdina da.

Modu honetan adieraziz gero, agerikoa da lege honek potentzien balantzearekin duen erlazioa: elementu aktiboek emandako potentzia elementu pasiboek xurgatuko dute (erraz froga daiteke erlazio hori maila bakarreko zirkuitua aintzat hartuz, elementu guztietatik korronte bera igarotzen baita kasu horretan, eta potentzien balantzea "tentsioen balantzea"-ren berdina baita orduan). Horrexegatik, lege hau eman baino lehen, energiaren kontserbazioaren printzipioaren ondorioa dela esan dugu.

• Zirkuituen ebazpide arrunta

Kirchhoff-en bi legeak eta Ohm-en legea nahikoak dira sorgailuek (independente zein menpeko) eta erresistentziek osaturiko edozein zirkuituren soluzioa bilatzeko. Gogora dezagun zertan datzan zirkuitu baten soluzioa bilatzea: zirkuitua osatzen duten elementu guztietako korronteak eta tentsioak kalkulatzean, hain zuzen ere.

Batzuetan soluzioa berehalakoa da zirkuitua oso sinplea delako, ariketetan ikusiko dugun legez. Beste batzuetan, ordea, ez da hain erraza. Horrexegatik, hona hemen, laburbilduta, zirkuitu baten soluzioa sistematikoki bilatzeko jarraitu beharreko urratsak, metodologia gisa:

1. Bilatu zirkuituaren korapiloak (korapilo-kopurua = N).

2. Aukeratu arbitrarioki adarretako korronteen noranzkoak, korronte-sorgailuak dituzten adarretan izan ezik, adar horietatik igaroko diren korronteak (noranzkoa barne) korronte-sorgailuek adierazitakoak baitira.

Baldin adar-kopurua AK bada, eta adar desberdinetan dauden korronte-sorgailuen kopurua KS bada, orduan korronte ezezagunen kopurua $AK - KS$ da.

3. Aukeratu arbitrarioki korronte-sorgailuetako tentsioen zeinuak (KS korronte-sorgailu dagoenez gero, tentsio ezezagunen kopurua KS da). Orduan:

$$\text{Korronte eta tentsio ezezagunen kopurua} = AK - KS + KS = AK$$

4. Finkatu erresistentzietako tentsioen zeinuak Ohm-en legearen arabera, eta aplikatu Ohm-en legea, erresistentzietako tentsioak adarretako korronteen funtzioan izateko.

5. Aplikatu Kirchhoff-en korronteen legea (KKL) korapilo guztietan batean izan ezik (besteen konbinazio lineala izango baita azken horretan lorturiko ekuazioa): ekuazio-kopurua = $N - 1$

6. Aplikatu Kirchhoff-en tentsioen legea (KTL) behar adina begiztatan $AK - (N-1)$ ekuazio lortzeko, non adar guztiak gutxienez behin azaldu behar diren.

$$\text{Ekuazio-kopurua guztira (KKL + KTL)} = N - 1 + AK - (N - 1) = AK$$

KTL begiztetan aplikatu ordez, mailetan aplikatu nahi baldin bada, orduan maila guztietan aplikatu behar da (maila-kopurua MK baldin bada, MK ekuazio lortuko dira modu honetan).

$$\text{Ekuazio-kopurua guztira (KKL + KTL)} = N - 1 + MK = AK$$

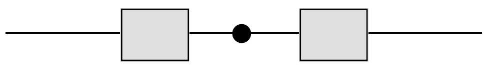
7. Ebatzi horrela lortutako ekuazio-sistema. Emaitza gisa, adarretako korronteak eta korronte-sorgailuen tentsioak lortuko dira. Erresistentzietako tentsioen balioak kalkulatu nahi badira, Ohm-en legea aplikatu behar da berriro.

• Elementuen elkarketak: serie- eta paralelo-elkarketak

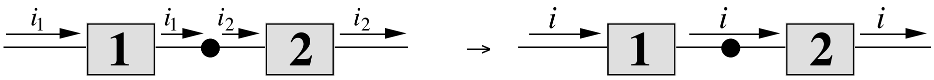
Serie-elkarketa:

Bi elementu seriean konektaturik daude mutur komun bat baldin badute eta, gainera, mutur komun horretan beste elementu bat konektaturik ez badago.

serie-elkarketa:

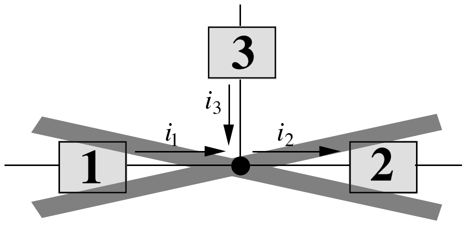


Serie-elkarketari KKL aplikatuz, bi elementuetatik korronte bera igarotzen dela ondorioztatzen da: $i_1 = i_2 = i$.

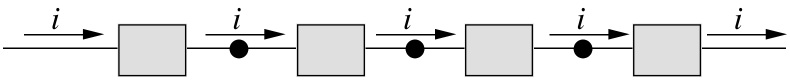


KKL aplikatzean lortutako emaitza dela eta, honako modu honetan ere defini daiteke serie-elkarketa: bi elementu seriean konektaturik daude, bietatik korronte bera igarotzen denean.

Ondoko irudiko 1 eta 2 elementuak ez daude seriean konektaturik, mutur komunean beste elementu bat ere konektatuta baitago; KKL mutur komunean aplikatuz gero, agerikoa da 1 eta 2 elementuetatik ez dela korronte bera igarotzen:



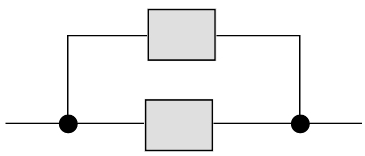
Serie-elkarketan nahi adina elementu elkartu daitezke.



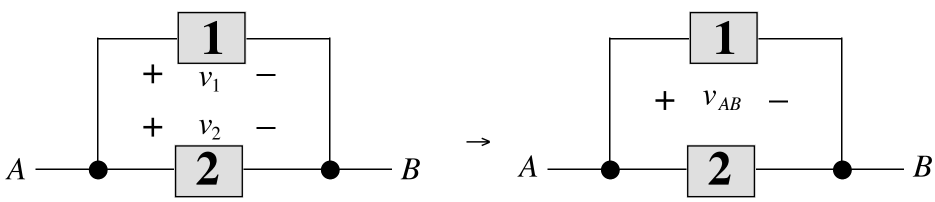
Paralelo-elkarketa:

Bi elementu paraleloan konektaturik daude, bi muturrak komunak dituztenean.

paralelo-elkarketa:

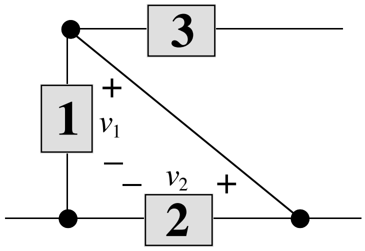


Paralelo-elkarketari KTL aplikatuz, bi elementuetako muturren artean tentsio bera dagoela ondorioztatzen da: $v_1 = v_2 = v_{AB}$.

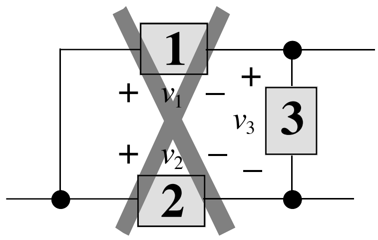


KTL aplikatzean lortutako emaitza dela eta, honako modu honetan ere defini daiteke paralelo-elkarketa: bi elementu paraleloan konektaturik daude, bien muturren arteko tentsioa bera denean.

Bi elementu elektrikoki paraleloan konektatuta egoteko, ez dute zertan egon paraleloki marraztuta; eta alderantziz, bi elementu geometrikoki paraleloan marraztuta egon arren, ez dute zertan egon paraleloan konektaturik, ondoko irudietan erakusten den legez:

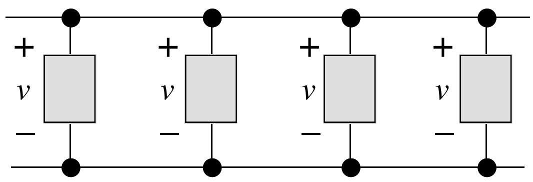


1 eta 2 elemetuak paraleloan daude, bi muturrak komunak baitituzte eta $v_1 = v_2$ baita.



1 eta 2 elementuak ez daude paraleloan, mutur komun bakarra baitute eta $v_1 \neq v_2$ baita .

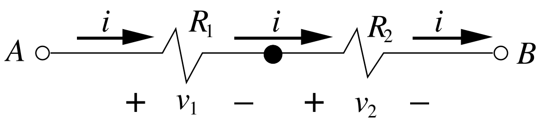
Paralelo-elkarketan nahi adina elementu elkartu daitezke.



• Erresistentziak seriean

Erresistentzia batzuk seriean konektatuta daudenean, erresistentzia baliokide bakar batez ordezka daiteke serie-elkarketa, honako modu honetan, Ohm-en eta Kirchhoff-en tentsioen (KTL) legeak aintzakotzat hartuz:

serie-elkarketa:

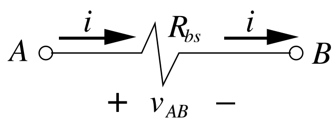


Ohm: $v_1 = R_1 i$ eta $v_2 = R_2 i$

KTL: $v_{AB} = v_1 + v_2 = R_1 i + R_2 i$

$\rightarrow \quad v_{AB} = (R_1 + R_2) i$

erresistentzia baliokidea:



Ohm: $v_{AB} = R_{bs} i$

Bi aldeetako ekuazioak berdinduz, honako emaitza hau lortzen da:

$$\boxed{R_{bs} = R_1 + R_2}$$

Beraz, bi erresistentzia edo gehiago seriean daudenean, erresistentzia bakar batez ordezka daitezke, erresistentzia baliokidearen balioa ordezkatutako erresistentzien balioen batura izanik, oro har:

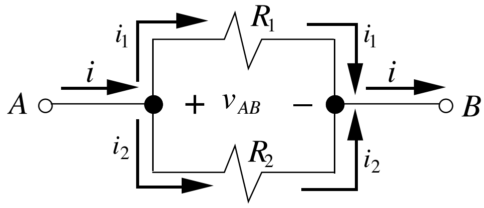
$$\boxed{R_{bs} = \sum_i R_i}$$

Adierazpen horretatik ondorioztatzen da ezen serie-elkarketaren erresistentzia baliokidea serie-elkarketa osatzen duten erresistentzien arteko handiena baino handiagoa dela, azken horien balioak batu egiten baitira.

• Erresistentziak paraleloan

Erresistentzia batzuk paraleloan konektatuta daudenean, erresistentzia baliokide bakar batez ordezka daiteke paralelo-elkarketa, honako modu honetan preseski, Ohm-en eta Kirchhoff-en korronteen (KKL) legeak aintzakotzat hartuz:

paralelo-elkarketa:

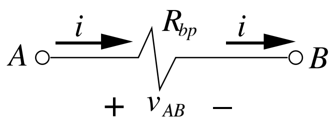


Ohm: $v_{AB} = R_1 i_1$ eta $v_{AB} = R_2 i_2$

KKL: $i = i_1 + i_2 = \left(\dfrac{v_{AB}}{R_1}\right) + \left(\dfrac{v_{AB}}{R_2}\right)$

$\rightarrow \quad i = \left[\left(\dfrac{1}{R_1}\right) + \left(\dfrac{1}{R_2}\right)\right] \cdot v_{AB}$

erresistentzia baliokidea:



Ohm: $i = \dfrac{v_{AB}}{R_{bp}}$

Bi aldeetako ekuazioak berdinduz, honako emaitza hau lortzen da:

$$\boxed{\frac{1}{R_{bp}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$$

Batzuetan erosoagoa da goiko formula jadanik landuta erabiltzea, honako modu honetan hain zuzen:

$$R_{bp} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \ ,$$

baina kontuan hartuz, azken honek soilik balio duela paraleloan konektaturik daudenak bi erresistentzia baino ez direnean.

Laburbilduz, beraz, bi erresistentzia edo gehiago paraleloan daudenean, erresistentzia bakar batez ordezka daitezke, erresistentzia baliokidearen balioaren alderantzizkoa ordezkatutako erresistentzien balioen alderantzizkoen batura izanik, oro har:

$$\boxed{\frac{1}{R_{bp}} = \sum_i \frac{1}{R_i}}$$

Adierazpen horretatik ondorioztatzen da ezen paralelo-elkarketaren erresistentzia baliokidea paralelo-elkarketa osatzen duten erresistentzien arteko txikiena baino txikiagoa dela, azken horien alderantzizko balioak baitira batzen direnak, alderantzizko baliorik handiena emango duena erresistentziarik txikiena izanik.

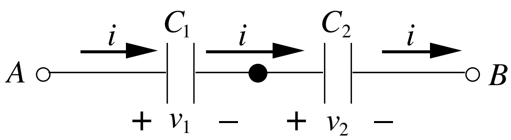
Oharra: aurreko formula kontuz erabiltzekoa da, ez baita gauza bera zatiduren batura egitea, formulak dioen legez, edo zatitzaileen batura, honako modu honetan:

$$\frac{1}{R_{bp}} \neq \frac{1}{\sum_i R_i}$$

• Kondentsadoreak seriean

Kondentsadore batzuk seriean konektatuta daudenean, kondentsadore baliokide bakar batez ordezka daiteke serie-elkarketa, honako modu honetan, Kirchhoff-en tentsioen legea (KTL) eta kondentsadoreen portaera-ekuazioa aintzakotzat hartuz:

serie-elkarketa:



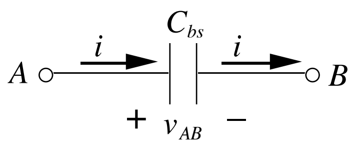
Kondentsadoreen ekuazioak:

$$i = C_1 \cdot \frac{dv_1}{dt} \quad \text{eta} \quad i = C_2 \cdot \frac{dv_2}{dt}$$

KTL: $v_{AB} = v_1 + v_2 \rightarrow \frac{dv_{AB}}{dt} = \frac{dv_1}{dt} + \frac{dv_2}{dt}$

$$\rightarrow \frac{dv_{AB}}{dt} = \frac{i}{C_1} + \frac{i}{C_2} = \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}\right) i$$

kapazitate baliokidea:



Kondentsadorearen ekuazioa:

$$i = C_{bs} \cdot \frac{dv_{AB}}{dt} \rightarrow$$

$$\frac{dv_{AB}}{dt} = \left(\frac{1}{C_{bs}}\right) i$$

Bi aldeetako ekuazioak berdinduz, honako emaitza hau lortzen da:

$$\boxed{\frac{1}{C_{bs}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}}$$

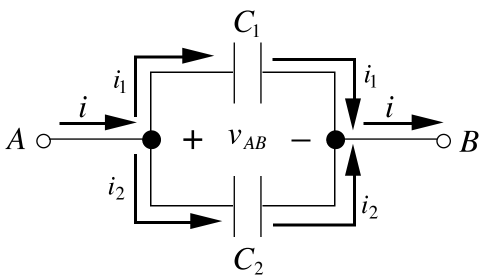
Beraz, bi kondentsadore edo gehiago seriean daudenean, kapazitate bakar batez ordezka daitezke, kapazitate baliokidearen balioaren alderantzizkoa, ordezkatutako kondentsadoreen balioen alderantzizkoen batura izanik, oro har:

$$\boxed{\frac{1}{C_{bs}} = \sum_i \frac{1}{C_i}}$$

• Kondentsadoreak paraleloan

Aurreko ataletako pauso guztiak errepikatuz, behar den bezala, honako hau lortzen da:

paralelo-elkarketa:



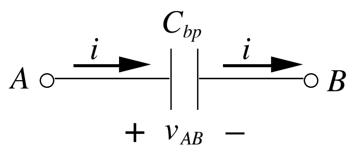
Kondentsadoreen ekuazioak:

$$i_1 = C_1 \frac{dv_{AB}}{dt} \quad \text{eta} \quad i_2 = C_2 \frac{dv_{AB}}{dt}$$

KKL: $i = i_1 + i_2$

$$\rightarrow \qquad i = \left(C_1 + C_2\right)\frac{dv_{AB}}{dt}$$

kapazitate baliokidea:



Kondentsadorearen ekuazioa:

$$i = C_{bp} \frac{dv_{AB}}{dt}$$

Bi aldeetako ekuazioak berdinduz, honako emaitza hau lortzen da:

$$\boxed{C_{bp} = C_1 + C_2}$$

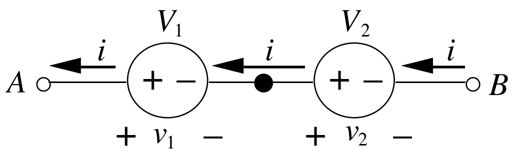
Beraz, bi kondentsadore edo gehiago seriean daudenean, kapazitate bakar batez ordezka daitezke, kapazitate baliokidearen balioa ordezkatutako kondentsadoreen balioen batura izanik, oro har:

$$\boxed{C_{bp} = \sum_i C_i}$$

• Tentsio-sorgailuak seriean

Tentsio-sorgailu batzuk seriean konektatuta daudenean, tentsio-sorgailu baliokide bakar batez ordezka daiteke serie-elkarketa. Kirchhoff-en tentsioen legea aintzakotzat hartuz, tentsio-sorgailuetako zeinuen arabera, kasu desberdinak daude; horregatik, garrantzitsuena KTL ongi aplikatzea da. Hona hemen adibide pare bat:

serie-elkarketa:

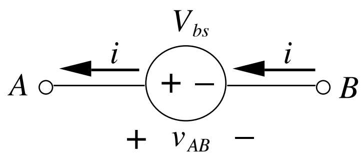


tentsio-sorgailuen ekuazioak:

$v_1 = V_1$ eta $v_2 = V_2$

KTL: $v_{AB} = v_1 + v_2 = V_1 + V_2$

tentsio-sorgailu baliokidea:



tentsio-sorgailuaren ekuazioa:

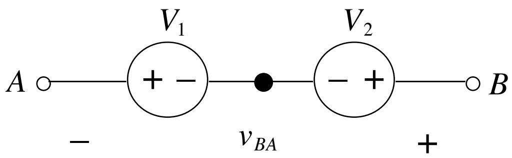
$v_{AB} = V_{bs}$

Bi aldeetako ekuazioak berdinduz, honako emaitza hau lortzen da:

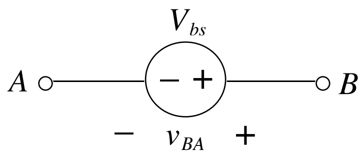
$$\boxed{V_{bs} = V_1 + V_2}$$

Oro har, tentsio-sorgailu batzuk seriean daudenean, tentsio-sorgailu bakar batez ordezka daitezke, baliokidearen balioa ordezkatutakoen batura algebraikoa izanik, guztien zeinuak kontuan hartuz. Hona hemen bigarren adibidea:

serie-elkarketa:



tentsio-sorgailu baliokidea:

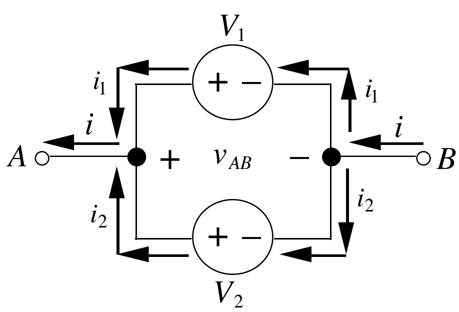


Kasu honetan, honako emaitza hau lortzen da KTL aplikatuz: $V_{bs} = V_2 - V_1$

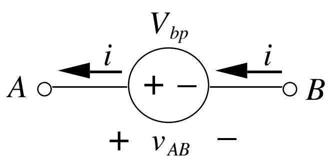
• Tentsio-sorgailuak paraleloan

Tentsio-sorgailuak kasu bakar batean konekta daitezke paraleloan, beren balioak (zeinua eta guzti) berdinak direnean soilik hain zuzen ere; bestela ez baita KTL betetzen, ondoren erakusten den legez:

paralelo-elkarketa:



tentsio-sorgailu baliokidea:



tentsio-sorgailuen ekuazioak:

$$v_{AB} = V_1 \quad \text{eta} \quad v_{AB} = V_2$$

tentsio-sorgailuaren ekuazioak:

$$v_{AB} = V_{bp}$$

Bete beharreko baldintza, beraz, bi tentsio-sorgailuen balioak berdinak izatea da ($V_1 = V_2$); eta hori betetzen denean, sorgailu baliokidearen balioa honako hau izango da:

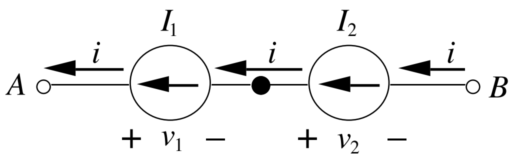
$$\boxed{V_{bp} = V_1 = V_2}$$

Beraz, tentsio baliokideari dagokionez, elkarketa honek ez du zentzu handirik, tentsio--sorgailuen banakako tentsioa lortzen baita. Dena den, elkarketa hau erabilgarria da, tentsio-sorgailuak zirkuituari eman behar dion korrontea sorgailuak eman dezakeen korronterik handiena baino handiagoa denean; bestela sorgailua hondatu egingo baita. Esate baterako, tentsio berdina ematen duten bi tentsio-sorgailu paraleloan elkartzean, bakoitzak zirkuituak behar duen korrontearen erdia eman beharko du; eta hau maximoa baino txikiagoa baldin bada, orduan ez da arazorik izango. Bestela, tentsio-sorgailu gehiago konektatu beharko dira paraleloan, bakoitzak eman behar duen korrontea maximoa baino txikiagoa dela ziurtatzeko (hiru konektatuz gero, bakoitzak korrontearen heren bat eman beharko du; lau konektatuz gero, bakoitzak korrontearen laurden bat eman beharko du; eta abar).

• Korronte-sorgailuak seriean

Korronte-sorgailuak kasu bakar batean konekta daitezke seriean: beren balioak (noranzko eta guzti) berdinak direnean, hain zuzen ere; bestela ez baita KKL betetzen, ondoren erakusten den legez:

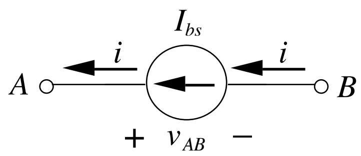
serie-elkarketa:



korronte-sorgailuen ekuazioak:

$$i = I_1 \quad \text{eta} \quad i = I_2$$

korronte-sorgailu baliokidea:



korronte-sorgailuaren ekuazioa:

$$i = I_{bs}$$

Bete beharreko baldintza, beraz, bi korronte-sorgailuen balioak berdinak izatea da ($I_1 = I_2$); eta hori betetzen denean, sorgailu baliokidearen balioa honako hau izango da:

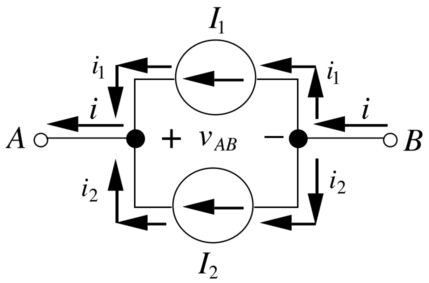
$$\boxed{I_{bs} = I_1 = I_2}$$

Aurreko atalean esandako guztia aplikagarria da kasu honetan ere; baina behar bezala egokituz gero. Hau da, elkarketa hau erabilgarria da, korronte-sorgailuari zirkuituak ezartzen dion tentsioa sorgailuak jasan dezakeen tentsiorik handiena baino handiagoa denean; bestela sorgailua hondatu egingo baita. Korronte-sorgailuak seriean konektatzean, bakoitzak tentsio osoaren zati bat baino ez du jasan beharko.

• Korronte-sorgailuak paraleloan

Korronte-sorgailu batzuk paraleloan konektatuta daudenean, korronte-sorgailu baliokide bakar batez ordezka daiteke paralelo-elkarketa. Kirchhoff-en korronteen legea aintzakotzat hartuz, korronte-sorgailuetako noranzkoen arabera, kasu desberdinak daude; horregatik, garrantzitsuena KKL ongi aplikatzea da. Hona hemen adibide pare bat:

paralelo-elkarketa:

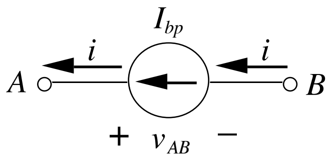


korronte-sorgailuen ekuazioak:

$i_1 = I_1$ eta $i_2 = I_2$

KKL: $i = i_1 + i_2 = I_1 + I_2$

korronte-sorgailu baliokidea:



korronte-sorgailuaren ekuazioa:

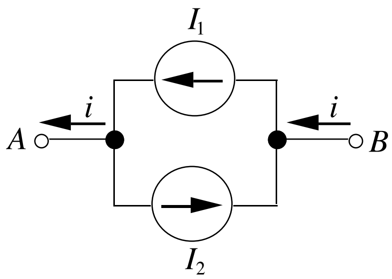
$i = I_{bp}$

Bi aldeetako ekuazioak berdinduz, honako emaitza hau lortzen da:

$$\boxed{I_{bp} = I_1 + I_2}$$

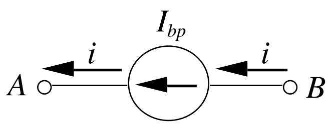
Oro har, korronte-sorgailu batzuk paraleloan daudenean, korronte-sorgailu bakar batez ordezka daitezke, baliokidearen balioa ordezkatutakoen batura algebraikoa izanik, guztien zeinuak kontuan hartuz. Hona hemen bigarren adibidea:

paralelo-elkarketa:



KKL: $i = I_1 - I_2$

korronte-sorgailu baliokidea:



korronte-sorgailuaren ekuazioa:

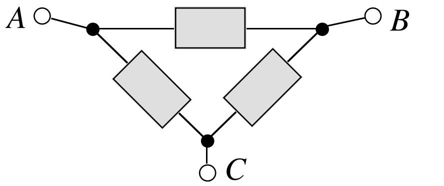
$i = I_{bp}$

Kasu honetan, honako emaitza hau lortzen da KKL aplikatuz: $I_{bp} = I_1 - I_2$.

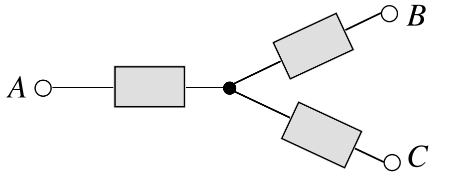
• Izar-triangelu bihurketa

Orain arte serie- eta paralelo-elkarketak baino ez ditugu hartu kontuan. Dena den, bi horiez gain, badago beste elkarketa-modu pare bat, arras arruntak direnak zirkuituetan: izar-elkarketa eta triangelu-elkarketa. Hauen ezaugarria, zirkuituko beste elementuekin hiru mutur lotuta izatea da, ondoko irudietan erakusten den legez.

triangelu-elkarketa:

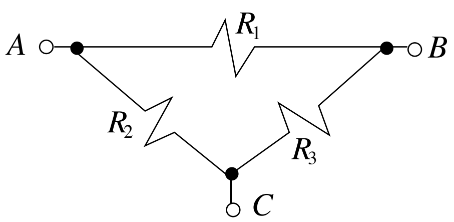


izar-elkarketa:

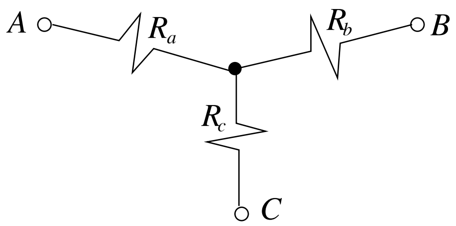


Hemen erresistentziek osaturiko izar- eta triangelu-elkarketak soilik aztertuko ditugu; bereziki, nola bilatu bestearen baliokidea, hau da, triangelu-elkarketa osatzen duten erresistentzien balioak emanda, nola kalkulatu izar-elkarketa baliokidearen balioak; eta alderantziz.

erresistentzien triangelu-elkarketa:

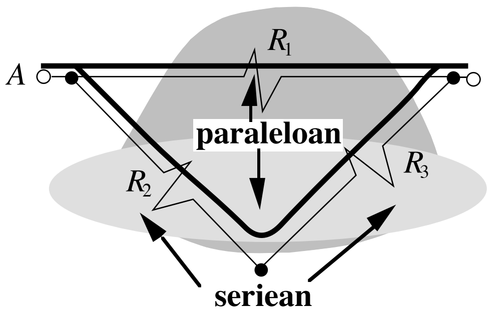


erresistentzien izar-elkarketa:

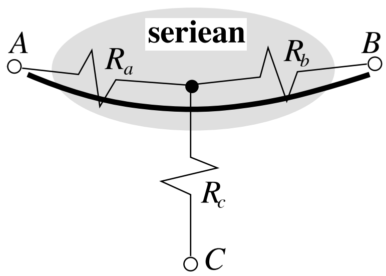


Bi elkarketak baliokideak izateko, edozein bi punturen arteko erresistentziak berdina izan behar du bi elkarketetan. Esate baterako, triangelu-elkarketan, *A* puntutik *B* puntura joateko, R_1 erresistentzia R_2 eta R_3 erresistentzien serie-elkarketarekin paraleloan aurkitzen dugu. Izar-elkarketan, ordea, R_a eta R_b erresistentziak seriean topatzen ditugu *A*-tik *B*-rako bidean, ondoko irudian erakusten den legez:

triangelu-elkarketan:



izar-elkarketan:



Berdin-berdin gertatzen da beste bi kasuetan. Matematikoki, honako hiru ekuazio hauek lortzen dira:

$$R_{AB}(\Delta) = \frac{R_1 \cdot (R_2 + R_3)}{(R_1 + R_2 + R_3)} = R_{AB}(\mathrm{Y}) = R_a + R_b$$

$$R_{BC}(\Delta) = \frac{R_3 \cdot (R_1 + R_2)}{(R_3 + R_1 + R_2)} = R_{BC}(\mathrm{Y}) = R_b + R_c$$

$$R_{AC}(\Delta) = \frac{R_2 \cdot (R_1 + R_3)}{(R_2 + R_1 + R_3)} = R_{AC}(\mathrm{Y}) = R_a + R_c$$

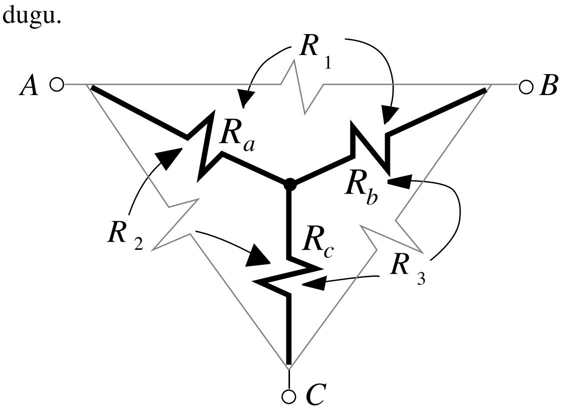
Hiru ekuazio horietatik bi elkarketen arteko baliokidetzak lor daitezke:

1) Triangelu-elkarketako erresistentzien balioak, R_1, R_2 eta R_3, ezagunak badira, izar--elkarketako erresistentzien balioak, R_a, R_b eta R_c, askatu behar dira horien funtzioan.

   Hona hemen lorturiko emaitzak:

   $$\boxed{R_a = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2 + R_3}} \qquad \boxed{R_b = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3}} \qquad \boxed{R_c = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3}}$$

   Oso erraza da emaitza hauek gogoratzea, zeren, elkarketen egiturei begiratuz gero, agerikoa baita izar- eta triangelu-elkarketen arteko erlazioa. Esate baterako, izar--elkarketako R_a kalkulatzeko, triangelu-elkarketan bere aldamenean dauden R_1 eta R_2-ren balioak biderkatu behar dira, eta ondoren triangelu-elkarketa osatzen duten hiru erresistentzien baturaz zatitu. Berdin-berdin egin behar da beste bi erresistentziak kalkulatzeko. Ondoren, triangelu-elkarketa izar-elkarketa baliokideaz ordezkatuko dugu.



2) Izar-elkarketako erresistentzien balioak, R_a, R_b eta R_c, ezagunak badira, triangelu--elkarketako erresistentzien balioak, R_1, R_2 eta R_3, askatu behar dira horien funtzioan.

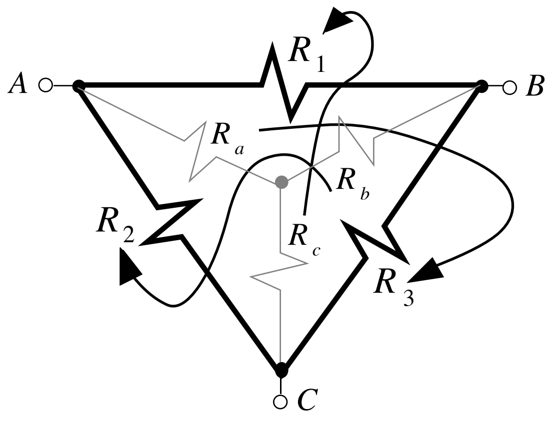
Hona hemen lorturiko emaitzak:

$$\boxed{R_1 = \frac{R_aR_b + R_aR_c + R_bR_c}{R_c}}$$

$$\boxed{R_2 = \frac{R_aR_b + R_aR_c + R_bR_c}{R_b}}$$

$$\boxed{R_3 = \frac{R_aR_b + R_aR_c + R_bR_c}{R_a}}$$

Lehen bezala oso erraza da emaitza hauek gogoratzea. Esate baterako, triangelu--elkarketako R_1 kalkulatzeko, izar-elkarketa osatzen duten hiru erresistentzien binakako biderkaduren batura kalkulatu behar da, eta ondoren izar-elkarketan R_1 erresistentziaren aurrean dagoen R_c erresistentziaz zatitu. Berdin-berdin egin behar da beste bi erresistentziak kalkulatzeko. Ondoren, izar-elkarketa triangelu-elkarketa baliokideaz ordezkatuko dugu.



• Erresistentzia-elkarketa konplexu baten erresistentzia baliokidea bilatzeko urratsak

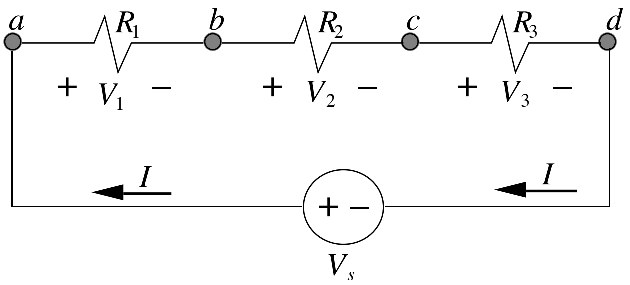
Erresistentzia-multzo baten erresistentzia baliokidea bilatzea honetan datza: erresistentzia-multzoa "sinplifikatu" behar da, oinarrizko elkarketak —seriea, paraleloa, izarra eta triangelua— aurkitu eta hauei dagozkien "baliokide partzialak" ordezkatuz; prozesu honi behin eta berriro ekin behar zaio, erresistentzia bakar bat lortu arte.

Ahal den neurrian, beti hasiko gara zirkuitua "sinplifikatzen", lehenengo gainbegirada batean antzematen diren elkarketa sinpleetatik abiatuta, antzematen zailagoak direnak gerorako utziz.

• Tentsio-zatitzailea

Erresistentzien serie-elkarketari deritzo tentsio-zatitzailea, erresistentzia bakoitzaren muturren artean elkarketari ezarritako tentsio osoaren zati bat baino ez baita agertzen. Ikus dezagun hori adibide baten bitartez.

Demagun irudiko zirkuituan seriean konektaturiko erresistentzia guztien tentsioak kalkulatu nahi ditugula.



Horretarako, lehendabizi, zirkuitutik igarotzen den korrontea kalkulatu behar da, KTL eta Ohm-en legea aplikatuz:

KTL: $V_s = V_1 + V_2 + V_3$ Ohm: $V_1 = R_1 I,\ V_2 = R_2 I,\ V_3 = R_3 I$

Ondorioz:

$$I = \frac{V_s}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{V_s}{R_{bs}}$$

eta ondoren, berriro ere erresistentzia bakoitzari Ohm-en legea aplikatuz:

$$V_1 = \frac{R_1}{R_{bs}} \cdot V_s, \quad V_2 = \frac{R_2}{R_{bs}} \cdot V_s, \quad V_3 = \frac{R_3}{R_{bs}} \cdot V_s$$

Serie-elkarketaren erresistentzia baliokidearen balioa, elkarketa osatzen duten erresistentzien balioen batura izanik, serie-elkarketan dauden erresistentzia guztiak baino handiagoa izango da beti. Hots, $R_{bs} > R_i$. Hori dela eta, aurreko adierazpenetan agerikoa da $V_i < V_s$ dela; beraz, elkarketari ezarritako tentsio osoa erresistentzien artean banatu da, hainbat "zatitan".

Oro har, tentsio-zatitzaileko erresistentzien muturren arteko tentsioa honelaxe kalkulatzen da:

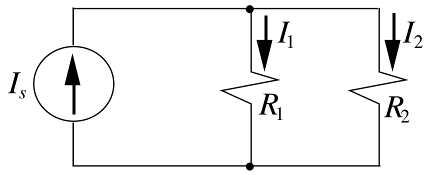
$$\boxed{V_i = \frac{R_i}{R_{bs}} \cdot V_s}$$

Adierazpen horretatik ondorioztatzen da, tentsiorik altuena erresistentziarik handienean izango dela, tentsioa erresistentziaren zuzenki proportzionala baita.

• Korronte-zatitzailea

Erresistentzien paralelo-elkarketari deritzo korronte-zatitzailea, erresistentzia bakoitzetik elkarketari bidalitako korronte osoaren zati bat baino ez baita igarotzen. Ikus dezagun hori adibide baten bitartez.

Demagun irudiko zirkuituan paraleloan konektaturiko bi erresistentzietatik igarotzen diren korronteak kalkulatu nahi ditugula.



Horretarako, KKL eta Ohm-en legea aplikatu behar dira:

KKL: $I_s = I_1 + I_2$ Ohm: $V_1 = R_1 I_1$, $V_2 = R_2 I_2$

eta, paraleloan egonik, KTL aplikatzearen ondorioz $V_1 = V_2$ dela kontuan hartuz, orduan:

$$\boxed{I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot I_s} \qquad \boxed{I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot I_s}$$

Bi adierazpen hauetan, agerikoa da zatitzailea ($R_1 + R_2$) zatikizunak (R_1 edo R_2) baino handiagoa dela. Hori dela eta, $I_i < I_s$ izango da; beraz, paralelo-elkarketara bidalitako korronte osoa erresistentzien artean banatu da, hainbat "zatitan".

Oro har, Ohm-en legea dela eta, adar batetik igarotzen den korrontea adarreko erresistentziaren alderantziz proportzionala denez gero, bi adarrek osaturiko korronte-zatitzailearen kasuan, goiko adierazpenen arabera, adar bakoitzetik igarotzen den korrontea beste adarreko erresistentziaren zuzenki proportzionala da.

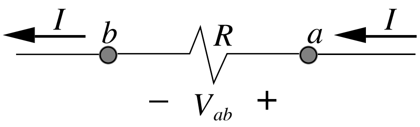
Adierazpen horietatik ondorioztatzen da, korronterik handiena erresistentziarik txikienetik igaroko dela; eta, alderantziz, korronterik txikiena erresistentziarik handienetik.

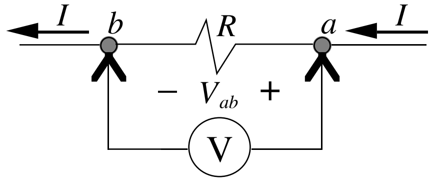
• Tentsio- eta korronte-neurketak: voltmetroa eta anperemetroa

Askotan, zirkuitu baten soluzio teorikoa bilatu ordez edo bilatzeaz gain, beharrezkoa izaten da zirkuitu fisikoaren gainean hainbat neurketa egitea, zirkuituaren benetako egoera (korronteak eta tentsioak) lortzeko. Behar hori dela eta, korronteak eta tentsioak neurtzeko erabiltzen diren neurgailuei buruz gutxieneko ezagutza edukitzea komeni da. Hona hemen, bada, neurgailu horiei buruzko zenbait xehetasun.

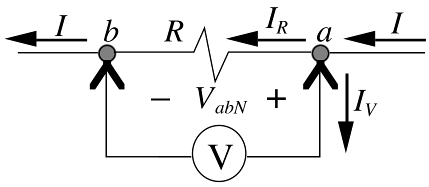
Voltmetroa:

Tentsioa neurtzeko, voltmetroa erabiltzen da (gogoratu tentsioaren unitatea volt izenekoa dela, hain zuzen ere). Tentsio elektrikoa bi punturen artean dagoen potentzial-diferentzia denez gero, voltmetroa bi puntu horien artean konektatu behar da, bertan dagoen elementuarekin paraleloan, ondoko irudian erakusten den legez.

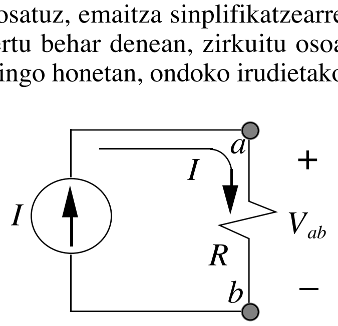




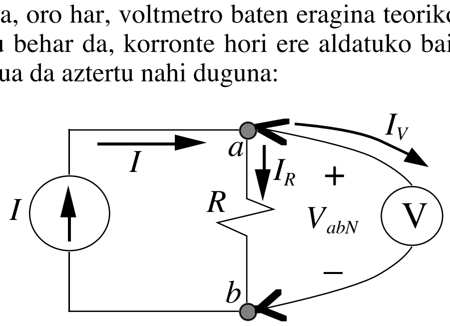
Irudian agerikoa da, voltmetroa konektatzean zirkuitua zertxobait aldatu dela, *a* eta *b* puntuen artean dagoen *R* erresistentziatik igarotzen den korrontea dela kausa, hain zuzen ere; bi kasu horietan adar horretatik *I* korrontea igarotzen dela suposatzen badugu, orduan voltmetroa konektatu gabe, erresistentziatik *I* korrontea igarotzen da; baina voltmetroa erresistentziarekin paraleloan konektatu ondoren, korronte-zatitzailearen antzeko egitura bat sortu denez gero, *I* korronte osoa bi zatitan banatuko da: zati bat erresistentziatik igaroko da, eta beste zatia, voltmetrotik. Korronte-aldaketa hori dela kausa, *a* eta *b* puntuen arteko tentsioa ere zertxobait aldatuko da; demagun tentsio berria V_{abN} dela.



Voltmetroa konektatzearen ondorioz zirkuituak eta neurtu nahi den tentsioak nozitzen duten eragina aztertzeko, ikus dezagun zein den tentsioaren balio teorikoaren (voltmetrorik gabekoa) eta errealaren (voltmetroak neurtutakoa, hain zuzen ere) arteko diferentzia; edo, beste hitzetan esanda, azter dezagun zenbatekoa izango den neurketaren errorea. Horretarako, aurreko bi zirkuituetan kalkuluak egiteko, Ohm-en eta Kirchhoff--en legeak erabiliko ditugu, beti ere bi kasuetan *I* korrontea konstante mantentzen dela suposatuz, emaitza sinplifikatzearren. Baina, oro har, voltmetro baten eragina teorikoki aztertu behar denean, zirkuitu osoa aztertu behar da, korronte hori ere aldatuko baita. Oraingo honetan, ondoko irudietako zirkuitua da aztertu nahi duguna:



Ohm: $V_{ab} = RI$



Ohm: $V_{abN} = RI_R$

KKL: $I = I_R + I_V$

Voltmetroaren eredua R_V erresistentzia bat dela suposatuz, voltmetroa duen zirkuituari dagozkion ekuazioak idatz ditzakegu:

Ohm-en legea voltmetroan: $V_{abN} = R_V I_V \;\rightarrow\; I = \dfrac{V_{abN}}{R} + \dfrac{V_{abN}}{R_V} \;\rightarrow\; I = V_{abN} \cdot \left(\dfrac{R + R_V}{R \cdot R_V} \right)$

$$\rightarrow \quad V_{abN} = I \cdot \left(\frac{R \cdot R_V}{R + R_V} \right)$$

Orain, neurtutako tentsioaren errore absolutua honelaxe kalkula dezakegu:

$$\Delta V_{ab} = V_{abN} - V_{ab} = IR\left(\frac{R_V}{R + R_V} \right) - IR = IR\left(-\frac{R}{R + R_V} \right)$$

$$\boxed{\Delta V_{ab} = \left(-\frac{R}{R + R_V} \right) \cdot V_{ab}}$$

Minus ikurrak, neurtutako balioa beti balio teorikoa baino txikiagoa izango dela adierazten du.

Orain errore erlatiboa honelaxe kalkula dezakegu:

$$\boxed{\varepsilon_{V_{ab}} = \frac{\Delta V_{ab}}{V_{ab}} = -\frac{R}{R + R_V}}$$

Azter ditzagun kasu jakin batzuk, neurketa-errorearen eragina zenbaterainokoa izan daitekeen argitzeko.

a) Demagun $R_V = R$ dela. Hau da, voltmetroaren erresistentzia zirkuituan dagoenaren berdina.

Errore absolutua: $\Delta V_{ab} = -0{,}5 V_{ab} \;\rightarrow\; V_{abN} = 0{,}5 V_{ab}$

hau da, neurtutako tentsioa teorikoki neurtu beharko litzatekeenaren erdia da!

Errore erlatiboa: $\varepsilon_{V_{ab}} = -0{,}5 \;\rightarrow\; \left| \varepsilon_{V_{ab}} \right| = \%50$

errore hori handiegia denez, onartezina da!

b) Demagun $R_V = 1000R$ dela. Hau da, voltmetroaren erresistentzia zirkuituan dagoena baino mila aldiz handiagoa.

Errore absolutua: $\Delta V_{ab} \cong -0{,}001 V_{ab} \;\rightarrow\; V_{abN} = 0{,}999 V_{ab}$

hau da, neurtutako tentsioa teorikoki neurtu beharko litzatekeenaren ia-ia berdina da.

Errore erlatiboa: $\varepsilon_{V_{ab}} \cong -0{,}001 \;\rightarrow\; \left| \varepsilon_{V_{ab}} \right| = \%0{,}1;$

errore hori onargarria da.

Adibide horietatik honako hau ondorioztatzen da: neurketa-errorea onargarria izango bada, voltmetroaren erresistentzia baliokideak zirkuituan dagoena baino askoz handiagoa izan behar du. Oro har, hauxe esan daiteke: voltmetroek erresistentzia handiko tresnak izan behar dute, neurketa-errorea ahalik eta txikiena izan dadin.

Idealki, voltmetroaren erresistentzia baliokideak infinitua izan beharko luke; modu horretan, voltmetroa zirkuitu irekiaren berdina izango litzateke eta bertatik ez litzateke korronterik igaroko, zirkuituaren gaineko eragina nulua izanik. Hots, errore absolutua eta errore erlatiboa nuluak izango lirateke:

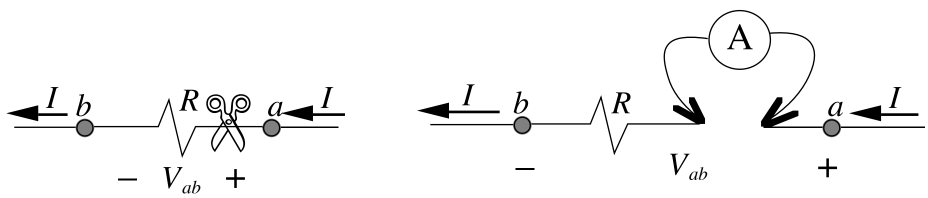
errore absolutua (ideala): $$\Delta V_{ab} = \left(-\frac{R}{R+R_V}\right)\cdot V_{ab} = \left(-\frac{R}{R+\infty}\right)\cdot V_{ab} = 0$$

errore erlatiboa (ideala): $$\varepsilon_{V_{ab}} = -\frac{R}{R+R_V} = -\frac{R}{R+\infty} = 0$$

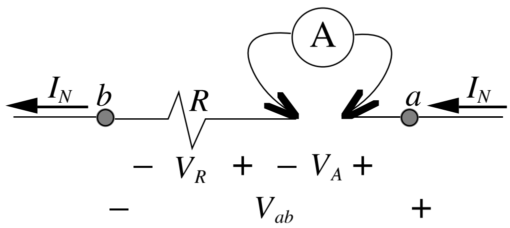
Anperemetroa:

Korrontearen intentsitatea neurtzeko anperemetroa erabiltzen da (gogoratu korrontearen unitatea anperea dela, hain zuzen ere). Korronte elektrikoa puntu batetik bestera igarotzen denez gero, anperemetroa korrontearen bidean ipini behar da, neurtu nahi den korrontea bere barnetik igaro dadin.

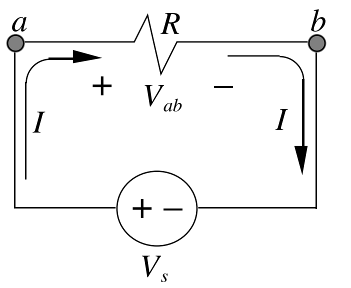
Hori dela eta, anperemetroa beti bi punturen artean konektatu behar da seriean, ondoko irudian erakusten den legez. Anperemetroa konektatu ahal izateko, beraz, beharrezkoa da lehendabizi korrontearen bidea "moztea" edo "irekitzea", lotuta dauden bi puntuak askatuz, ibilbidean anperemetroa sartu ahal izateko, askatu diren bi puntuen artean hain zuzen ere.



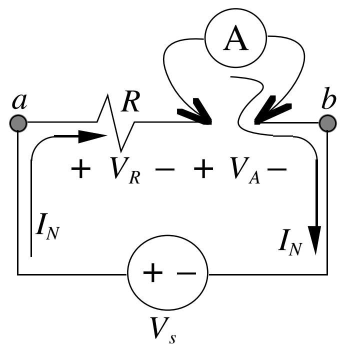
Irudian agerikoa da anperemetroa konektatzean zirkuitua zertxobait aldatu dela, *a* eta *b* puntuen artean dagoen *R* erresistentziaren muturren arteko tentsioa dela kausa, hain zuzen ere; bi kasu horietan adar horren muturren arteko tentsioa V_{ab} dela suposatzen badugu, orduan anperemetroa konektatu gabe, erresistentziaren muturren artean V_{ab} tentsioa dago; baina anperemetroa erresistentziarekin seriean konektatu ondoren, tentsio-zatitzailearen antzeko egitura bat sortu denez gero, V_{ab} tentsio osoa bi zatitan banatuko da: zati bat erresistentziaren muturren artean agertuko da, eta beste zatia, anperemetroarenetan. Tentsio-aldaketa hori dela kausa, *a* puntutik *b* puntura igarotzen den korrontea ere zertxobait aldatuko da; demagun korronte berria I_N dela.



Anperemetroa konektatzearen ondorioz zirkuituak eta neurtu nahi den korronteak nozitzen duten eragina aztertzeko, ikus dezagun zein den korrontearen balio teorikoaren (anperemetrorik gabekoa) eta errealaren (anperemetroak neurtutakoa, hain zuzen ere) arteko diferentzia; edo, beste hitzetan esanda, azter dezagun zenbatekoa izango den neurketaren errorea. Horretarako, aurreko bi zirkuituetan kalkuluak egiteko, Ohm-en eta Kirchhoff-en legeak erabiliko ditugu, beti ere bi kasuetan V_{ab} tentsioa konstante mantentzen dela suposatuz, emaitza sinplifikatzearren. Baina, oro har, anperemetro baten eragina teorikoki aztertu behar denean, zirkuitu osoa aztertu behar da, tentsio hori ere aldatuko baita. Oraingo honetan, ondoko irudietako zirkuitua da aztertu nahi duguna:



Ohm: $V_s = IR$



Ohm: $V_R = I_N R$

KTL: $V_s = V_R + V_A$

Anperemetroaren eredua R_A erresistentzia bat dela suposatuz, anperemetroa duen zirkuituari dagozkion ekuazioak idatz ditzakegu:

Ohm-en legea anperemetroan: $V_A = R_A I_N \quad \rightarrow \quad V_s = RI_N + R_A I_N$

$$\rightarrow \quad V_s = (R + R_A) I_N \quad \rightarrow \quad I_N = \frac{V_s}{R + R_A}$$

Orain, neurtutako korrontearen errore absolutua honelaxe kalkula dezakegu:

$$\Delta I = I_N - I = \frac{V_s}{R + R_A} - \frac{V_s}{R} = \frac{V_s}{R} \cdot \left(-\frac{R_A}{R + R_A} \right)$$

$$\boxed{\Delta I = \left(-\frac{R_A}{R+R_A}\right)\cdot I}$$

Minus ikurrak, neurtutako balioa beti balio teorikoa baino txikiagoa izango dela adierazten du.

Orain errore erlatiboa honelaxe kalkula dezakegu:

$$\boxed{\varepsilon_I = \frac{\Delta I}{I} = -\frac{R_A}{R+R_A}}$$

Azter ditzagun orain kasu jakin batzuk, neurketa-errorearen eragina zenbaterainokoa izan daitekeen argitzeko.

a) Demagun $R_A = R$ dela. Hau da, anperemetroaren erresistentzia zirkuituan dagoenaren berdina

Errore absolutua: $\Delta I = -0,5I \rightarrow I_N = 0,5I$

hau da, neurtutako korrontea teorikoki neurtu beharko litzatekeenaren erdia da!

Errore erlatiboa: $\varepsilon_I = -0,5 \rightarrow |\varepsilon_I| = \%50$!!!

errore hori handiegia denez, onartezina da!

b) Demagun $R_A = 0,001R$ dela, hau da anperemetroaren erresistentzia zirkuituan dagoena baino mila aldiz txikiagoa;

Errore absolutua: $\Delta I \cong -0,001I \rightarrow I_N = 0,999I$

hau da, neurtutako korrontea teorikoki neurtu beharko litzatekeenaren ia-ia berdina da!

Errore erlatiboa: $\varepsilon_I \cong -0,001 \rightarrow |\varepsilon_I| = \%0,1$

errore hori onargarria da.

Adibide hauetatik honako hau ondorioztatzen da: neurketa-errorea onargarria izango bada, anperemetroaren erresistentzia baliokideak, zirkuituan dagoena baino askoz txikiagoa izan behar du. Oro har, hauxe esan daiteke: anperemetroek erresistentzia txikiko tresnak izan behar dute, neurketa-errorea ahalik eta txikiena izan dadin.

Idealki, anperemetroaren erresistentzia baliokideak zero izan beharko luke; modu horretan, anperemetroa zirkuitulaburraren berdina izango litzateke, eta bere muturren arteko tentsioa zero izango litzateke, zirkuituaren gaineko eragina nulua izanik. Hots, errore absolutua eta errore erlatiboa nuluak izango lirateke:

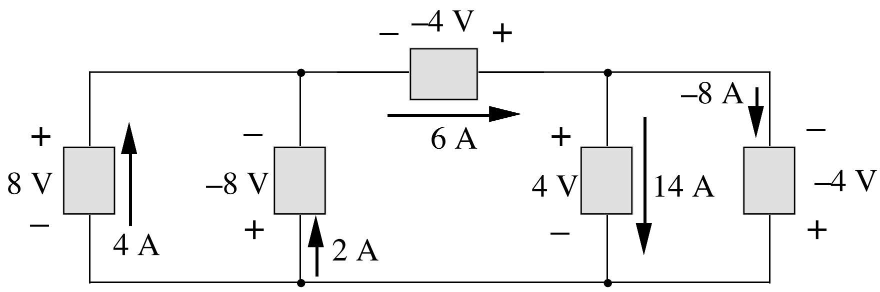
errore absolutua (ideala): $\Delta I = -\frac{R_A}{R+R_A} I = -\frac{0}{R+0} I = 0$

errore erlatiboa (ideala): $\varepsilon_I = -\frac{R_A}{R+R_A} = -\frac{0}{R+0} = 0$

B) Ariketa ebatziak

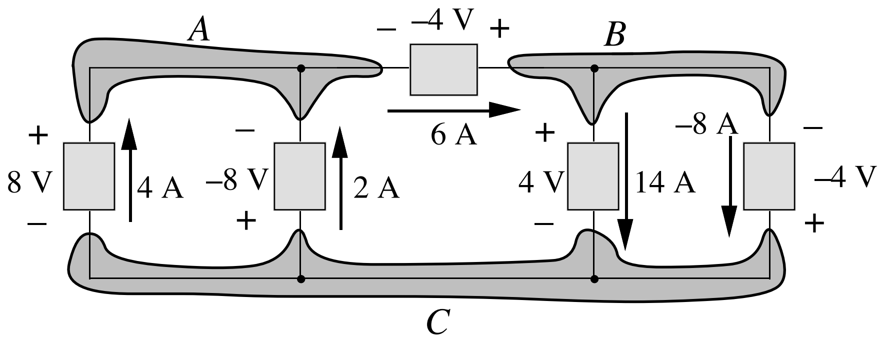
3.1. Kirchhoff-en legeak

1. Egiazta ezazu ondoko zirkuituan Kirchhoff-en legeak betetzen direla.

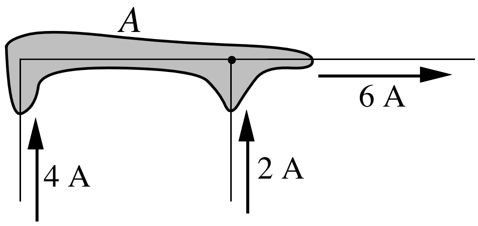


Ebazpena:

Lehenik eta behin, Kirchhoff-en korronteen legea (KKL) aplikatu ahal izateko, zirkuituko korapiloak bilatu behar dira. Hona hemen:



Ikus dezagun orain nola betetzen den KKL legea hiru korapilo horietan:



KKL *A* korapiloan:

korapilora iritsi = 4 A eta 2 A

korapilotik irten = 6 A

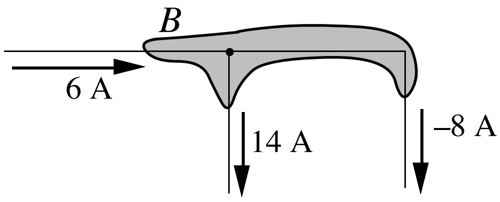
$$4\text{ A} + 2\text{ A} \equiv 6\text{ A}$$

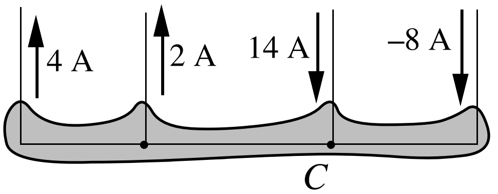
KKL B korapiloan:

korapilora iritsi = 6 A

korapilotik irten = 14 A eta (–8 A)

$$6\text{ A} \equiv 14\text{ A} + (-8\text{ A})$$





KKL C korapiloan:

korapilora iritsi = 14 A eta (–8 A)

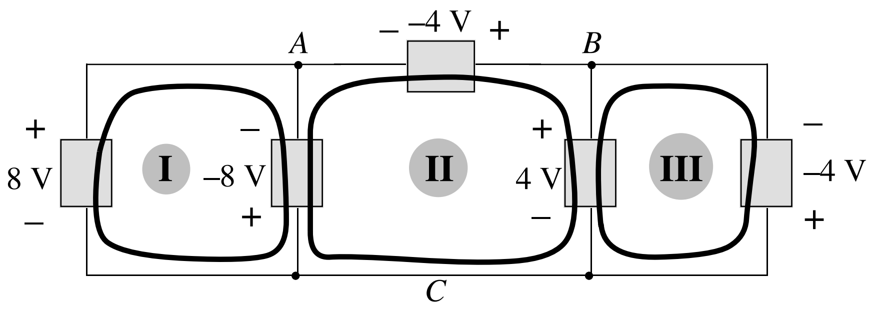
korapilotik irten = 4 A eta 2 A

$$14\text{ A} + (-8\text{ A}) \equiv 4\text{ A} + 2\text{ A}$$

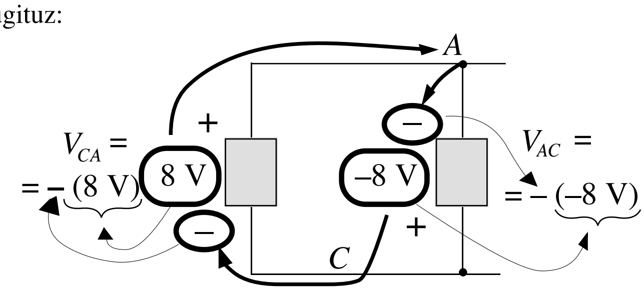
Beraz, KKL zirkuituko hiru korapiloetan betetzen dela frogatu dugu dagoeneko.

Azter dezagun orain ea zirkuituko ibilbide itxi guztietan Kirchhoff-en tentsioen legea (KTL) betetzen den. Horretarako, maila guztiak aztertuko ditugu banan-banan, beste begiztetako ekuazioak mailen ekuazioen konbinazio linealak izango baitira.

Ondoko irudian, zirkuitu honetako mailak ageri dira, hiru guztira.

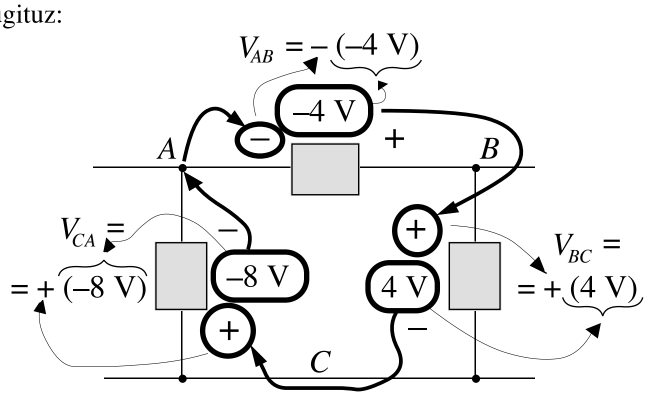


KTL I mailan: A - C - A ibilbidea, A abiapuntutzat hartuz eta erlojuaren orratzen noranzkoan mugituz:



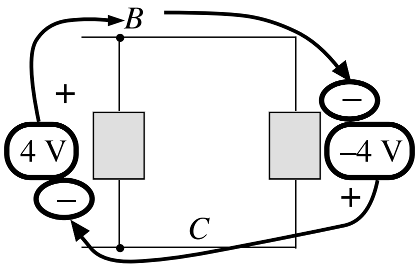
$$\sum_i v_i^I = V_{AC} + V_{CA} = 0 \quad \rightarrow \quad [-(-8\text{ V})] + [-(8\text{ V})] \equiv 0$$

KTL II mailan: *A* - *B* - *C* - *A* ibilbidea, *A* abiapuntutzat hartuz eta erlojuaren orratzen noranzkoan mugituz:



$$\sum_i v_i^{II} = V_{AB} + V_{BC} + V_{CA} = 0 \quad \rightarrow \quad [-(-4\text{ V})] + [+(4\text{ V})] + [+(-8\text{ V})] \equiv 0$$

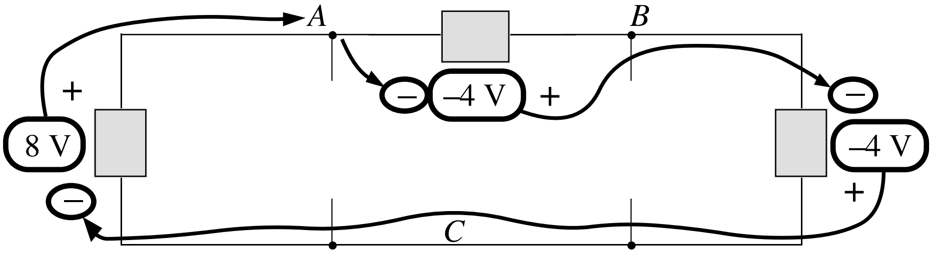
KTL III mailan: *B* - *C* - *B* ibilbidea, *B* abiapuntutzat hartuz eta erlojuaren orratzen noranzkoan mugituz:



$$\sum_i v_i^{III} = V_{BC} + V_{CB} = 0 \quad \rightarrow \quad [-(-4\text{ V})] + [-(4\text{ V})] \equiv 0$$

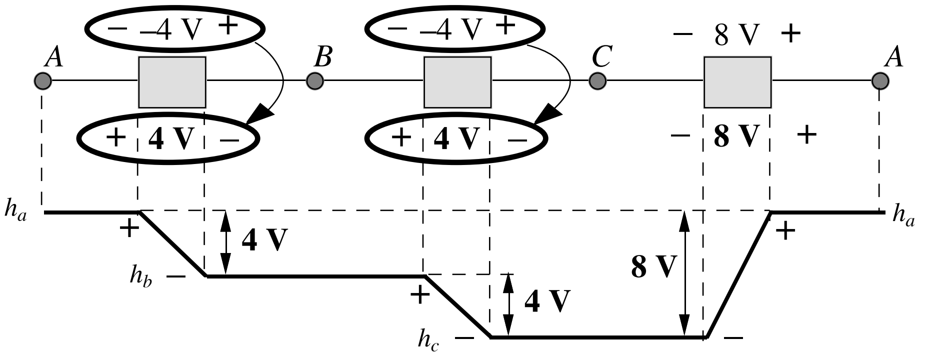
Beraz, KTL zirkuituko hiru mailetan betetzen dela frogatu dugu dagoeneko.

Orain, maila ez den beste ibilbide itxi bat, begizta bat alegia, aintzat hartuko dugu, bertan ere KTL betetzen dela egiaztatzeko. Adibide gisa, kanpoko begizta hartuko dugu:

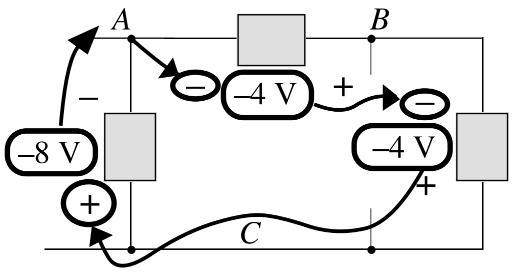


$$V_{AB} + V_{BC} + V_{CA} = 0 \quad \rightarrow \quad [-(-4\text{ V})] + [-(-4\text{ V})] + [-(8\text{ V})] \equiv 0$$

Grafikoki, honelaxe ikus daiteke zirkuitu honetako hiru korapiloen "altueren" arteko erlazioa (potentzial-diferentziak, alegia):



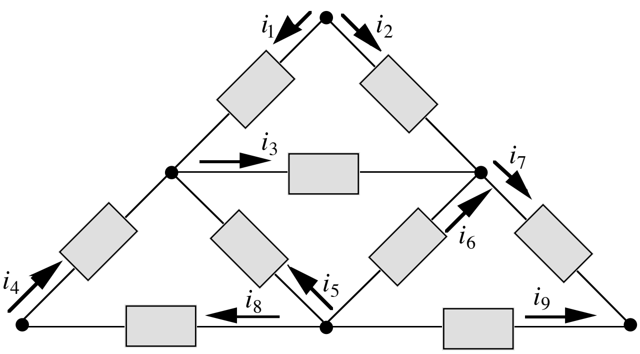
Beste edozein begizta aintzat hartuz gero ere, KTL betetzen dela ikus dezakegu:



2. Ondoko zirkuituan honako adar-korronte hauek ezagunak dira:

$$i_1 = 2\text{ A},\ i_3 = 1\text{ A},\ i_7 = 2\text{ A eta }\ i_8\ = 3\text{ A}.$$

Kalkula ote daitezke ezagutzen ez diren beste adar-korronte guztiak, Kirchhoff-en korronteen legearen bidez? Kalkula itzazu ahal diren balio guztiak; eta adar-korronteren bat kalkulatzerik ez dagoenean, esan zer datu beharko litzatekeen hori kalkulatu ahal izateko.



Ebazpena:

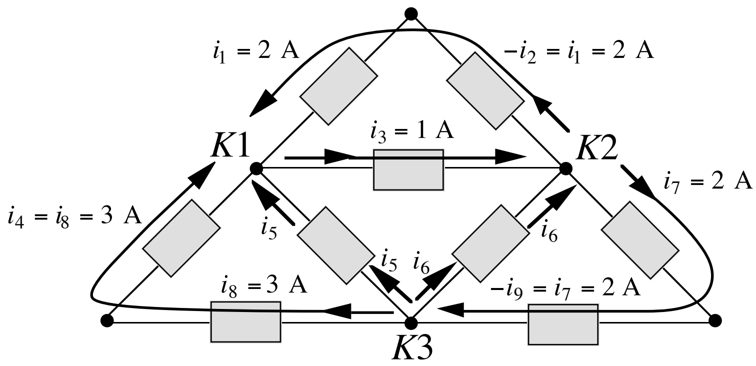
Egindako galderari —ea ezagutzen ez diren korronte guztiak kalkula daitezkeen, alegia— erantzuna eman ahal izateko, lehendabizi ezezagunen kopurua eta zirkuitutik lor daitezkeen ekuazioak (KKL aplikatuz) alderatu behar dira.

Ezezagunen kopurua kalkulatzeko, nahikoa dugu zirkuitua aztertzearekin: zirkuituan bederatzi adar daudenez gero, bederatzi adar-korronte daude: i_1, i_2, ..., i_9. Baina horiek guztiak ez dira ezezagunak, $i_1 = 2$ A, $i_3 = 1$ A, $i_7 = 2$ A eta $i_8 = 3$ A lau adar-korronteak ezagutzen baititugu. Beraz, bost dira ezezagunak: i_2, i_4, i_5, i_6 eta i_9.

Ekuazio-kopurua zein den jakiteko, zirkuituaren korapiloak bilatu behar dira, korapilo adina aldiz aplikatu behar baita KKL. Lehenengo begirada batean antzematen da, gure definizioaren arabera triangeluaren hiru erpinak ez direla korapiloak, bertan bi elementu baino ez baitira elkartzen. Dena den, KKL legea bertan ere betetzen da. Hori dela eta, honako hiru berdintza hauek ondorioztatzen dira hiru erpinetan:

$$i_2 = -i_1, \qquad i_9 = -i_7, \qquad i_4 = i_8$$

Beraz: $i_2 = -2$ A, $i_9 = -2$ A eta $i_4 = 3$ A. Ondorioz, bi korronte dira ezezagunak: i_5 eta i_6.



Zirkuituak hiru korapilo dituenez gero ($K1$, $K2$ eta $K3$), KKL bi korapilotan soilik aplikatu behar dugu, modu horretan bi ekuazio lortuko direlarik, hirugarren korapiloari dagokion ekuazioa beste bien konbinazio lineala izango baita. Beraz, ezagutzen ez diren bi korronte horiek kalkulatzeko, $K1$ eta $K2$ korapiloetan aplikatuko dugu KKL:

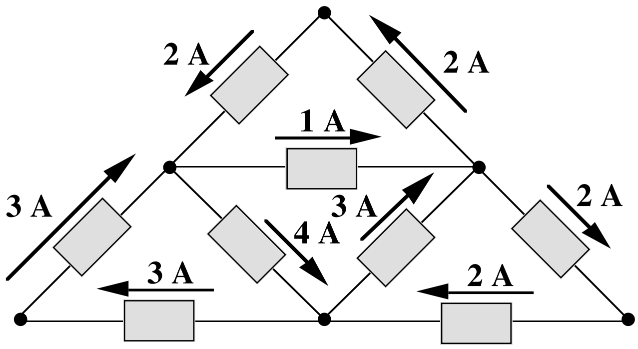
KKL $K1$ korapiloan: $i_1 + i_5 + i_8 = i_3 \;\rightarrow\; 2\text{ A} + i_5 + 3\text{ A} = 1\text{ A} \;\rightarrow\; i_5 = -4\text{ A}$

KKL $K2$ korapiloan: $i_1 + i_7 = i_3 + i_6 \;\rightarrow\; 2\text{ A} + 2\text{ A} = 1\text{ A} + i_6 \;\rightarrow\; i_6 = 3\text{ A}$

Orain, KKL $K3$ korapiloan aplika dezakegu, lorturiko balioak egiaztatzeko:

KKL $K3$ korapiloan: $i_6 + i_5 + i_8 = i_7 \;\rightarrow\; 3\text{ A} + (-4\text{ A}) + 3\text{ A} \equiv 2\text{ A}$ (egiaztapena)

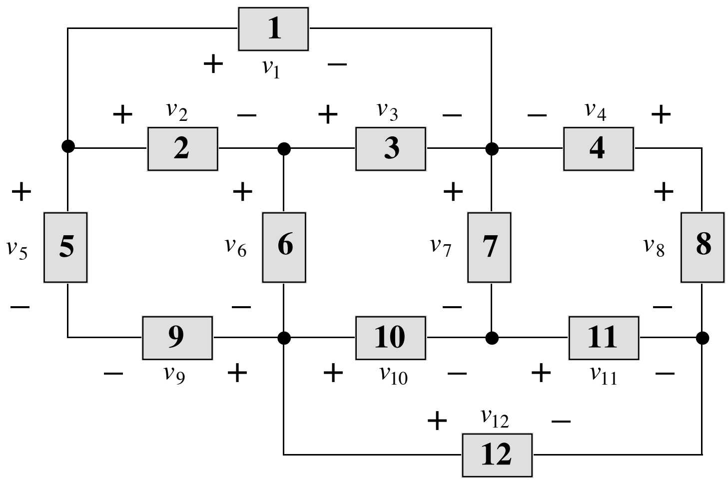
Ondoko irudian ageri dira zirkuituko adar guztietatik igarotzen diren korronteak:



3. Ondoko zirkuituan honako tentsio hauek ezagunak dira:

$v_1 = -3$ V, $v_3 = 2$ V, $v_4 = 8$ V, $v_5 = 10$ V, $v_6 = 5$ V eta $v_8 = -3$V.

Kalkula ote daitezke ezagutzen ez diren beste tentsio guztiak, Kirchhoff-en tentsioen legearen bidez? Kalkula itzazu ahal diren balio guztiak; eta tentsioren bat kalkulatzerik ez dagoenean, esan zer datu beharko litzatekeen tentsio hori kalkulatu ahal izateko.

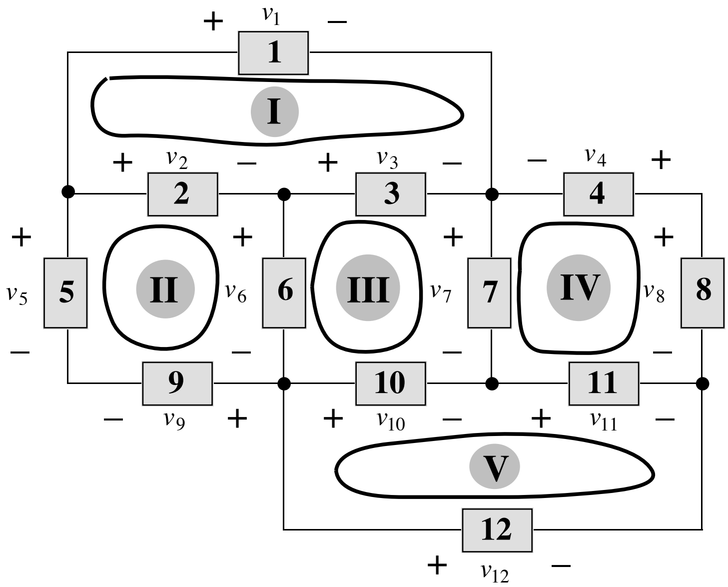


Ebazpena:

Egindako galderari —ea ezagutzen ez diren tentsio guztiak kalkula daitezkeen, alegia— erantzuna eman ahal izateko, lehendabizi ezezagunen kopurua eta zirkuitutik lor daitezkeen ekuazioak (KTL aplikatuz) alderatu behar dira.

Ezezagunen kopuruari dagokionez, nahikoa dugu zirkuitua aztertzearekin: zirkuituan hamabi tentsio agertzen dira: v_1, v_2, ..., v_{12}. Baina horietatik, sei ezagunak dira. Beraz, sei dira ezezagunak: v_2, v_7, v_9, v_{10}, v_{11} eta v_{12}.

Ekuazio-kopuruari dagokionez, jakin badakigu gehienez ere *MK* ekuazio independente lor daitezkeela KTL aplikatuz, *MK* delakoa maila guztien kopurua izanik. Hori dela eta, lehendabizi zirkuituko mailak bilatu behar dira:



Irudian agerikoa denez, zirkuitu honetan bost maila baino ez dago. Hori dela eta, gehienez ere bost ekuazio lor daitezke KTL aplikatuz. Agerikoa da, beraz, ezinezkoa dela ezagutzen ez diren tentsio guztiak kalkulatzea, behar adina ekuaziorik ez baitago.

Aplika dezagun KTL zirkuituko bost mailetan eta ikus dezagun zein tentsio kalkula daitezkeen:

KTL I mailan: $v_1 = v_2 + v_3 \quad \rightarrow \quad (-3\text{ V}) = v_2 + 2\text{ V} \quad \rightarrow \quad v_2 = -5\text{ V}$

KTL II mailan: $v_9 = -v_6 - v_2 + v_5 \quad \rightarrow \quad v_9 = -(5\text{ V}) - (-5\text{ V}) + 10\text{ V} = 10\text{ V}$

KTL III mailan: $v_7 - v_{10} = -v_3 + v_6 \quad \rightarrow \quad v_7 - v_{10} = -(2\text{ V}) + 5\text{ V} = 3\text{ V}$

KTL IV mailan: $v_7 + v_{11} = -v_4 + v_8 \quad \rightarrow \quad v_7 + v_{11} = -(8\text{ V}) + (-3\text{ V}) = -11\text{ V}$

KTL V mailan: $v_{12} = v_{10} + v_{11}$

Lehenengo bi ekuazioetatik, bi tentsio kalkulatu ditugu zuzen-zuzenean. Beste hiru ekuazioetatik, ordea, tentsio bakar bat lor daiteke:

III mailako ekuaziotik: $v_{10} = v_7 - 3\text{ V}$; IV mailako ekuaziotik: $v_{11} = -11\text{ V} - v_7$

V mailako ekuazioan ordezkatuz: $v_{12} = (v_7 - 3\text{ V}) + (-11\text{ V} - v_7) = -14\text{ V}$

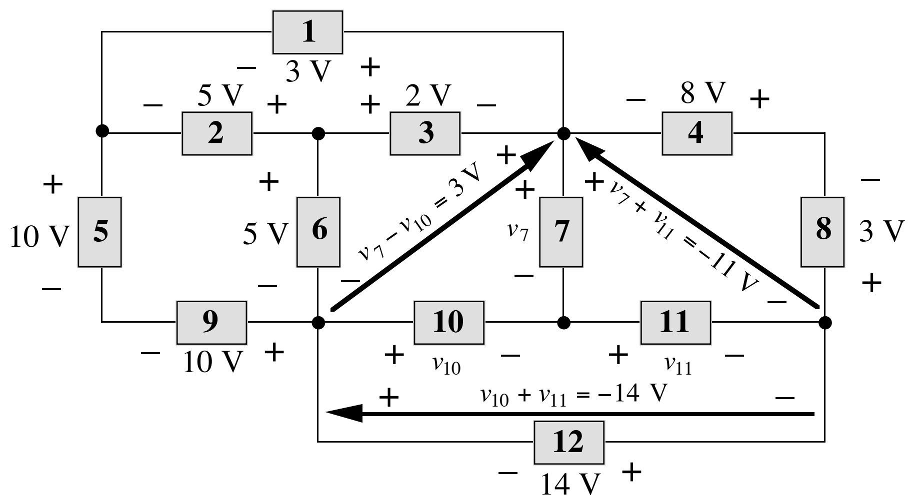
Dagoeneko, sei ezezagunetatik hiru kalkulatu ditugu. Kalkulatzeke dauden beste hiru tentsioak ezin ditugu kalkulatu, ordea, ekuazio bat falta zaigulako. Hau da, beti hiru horietatik tentsio bat ezezaguna izango denez gero, egin dezakegun gauza bakarra honako hau da: bi tentsio bestearen funtzioan idatzi. Honelaxe, esate baterako:

III mailako ekuaziotik: $v_{10} = v_7 - 3\ \text{V}$

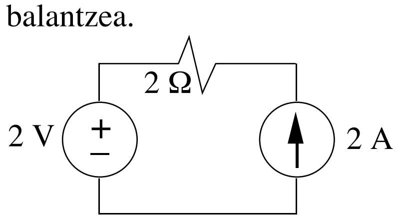
IV mailako ekuaziotik: $v_{11} = -11\ \text{V} - v_7$

Beti ere suposatuz v_7 dela kalkulatu ezin daitekeena.

Bukatzeko, honelaxe geratzen da zirkuitua:

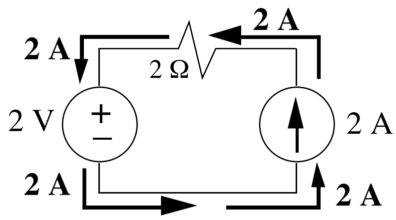


4. Analiza ezazu ondoko irudiko zirkuitua, Kirchhoff-en legeak eta elementuen ekuazioak besterik ez erabiliz. Emaitza egiaztatzeko, egin ezazu potentzien balantzea.



Ebazpena:

Zirkuitu hau analizatzeko, ondoko atalean landuko dugun ebazpidea erabil daitekeen arren, begi-bistakoa da oso zirkuitu sinplea dela: hiru osagaiak seriean daudenez gero, ez dago korapilorik (gure definizioaren arabera, behinik behin) eta hiru osagaietatik korronte-intentsitate bera igarotzen da, korronte-sorgailuak finkatzen duena, hain zuzen ere, ondoko irudian erakutsi den legez. (Gogoratu Kirchhoff-en korronteen legea, KKL, bi elementu elkartzen direneko puntuetan aplikatzean ondorioztatzen dela hori.)

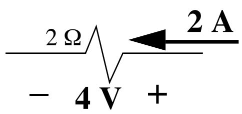


Gogora dezagun zertan datzan zirkuitu bat analizatzea: zirkuituko osagai guztietako tentsioak eta korronteak kalkulatzean, hain zuzen ere. Beraz, dagoeneko, tentsio-sorgailuari dagokionez, tentsioa (2 V) eta korrontea (2 A, beherantz) ezagunak dira. Ikus dezagun nola kalkula daitezkeen falta zaizkigun beste magnitudeak.

Erresistentziari dagokionez, badakigu Ohm-en legea betetzen dela (gogoratu: $v = Ri$); erresistentziatik igarotzen den korrontea ezaguna denez gero, berehalakoa da erresistentziaren muturren arteko tentsioa kalkulatzea:

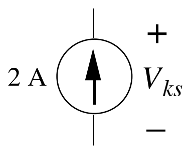
Ohm-en legea: $V_{2\Omega} = R \cdot I_{2\Omega}$, $V_{2\Omega} = 2\ \Omega \cdot 2\ \mathrm{A}$

$\rightarrow$ $V_{2\Omega} = 4\ \mathrm{V}$

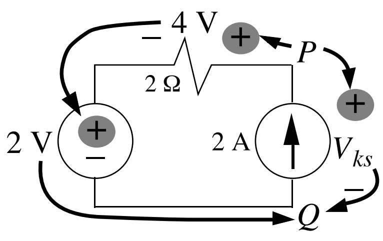


Gogoratu tentsioen zeinuak balio absolutuak bezain garrantzitsuak direla. Horrexegatik ez da nahikoa erresistentziaren muturren arteko tentsioa 4 V-ekoa dela esatea, eta guztiz beharrezkoa da tentsio horren alde positiboa non dagoen grafikoki adieraztea, goiko eskuineko irudian egin den bezala.

Dagoeneko, beraz, korronte-sorgailuaren muturren arteko tentsioa baino ez da falta. Ezezaguna denez gero, arbitrarioki aukera dezakegu beraren zeinua, ondoko irudian erakutsi den legez:



Orain, tentsio hori kalkulatzeko, Kirchhoff-en tentsioen legea (KTL) aplikatu behar dugu, nahitaez, zirkuituan dagoen maila bakarrean (tentsioaren zeinua arbitrarioki aukeratu dugunez gero, kalkuluak egin ondoren, beraren balioa positiboa edo negatiboa izan daiteke):

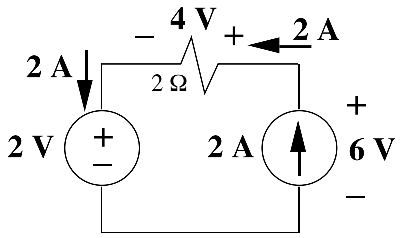


KTL: $V_{PQ_{\mathrm{eskuinetik}}} = V_{PQ_{\mathrm{ezkerretik}}}$

$V_{ks} = 4\ \mathrm{V} + 2\ \mathrm{V}$

$\rightarrow$ $V_{ks} = 6\ \mathrm{V}$

Ondoko irudian zirkuituaren soluzioa aurkeztu da, zirkuituaren egoera horixe izanik.



Soluzioa egiaztatzeko, potentzien balantzea egingo dugu. Hona hemen zirkuitu honi dagokiona:

Tentsio-sorgailuak potentzia xurgatzen du: $P_{ts} = 2\ \text{V} \cdot 2\ \text{A} = 4\ \text{W}$, xurgatutakoa

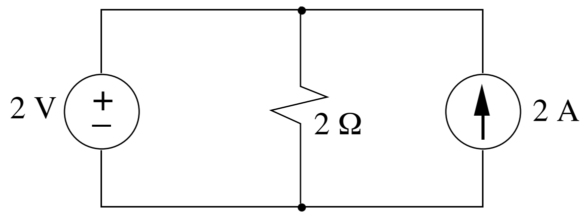
Erresistentziak potentzia xurgatzen du beti: $P_{2\Omega} = 4\ \text{V} \cdot 2\ \text{A} = 8\ \text{W}$, xurgatutakoa

Korronte-sorgailuak potentzia ematen du: $P_{ks} = 6\ \text{V} \cdot 2\ \text{A} = 12\ \text{W}$, emandakoa

Potentzien balantzea:

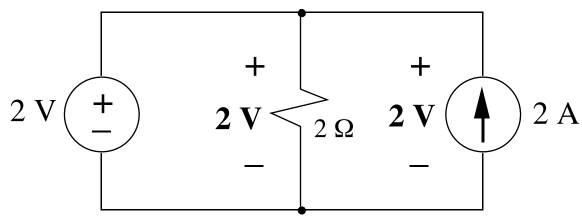
$$\Sigma P_{\text{emandakoak}} = P_{ks} = 12\ \text{W} = \Sigma P_{\text{xurgatutakoak}} = P_{ts} + P_{2\Omega} = 4\ \text{W} + 8\ \text{W} \equiv 12\ \text{W}$$

5. Analiza ezazu ondoko irudiko zirkuitua, Kirchhoff-en legeak eta elementuen ekuazioak besterik ez erabiliz. Emaitza egiaztatzeko, egin ezazu potentzien balantzea.



Ebazpena:

Zirkuitu hau ere, aurrekoa bezalaxe, oso zirkuitu sinplea da: hiru osagaiak paraleloan daudenez gero, hiruren muturren arteko tentsioa bera da, tentsio-sorgailuak finkatzen duena hain zuzen ere, ondoko irudian erakutsi den legez. (Gogoratu, bina elementuk osatutako mailetan KTL aplikatzean ondorioztatzen dela hori.)

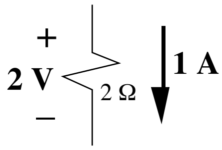


Beraz, dagoeneko, korronte-sorgailuari dagokionez, korrontea (2 A) eta tentsioa (2 V) ezagunak dira. Ikus dezagun nola kalkula daitezkeen falta zaizkigun beste magnitudeak.

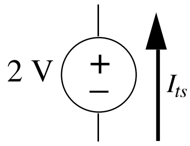
Erresistentziari dagokionez, badakigu Ohm-en legea betetzen dela (gogoratu: $v = Ri$); erresistentziaren muturren arteko tentsioa ezaguna denez gero, berehalakoa da erresistentziatik igarotzen den korrontea kalkulatzea:

Ohm-en legea: $V_{2\Omega} = R \cdot I_{2\Omega}$, $2\ \text{V} = 2\ \Omega \cdot I_{2\Omega}$

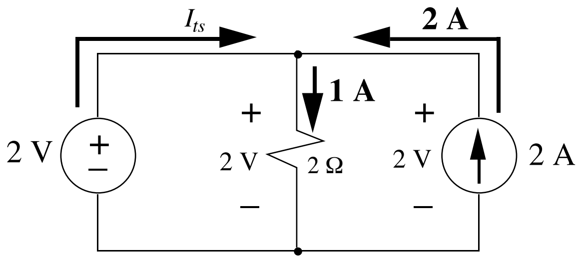
$\rightarrow \quad I_{2\Omega} = 1\ \text{A}$ (beherantz)



Dagoeneko, beraz, tentsio-sorgailutik igarotzen den korronte-intentsitatea baino ez da falta. Ezezaguna denez gero, arbitrarioki aukera dezakegu beraren noranzkoa, gorantz, esate baterako:



Orain, korronte hori kalkulatzeko, Kirchhoff-en korronteen legea (KKL) aplikatu behar dugu, nahitaez, zirkuituan dauden bi korapiloetariko batean (korrontearen noranzkoa arbitrarioki aukeratu dugunez gero, kalkuluak egin ondoren, beraren balioa positiboa edo negatiboa izan daiteke):



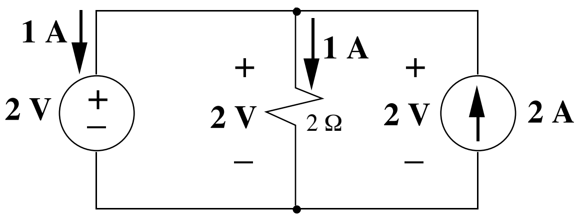
KKL korapiloetan:

$$I_{ts} + 2\ \text{A} = 1\ \text{A}$$

$$\rightarrow \quad I_{ts} = -1\ \text{A}$$

Minus ikurrak I_{ts} korrontea geuk aukeratu dugun noranzkoaren kontra doala baino ez du esan nahi.

Ondoko irudian zirkuituaren soluzioa aurkeztu da, zirkuituaren egoera horixe izanik.



Soluzioa egiaztatzeko, potentzien balantzea egingo dugu:

Tentsio-sorgailuak potentzia xurgatzen du: $P_{ts} = 2\ \text{V} \cdot 1\ \text{A} = 2\ \text{W}$, xurgatutakoa

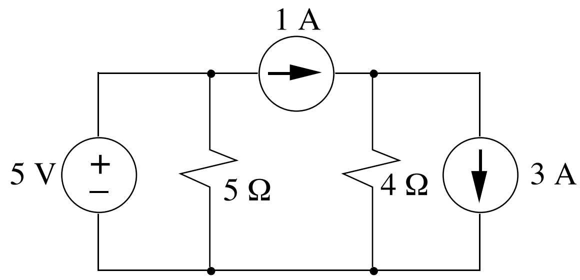
Erresistentziak potentzia xurgatzen du beti: $P_{2\Omega} = 2\ \text{V} \cdot 1\ \text{A} = 2\ \text{W}$, xurgatutakoa

Korronte-sorgailuak potentzia ematen du: $P_{ks} = 2\ \text{V} \cdot 2\ \text{A} = 4\ \text{W}$, emandakoa

Potentzien balantzea:

$$\Sigma P_{\text{emandakoak}} = P_{ks} = 4\ \text{W} = \Sigma P_{\text{xurgatutakoak}} = P_{ts} + P_{2\Omega} = 2\ \text{W} + 2\ \text{W} \equiv 4\ \text{W}$$

6. Analiza ezazu ondoko irudiko zirkuitua, Kirchhoff-en legeak eta elementuen ekuazioak besterik ez erabiliz.



Ebazpena:

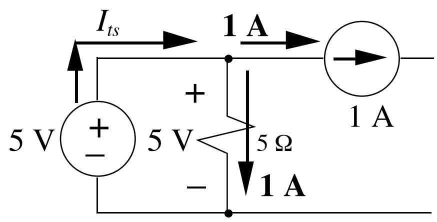
Zirkuitu honen analisia ere, aurrekoena bezala, berehalakoa da, zirkuitua oso sinplea delako.

Alde batetik, 5 V-eko tentsio-sorgailua eta 5 Ω-eko erresistentzia paraleloan daudenez gero, bien muturren arteko tentsioa berdina da, 5 V; ondorioz, Ohm-en legeak dioenez, 5 Ω-eko erresistentziatik 1 A-ko korrontea igaroko da (5 V = 5 Ω · 1 A) beherantz. Goiko ezkerreko korapiloan KKL aplikatzen badugu, ezezagun bakarra tentsio-sorgailutik igarotzen den korrontea da, beraz:

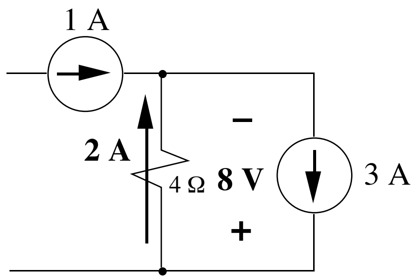
KKL goiko ezkerreko korapiloan:

$$I_{ts} = 1\ \text{A} + 1\ \text{A}$$

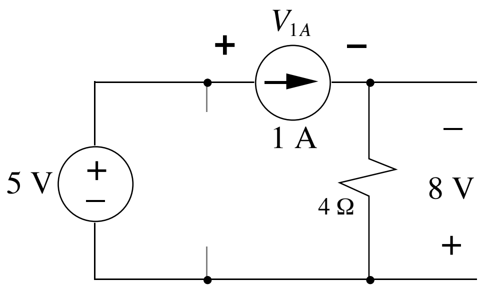
$$\rightarrow \quad I_{ts} = 2\ \text{A (gorantz)}$$



Beste alde batetik, goiko eskuineko korapiloan elkartzen diren hiru elementuetatik bi korronte-sorgailuak direnez gero, KKL aplikatzean, berehala lortzen da 4 Ω-eko erresistentziatik igarotzen den korrontea: 1 A + $I_{4\Omega}$ = 3 A $\rightarrow$ $I_{4\Omega}$ = 2 A (gorantz). Orain, Ohm-en legea aplikatuz, 4 Ω-eko erresistentziaren muturren arteko tentsioa kalkula daiteke: $V_{4\Omega}$ = 4 Ω · 2 A = 8 V (positiboa behean eta negatiboa goian). 3 A-ko korronte--sorgailuak, 4 Ω-eko erresistentziarekin paraleloan dagoenez gero, tentsio berdina izango du bere muturren artean.



Une honetan, ezker aldeko eta eskuin aldeko adarretako tentsioak ezagunak direnez gero, berehalakoa da falta zaigun magnitudea kalkulatzea: 1 A-ko korronte-sorgailuaren muturren arteko tentsioa, hain zuzen ere. Horretarako, KTL aplikatu behar dugu korronte-sorgailu hori barnean hartzen duen begizta batean:

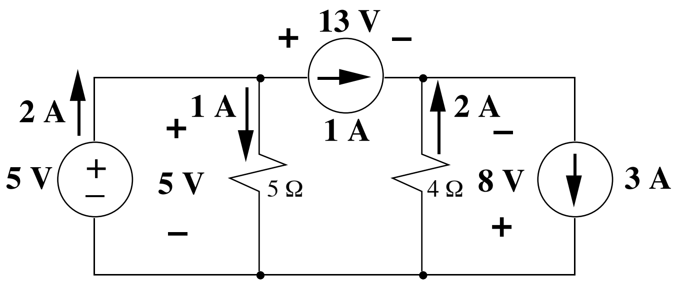


KTL kanpoko begiztan:

$$V_{1A} = 5\ \text{V} + 8\ \text{V}$$

$$\rightarrow \quad V_{1A} = 13\ \text{V}$$

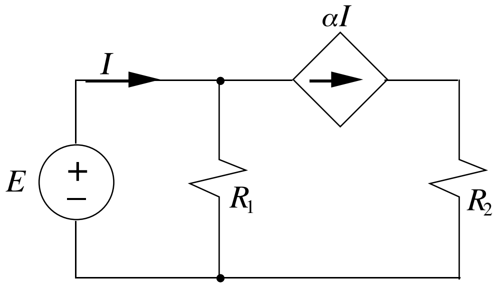
Ondoko irudian zirkuituaren soluzioa aurkeztu da, zirkuituaren egoera horixe izanik.



Soluzioa egiaztatzeko, irakurleak egin dezake potentzien balantzea.

7. Ondoko irudiko zirkuituan, kalkula itzazu R_1 erresistentziatik igarotzen den korrontea eta R_2 erresistentziaren muturren arteko tentsioa, Kirchhoff-en legeak eta elementuen ekuazioak besterik ez erabiliz.

Oharra: Irudian ageri diren parametro guztiak, I korrontea izan ezik, ezagunak dira: E, R_1, R_2 eta α. Beraz, soluzioak parametro horien menpekoak izango dira, inoiz ez I-ren menpekoak.



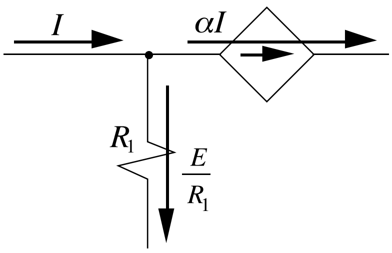
Ebazpena:

Zirkuitu hau ere oso sinplea denez gero, berehala kalkula daitezke eskatutako magnitudeak, aurrekoetan bezalaxe, αI korrontea ematen duen korronte-sorgailu menpekoak ez baititu kalkuluak zailtzen; izan ere, korronte-sorgailu independenteen modura jokatzen du: berak finkatzen du bere barnetik igarotzen den korrontearen balioa, kasu honetan zirkuituko beste magnitude baten menpekoa dena. Beste horrenbeste gertatzen da beste sorgailu menpeko guztiekin, hurrengo atalean ikusiko dugun legez.

Lehenik eta behin, begi-bistakoa da E tentsio-sorgailua eta R_1 erresistentzia paraleloan daudela. Ondorioz, R_1 erresistentziari Ohm-en legea aplikatuz:

$$\boxed{I_{R_1} = \frac{E}{R_1}} \qquad \text{(beherantz)}$$

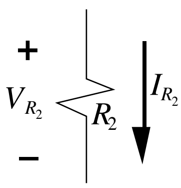
Goiko korapiloan KKL aplikatzen badugu, I korronte ezezaguna kalkula daiteke:



KKL goiko korapiloan:

$$I = \alpha I + \frac{E}{R_1} \quad \rightarrow \quad I = \frac{E}{(1-\alpha)R_1}$$

Beraz, dagoeneko, eskuin aldeko adarretik igarotzen den korrontea (αI) beste parametroen arabera ezaguna denez gero, berehalakoa da R_2 erresistentziaren muturren arteko tentsioa kalkulatzea, Ohm-en legea aplikatuz:



$$I_{R_2} = \alpha I = \frac{\alpha E}{(1-\alpha)R_1}$$

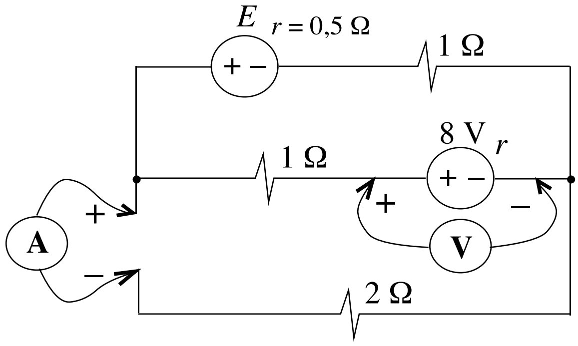
Ohm-en legea: $V_{R_2} = R_2 \cdot I_{R_2}$

$$\rightarrow \quad \boxed{V_{R_2} = \frac{\alpha R_2 E}{(1-\alpha)R_1}}$$

8. Irudiko zirkuituko tentsio-sorgailuak errealak dira, beren barne-erresistentziak alboan adierazitakoak izanik. Irudiko voltmetro idealak 7,4 V-eko tentsioa eta anperemetro idealak 2,2 A-ko korrontea neurtu dute. Kalkula itzazu elementu guztietako tentsio eta korronteak; bereziki 8 V-eko tentsio-sorgailuaren r barne-erresistentzia ezezaguna eta beste tentsio-sorgailuaren E tentsio ezezaguna.

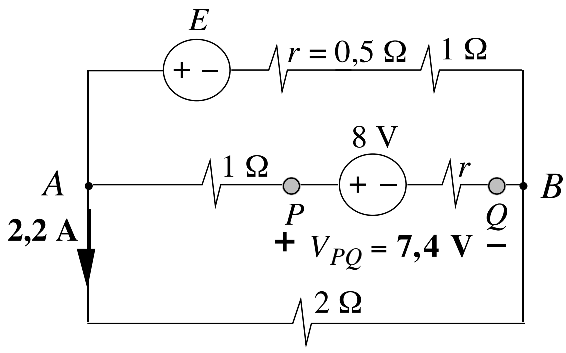
(**Oharra**: Voltmetro idealaren eredua zirkuitu irekia da: hots, voltmetrotik ez da inoiz korronterik pasatzen eta, ondorioz, ez du eraginik zirkuituaren portaeraren gainean.

Anperemetro idealaren eredua zirkuitulaburra da: hots, anperemetroaren muturren arteko tentsioa beti zero da eta, ondorioz, ez du eraginik zirkuituaren portaeraren gainean.)



__Ebazpena:__

Lehenik eta behin, gogora dezagun tentsio-sorgailu erreal baten eredua tentsio-sorgailu ideal bat eta seriean konektaturiko erresistentzia (barne-erresistentzia, hain zuzen ere) bat dela. Horretan oinarriturik, zirkuituko tentsio-sorgailu errealak beren ereduez ordezkatuz, hurrengo irudiko zirkuitua izango da analizatu beharko duguna; bertan, anperemetroak eta voltmetroak emandako neurriak agerian utzi dira, eta neurgailuak kendu egin ditugu. Era berean, zirkuituan dauden bi korapiloak ere, A eta B, agerian utzi dira.

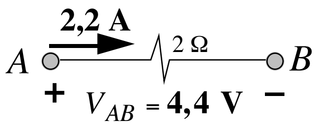


Kasu honetan, zirkuitua aurreko ariketetakoak bezain sinplea izan ez arren, ez da beharrezkoa ondoko atalean azalduko dugun ebazpide arruntari jarraitzea, hasieratik magnitude batzuk ezagunak baitira, voltmetroak eta anperemetroak neurtutakoak, hain zuzen ere. Hori dela eta, zuzen-zuzenean ekin diezaiokegu analisiari.

Hasteko, anperemetroak neurtutako korrontea beheko adarretik igarotzen da, eta bertan 2 Ω-eko erresistentzia bat baino ez dago; beraz, Ohm-en legea aplikatuz, erresistentziaren bi muturren arteko tentsioa kalkula dezakegu eta horrela zirkuituko bi korapiloen arteko tentsioa izango dugu:

Ohm-en legea: $V_{2\Omega} = R \cdot I_{2\Omega} = 2\ \Omega \cdot 2{,}2\ \text{A}$

$\rightarrow \quad V_{2\Omega} = V_{AB} = 4{,}4\ \text{V}$

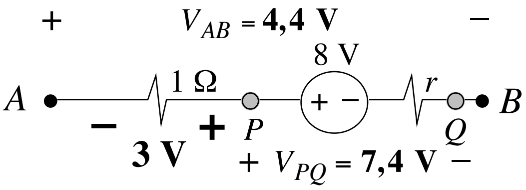


Orain, bi korapiloen arteko tentsioa, V_{AB}, ezaguna denez gero, erdiko adarrean 1 Ω-eko erresistentziaren muturren arteko tentsioa kalkula dezakegu, *A* eta *B* puntuen artean KTL aplikatuz eta V_{PQ} tentsioa voltmetroak neurtutakoa dela kontuan hartuz. Hona hemen:

$$V_{AB} = 4{,}4\ \text{V} = V_{AP} + V_{PB} = V_{AP} + V_{PQ} = V_{1\Omega} + 7{,}4\ \text{V} \quad \rightarrow$$

$$V_{1\Omega} = V_{AB} - V_{PQ} = 4{,}4\ \text{V} - 7{,}4\ \text{V} = -3\ \text{V}$$

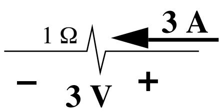
Zeinu negatiboak kontrako tentsioa positiboa dela besterik ez du esan nahi. Ondorioz, erdiko adarrean honako tentsio hauek daude:



Eta orain, erdiko adarreko 1 Ω-eko erresistentzia horretan Ohm-en legea aplikatuz, hain zuzen ere, erdiko adarretik korrontea *B* korapilotik *A* korapilora igarotzen dela ondorioztatzen da; hots, eskuinetik ezkerrera, eta bere balioa 3 A-koa dela:

Ohm-en legea: $V_{1\Omega} = R \cdot I_{1\Omega} \quad \rightarrow \quad 3\ \text{V} = 1\ \Omega \cdot I_{1\Omega}$

$\rightarrow \quad I_{1\Omega} = 3\ \text{A}$ (ezkerrerantz)

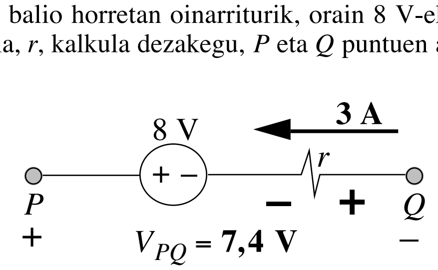


Erdiko adarretik igarotzen den korrontearen balio horretan oinarriturik, orain 8 V-eko tentsio-sorgailu errealaren barne-erresistentzia, *r*, kalkula dezakegu, *P* eta *Q* puntuen artean KTL aplikatuz:

KTL: $V_{PQ} = 8\ \text{V} - r \cdot I_{1\Omega}$

$7{,}4\ \text{V} = 8\ \text{V} - r \cdot 3\ \text{A}$

$\rightarrow \quad \boxed{r = 0{,}2\ \Omega}$

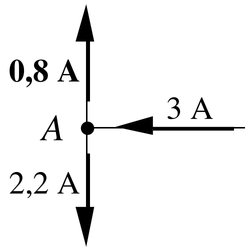


Beste horrenbeste egin dezakegu goiko adarrean, tentsio-sorgailu errealaren tentsioa kalkulatzeko. Lehenik, KKL aplikatuko dugu *A* korapiloan, goiko adarretik igarotzen den korrontea kalkulatzeko:

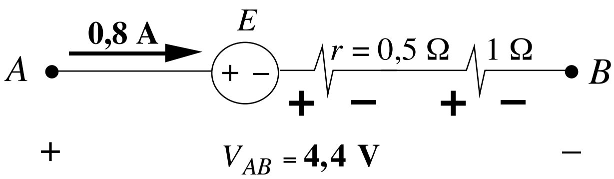
KKL A korapiloan:

$$I_{goikoa} = 3\ \text{A} - 2{,}2\ \text{A}$$

$$\rightarrow \quad I_{goikoa} = 0{,}8\ \text{A} \qquad \text{(gorantz)}$$



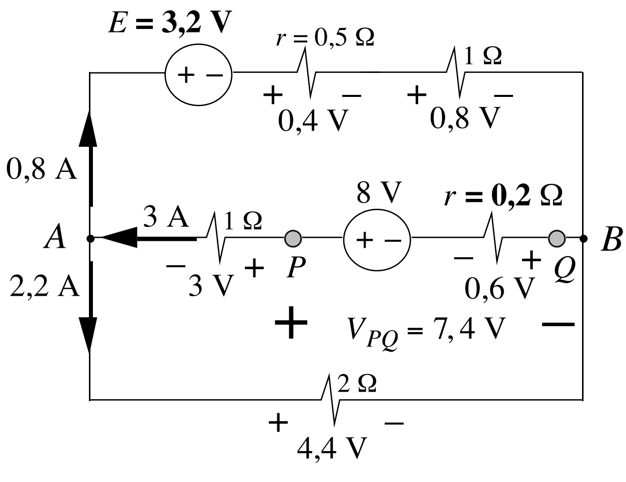
Ondoren KTL aplikatuko dugu *A* eta *B* puntuen artean, baina oraingo honetan goiko adarretik:



$$V_{AB} = 4{,}4\ \text{V} = E + 0{,}8\ \text{A} \cdot 0{,}5\ \Omega + 0{,}8\ \text{A} \cdot 1\ \Omega \quad \rightarrow$$

$$E = 4{,}4\ \text{V} - 0{,}4\ \text{V} - 0{,}8\ \text{V} \quad \rightarrow \quad \boxed{E = 3{,}2\ \text{V}}$$

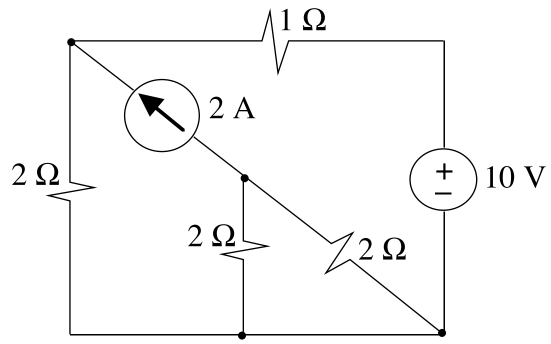
Ondoko irudian zirkuituaren soluzioa aurkeztu da.



Beti bezala, soluzioa lortu ondoren, modu askotan egiazta daiteke zuzena denentz. Esate baterako, KTL eta KKL egiazta daitezke berriro ere, ea akatsen bat sartu den nonbait; edota potentzien balantzea egin, ea betetzen den.

3.2. Zirkuituen ebazpide arrunta

1. Egin ezazu irudiko zirkuituaren analisia; hots, kalkula itzazu elementu guztietako tentsioak eta korronteak.

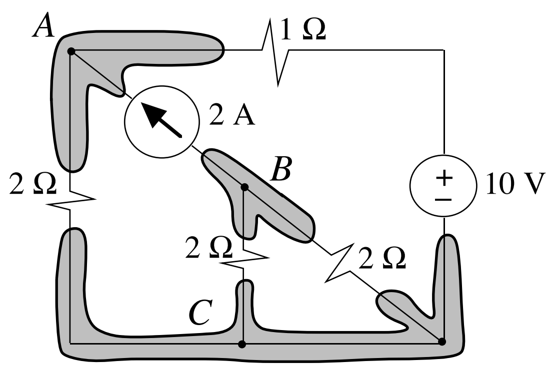


Ebazpena:

Irudiko zirkuituaren analisia egiteko, ebazpide arruntari jarraituko gatzaizkio, pausoz pauso:

1. Bilatu zirkuituaren korapiloak (korapilo-kopurua = N).

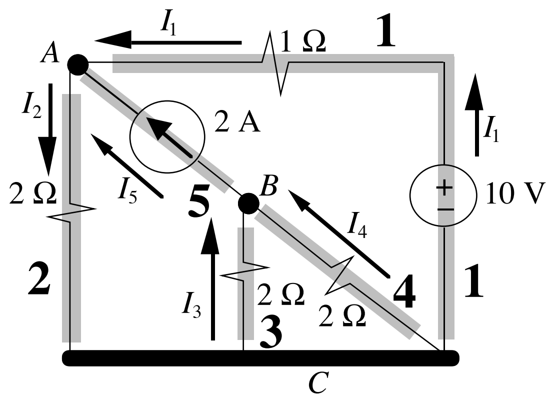
Gogoratu korapiloa dela hiru osagai edo gehiago elkartzen direneko puntua. Definizio horren arabera, kasu honetan hiru korapilo daude, A, B eta C, ondoko irudian erakutsi den legez. Eskuin aldeko goiko izkinan bi osagai (10 V-eko tentsio-sorgailua eta 1 Ω-eko erresistentzia) soilik elkartzen direnez gero, guretzat puntu hori ez da korapilo bat. Zioa da, bi osagai besterik elkartzen ez direnean, KKL legea zuzen-zuzenean aplikatzen dela, bietatik korronte bera igarotzen baita.



Beraz, kasu honetan, $N = 3$.

2. Aukeratu arbitrarioki adarretako korronteen noranzkoak, korronte-sorgailuak dituzten adarretan izan ezik, adar horietatik igaroko diren korronteen intentsitate eta noranzkoak korronte-sorgailuek adierazitakoak baitira.

Beraz, lehendabizi adarrak bilatu behar ditugu; horretarako gogoratu egin behar dugu adar bat zer den: bi korapiloren arteko ibilbide bat. Hori gogoan izanik, erraz ikus daiteke zirkuitu honetan bost adar daudela, ondoko irudian erakutsi den legez. Ondoren, adarretako korronteen noranzkoak arbitrarioki finkatu ditugu, irudian erakutsitakoak hain zuzen.

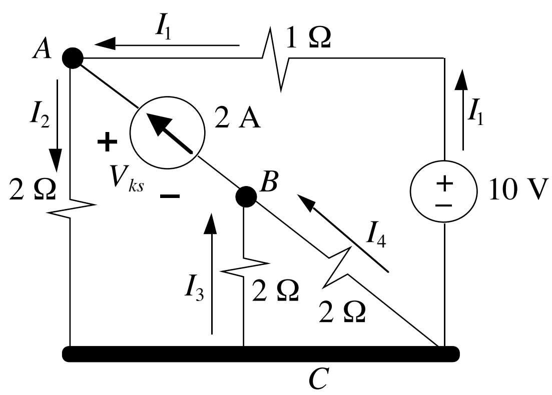


Irudian korronteak bost adarretan marraztu diren arren, 5. adarrean korronte-sorgailu bat dagoenez gero, berak finkatzen ditu adar horretako korrontearen intentsitatea eta noranzkoa, I_5 = 2 A eta gorantz zuzenduta, hain zuzen ere.

Baldin adar-kopurua = AK = 5, eta adar desberdinetan dauden korronte-sorgailuen kopurua = KS = 1 badira →

Korronte ezezagunen kopurua = $AK - KS = 5 - 1 = 4$: I_1, I_2, I_3 eta I_4.

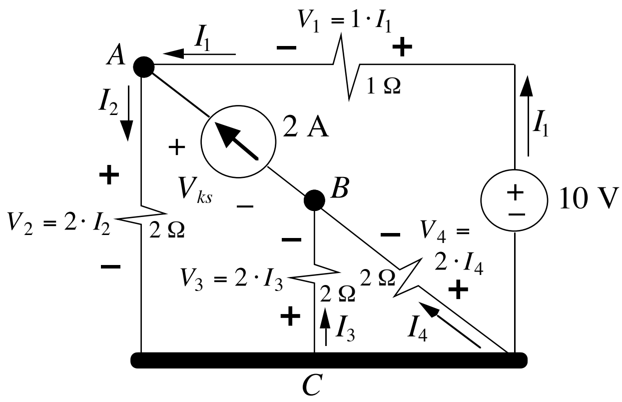
3. Aukeratu arbitrarioki korronte-sorgailuetako tentsioen zeinuak (tentsio ezezagunen kopurua = KS = 1)



Korronte eta tentsio ezezagunen kopurua = 4 + 1 = 5 : I_1, I_2, I_3, I_4 eta V_{ks}.

4. Finkatu erresistentzietako tentsioen zeinuak Ohm-en legearen arabera, eta aplikatu Ohm-en legea erresistentzietako tentsioak adarretako korronteen funtzioan izateko.

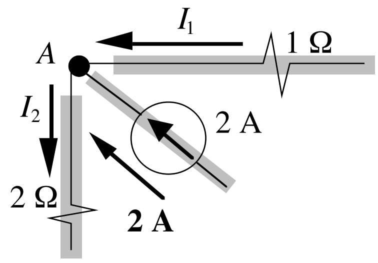
Gogoratu Ohm-en legeak dioena: $v_R = R \cdot i$, korrontea tentsioaren alde positibotik sartzen delarik beti. Horren arabera, zirkuituko erresistentzietan ondoko irudiko tentsioak izango ditugu, arbitrarioki finkatutako korronteen arabera.



Agerikoa da, Ohm-en legea aplikatzean ez dugula ezezagun berririk gehitu, erresistentzietako tentsioak adarretako korronteen menpekoak baitira. Hori dela eta, normalean pauso honetan tentsioen zeinuak adierazi besterik ez da egin behar, eta kalkuluak ($v_R = R \cdot i$) buruz egiten dira gero, KTL aplikatzean.

5. Aplikatu Kirchhoff-en korronteen legea (KKL) korapilo guztietan batean izan ezik (azken horretan lorturiko ekuazioa besteen konbinazio lineala izango baita): ekuazio-kopurua = N–1

Betearaz diezaiogun zirkuituari KKL legea (N–1) = 2 korapilotan soilik:



KKL *A* korapiloan:

korapilora iritsi = I_1 eta 2 A

korapilotik irten = I_2

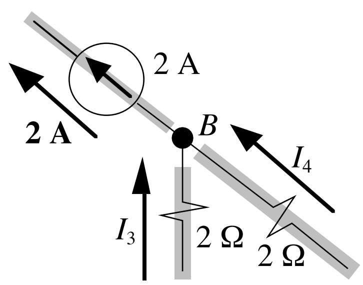
1. ekuazioa: $I_1 + 2\ \text{A} = I_2$

KKL *B* korapiloan:

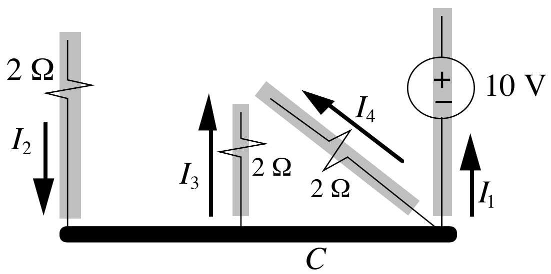
korapilora iritsi = I_3 eta I_4

korapilotik irten = 2 A

2. ekuazioa: $I_3 + I_4 = 2\ \text{A}$



Egiazta dezagun ezen, KKL hirugarren korapiloan aplikatuz gero, beste bi ekuazioen konbinazio lineala den ekuazio bat lortzen dela:



KKL C korapiloan:

korapilora iritsi = I_2

korapilotik irten = I_1, I_3 eta I_4

ekuazioa: $I_1 + I_3 + I_4 = I_2$

Erraz ikus daiteke azken ekuazio hau aurreko biak batuz lortzen dela:

$$(I_1 + 2\text{ A})_{1.\text{ ekuazioa}} + (I_3 + I_4)_{2.\text{ ekuazioa}} = (I_2)_{1.\text{ ekuazioa}} + (2\text{ A})_{2.\text{ ekuazioa}}$$

Laburbilduz, dagoeneko bi ekuazio ditugu, baina bost ezezagun. Ondorioz, hiru ekuazio gehiago bilatu behar dira.

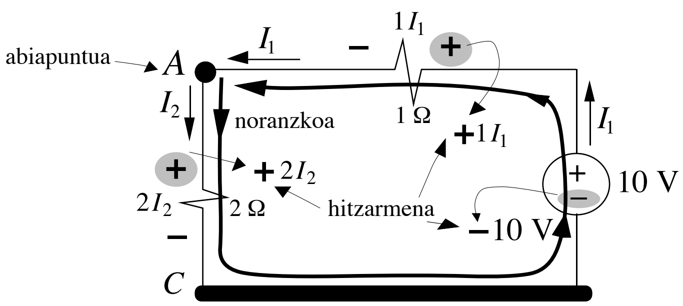
6. Aplikatu Kirchhoff-en tentsioen legea (KTL) behar adina begiztatan $AK - (N{-}1) = 5 - (3{-}1) = 3$ ekuazio lortzeko, non adar guztiak gutxienez behin azaldu behar diren.

Lehendabizi, begizta bat zer den gogoratu behar dugu: adarrek osaturiko edozein ibilbide itxi. Hori gogoan izanik, nahi izanez gero, errazegia izan ez arren, zirkuitu honetan zazpi begizta daudela ikus daiteke. Baina guk hiru besterik ez dugu behar.

Beraz, gure arazoa orain begiztak ongi aukeratzean datza, baldintza bat bete behar baita: adar bakoitza gutxienez behin agertu behar da begiztaren batean.

Begiztak aukeratzeaz gain, KTL aplikatzeko, begiztan abiapuntu bat finkatu ondoren, ibilbidearen noranzkoa eta tentsioen zeinuei buruzko hitzarmena aukeratu behar ditugu. Hona hemen egindako aukeraketa bat (kontuan izan hau ez dela aukera bakarra!):

Hasteko, kanpoko begizta hartu dugu aintzakotzat, ondoko irudian erakutsi den legez. Abiapuntutzat A korapiloa hartu dugu; noranzkoa, erlojuaren orratzen kontrakoa; eta hitzarmena, honako hau: osagai batera tentsioaren positibotik sartzen garenean, tentsio hori positibotzat hartuko dugu KTL idaztean; bestela, negatibotzat.

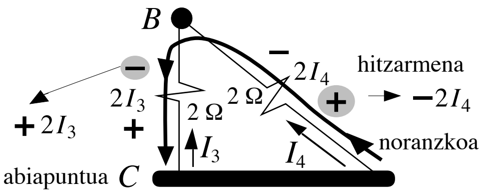


Hona hemen modu horretan lorturiko ekuazioa (analizatzen ari garen zirkuituari dagokionez, hirugarrena da, aurretik beste bi lortu baititugu KKL aplikatuz):

$$3.\ \text{ekuazioa:}\quad +2I_2 - 10\ \text{V} + 1I_1 = 0 \quad \rightarrow \quad 2I_2 + 1I_1 = 10\ \text{V}$$

Oharra: irakurleak egiazta dezake ekuazio bera (eta, ondorioz, bakarra) lortzen dela begizta horretan beste abiapuntu bat hartuz, edota beste noranzkoa, edota beste hitzarmen bat; eta hau begizta guztietan betetzen dela.

4. ekuazioa lortzeko, ondoko irudian adierazitako begizta, abiapuntua, noranzkoa eta hitzarmena hartu ditugu aintzakotzat:

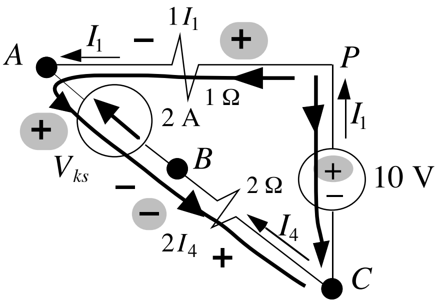


$$4.\ \text{ekuazioa:}\quad -2I_4 + 2I_3 = 0 \rightarrow$$

$$\rightarrow \quad 2I_3 = 2I_4$$

$$\rightarrow \quad I_3 = I_4$$

5. ekuazioa lortzeko, nahitaez hartu behar dugu 2 A-ko korronte-sorgailua barnean hartzen duen begizta bat, horixe baita dagoeneko falta zaigun adarra:



$$V_{PC\ \text{bide batetik}} = V_{PC\ \text{beste bide batetik}}$$

$$5.\ \text{ekuazioa:}\ 10\ \text{V} = 1I_1 + V_{ks} - 2I_4$$

Dagoeneko, behar genituen ekuazio guztiak lortu ditugu:

Ekuazio-kopurua guztira = $[N–1]_{\text{KKL}} + [AK–(N–1)]_{\text{KTL}} = [3–1] +[5–(3–1)]$ **=** 5

eta hurrengo pausoari ekin diezaiokegu.

7. Ebatzi horrela lortutako ekuazio-sistema. Emaitza gisa, adarretako korronteak eta korronte-sorgailuen tentsioak lortuko dira. Erresistentzietako tentsioen balioak kalkulatu nahi badira, Ohm-en legea aplikatu behar da berriro.

Hona hemen, berridatzita, lortu ditugun bost ekuazioak:

❶ $I_1 + 2 = I_2$
❷ $I_3 + I_4 = 2$
❸ $I_1 + 2I_2 = 10$
❹ $I_3 = I_4$
❺ $I_1 + V_{ks} - 2I_4 = 10$

Ekuazio-sistema ebazten hasi baino lehen, merezi du gainetik begiratzea soluzioaren bilaketa errazten digun ezaugarririk ba ote duen. Kasu honetan, begi-bistakoa da 1. eta 3. ekuazioek beren aldetik bi ezezaguneko (I_1 eta I_2) bi ekuaziodun sistema osatzen dutela. Gauza bera gertatzen da 2. eta 4. ekuazioekin, bi ezezagun (I_3 eta I_4) besterik ez baita agertzen bi ekuazio horietan. Ondorioz, bost ekuaziodun sistema bat ebatzi ordez, bina ekuaziodun bi sistema independente ebatzi behar ditugu; bi sistema horien soluzioa bilatu ondoren, 5. ekuazioa V_{ks} ezezaguna kalkulatzeko erabiliko dugu. Hona hemen aipaturiko bi ekuazio-sistemak eta horien soluzioak:

1. ekuazio-sistema:

❶ $I_1 + 2 = I_2$

❸ $I_1 + 2I_2 = 10$

Soluzioa:

$I_1 = 2\ \text{A}, \qquad I_2 = 4\ \text{A}$

2. ekuazio-sistema:

❷ $I_3 + I_4 = 2$

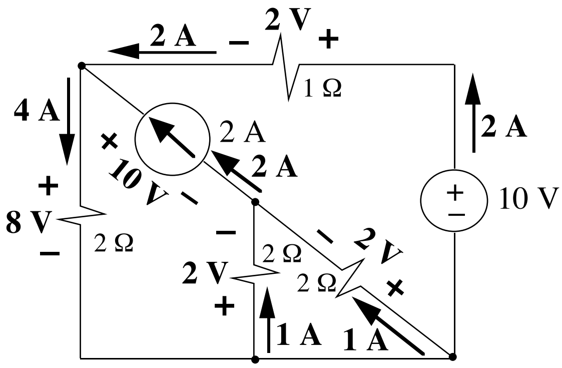
❹ $I_3 = I_4$

Soluzioa:

$I_3 = 1\ \text{A}, \qquad I_4 = 1\ \text{A}$

Orain balio horiek 5. ekuazioan ordezkatuz: $V_{ks} = 10\ \text{V}$

Ondoko irudian zirkuituaren soluzioa aurkeztu da, zirkuituaren egoera horixe izanik.



Soluzioa lortu ondoren, modu askotan egiazta daiteke zuzena denentz. Esate baterako, KTL eta KKL egiazta daitezke berriro ere, ea akatsen bat sartu den nonbait.

Batzuetan, potentzien balantzea egin behar da. Hona hemen zirkuitu honi dagokiona:

10 V-eko tentsio-sorgailua: $P_{emandakoa} = 10\ \text{V} \cdot 2\ \text{A} = 20\ \text{W}$

2 A-ko korronte-sorgailua: $P_{emandakoa} = 10\ \text{V} \cdot 2\ \text{A} = 20\ \text{W}$

1 Ω-eko erresistentzia: $P_{xurgatutakoa} = 2\ \text{V} \cdot 2\ \text{A} = 4\ \text{W}$

2 Ω-eko ezkerreko erresistentzia: $P_{xurgatutakoa} = 8\ \text{V} \cdot 4\ \text{A} = 32\ \text{W}$

2 Ω-eko erdiko erresistentzia: $P_{xurgatutakoa} = 2\ \text{V} \cdot 1\ \text{A} = 2\ \text{W}$

2 Ω-eko eskuineko erresistentzia: $P_{xurgatutakoa} = 2\ \text{V} \cdot 1\ \text{A} = 2\ \text{W}$

$$\Sigma\, P_{emandakoa} = 20 \text{ W} + 20 \text{ W} = 40 \text{ W}$$

$$\Sigma\, P_{xurgatutakoa} = 4 \text{ W} + 32 \text{ W} + 2 \text{ W} + 2 \text{ W} = 40 \text{ W}$$

Potentzien balantzea: $\Sigma\, P_{emandakoa} = 40 \text{ W} = \Sigma\, P_{xurgatutakoa}$

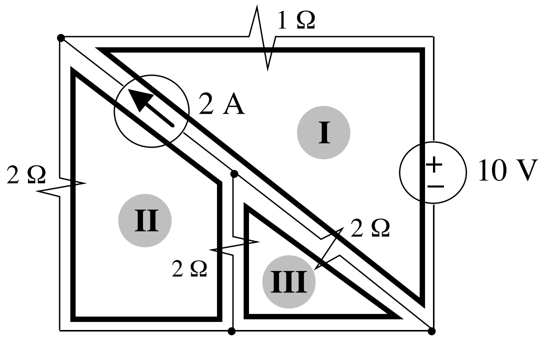
Honaino iritsita, ariketa bukatutzat eman genezakeen arren, ez dugu horrelakorik egingo, ariketa hau dela medio zirkuituen ebazpide arrunta sakonki aztertzea merezi duelakoan. Hori dela eta, ebazpidearen 6. urratsera itzuliko gara, KTL aplikatuz lortu behar diren ekuazioetara hain zuzen ere, oraingo honetan geuk aukeratutako begiztetan aplikatu ordez, mailetan aplikatzea interesatzen baitzaigu. Gogora dezagun berriro ere zer zioen ebazpidearen 6. urratsak:

6. Aplikatu Kirchhoff-en tentsioen legea (KTL) behar adina begiztatan $AK - (N-1) = 5-(3-1) = 3$ ekuazio lortzeko, non adar guztiak gutxienez behin azaldu behar diren.

Begiztetan aplikatu ordez, KTL mailetan aplikatu nahi baldin bada, orduan maila guztietan aplikatu behar da (maila-kopurua = MK baldin bada, MK ekuazio lortuko dira modu honetan).

→ ekuazio-kopurua $= N - 1 + MK = AK$

Lehendabizi, mailak zer diren gogoratu behar dugu: barruan adarrik hartzen ez duten begiztak. Hori gogoan izanik, zirkuitu honetan hiru maila daudela ikus daiteke, ondoko irudikoak, behar dugun ekuazio-kopuru adina, hain zuzen ere.



Orain, lehen bezala, KTL aplikatzeko, mailetan abiapuntu bat finkatu ondoren, ibilbidearen noranzkoa eta tentsioen zeinuei buruzko hitzarmena aukeratu behar dira. Agerikoa da I eta III mailak lehen aukeratu ditugula begizta gisa.

Hona hemen, beraz, mailetan lortzen diren hiru ekuazioak:

I mailan: $10 = 1I_1 + V_{ks} - 2I_4$ (lehengo 5. ekuazioa)

II mailan: $V_{ks} = 2I_2 + 2I_3$ (ekuazio berria)

III mailan: $I_3 = I_4$ (lehengo 4. ekuazioa)

Lehen bezala, dagoeneko, behar genituen ekuazio guztiak lortu ditugu: $[N{-}1]_{\mathrm{KKL}} + [MK]_{\mathrm{KTL}} = [\,3-1] + [3] = 5$ eta hurrengo pausoari ekin diezaiokegu.

7. Ebatzi horrela lortutako ekuazio-sistema. Emaitza gisa, adarretako korronteak eta korronte-sorgailuen tentsioak lortuko dira. Erresistentzietako tentsioen balioak kalkulatu nahi badira, Ohm-en legea aplikatu behar da berriro.

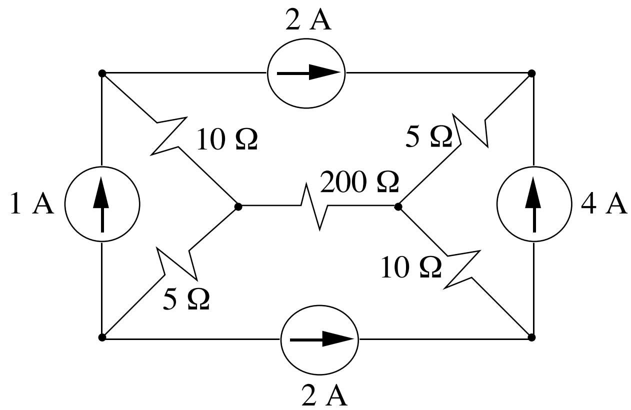
Hona hemen, berridatzita, lortu ditugun bost ekuazio berriak:

❶ $I_1 + 2 = I_2$
❷ $I_3 + I_4 = 2$
❸ $I_1 + V_{ks} - 2I_4 = 10$
❹ $V_{ks} = 2I_2 + 2I_3$
❺ $I_3 = I_4$

Oraingo honetan, ekuazioak ez daude lehen bezain bereizirik (dena den, soluzio bera lortzen da). Horregatik, sistema berri honen soluzioa bilatzea ez da lehen bezain erraza (hau ere oso erraza izan arren). Honen bitartez, honako hau azpimarratu nahi dugu: ekuazioen aukeraketak ebazpenaren gainean zuzeneko eragina duenez gero, beti merezi du ekuazioak idazten hasi aurretik zirkuitua gainetik aztertzea, gehien interesatzen zaizkigun ekuazioak zein diren ikusteko. Modu horretan, zenbakizko kalkuluak erraztu egin daitezke. Hurrengo ariketetan ikuspegi hau landu nahi dugu: lehendabizi aztertu zirkuitua gainetik, eta gero ekin ekuazioak idazteari, askotan ez baita beharrezkoa pauso guztiak hemen esandako ordenan egitea.

Azken oharra: atal honetan landuko ez dugun arren, begibistakoa da 2 Ω-eko erdiko eta eskuineko erresistentziak paraleloan daudela. Hori dela eta, zirkuitu honen soluzioa, ezaugarri hori kontuan hartuz ere bila daiteke, 3.3. atalean ikusiko den legez.

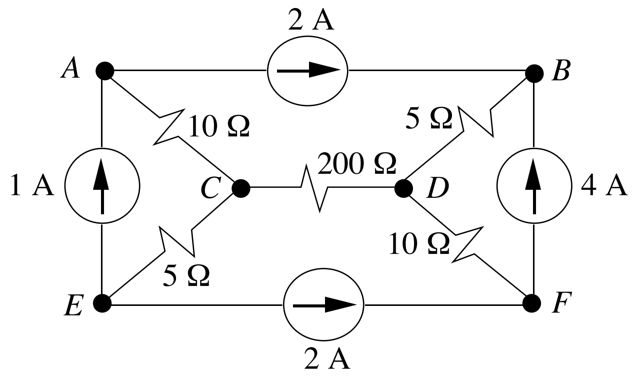
2. Egin ezazu irudiko zirkuituaren analisia; hots, kalkula itzazu elementu guztietako tentsioak eta korronteak.



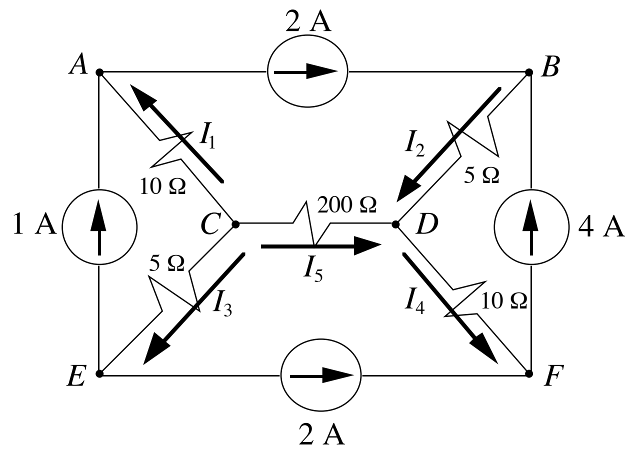
Ebazpena:

Berriro ere, ebazpide arruntari lotuko gatzaizkio, baina, oraingo honetan, zirkuituaren ezaugarriei erreparatuz, pausoak komeni zaigun ordenan emango ditugu, soluzioa azkarrago lortzeko asmoz:

1. Bilatu zirkuituaren korapiloak (korapilo-kopurua = $N = 6$).



2. Aukeratu arbitrarioki adarretako korronteen noranzkoak, korronte-sorgailuak dituzten adarretan izan ezik, adar horietatik igaroko diren korronteen intentsitate eta noranzkoak korronte-sorgailuek adierazitakoak baitira.



Korronte ezezagunen kopurua = 5 : I_1, I_2, I_3, I_4 eta I_5.

Agerikoa da *A*, *B*, *E* eta *F* korapiloetan bina korronte-sorgailu eta erresistentzia bana elkartzen direla. Horren ondorioz, KKL aplikatzean, ezezagun bakarreko lau ekuazio independente lortuko ditugu. Horrexegatik, hain zuzen ere, 3. eta 4. pausoak alde batera utzi eta zuzen-zuzenean 5. pausora joango gara, KKL aplikatzera.

5. Aplikatu Kirchhoff-en korronteen legea (KKL) korapilo guztietan batean izan ezik (azken horretan lorturiko ekuazioa besteen konbinazio lineala izango baita): ekuazio-kopurua = $N - 1$

Betearaz diezaiogun zirkuituari KKL, A, B, E eta F korapiloetan:

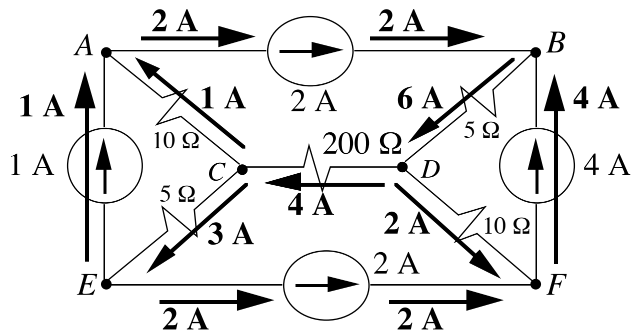
KKL A korapiloan:	$I_1 + 1\ \text{A} = 2\ \text{A}$	$\rightarrow$	$I_1 = 1\ \text{A}$
KKL B korapiloan:	$I_2 = 2\ \text{A} + 4\ \text{A}$	$\rightarrow$	$I_2 = 6\ \text{A}$
KKL E korapiloan:	$I_3 = 1\ \text{A} + 2\ \text{A}$	$\rightarrow$	$I_3 = 3\ \text{A}$
KKL F korapiloan:	$I_4 + 2\ \text{A} = 4\ \text{A}$	$\rightarrow$	$I_4 = 2\ \text{A}$

Orain, kalkulatutako balio horietan oinarriturik, beste bi korapiloetariko batean aplika dezakegu KKL, I_5 kalkulatzeko:

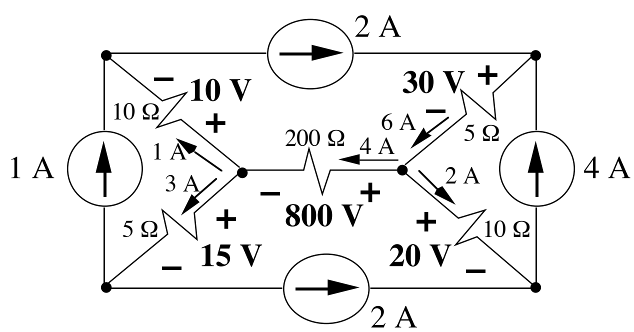
KKL C korapiloan:	$I_1 + I_3 + I_5 = 0$	$\rightarrow$	$I_5 = -4\ \text{A}$

Minus ikurrak I_5 korrontea geuk aukeratu dugun noranzkoaren kontra doala esan nahi du. Nahi izanez gero, D korapiloan ere aplika daiteke KKL, kalkulaturiko balioak ongi daudela egiaztatzeko.

Korronteei dagokienez, beraz, honelaxe geratzen da zirkuitua:

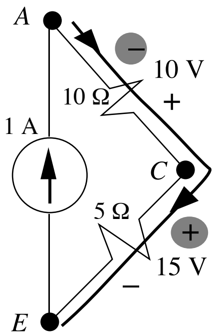


Adarretako korronte guztiak ezagunak direnez gero, berehalakoa da erresistentzietako tentsioen balioak (zeinuak barne) kalkulatzea, Ohm-en legea aplikatuz (4. pausoa). Hona hemen:



Orain, oso erraza da 3. eta 6. pausoak aldi berean egitea. Korronte-sorgailuetako tentsioen zeinuak arbitrarioki finkatu ordez, zirkuituari begira ipiniko ditugu, positiboak izan daitezen. KTL aplikatzeko, korronte-sorgailuak dituzten mailak aukeratzen baditugu, kalkulu hauek ere berehalakoak dira. Hona hemen:

Ezkerreko mailan:

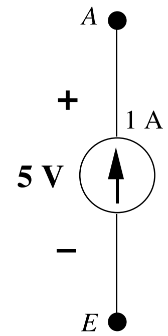


$$V_{AE} = V_{AC} + V_{CE} = -10\ \text{V} + 15\ \text{V}$$

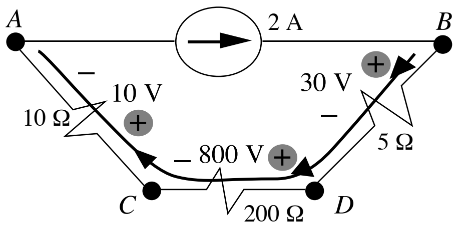
$\rightarrow$ $V_{AE} = +5\ \text{V}$

$\rightarrow$ *A*-ren potentziala *E*-rena baino altuagoa

$\rightarrow$ *A* + eta *E* – $\rightarrow$



Goiko mailan:



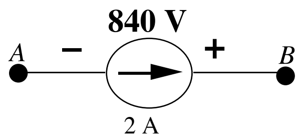
$$V_{BA} = V_{BD} + V_{DC} + V_{CA} \rightarrow$$

$$V_{BA} = +30\ \text{V} + 800\ \text{V} + 10\ \text{V} \rightarrow$$

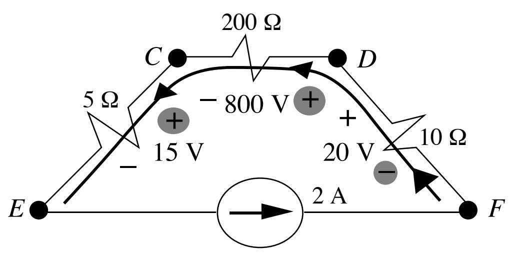
$$\rightarrow \quad V_{BA} = +840\ \text{V}$$

$\rightarrow$ *B*-ren potentziala *A*-rena baino altuagoa

$\rightarrow$ *B* + eta *A* – $\rightarrow$

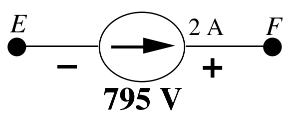


Beheko mailan:

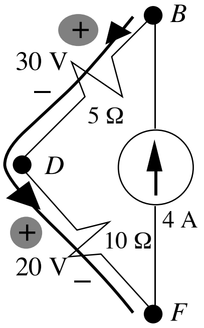


$$V_{FE} = V_{FD} + V_{DC} + V_{CE} = -20\ \text{V} + 800\ \text{V} + 15\ \text{V}$$

$$\rightarrow \quad V_{FE} = +795\ \text{V} \quad \rightarrow$$

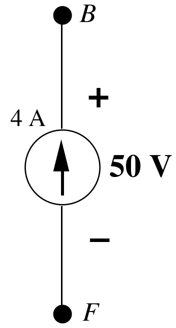


Eskuineko mailan:

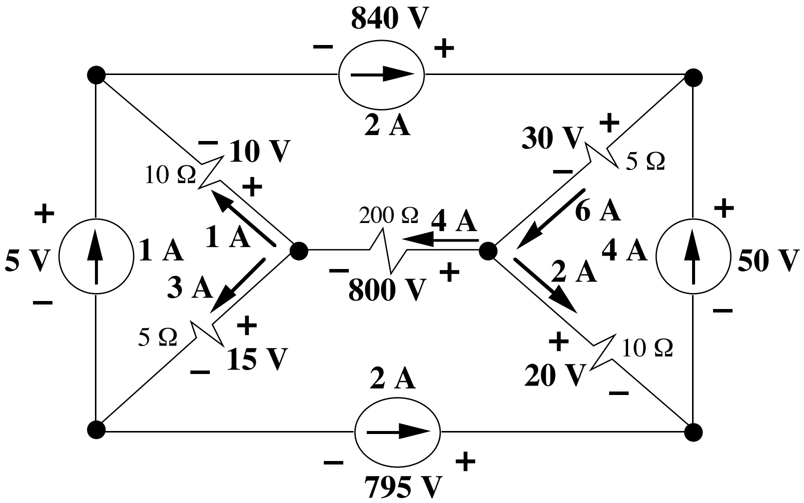


$$V_{BF} = V_{BD} + V_{DF} = +30\ \text{V} + 20\ \text{V}$$

$$\rightarrow \quad V_{BF} = +50\ \text{V} \quad \rightarrow$$



Beraz, dagoeneko, zirkuituaren soluzioa aurkitu dugu:



Berriro ere, KTL eta KKL egiaztatuz edota potentzien balantzea eginez egiazta daiteke soluzioa. Hona hemen zirkuitu honi dagokiona:

$$\Sigma P_{emandakoa} = P_{1A} + P_{2\,Agoikoa} + P_{4\,A} + P_{2\,Abehekoa}$$

$$\Sigma P_{emandakoa} = 5\ \text{V} \cdot 1\ \text{A} + 840\ \text{V} \cdot 2\ \text{A} + 50\ \text{V} \cdot 4\ \text{A} + 795\ \text{V} \cdot 2\ \text{A}$$

$$\Sigma P_{emandakoa} = 5\ \text{W} + 1680\ \text{W} + 200\ \text{W} + 1590\ \text{W} \quad \rightarrow \quad \Sigma P_{emandakoa} = 3475\ \text{W}$$

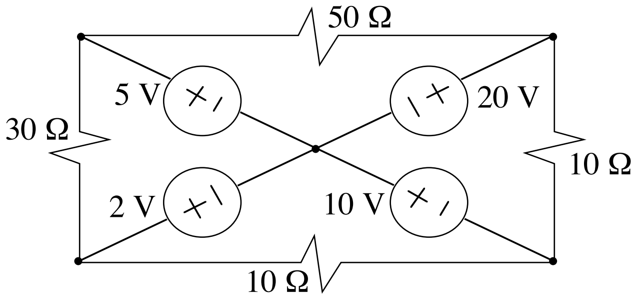
$$\Sigma P_{xurgatutakoa} = P_{10\Omega ezker} + P_{5\Omega ezker} + P_{200\Omega} + P_{10\Omega eskuin} + P_{5\Omega eskuin}$$

$$\Sigma P_{xurgatutakoa} = 10\ \text{V} \cdot 1\ \text{A} + 15\ \text{V} \cdot 3\ \text{A} + 800\ \text{V} \cdot 4\ \text{A} + 30\ \text{V} \cdot 6\ \text{A} + 20\ \text{V} \cdot 2\ \text{A}$$

$$\Sigma P_{xurgatutakoa} = 10\ \text{W} + 45\ \text{W} + 3200\ \text{W} + 180\ \text{W} + 40\ \text{W} \quad \rightarrow \quad \Sigma P_{xurgatutakoa} = 3475\ \text{W}$$

Potentzien balantzea: $\Sigma P_{emandakoa} = 3475\ \text{W} = \Sigma P_{xurgatutakoa}$

3. Egin ezazu irudiko zirkuituaren analisia; hots, kalkula itzazu elementu guztietako tentsioak eta korronteak.

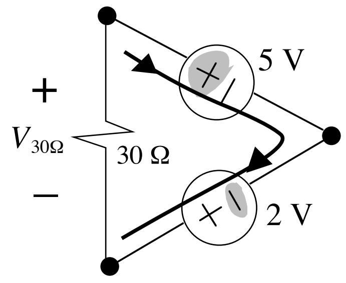


Ebazpena:

Begi-bistakoa da zirkuitu honetan ere, aurrekoan bezala, ez duela merezi ebazpide arruntari pausoz pauso lotzea, pausoak komeni zaigun ordenan egitea baizik, zirkuituaren honako ezaugarri hau dela eta: erresistentzia guztiek bina tentsio-sorgailurekin batera maila bana osatzen dutenez gero, erresistentzien muturren arteko tentsioak berehala kalkula daitezke, maila horietan KTL aplikatuz (ebazpidearen 6. urratsa, alegia). Hona hemen zirkuitu honen berehalako soluzioa, ezaugarri hori kontuan hartuz:

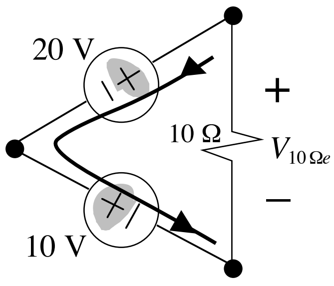
6. Aplikatu Kirchhoff-en tentsioen legea (KTL) maila guztietan.

Ezkerreko mailan:



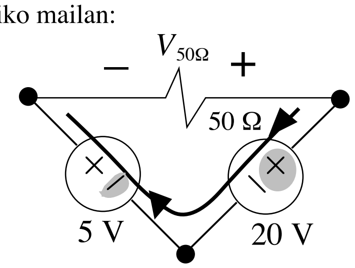
$V_{30\Omega} = +5\text{ V} - 2\text{ V} \rightarrow V_{30\Omega} = +3\text{ V}$

Eskuineko mailan:



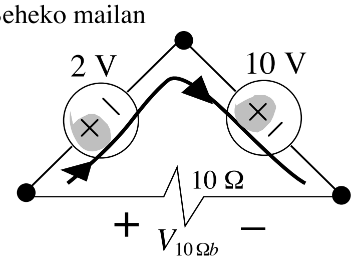
$V_{10\Omega e} = +20\text{ V} + 10\text{ V} \rightarrow V_{10\Omega e} = +30\text{ V}$

Goiko mailan:



$V_{50\Omega} = +20\text{ V} - 5\text{ V} \rightarrow V_{50\Omega} = +15\text{ V}$

Beheko mailan

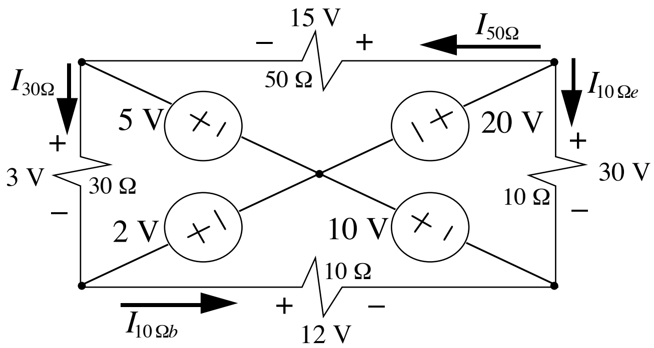


$V_{10\Omega b} = +2\text{ V} + 10\text{ V} \rightarrow V_{10\Omega b} = +12\text{ V}$

Orain, erresistentzietako tentsioen zeinuak eta balioak ezagunak direnez gero, zuzen-zuzenean joango gara 4. pausora, Ohm-en legea aplikatzera, hain zuzen ere; baina, oraingo honetan, erresistentzietatik igarotzen diren korronteak kalkulatzeko asmoz, horien noranzkoak eta balioak tentsioek finkatuta baitaude. Hona hemen:

4. Aplikatu Ohm-en legea erresistentzietan.

Badakigu erresistentziak beti osagai pasiboak direla. Hori kontuan izanik, eta tentsioen zeinuen arabera, erresistentzietatik igarotzen diren korronteen noranzkoak finkatu ditugu ondoko irudian:



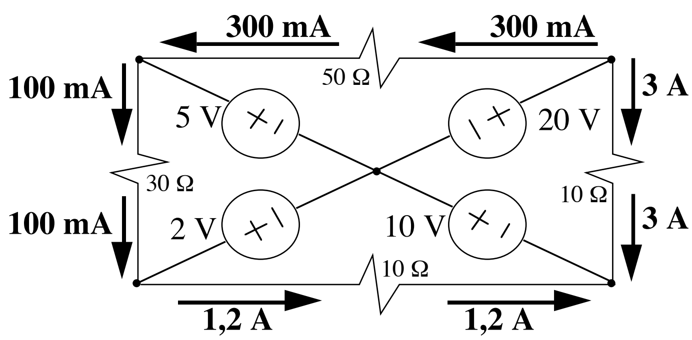
Orain, korronte horien balioak kalkulatzeari ekingo diogu, erresistentzia bakoitzean Ohm-en legea aplikatuz (gogoratu $v = R \cdot i$ dela):

Ohm-en legea 50 Ω-eko erresistentzian: $15\ \text{V} = 50\ \Omega \cdot I_{50\Omega} \quad \rightarrow \quad I_{50\Omega} = 300\ \text{mA}$

Ohm-en legea 30 Ω-eko erresistentzian: $3\ \text{V} = 30\ \Omega \cdot I_{30\Omega} \quad \rightarrow \quad I_{30\Omega} = 100\ \text{mA}$

Ohm-en legea 10 Ω-eko eskuineko erresistentzian: $30\ \text{V} = 10\ \Omega \cdot I_{10\Omega e} \quad \rightarrow \quad I_{10\Omega e} = 3\ \text{A}$

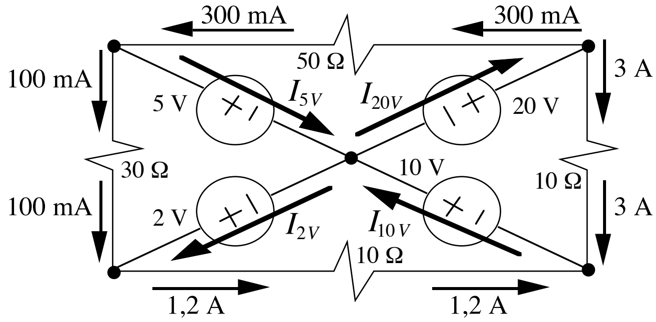
Ohm-en legea 10 Ω-eko beheko erresistentzian: $12\ \text{V} = 10\ \Omega \cdot I_{10\Omega b} \quad \rightarrow \quad I_{10\Omega b} = 1{,}2\ \text{A}$



Orain, erresistentziek osatzen duten laukiaren erpinetan (zirkuituaren korapiloak dira) KKL aplikatu daiteke, korapilo horietan elkartzen diren hiru korronteetatik bi ezagunak baitira, bakarra izanik ezezaguna. Hau da, zuzen-zuzenean joango gara 5. pausora. Hona hemen:

5. Aplikatu Kirchhoff-en korronteen legea (KKL) korapilo guztietan, batean izan ezik.

Garbi dago 5. pausoari ekin baino lehen, 1.ari ekin beharko geniokeela, korapiloak bilatzeari hain zuzen ere. Baina kasu honetan zirkuituaren korapiloak agerikoak dira: gorago aipatu den bezala laukiaren lau erpinak eta erdiko puntua baitira, guztira bost korapilo, beraz.

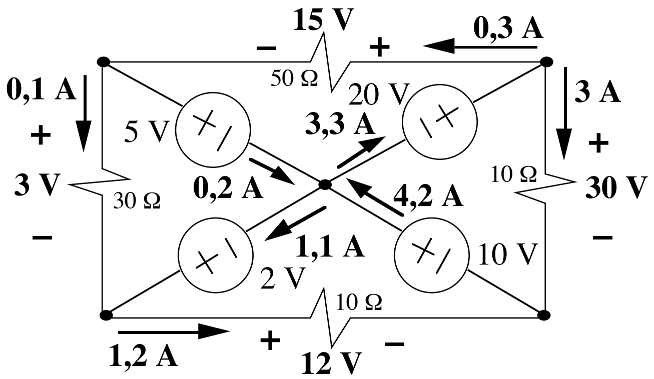


KKL goiko ezkerreko korapiloan:	$300 \text{ mA} = 100 \text{ mA} + I_{5V}$	$\rightarrow$	$I_{5V} = 0,2 \text{ A}$
KKL goiko eskuineko korapiloan:	$I_{20V} = 3 \text{ A} + 300 \text{ mA}$	$\rightarrow$	$I_{20V} = 3,3 \text{ A}$
KKL beheko ezkerreko korapiloan:	$I_{2V} + 100 \text{ mA} = 1,2 \text{ A}$	$\rightarrow$	$I_{2V} = 1,1 \text{ A}$
KKL beheko eskuineko korapiloan:	$I_{10V} = 3 \text{ A} + 1,2 \text{ A}$	$\rightarrow$	$I_{10V} = 4,2 \text{ A}$

Orain, nahi izanez gero, kalkulatutako balio horietan oinarriturik, erdiko korapiloan KKL betetzen dela egiazta dezakegu:

KKL erdiko korapiloan: $I_{5V} + I_{10V} = I_{2V} + I_{20V} \quad \rightarrow \quad 0,2 \text{ A} + 4,2 \text{ A} \equiv 1,1 \text{ A} + 3,3 \text{ A}$

Beraz, dagoeneko, zirkuituaren soluzioa aurkitu dugu:



Berriro ere, KTL eta KKL egiaztatuz, edota potentzien balantzea eginez egiazta daiteke soluzioa. Hona hemen zirkuitu honi dagokiona:

Tentsio-sorgailuek emandako potentzia:

$$\Sigma P_{emandakoa} = P_{5V} + P_{20V} + P_{10V} + P_{2V}$$

$$\Sigma P_{emandakoa} = 5\ \text{V} \cdot (-0{,}2\ \text{A}) + 20\ \text{V} \cdot 3{,}3\ \text{A} + 10\ \text{V} \cdot 4{,}2\ \text{A} + 2\ \text{V} \cdot 1{,}1\ \text{A}$$

$$\Sigma P_{emandakoa} = -1\ \text{W} + 66\ \text{W} + 42\ \text{W} + 2{,}2\ \text{W} \quad \rightarrow \quad \Sigma P_{emandakoa} = 109{,}2\ \text{W}$$

Erresistentziek xurgatutako potentzia:

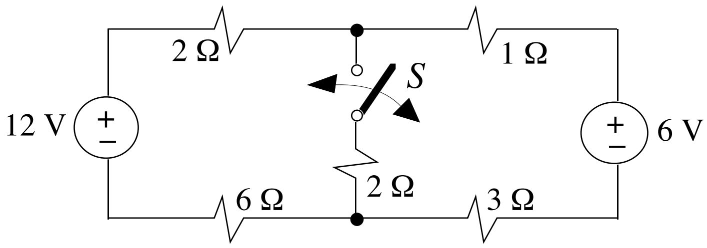
$$\Sigma P_{xurgatutakoa} = P_{50\Omega} + P_{10\Omega e} + P_{10\Omega b} + P_{30\Omega}$$

$$\Sigma P_{xurgatutakoa} = 15\ \text{V} \cdot 0{,}3\ \text{A} + 30\ \text{V} \cdot 3\ \text{A} + 12\ \text{V} \cdot 1{,}2\ \text{A} + 3\ \text{V} \cdot 0{,}1\ \text{A}$$

$$\Sigma P_{xurgatutakoa} = 4{,}5\ \text{W} + 90\ \text{W} + 14{,}4\ \text{W} + 0{,}3\ \text{W} \quad \rightarrow \quad \Sigma P_{xurgatutakoa} = 109{,}2\ \text{W}$$

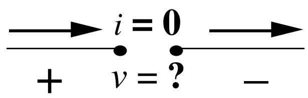
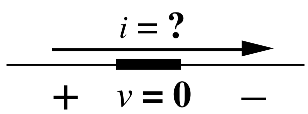
Potentzien balantzea: $\Sigma P_{emandakoa} = 109{,}2\ \text{W} = \Sigma P_{xurgatutakoa}$

4. Egin ezazu irudiko zirkuituaren analisia S etengailu idealaren bi posizioetarako. Bereziki, etengailua irekita dagoenean, kalkula ezazu bere muturren arteko tentsioa; eta etengailua itxita dagoenean, bere barnetik igarotzen den korronte-intentsitatea. Kontuan izan etengailu ideala irekita dagoenean zirkuitu ireki batez ordezkatzen dela; eta itxita dagoenean, berriz, zirkuitulabur batez.



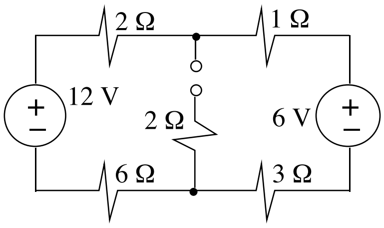
Ebazpena:

Agerikoa da etengailuaren posizioak zirkuituaren topologiaren gainean eragin garrantzitsua duela. Are gehiago, bi zirkuitu desberdinen aurrean gaudela esan genezake, hain baita desberdina etengailuaren portaera-ekuazioa kasu batean eta bestean. Gogora dezagun, lehendabizi, zein diren etengailu idealaren portaera-ekuazioak bi posizioetan:

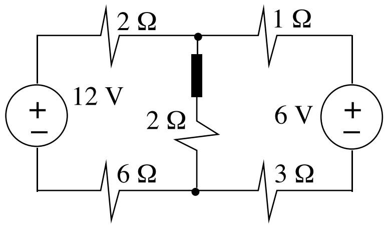
Posizioa:			**ekuazioa:**
a)	irekita:		$i = 0,\ \forall v$
b)	itxita:		$v = 0,\ \forall i$

Desberdintasun horiek direla kausa, ondoko irudiko bi zirkuituak analizatu beharko genituzke, independenteki. Hots, lana bikoiztu egiten da.

etengailua irekita:

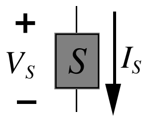


etengailua itxita:



Zirkuitua modu horretan arazorik gabe (lana bi aldiz egiteaz aparte) analiza daitekeen arren, lanaren bikoizketa hori saihesteko, badugu beste aukera bat:

Zirkuitu batean etengailua bezalako osagai "aldakor" bat aurkitzen dugunean (hots, egoera desberdinak eta, ondorioz, portaera-ekuazio desberdinak izan ditzakeen osagaia), egoera desberdin posible guztiak banan-banan aztertu beharrean, balizko egoera orokor bat kontsideratuko dugu. Horretarako, osagai "aldakorraren" portaeran parte hartzen duten magnitude guztiak ezezaguntzat hartuko ditugu, egoera zehatza aldez aurretik finkatu gabe, egoeraren arabera magnitude horien artean erlazio finko bat beteko dela baitakigu: osagai "aldakorraren" portaera-ekuazioa, hain zuzen ere. Esate baterako, etengailuaren kasuan, portaeran parte hartzen duten magnitudeak korrontea eta tentsioa dira eta honako modu honetan kontsideratuko dugu balizko egoera orokorra:



Agerikoa da osagai "aldakor" hori zirkuituko adar batean egongo dela eta, ondorioz, bere korrontea adarretik igarotzen dena izango dela; beraz, alde horretatik eta korronteari dagokionez, ez dugu ezezagun berririk gehitu zirkuituen ebazpide arruntari begira. Baina haren muturren arteko tentsioa —hori bai— ezezagun berria da (korronte-sorgailuen muturren arteko tentsioaren antzera, ebazpide arruntaren 3. pausoan agerikoa denez); eta horrexegatik, ebazpide arruntean lortzen diren ekuazioak ez dira nahikoak izango, osagai "aldakorraren" portaera-ekuazioa ere guztiz beharrezkoa baita.

Hori dela eta, metodo hori aplikatzeko, aldaketa txiki bat sartuko dugu ebazpide arruntean, ekuazioen esanahia agerian uzteko asmoz, besterik ez bada ere. Horrela, ebazpide arrunteko 5. eta 6. urratsak (KKL eta KTL aplikatzen direnekoak), urrats bakar batean bilduko ditugu, 5b urrats berrian, eta honela adieraziko dugu urrats berri hau:

5b. Idatzi zirkuituari dagozkion ekuazioak.

- Aplikatu Kirchhoff-en korronteen legea (KKL) korapilo guztietan batean izan ezik: ekuazio-kopurua = $N-1$.
- Aplikatu Kirchhoff-en tentsioen legea (KTL) maila guztietan (maila-kopurua = MK) edo behar adina begiztatan, $AK-(N-1)$ ekuazio lortzeko, non adar guztiak gutxienez behin azaldu behar diren.

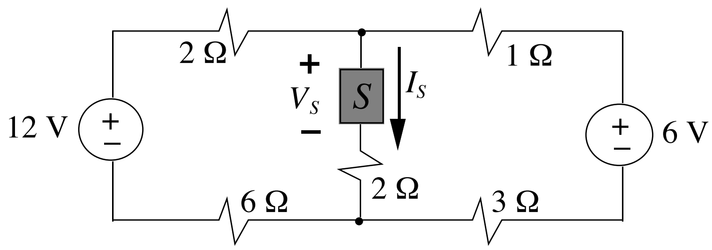
Ondoren, osagai "aldakorraren" portaera-ekuazioa idatziko dugu, 6b urrats berrian, eta honela adieraziko dugu urrats berri hori:

6b. Idatzi osagai "aldakorrari" dagozkion ekuazioak, egoeraren arabera.

Era horretan, zirkuituari dagozkion ekuazioak behin bakarrik idatziko ditugu, eta beraietan osagai "aldakorraren" magnitudeak agertuko dira ezezagun gisa. Ondoren, osagai "aldakorraren" portaera-ekuazio desberdinak idatziko ditugu, egoera desberdinen arabera. Horrela, ekuazio-sistema bat baino gehiago lortuko dugu, osagai "aldakorraren" egoera desberdin adina, hain zuzen ere. Azken ekuazio horiek izango dira ekuazio-sistemen arteko desberdintasun bakarra; eta besteetan ordezkatuz, zirkuituari dagozkion ekuazioak osagai "aldakorraren" egoera desberdinetarako partikularizatuko ditugu. Horrela, ekuazio-sistemaren ebazpena da bikoiztuko den lan bakarra, ekuazioak pixka bat aldatuko baitira osagai "aldakorraren" egoera desberdinetarako.

Metodo honen bitartez ebazpen-denbora murriztu egiten da, eta hori oso baliagarria da diodo eta transistoreak dituzten zirkuituetan, osagai horiei dagozkien gaietan ikusiko dugun legez.

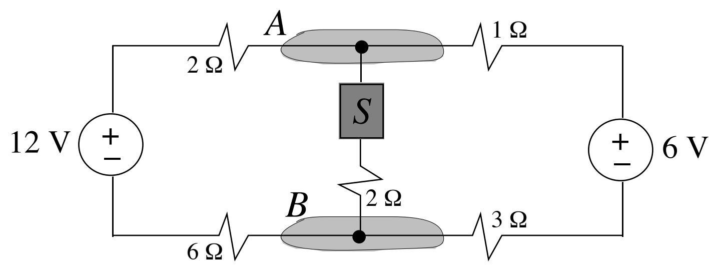
Aplika dezagun orain metodo hori analizatu nahi dugun zirkuituan. Horretarako, lehendabizi zirkuitua marraztuko dugu berriro, etengailuaren portaera-ekuazioan parte hartzen duten bi magnitudeak (korrontea eta tentsioa) agerian uzteko, etengailua baita kasu honetako osagai "aldakorra".



Orain, zirkuituaren analisia egiteko, gorago azaldutako moduan aldatutako ebazpide arruntari jarraituko gatzaizkio, pausoz pauso:

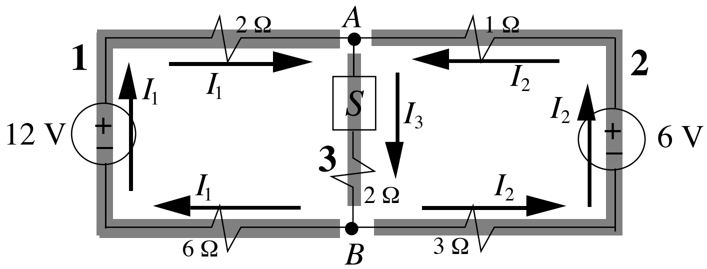
1. Bilatu zirkuituaren korapiloak (korapilo-kopurua = N).

Zirkuitu honetan bi korapilo baino ez daude, A eta B, ondoko irudian erakutsi den legez. Beraz, kasu honetan, $N = 2$.



2. Aukeratu arbitrarioki adarretako korronteen noranzkoak, korronte-sorgailuak dituzten adarretan izan ezik, adar horietatik igaroko diren korronteen intentsitate eta noranzkoak korronte-sorgailuek adierazitakoak baitira.

Beraz, lehendabizi adarrak bilatu behar ditugu; horretarako adar bat zer den gogoratu behar dugu: bi korapiloren arteko ibilbide bat. Hori gogoan izanik, erraz ikus daiteke zirkuitu honetan hiru adar daudela, irudian erakutsi den legez. Ondoren, adarretako korronteen noranzkoak arbitrarioki finkatu ditugu, irudian erakutsitako eran.



Irudian agerikoa da $I_3 = I_S$ dela.

Baldin adar-kopurua = AK = 3, eta adar desberdinetan dauden korronte-sorgailuen kopurua = KS = 0 badira →

Korronte ezezagunen kopurua = $AK - KS = 3 - 0 = 3$: I_1, I_2 eta I_S.

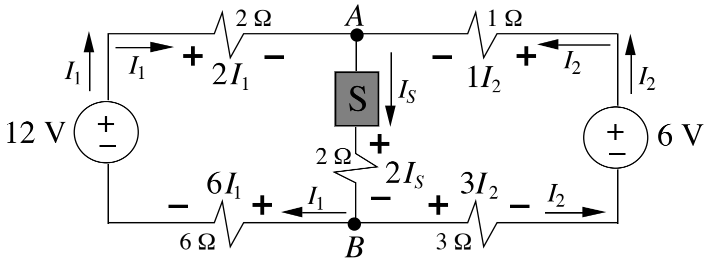
Korronte ezezagun horiez gain, etengailuaren muturren arteko tentsioa ere, V_S, ezezaguna da, I_S eta V_S-ren artean lotura bat egongo dela jakin arren. Beraz:

Korronte eta tentsio ezezagunen kopurua = 3 + 1 = 4 : I_1, I_2, I_S eta V_S.

Orain, zirkuitu honetan korronte-sorgailurik ez dagoenez gero, 3. pausoa alde batera utziko dugu, zuzen-zuzenean 4.era pasatzeko.

4. Finkatu erresistentzietako tentsioen zeinuak Ohm-en legearen arabera, eta aplikatu Ohm-en legea erresistentzietako tentsioak adarretako korronteen funtzioan izateko.

Gogoratu Ohm-en legeak dioena: $v_R = R \cdot i$, korrontea tentsioaren alde positibotik sartzen delarik beti. Horren arabera, zirkuituko erresistentzietan ondoko irudiko tentsioak izango ditugu, arbitrarioki finkatutako korronteen arabera.

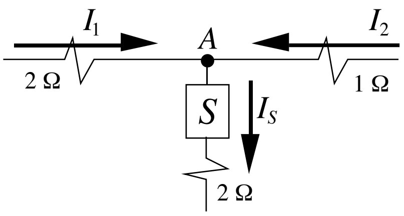


Atal honetako 1. ariketan esan genuen legez, ez da beharrezkoa erresistentzietako tentsioen balioak ipintzea, berehalakoa baita hurrengo pausoan kalkulu horiek buruz egitea. Haatik, azpimarratu beharra dago pauso hau hagitz garrantzitsua dela tentsioen zeinuei dagokienez, buruz egiten bada, zeinuok grafikoki adierazi ezean oso erraza baita, gero, KTL aplikatzean, hanka sartzea.

5b. Idatzi zirkuituari dagozkion ekuazioak.

- Aplikatu Kirchhoff-en korronteen legea (KKL) korapilo guztietan batean izan ezik: ekuazio-kopurua = $N-1$.

Betearaz diezaiogun zirkuituari KKL legea $N-1=1$ korapilotan soilik, goiko korapiloan (A), hain zuzen ere:



KKL A korapiloan:

korapilora iritsi = I_1 eta I_2

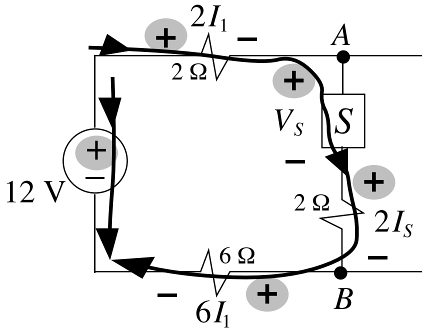
korapilotik irten = I_S

1. ekuazioa: $I_1 + I_2 = I_S$

Irakurleak egiazta dezake ezen KKL B beheko korapiloan aplikatuz gero, ekuazio bera lortzen dela.

- Aplikatu Kirchhoff-en tentsioen legea (KTL) maila guztietan (maila-kopurua = $MK = 2$) edo behar adina begiztatan, $AK-(N-1)=3-(2-1)=2$ ekuazio lortzeko, non adar guztiak gutxienez behin azaldu behar diren.

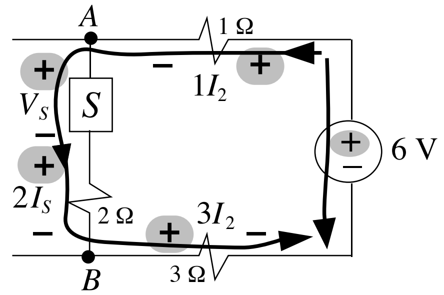
Hau da, KTL aplikatuz, gehienez ere bi ekuazio lortuko ditugu. Beraz, lau ezezagun ditugu, baina oraingoz hiru ekuazio besterik ez (bat KKL eta bi KTL); nondik aterako dugu falta zaigun azken ekuazioa? Une honetan ariketaren hasieran aipatu duguna gogoratu beharko du irakurleak: osagai "aldakorraren" portaera-ekuazioa izango da, hain zuzen ere, azken ekuazio hori, egoeraren arabera azken momentuan partikularizatuko duguna. Hori kontuan izanik, lor ditzagun, bada, KTLren bitartez lor daitezkeen bi ekuazioak, KTL mailetan aplikatuz. Hona hemen ekuazioak, orain arte erabilitako irizpide berdinei jarraituz:



ezker aldeko mailan:

2. ekuazioa:

$$2I_1 + V_S + 2I_S + 6I_1 = 12 \text{ V}$$



eskuin aldeko mailan:

3. ekuazioa:

$$1I_2 + V_S + 2I_S + 3I_2 = 6 \text{ V}$$

Dagoeneko, zirkuituari dagozkion hiru ekuazioak lortu ditugu. Orain, osagai "aldakorraren" portaera-ekuazioa idatziko dugu, 6b urrats berrian:

6b. Idatzi osagai "aldakorrari" dagozkion ekuazioak, egoeraren arabera.

Kasu honetan ekuazio bakarra da egoera bakoitzeko.

4. ekuazioa: osagai "aldakorraren" portaera-ekuazioa

etengailua itxita: $V_S = 0$

etengailua irekita: $I_S = 0$

Dagoeneko, behar genituen ekuazio guztiak lortu ditugu, eta hurrengo pausoari ekin diezaiokegu.

7. Ebatzi horrela lortutako ekuazio-sistema.

Hona hemen, berridatzita, lortu ditugun ekuazioak:

Zirkuituari dagozkion ekuazioak:	❶	$I_1 + I_2 = I_S$
	❷	$2I_1 + V_S + 2I_S + 6I_1 = 12$
	❸	$1I_2 + V_S + 2I_S + 3I_2 = 6$
Osagai aldakorraren portaera- ekuazioa, itxita:	❹'	$V_S = 0$
irekita:	❹''	$I_S = 0$

Garbi dago, beraz, bi ekuazio-sistema desberdin ditugula, etengailuaren egoeraren arabera. Hona hemen bi ekuazio-sistemak eta horien soluzioak:

etengailua itxita dagoenean:

❶ $I_1 + I_2 = I_S$

❷ $2I_1 + V_S + 2I_S + 6I_1 = 12$

❸ $1I_2 + V_S + 2I_S + 3I_2 = 6$

❹' $V_S = 0$

etengailua irekita dagoenean:

❶ $I_1 + I_2 = I_S$

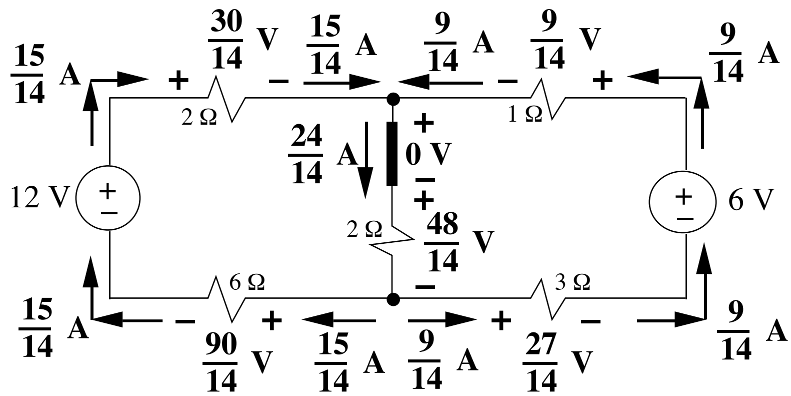
❷ $2I_1 + V_S + 2I_S + 6I_1 = 12$

❸ $1I_2 + V_S + 2I_S + 3I_2 = 6$

❹'' $I_S = 0$

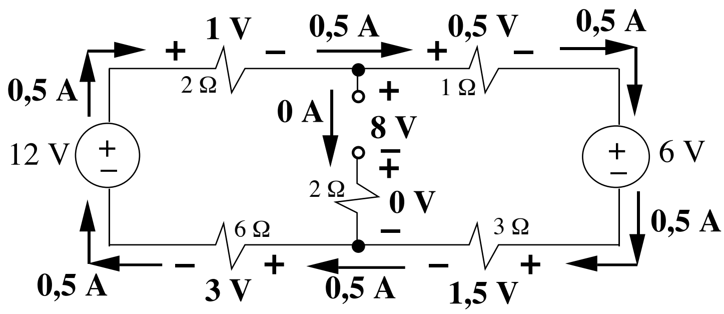
Soluzioa etengailua itxita dagoenean:

$$I_1 = \frac{15}{14}\ \text{A}, \qquad I_2 = \frac{9}{14}\ \text{A}, \qquad I_3 = \frac{24}{14}\ \text{A}, \qquad V_S = 0\ \text{V}$$



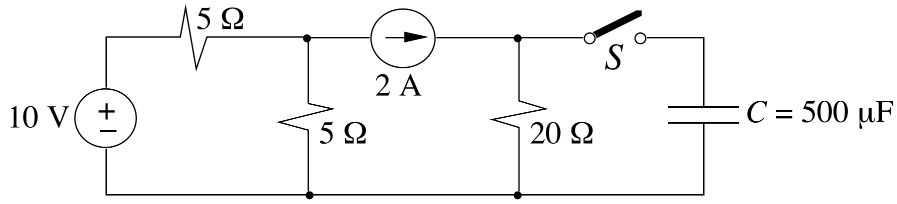
Soluzioa etengailua irekita dagoenean:

$$I_1 = 0{,}5\ \text{A}, \qquad I_2 = -0{,}5\ \text{A}, \qquad I_S = 0\ \text{A}, \qquad V_S = 8\ \text{V}$$



Hemen ere, irakurleak potentzien balantzea eginez egiazta ditzake soluzioak.

5. Irudiko zirkuiturako:



a) Kalkula itzazu osagai guztietako korronte eta tentsioak S etengailua irekita egonik.

Kalkula ezazu baita ere osagai bakoitzeko potentzia, emandakoa ala xurgatutakoa den adieraziz. Egin ezazu potentzien balantzea.

b) Kalkula ezazu etengailua itxi ondorengo egoera egonkor berrian kondentsadoreak lortuko duen tentsioa. Egin ezazu potentzien balantzea egoera egonkor berri horretan. Zer azpimarratuko zenuke?

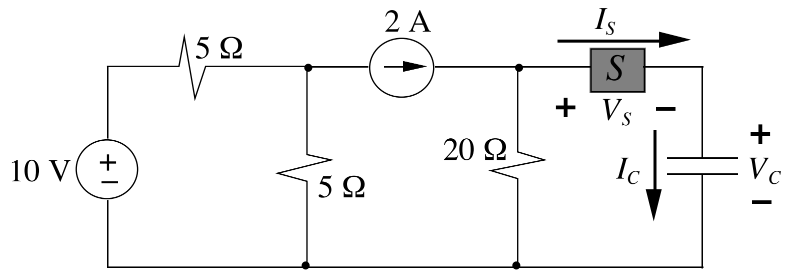
Ebazpena:

Ariketa honetan bi dira osagai "bereziak": etengailua eta kondentsadorea. Etengailuaren eragina zirkuituaren gainean aurreko ariketan bezala analizatuko dugun arren, oraingo honetan eragin hori ez da bakarrik zirkuituaren topologiaren gainekoa; izan ere, etengailuaren posizioa aldatzeak eragin nabaria izango du kondentsadorearen portaeran, 5. kapituluan ikusiko den legez.

Arrazoia honako hau da: kondentsadorearen portaera-ekuazioa ez da lineala, diferentziala baizik; horrexegatik, haren portaera desberdina da zirkuituko magnitudeak konstante mantentzen direnean (egoera egonkorra) eta denboran zehar aldatzen ari direnean (egoera iragankorra). Azken egoera hau zirkuituan edozein aldaketa (etengailuaren posizioa aldatzea, hain zuzen ere) gertatzen denean gertatuko da. (Gogoratu 0. kapituluan zirkuituetako egoera egonkorra eta iragankorra definitu genituela, eta 2. kapituluan, kondentsadorearen portaera korronte zuzeneko zirkuituetako egoera egonkorretan.)

Horrelako zirkuituetan etengailuaren posizioa aldatzen den unean gertatzen den egoera iragankorra 5. kapituluan azalduko da; baina izenak berak dioenez, egoera hori etengailuaren posizio-aldaketa gertatu ondorengo denbora-tarte labur batean "iragaten" da, eta zirkuitua egoera egonkor berri batera iritsiko da etengailuaren posizio berrian. Oraingo honetan, bada, etengailuaren bi posizio desberdinetan gertatzen diren egoera egonkorrak soilik aztertu nahi ditugu, eta egoera egonkor horietan kondentsadorearen portaera finkoa eta ezaguna da, zirkuitu ireki baten modura jokatzen baitu (gogoratu berriro ere, kondentsadoreari buruz 2. kapituluan esandakoa).

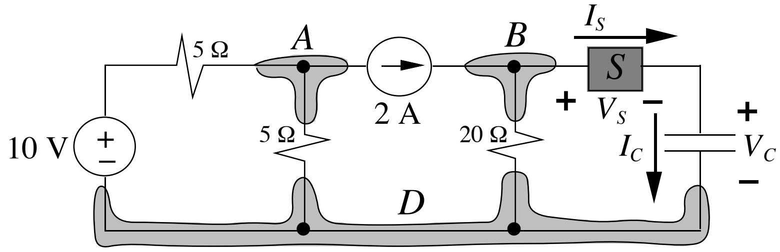
Hori guztia kontuan hartuz, ekin diezaiogun, bada, esandako bi egoera egonkorretan zirkuitua analizatzeari. Aurreko ariketan bezala, zirkuituari dagozkion ekuazioak idaztean, etengailua posizio orokor batean balego bezala hartuko dugu kontuan, eta gero ekuazioak bi posizio desberdinetarako partikularizatuko ditugu. Beste horrenbeste egingo dugu kondentsadorearekin. Hona hemen, beraz, analizatu behar dugun zirkuituaren eskema.



Orain, zirkuituaren analisia egiteko, aldatutako ebazpide arruntari jarraituko gatzaizkio:

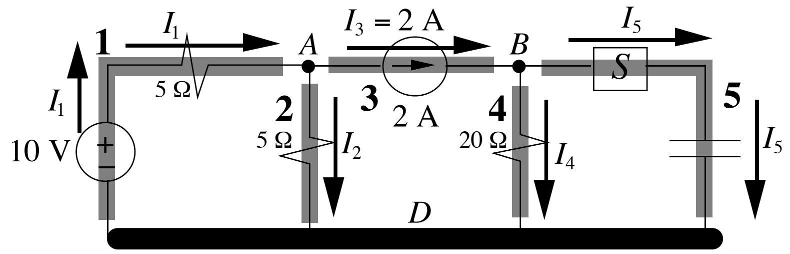
1. Bilatu zirkuituaren korapiloak (korapilo-kopurua = N).

Zirkuitu honetan hiru korapilo besterik ez dago, A, B eta D, ondoko irudian erakutsi den legez. Beraz, kasu honetan, $N = 3$.



2. Aukeratu arbitrarioki adarretako korronteen noranzkoak, korronte-sorgailuak dituzten adarretan izan ezik, adar horietatik igaroko diren korronteen intentsitate eta noranzkoak korronte-sorgailuek adierazitakoak baitira.

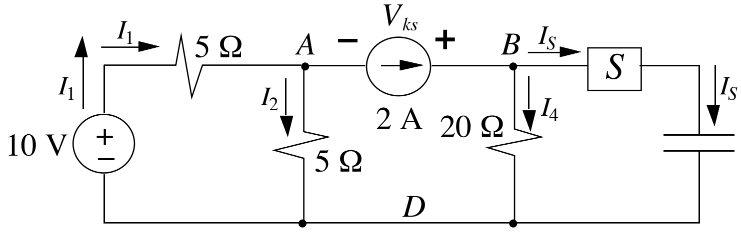
Ondoko irudian, zirkuitu honetako adarrak eta arbitrarioki aukeratutako adarretako korronteen noranzkoak ageri dira. Irudian agerikoa denez, $I_3 = 2$ A eta $I_5 = I_S = I_C$.



Baldin adar-kopurua = $AK = 5$, eta adar desberdinetan dauden korronte-sorgailuen kopurua = $KS = 1$ badira,

Korronte ezezagunen kopurua = $AK - KS = 5 - 1 = 4$: I_1, I_2, I_4 eta I_S.

3. Aukeratu arbitrarioki korronte-sorgailuetako tentsioen zeinuak (tentsio ezezagunen kopurua = $KS = 1$).



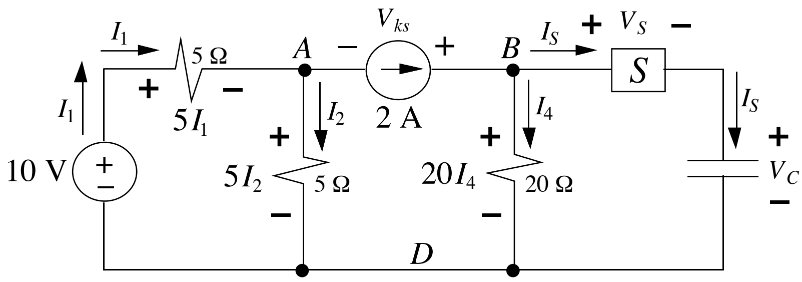
Korronte eta tentsio ezezagunen kopurua = 4 + 1 = 5 : I_1, I_2, I_4, I_S eta V_{ks}.

Korronte eta tentsio ezezagun horiez gain, etengailuaren muturren arteko tensioa, V_S, eta kondentsadorearen muturren artekoa, V_C, ere, ezezagunak dira. Beraz:

Korronte eta tentsio ezezagunen kopurua = 5 + 2 = 7 : I_1, I_2, I_4, I_S, V_{ks}, V_S eta V_C.

4. Finkatu erresistentzietako tentsioen zeinuak Ohm-en legearen arabera, eta aplikatu Ohm-en legea, erresistentzietako tentsioak adarretako korronteen funtzioan izateko.

Arbitrarioki finkatutako korronteen arabera, ondoko irudiko tentsioak izango ditugu:



5b. Idatzi zirkuituari dagozkion ekuazioak.

- Aplikatu Kirchhoff-en korronteen legea (KKL) korapilo guztietan batean izan ezik: ekuazio-kopurua = N – 1= 2.

Betearaz diezaiogun zirkuituari KKL legea bi korapilotan soilik, A eta B korapiloetan hain zuzen ere:

KKL A korapiloan:	KKL B korapiloan:
korapilora iritsi = I_1	korapilora iritsi = 2 A
korapilotik irten = 2 A eta I_2	korapilotik irten = I_S eta I_4
1. ekuazioa: $I_1 = 2 + I_2$	2. ekuazioa: $2 = I_S + I_4$

- Aplikatu Kirchhoff-en tentsioen legea (KTL) maila guztietan (maila-kopurua = MK = 3), hiru ekuazio lortzeko.

Hona hemen ekuazioak, orain arte erabilitako irizpide berdinei jarraituz:

ezker aldeko mailan:	erdiko mailan:	eskuin aldeko mailan:
3. ekuazioa:	4. ekuazioa:	5. ekuazioa:
$5I_1 + 5I_2 = 10\ \text{V}$	$5I_2 = -V_{ks} + 20I_4$	$20I_4 = V_S + V_C$

6b. Idatzi osagai "aldakorrei" dagozkien ekuazioak, egoeraren arabera.

Falta diren beste bi ekuazioak:

6. ekuazioa: etengailuaren portaera-ekuazioa, posizioaren araberakoa

etengailua itxita: $V_S = 0$

etengailua irekita: $I_S = 0$

7. ekuazioa: kondentsadorearen portaera-ekuazioa egoera egonkorrean: $I_C = 0$

7. Ebatzi horrela lortutako ekuazio-sistema.

Hona hemen, berridatzita, lortu ditugun ekuazioak:

Zirkuituari dagozkion ekuazioak:

❶ $I_1 = 2 + I_2$
❷ $2 = I_S + I_4$
❸ $5I_1 + 5I_2 = 10$
❹ $5I_2 = -V_{ks} + 20I_4$
❺ $20I_4 = V_S + V_C$

etengailuaren portaera-ekuazioa:

❻' $I_S = 0$
❻'' $V_S = 0$

kondentsadorearena, egoera egonkorrean:

❼ $I_C = 0$

Garbi dago, beraz, bi ekuazio-sistema desberdin ditugula, etengailuaren posizioaren arabera. Hona hemen bi ekuazio-sistemak eta horien soluzioak:

etengailua irekita dagoenean:	etengailua itxita dagoenean:
❶ $I_1 = 2 + I_2$	❶ $I_1 = 2 + I_2$
❷ $2 = I_S + I_4$	❷ $2 = I_S + I_4$
❸ $5I_1 + 5I_2 = 10$	❸ $5I_1 + 5I_2 = 10$
❹ $5I_2 = -V_{ks} + 20I_4$	❹ $5I_2 = -V_{ks} + 20I_4$
❺ $20I_4 = V_S + V_C$	❺ $20I_4 = V_S + V_C$
❻' $I_S = 0$	❻'' $V_S = 0$
❼ $I_C = 0$	❼ $I_C = 0 \rightarrow I_S = 0$

Soluzioa etengailua irekita dagoenean:

$I_1 = 2\ \mathrm{A}$, $I_2 = 0\ \mathrm{A}$, $I_4 = 2\ \mathrm{A}$, $I_C = I_S = 0\ \mathrm{A}$, $V_{ks} = 40\ \mathrm{V}$, $V_S + V_C = 40\ \mathrm{V}$

kondentsadorea deskargatuta badago: $V_C = 0\ \mathrm{V}$, $V_S = 40\ \mathrm{V}$

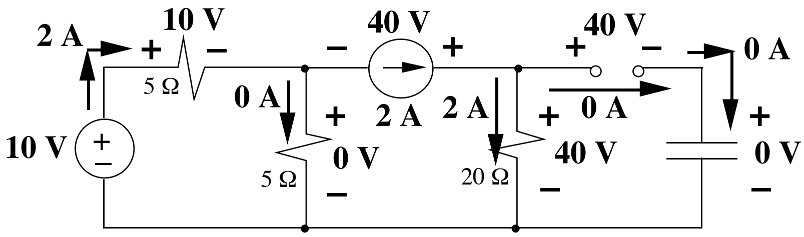
Soluzioa etengailua itxita dagoenean:

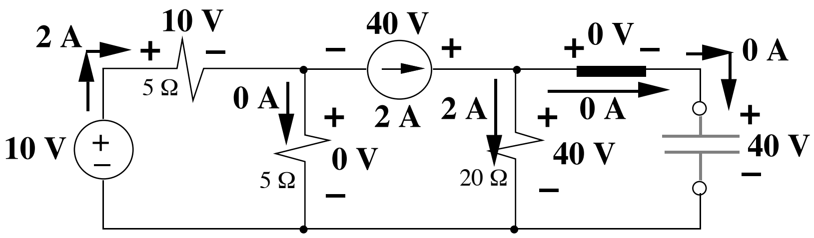
$I_1 = 2\ \mathrm{A}$, $I_2 = 0\ \mathrm{A}$, $I_4 = 2\ \mathrm{A}$, $I_C = I_S = 0\ \mathrm{A}$, $V_{ks} = 40\ \mathrm{V}$, $V_S = 0\ \mathrm{V}$, $V_C = 40\ \mathrm{V}$

Agerikoa da bi soluzioak berdinak direla, kondentsadorearen eta etengailuaren tentsioak izan ezik. Hori bai, bietan betetzen da $V_S + V_C = 40\ \mathrm{V}$.

Laburbilduz, etengailua irekita dagoenean eskuineko adarretik ez da korronterik igarotzen etengailua irekita dagoelako; eta, kondentsadorea deskargatuta dagoela suposatzen badugu, orduan zirkuituak adar horren muturren artean ezarritako tentsio osoa etengailuaren muturren artean agertzen da (40 V). Etengailua itxita dagoenean, berriz, eskuineko adarretik ez da korronterik igarotzen kondentsadoreak egoera egonkorra iritsi duelako, erabat kargatua izanik; horrexegatik, emaitza berdinak lortzen dira, baina oraingo honetan etengailuaren muturren arteko tentsioa zero da, zirkuitulaburtuta baitago, eta, ondorioz, zirkuituak adar horren muturren artean ezarritako tentsio osoa kondentsadorearen muturren artean agertzen da (40 V), karga-prozesuan zehar kondentsadoreak lortu duen karga horixe izanik; hots, etengailua itxi ondorengo egoera iragankorrean, kondentsadorea kargatuz joan da, egoera egonkorrean 40 V-eko tentsioa lortu arte.

Ondoko irudietan zirkuituaren soluzioak aurkeztu dira, etengailuaren bi posizioetarako, kontuan izanik berdinak direla, eskuineko adarreko tentsioak izan ezik.





Potentzien balantzeari dagokionez, agerikoa da bi kasu horietan berdina izango dela, bietan eskuineko adarreko korrontea zero delako; ondorioz, bai etengailuak eta bai kondentsadoreak xurgatzen duten potentzia zero da. Beraz, hona hemen potentzien balantzea:

Sorgailuek emandako potentzia: $\Sigma P_{emandakoa} = P_{10V} + P_{2A} = 10\ \text{V} \cdot 2\ \text{A} + 40\ \text{V} \cdot 2\ \text{A}$

$$\Sigma P_{emandakoa} = 20\ \text{W} + 80\ \text{W} = 100\ \text{W} \qquad \rightarrow \qquad \Sigma P_{emandakoa} = 100\ \text{W}$$

Osagai pasiboek xurgatutako potentzia:

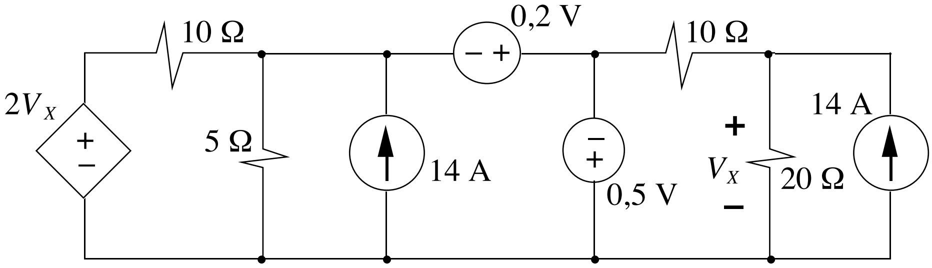
$$\Sigma P_{xurgatutakoa} = P_{5\Omega goikoa} + P_{5\Omega behekoa} + P_{20\Omega} + P_{etengailua} + P_{kondentsadorea}$$

$$\Sigma P_{xurgatutakoa} = 10\ \text{V} \cdot 2\ \text{A} + 0\ \text{V} \cdot 0\ \text{A} + 40\ \text{V} \cdot 2\ \text{A} + V_S \cdot 0\ \text{A} + V_C \cdot 0\ \text{A}$$

$$\Sigma P_{xurgatutakoa} = 20\ \text{W} + 0\ \text{W} + 80\ \text{W} + 0\ \text{W} + 0\ \text{W} \quad \rightarrow \quad \Sigma P_{xurgatutakoa} = 100\ \text{W}$$

Potentzien balantzea: $\Sigma P_{emandakoa} = 100\ \text{W} = \Sigma P_{xurgatutakoa}$

6. Analiza ezazu ondoko irudiko zirkuitua; hots, kalkula itzazu elementu guztietako tentsioak eta korronteak.



Ebazpena:

Zirkuitu honen berezitasuna sorgailu menpeko bat izatea da. Bereziki, tentsioz kontrolaturiko tentsio-sorgailu bat da, eta $2V_X$ tentsioa ematen du, kontrol-tentsioa V_X izanik, zirkuituko beste elementu baten muturren artekoa; izan ere, V_X hori 20 Ω-eko erresistentziaren muturren arteko tentsioa da, irudian ageri den legez.

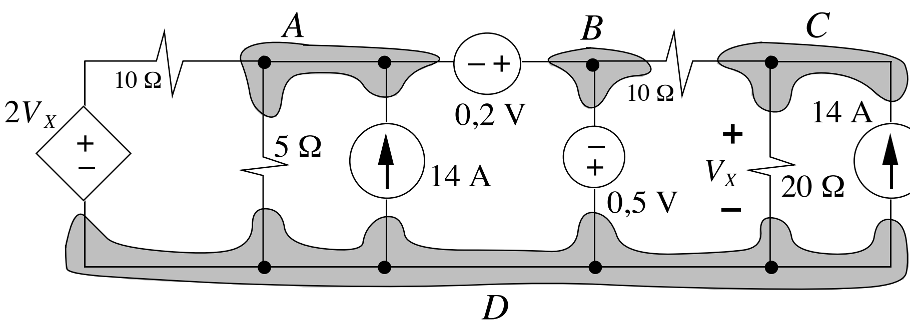
Dena den, zirkuituaren analisiari dagokionez, berezitasun horrek ez du aparteko eraginik; kontuan hartu beharreko gauza bakarra honako hau da, alegia, oraingo honetan tentsio ezezagun bat ($2V_X$) hornitzen duen tentsio-sorgailu bat dagoela, eta horrexegatik zirkuitu arruntetan baino ekuazio bat gehiago behar dela: V_X tentsioa definitzen duen ekuazioa, hain zuzen ere. Hori guztia kontuan izanik, analisia egiteko aurreko ariketetan aldatutako metodo arruntari jarraituko gatzaizkio, besterik gabe, baina oraingo honetan 6b urratsa honela adieraziko dugu:

> **6b.** Idatzi menpeko sorgailuen kontrol-magnitudeei dagozkien ekuazioak.

Hona hemen zirkuitu honi dagokion ebazpidea:

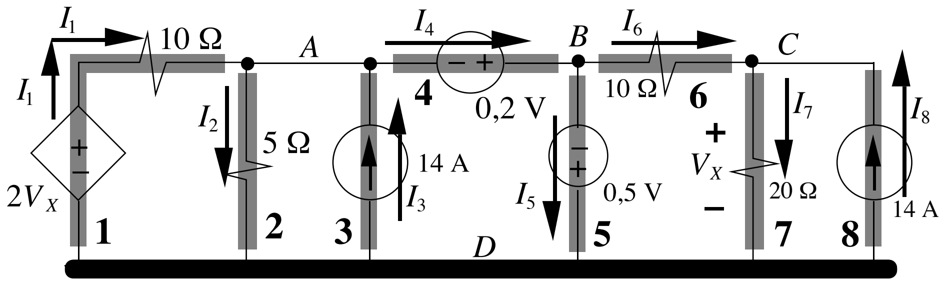
> **1.** Bilatu zirkuituaren korapiloak (korapilo-kopurua = N).

Zirkuitu honetan lau korapilo besterik ez dago, A, B, C eta D, ondoko irudian erakutsi den legez. Beraz, kasu honetan, $N = 4$.



2. Aukeratu arbitrarioki adarretako korronteen noranzkoak, korronte-sorgailuak dituzten adarretan izan ezik, adar horietatik igaroko diren korronteen intentsitate eta noranzkoak korronte-sorgailuek adierazitakoak baitira.

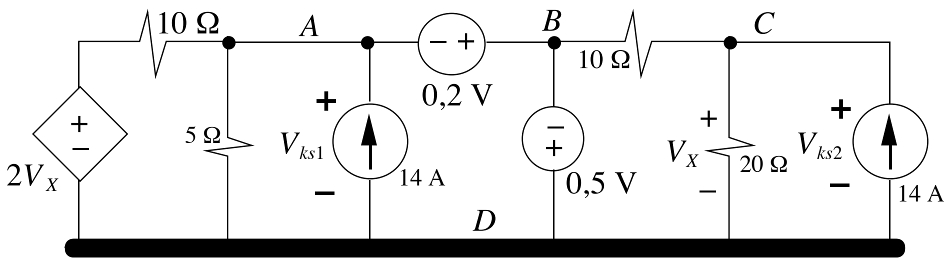
Ondoko irudian, zirkuitu honetako adarrak eta arbitrarioki aukeratutako adarretako korronteen noranzkoak ageri dira. Irudian agerikoa denez, I_3 = 14 A eta I_8 = 14 A.



Baldin adar-kopurua = AK = 8, eta adar desberdinetan dauden korronte-sorgailuen kopurua = KS = 2 badira,

Korronte ezezagunen kopurua = $AK - KS = 8 - 2 = 6$: I_1, I_2, I_4, I_5, I_6, eta I_7.

3. Aukeratu arbitrarioki korronte-sorgailuetako tentsioen zeinuak (tentsio ezezagunen kopurua = KS = 2).



Korronte eta tentsio ezezagunen kopurua = 6 + 2 = 8 :

I_1, I_2, I_4, I_5, I_6, I_7 eta V_{ks1}, V_{ks2}.

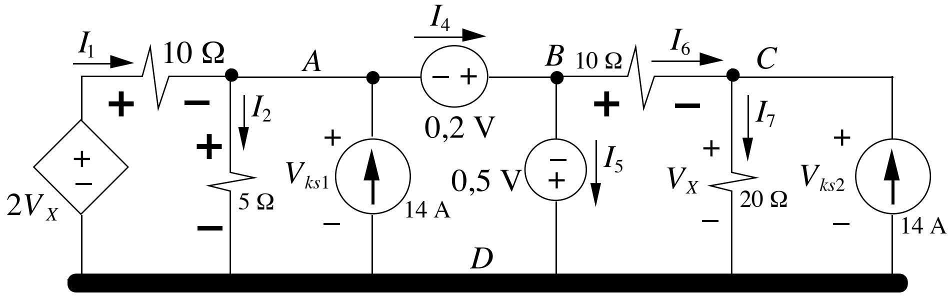
Korronte eta tentsio ezezagun horiez gain, menpeko sorgailuaren kontrol-tentsioa, V_X, ere, ezezaguna da. Beraz:

Korronte eta tentsio ezezagunen kopurua = 8 + 1 = 9 :

I_1, I_2, I_4, I_5, I_6, I_7 eta V_{ks1}, V_{ks2} eta V_X.

4. Finkatu erresistentzietako tentsioen zeinuak Ohm-en legearen arabera, eta aplikatu Ohm-en legea, erresistentzietako tentsioak adarretako korronteen funtzioan izateko.

Arbitrarioki finkatutako korronteen arabera, ondoko irudiko tentsioak izango ditugu:



5b. Idatzi zirkuituari dagozkion ekuazioak.

- Aplikatu Kirchhoff-en korronteen legea (KKL) korapilo guztietan batean izan ezik: ekuazio-kopurua = $N - 1 = 3$.

Betearaz diezaiogun zirkuituari KKL legea hiru korapilotan soilik, *A*, *B* eta *C* korapiloetan hain zuzen ere:

KKL *A* korapiloan:	KKL *B* korapiloan:	KKL *C* korapiloan:
1. ekuazioa:	2. ekuazioa:	3. ekuazioa:
$I_1 + 14 = I_2 + I_4$	$I_4 = I_5 + I_6$	$I_6 + 14 = I_7$

- Aplikatu Kirchhoff-en tentsioen legea (KTL) maila guztietan (maila-kopurua = $MK = 5$), bost ekuazio lortzeko.

Hona hemen bost ekuazio horiek, orain arte erabilitako irizpide berdinei jarraituz:

ezker aldeko mailan:	ezker-erdiko mailan:	erdiko mailan:
4. ekuazioa:	5. ekuazioa:	6. ekuazioa:
$2V_X = 10I_1 + 5I_2$	$5I_2 = V_{ks1}$	$V_{ks1} = -0{,}2 - 0{,}5$

eskuin-erdiko mailan:	eskuin aldeko mailan:
7. ekuazioa: $-0{,}5 = 10I_6 + 20I_7$	8. ekuazioa: $20I_7 = V_{ks2}$

6b. Idatzi menpeko sorgailuen kontrol-magnitudeei dagozkien ekuazioak.

Kasu honetan, V_X tentsioa adierazten duen ekuazioa idatzi behar dugu. Erresistentzia baten muturren arteko tentsioa denez gero, Ohm-en legea aplikatu besterik ez da egin behar:

9. ekuazioa: $V_X = 20I_7$

7. Ebatzi horrela lortutako ekuazio-sistema.

Hona hemen, berridatzita, lortu ditugun ekuazioak:

❶ $I_1 + 14 = I_2 + I_4$
❷ $I_4 = I_5 + I_6$
❸ $I_6 + 14 = I_7$

Zirkuituari dagozkion ekuazioak:

❹ $2V_X = 10I_1 + 5I_2$
❺ $5I_2 = V_{ks1}$
❻ $V_{ks1} = -0,7$
❼ $-0,5 = 10I_6 + 20I_7$
❽ $20I_7 = V_{ks2}$

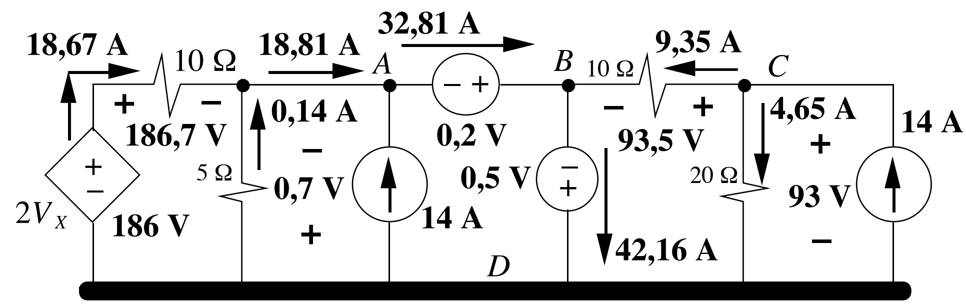
menpeko sorgailuaren kontrol-tentsioa:

❾ $V_X = 20I_7$

Hona hemen soluzioa:

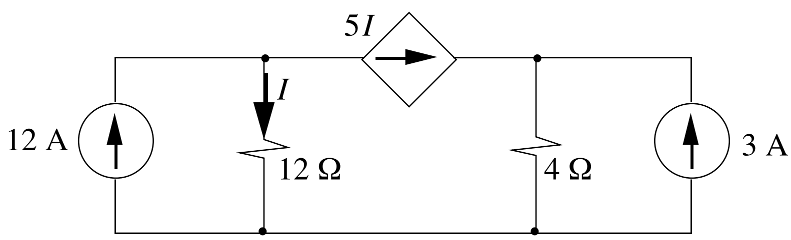
$I_1 = 18,67$ A, $I_2 = -0,14$ A, $I_3 = 14$ A, $I_4 = 32,81$ A, $I_5 = 42,16$ A, $I_6 = -9,35$ A
$I_7 = 4,65$ A, $I_8 = 14$ A, $V_{ks1} = -0,7$ V, $V_{ks2} = 93$ V, $V_X = 93$ V

Ondoko irudian zirkuituaren soluzioa aurkeztu da, zirkuituaren egoera horixe izanik.



Soluzioa egiaztatzeko, irakurleak potentzien balantzea egin dezake; edota Kirchhoff-en legeak betetzen direla egiazta dezake.

7. Analiza ezazu ondoko irudiko zirkuitua; hots, kalkula itzazu elementu guztietako tentsioak eta korronteak.



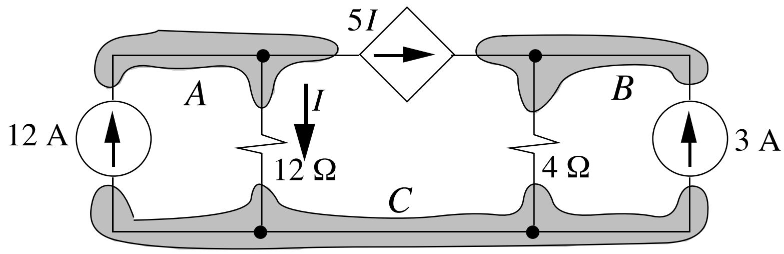
Ebazpena:

Aurreko zirkuituarekin alderatuta, desberdintasun bakarra honako hau da: zirkuitu honetako sorgailu menpekoa korrontez kontrolaturiko korronte-sorgailu bat da eta $5I$ korrontea hornitzen du, I kontrol-korrontea izanik, zirkuituko beste elementu batetik igarotzen dena; izan ere, I hori, 5 Ω-eko erresistentziatik igarotzen den korrontea da, irudian ageri den legez.

Hori guztia kontuan izanik, analisiari ekingo diogu aurreko ariketan bezalaxe:

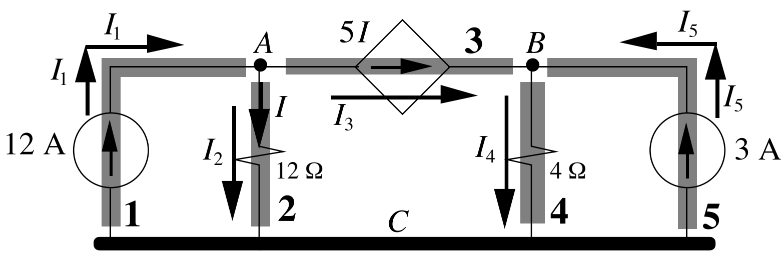
1. Bilatu zirkuituaren korapiloak (korapilo-kopurua = N).

Zirkuitu honetan hiru korapilo besterik ez dago, A, B eta C, ondoko irudian erakutsi den legez. Beraz, kasu honetan, N = 3.



2. Aukeratu arbitrarioki adarretako korronteen noranzkoak, korronte-sorgailuak dituzten adarretan izan ezik, adar horietatik igaroko diren korronteen intentsitate eta noranzkoak korronte-sorgailuek adierazitakoak baitira.

Ondoko irudian, zirkuitu honetako adarrak eta arbitrarioki aukeratutako adarretako korronteen noranzkoak ageri dira. Agerikoa denez, I_1 = 12 A, $I_2 = I$, $I_3 = 5I$ eta I_5 = 3 A.



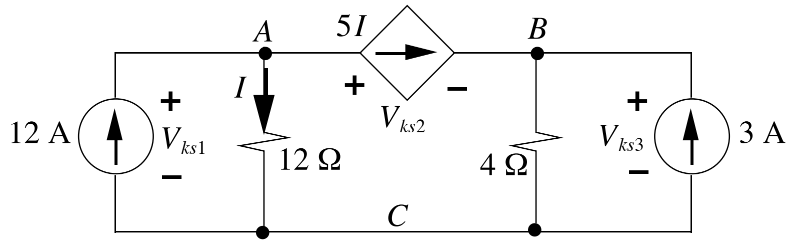
Baldin adar-kopurua = AK = 5, eta adar desberdinetan dauden korronte-sorgailuen kopurua = KS = 3 badira,

Korronte ezezagunen kopurua = $AK - KS$ = 5 – 3 = 2 : I_2 eta I_4.

Korronte-sorgailu menpekoak, oro har, korronte ezezagun bat gehitzen du: I.

Korronte ezezagunen kopurua = 2 + 1 = 3 : I_2, I_4 eta I.

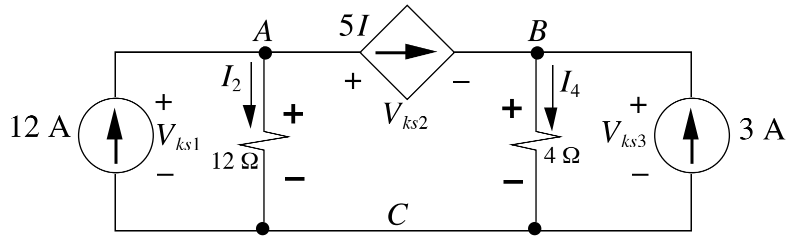
3. Aukeratu arbitrarioki korronte-sorgailuetako tentsioen zeinuak (tentsio ezezagunen kopurua = KS = 3).



Korronte eta tentsio ezezagunen kopurua = 3 + 3 = 6 : I_2, I_4, I eta V_{ks1}, V_{ks2} ,V_{ks3}.

4. Finkatu erresistentzietako tentsioen zeinuak Ohm-en legearen arabera, eta aplikatu Ohm-en legea, erresistentzietako tentsioak adarretako korronteen funtzioan izateko.

Arbitrarioki finkatutako korronteen arabera, ondoko irudiko tentsioak izango ditugu:



5b. Idatzi zirkuituari dagozkion ekuazioak.

- Aplikatu Kirchhoff-en korronteen legea (KKL) korapilo guztietan batean izan ezik: ekuazio-kopurua = $N - 1 = 2$.

Betearaz diezaiogun zirkuituari KKL legea bi korapilotan soilik, *A* eta *B* korapiloetan hain zuzen ere:

KKL *A* korapiloan:	KKL *B* korapiloan:
1. ekuazioa: $12 = I_2 + 5I$	2. ekuazioa: $5I + 3 = I_4$

- Aplikatu Kirchhoff-en tentsioen legea (KTL) maila guztietan (maila-kopurua = $MK = 3$), hiru ekuazio lortzeko.

Hona hemen hiru ekuazio horiek, orain arte erabilitako irizpide berdinei jarraituz:

ezker aldeko mailan:	erdiko mailan:	eskuin aldeko mailan:
3. ekuazioa: $V_{ks1} = 12I_2$	4. ekuazioa: $12I_2 = V_{ks2} + 4I_4$	5. ekuazioa: $V_{ks3} = 4I_4$

6b. Idatzi menpeko sorgailuen kontrol-magnitudeei dagozkien ekuazioak.

Kasu honetan, kontrol-magnitudeari dagokion ekuazioa agerikoa da, adar korronte bat baita:

6. ekuazioa: $I = I_2$

Une honetan, irakurleak oso garbi izan beharko luke kasu honetan azken urrats hau ez dela beharrezkoa, 2. urratsean jadanik aipatu baitugu $I_2 = I$ betetzen dela. Hori dela eta, azken ekuazio hau inplizituki erabil genezake hasieratik, azken momentura arte itxaron gabe. Dena den, liburuaren egileok nahita utzi dugu modu honetan, irakurleak ikus dezan, zirkuituak ebazteko atal honetan landu dugun metodo orokorrak soluziora eramango gaituela sistematikoki (ongi aplikatzen badugu, bai horixe!), nahiz eta adi-adi ez egon. Are gehiago, kasu honetan metodoari jarraitzea ere ez da beharrezkoa, zirkuitua oso sinplea baita, aurreko atalean landu ditugunen antzera; baina metodoak soluzioa emango digu. Hori bai, edozein kasutan lan gehiago egin behar izan dugu, zikuituaren sinpletasunari hasieran bertan ez erreparatzeagatik.

7. Ebatzi horrela lortutako ekuazio-sistema.

Hona hemen, berridatzita, lortu ditugun ekuazioak:

Zirkuituari dagozkion ekuazioak:

❶ $12 = I_2 + 5I$

❷ $5I + 3 = I_4$

❸ $V_{ks1} = 12 I_2$

❹ $12 I_2 = V_{ks2} + 4 I_4$

❺ $V_{ks3} = 4 I_4$

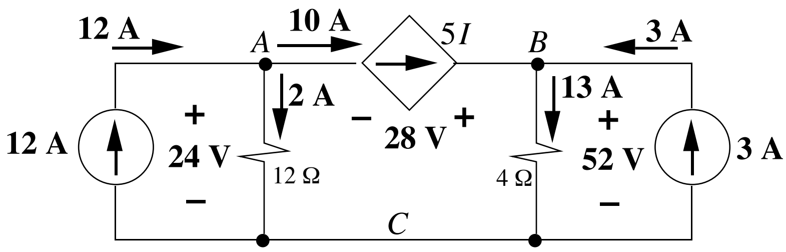
menpeko sorgailuaren kontrol-korrontea:

❻ $I = I_2$

Soluzioa: $I_1 = 12\ \mathrm{A}$, $I_2 = I = 2\ \mathrm{A}$, $I_3 = 5I = 10\ \mathrm{A}$, $I_4 = 13\ \mathrm{A}$, $I_5 = 3\ \mathrm{A}$,

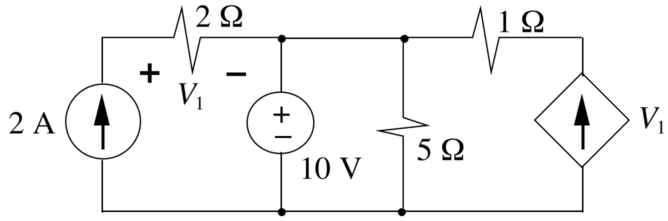
$V_{ks1} = 24\ \mathrm{V}$, $V_{ks2} = -28\ \mathrm{V}$, $V_{ks3} = 52\ \mathrm{V}$

Ondoko irudian zirkuituaren soluzioa aurkeztu da.



Beti bezala, irakurleak egiazta dezake soluzioa.

8. Analiza ezazu ondoko irudiko zirkuitua; hots, kalkula itzazu elementu guztietako tentsioak eta korronteak.



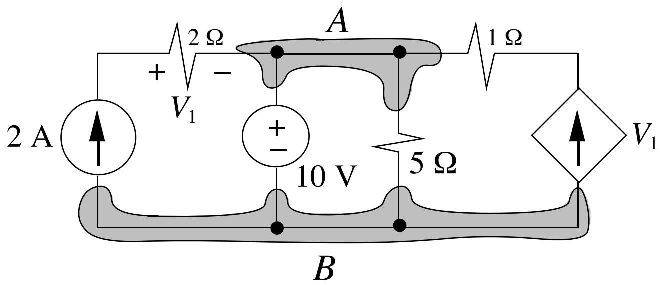
Ebazpena:

Oraingo zirkuitu honetan, menpeko sorgailua tentsioz kontrolaturiko korronte-sorgailu bat da. V_1 korrontea ematen du (bai, korrontea!, $I = 1\ \Omega^{-1} \cdot V_1$; gogoratu 2. gaian menpeko sorgailuei buruz esandakoa), V_1 kontrol-tentsioa izanik, zirkuituko beste elementu baten muturren artekoa; izan ere, V_1 hori 2 Ω-eko erresistentziaren muturren arteko tentsioa da, irudian ageri den legez.

Hona hemen zirkuitu honi dagokion ebazpidea:

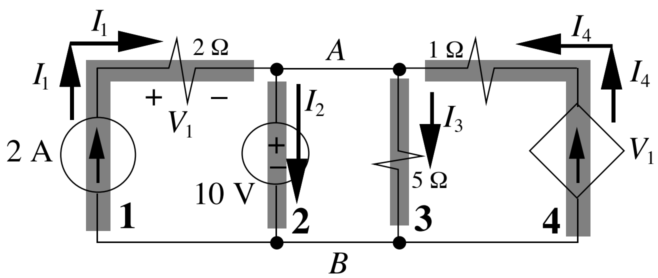
1. Bilatu zirkuituaren korapiloak (korapilo-kopurua = *N*).

Zirkuitu honetan bi korapilo baino ez daude, *A* eta *B*, ondoko irudian erakutsi den legez. Beraz, kasu honetan, $N = 2$.



2. Aukeratu arbitrarioki adarretako korronteen noranzkoak, korronte-sorgailuak dituzten adarretan izan ezik, adar horietatik igaroko diren korronteen intentsitate eta noranzkoak korronte-sorgailuek adierazitakoak baitira.

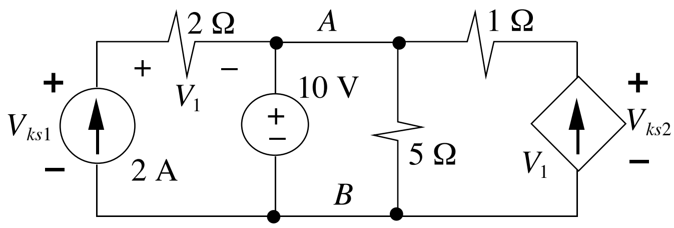
Ondoko irudian, zirkuitu honetako adarrak eta arbitrarioki aukeratutako adarretako korronteen noranzkoak ageri dira. Irudian agerikoa denez, $I_1 = 2$ A eta $I_4 = V_1$.



Baldin adar-kopurua = $AK = 4$, eta adar desberdinetan dauden korronte-sorgailuen kopurua = $KS = 2$ badira,

Korronte ezezagunen kopurua = $AK - KS = 4 - 2 = 2$: I_2 eta I_3.

3. Aukeratu arbitrarioki korronte-sorgailuetako tentsioen zeinuak (tentsio ezezagunen kopurua = $KS = 2$).



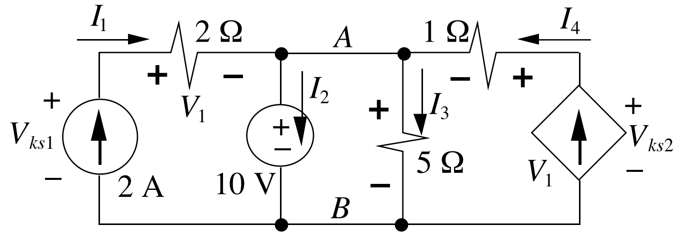
Korronte eta tentsio ezezagunen kopurua = 2 + 2 = 4 : I_2, I_3 eta V_{ks1}, V_{ks2}.

Korronte eta tentsio ezezagun horiez gain, menpeko sorgailuaren kontrol-tensioa, V_1, ere ezezaguna da. Beraz:

Korronte eta tentsio ezezagunen kopurua = 4 + 1 = 5 : I_2, I_3, V_{ks1}, V_{ks2} eta V_1.

4. Finkatu erresistentzietako tentsioen zeinuak Ohm-en legearen arabera, eta aplikatu Ohm-en legea, erresistentzietako tentsioak adarretako korronteen funtzioan izateko.

Arbitrarioki finkatutako korronteen arabera, ondoko irudiko tentsioak izango ditugu:



5b. Idatzi zirkuituari dagozkion ekuazioak.

- Aplikatu Kirchhoff-en korronteen legea (KKL) korapilo guztietan batean izan ezik: ekuazio-kopurua = 2 – 1 = 1.

Betearaz diezaiogun zirkuituari KKL legea korapilo batean soilik, *A* korapiloan hain zuzen ere:

KKL A korapiloan: 1. ekuazioa: $2 + V_1 = I_2 + I_3$

- Aplikatu Kirchhoff-en tentsioen legea (KTL) maila guztietan (maila-kopurua = $MK = 3$), hiru ekuazio lortzeko.

Hona hemen hiru ekuazio horiek, orain arte erabilitako irizpide berdinei jarraituz:

ezker aldeko mailan: 2. ekuazioa: $V_{ks1} = 2I_1 + 10 = 4 + 10 = 14$ V

erdiko mailan: 3. ekuazioa: $10 = 5I_3$

eskuin aldeko mailan: 4. ekuazioa: $5I_3 = -1V_1 + V_{ks2}$

6b. Idatzi menpeko sorgailuen kontrol-magnitudeei dagozkien ekuazioak.

Kasu honetan, V_1 tentsioa adierazten duen ekuazioa idatzi behar dugu. Erresistentzia baten muturren arteko tentsioa denez gero, Ohm-en legea aplikatu besterik ez da egin behar:

5. ekuazioa: $V_1 = 2I_1 = 2\ \Omega \cdot 2\ \text{A} = 4\ \text{V}$

7. Ebatzi horrela lortutako ekuazio-sistema.

Hona hemen, berridatzita, lortu ditugun ekuazioak:

Zirkuituari dagozkion ekuazioak:

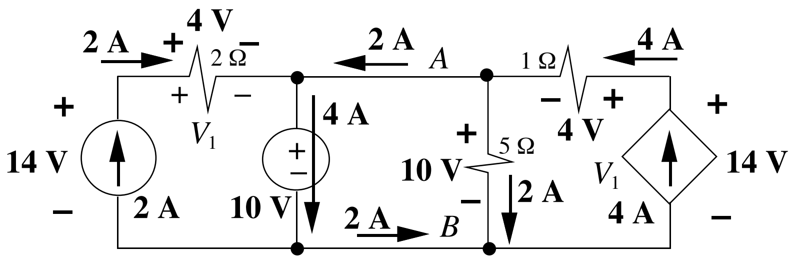
❶ $2 + V_1 = I_2 + I_3$
❷ $V_{ks1} = 14\ \text{V}$
❸ $10 = 5I_3$
❹ $5I_3 = -1V_1 + V_{ks2}$

menpeko sorgailuaren kontrol-tentsioa: ❺ $V_1 = 4\ \text{V}$

Soluzioa: $I_1 = 2\ \text{A},\ I_2 = 4\ \text{A},\ I_3 = 2\ \text{A},\ I_4 = 4\ \text{A},$

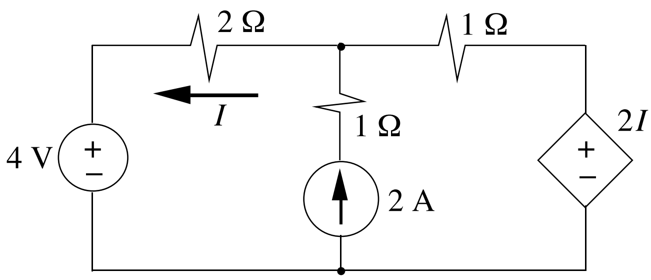
$V_{ks1} = 14\ \text{V}\ ,\ V_{ks2} = 14\ \text{V},\ V_1 = 4\ \text{V}$

Ondoko irudian zirkuituaren soluzioa aurkeztu da, zirkuituaren egoera horixe izanik.



Beti bezala, irakurleak egiazta dezake soluzioa.

9. Analiza ezazu ondoko irudiko zirkuitua; hots, kalkula itzazu elementu guztietako tentsioak eta korronteak.



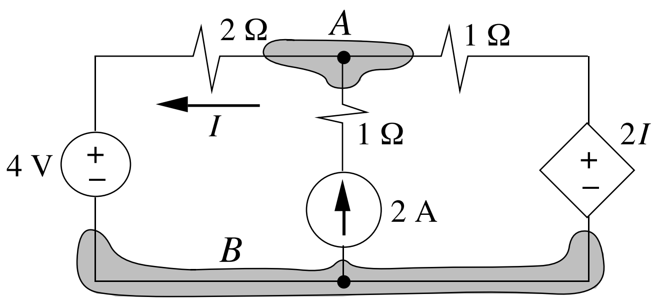
Ebazpena:

Honetan, menpeko sorgailua korrontez kontrolaturiko tentsio-sorgailu bat da eta $2I$ tentsioa ematen du, I kontrol-korrontea izanik, zirkuituko beste elementu batetik igarotzen dena; izan ere, I hori 2 Ω-eko erresistentziatik igarotzen den korrontea da, irudian ageri den legez.

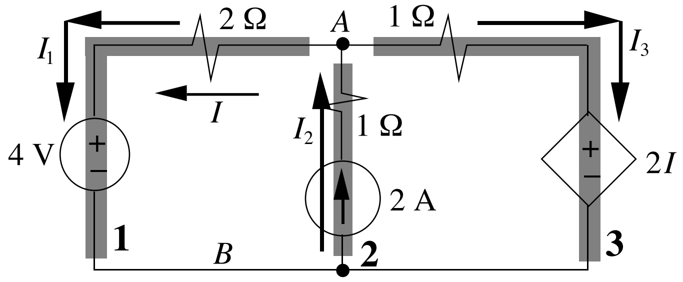
Hona hemen zirkuitu honi dagokion ebazpidea:

1. Bilatu zirkuituaren korapiloak (korapilo-kopurua = N).

Zirkuitu honetan bi korapilo baino ez daude, A eta B, ondoko irudian erakutsi den legez. Beraz, kasu honetan, $N = 2$.



2. Aukeratu arbitrarioki adarretako korronteen noranzkoak, korronte-sorgailuak dituzten adarretan izan ezik, adar horietatik igaroko diren korronteen intentsitate eta noranzkoak korronte-sorgailuek adierazitakoak baitira.

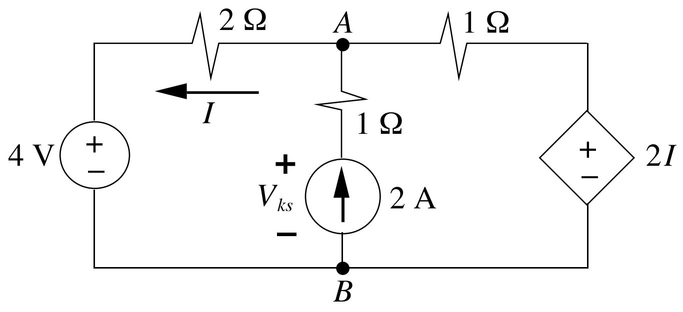


Aurreko irudian, zirkuitu honetako adarrak eta arbitrarioki aukeratutako adarretako korronteen noranzkoak ageri dira. Irudian agerikoa denez, $I_1 = I$ eta $I_2 = 2$ A.

Baldin adar-kopurua = $AK = 3$, eta adar desberdinetan dauden korronte-sorgailuen kopurua = $KS = 1$ badira,

Korronte ezezagunen kopurua = $AK - KS = 3 - 1 = 2$: I_1 eta I_3.

3. Aukeratu arbitrarioki korronte-sorgailuetako tentsioen zeinuak (tentsio ezezagunen kopurua = $KS = 1$).



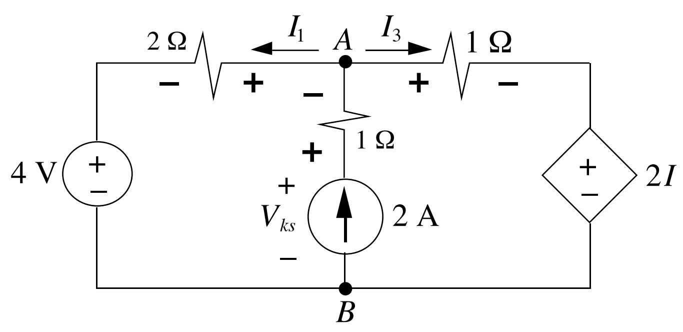
Korronte eta tentsio ezezagunen kopurua = 2 + 1 = 3 : I_1, I_3 eta V_{ks}.

Korronte eta tentsio ezezagun horiez gain, menpeko sorgailuaren kontrol-korrontea, *I,* ere ezezaguna da. Beraz:

Korronte eta tentsio ezezagunen kopurua = 3 + 1 = 4 : I_1, I_3, V_{ks} eta *I*.

4. Finkatu erresistentzietako tentsioen zeinuak Ohm-en legearen arabera, eta aplikatu Ohm-en legea, erresistentzietako tentsioak adarretako korronteen funtzioan izateko.

Arbitrarioki finkatutako korronteen arabera, ondoko irudiko tentsioak izango ditugu:



5b. Idatzi zirkuituari dagozkion ekuazioak.

- Aplikatu Kirchhoff-en korronteen legea (KKL) korapilo guztietan batean izan ezik: ekuazio-kopurua = $N - 1 = 1$.

Betearaz diezaiogun zirkuituari KKL legea *A* korapiloan

KKL *A* korapiloan: 1. ekuazioa: $2 = I_1 + I_3$

- Aplikatu Kirchhoff-en tentsioen legea (KTL) maila guztietan (maila-kopurua = $MK = 2$), bi ekuazio lortzeko.

Hona hemen bi ekuazio horiek, orain arte erabilitako irizpide berdinei jarraituz:

ezker aldeko mailan:	2. ekuazioa:	$4 = -2I_1 - 1I_2 + V_{ks} = -2I_1 - 2 + V_{ks}$
eskuin aldeko mailan:	3. ekuazioa:	$2I = -1I_3 - 1I_2 + V_{ks} = -1I_3 - 2 + V_{ks}$

6b. Idatzi menpeko sorgailuen kontrol-magnitudeei dagozkien ekuazioak.

Kasu honetan, kontrol-magnitudeari dagokion ekuazioa agerikoa da, adar-korronte bat baita:

4. ekuazioa: $I = I_1$

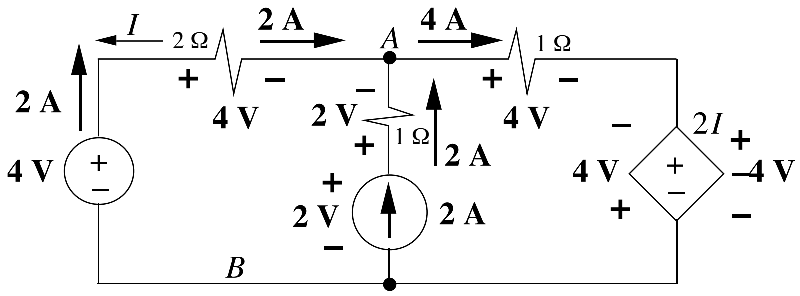
7. Ebatzi horrela lortutako ekuazio-sistema.

Hona hemen, berridatzita, lortu ditugun ekuazioak:

	❶	$2 = I_1 + I_3$
Zirkuituari dagozkion ekuazioak:	❷	$6 = -2I_1 + V_{ks}$
	❸	$2I = -1I_3 - 2 + V_{ks}$
menpeko sorgailuaren kontrol-korrontea:	❹	$I = I_1$

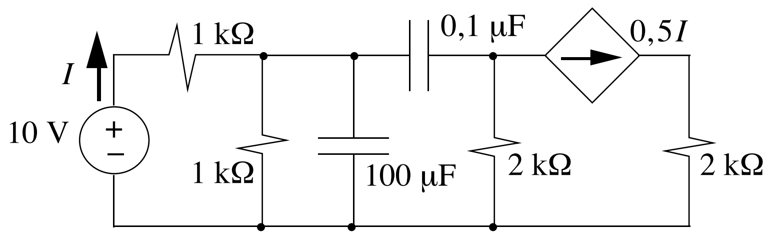
Soluzioa: $I = I_1 = -2\ \text{A},\ I_2 = 2\ \text{A},\ I_3 = 4\ \text{A},\ V_{ks} = 2\ \text{V}$

Ondoko irudian zirkuituaren soluzioa aurkeztu da.



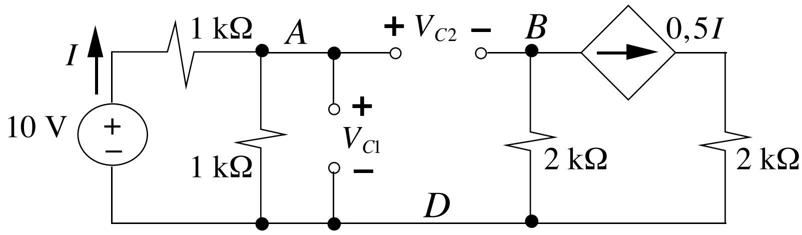
Beti bezala, soluzioa egiaztatzeko, irakurleak potentzien balantzea egin dezake, edota Kirchhoff-en legeak betetzen direla egiazta dezake.

10. Irudiko zirkuiturako, kalkula itzazu elementu guztietako korronteak eta tentsioak, korronte zuzeneko zirkuitua dela eta egoera egonkorrean dagoela kontuan hartuz.

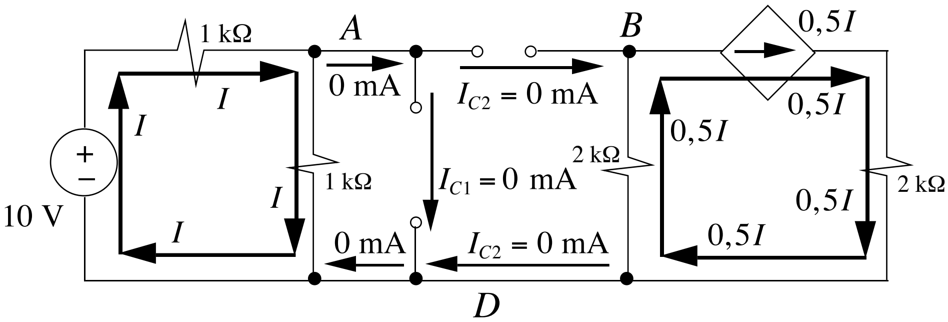


Ebazpena:

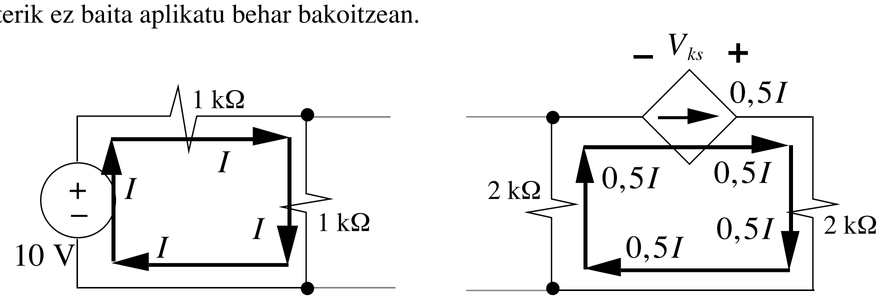
Zirkuitu honetan, menpeko sorgailu bat eta kondentsadore pare bat daudenez gero, aurreko ariketetan ikusitako metodoa erabil dezakegu. Zirkuitua korronte zuzenekoa dela eta egoera egonkorrean dagoela kontuan hartuz, hasieratik bertatik bi kondentsadoreak beren ereduaz ordezkatzen baditugu, hots, kondentsadorearen ordez zirkuitu irekia ipintzen badugu, oso zirkuitu sinplea geratzen da. Hori bai, ahaztu gabe kondentsadoreen muturren arteko tentsioak ez direla zero izango, ezezagunak baizik, kondentsadoreak kargatuta baitaude. Hona hemen zirkuitu baliokide hori, non korapiloak ere agerian utzi baitira (*A*, *B* eta *D*):



Zirkuitu baliokide hori ongi aztertuz gero, agerikoa da bi zirkuitu bereizi eta arras sinpleak geratzen direla, kondentsadoreen zirkuitu irekiak direla kausa. Izan ere, *A* korapiloan KKL aplikatuz, honako hau ondorioztatzen da: ezker aldeko adarretik igarotzen den *I* korrontea, ezker aldeko mailatik igaroko da, ez baitu beste modurik ibilbide itxi bat egiteko; beste horrenbeste gertatzen da eskuin aldeko korrontearekin (0,5*I*), KKL *B* korapiloan aplikatuz gero, ondoko irudian erakutsi den legez:



Hori guztia kontuan hartuz, oso erraza da orain bi atal horien soluzioa bilatzea, KTL besterik ez baita aplikatu behar bakoitzean.

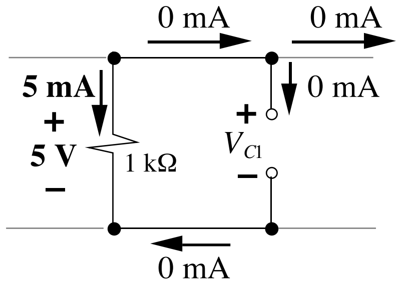


Hona hemen bi ekuazioak:

ezker aldeko mailan:	eskuin aldeko mailan:
1. ekuazioa: $10 = 1I + 1I = 2I$	2. ekuazioa: $2\cdot(0{,}5I) + 2\cdot(0{,}5I) = V_{ks}$

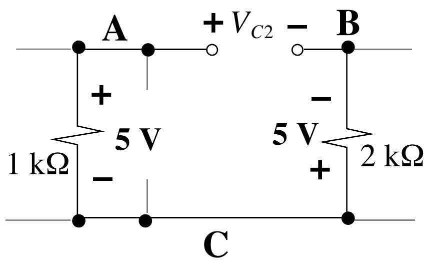
Soluzioa: $I = 5\ \text{mA}$, $0{,}5I = 2{,}5\ \text{mA}$, $V_{ks} = 10\ \text{V}$

Balio horiek kalkulatu ondoren, berehalakoa da kondentsadoreen muturren arteko tentsioak kalkulatzea, kondentsadore bana barnean hartzen duten edozein bi begiztatan KTL aplikatuz. Hona hemen:



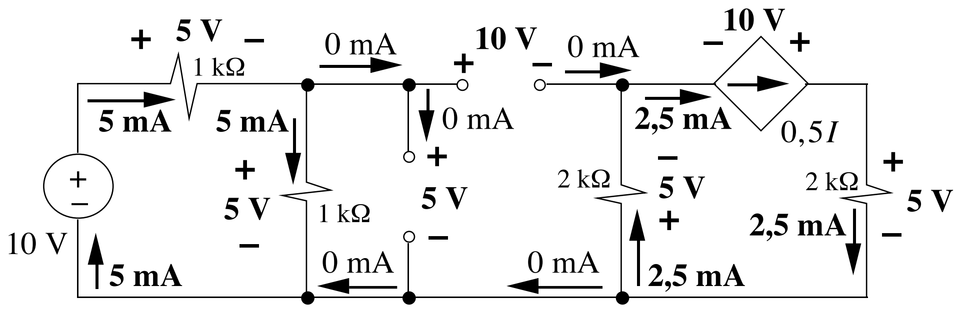
$V_{C1} = 5\ \text{V}$

(erresistentzia eta kondentsadorea paraleloan baitaude)



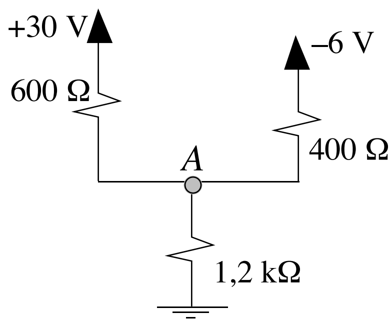
$V_{C2} = 5\ \text{V} + 5\ \text{V} = 10\ \text{V}$

Ondoko irudian zirkuituaren soluzioa aurkeztu da, zirkuituaren egoera horixe izanik.



Soluzioa egiaztatzeko, irakurleak potentzien balantzea egin dezake.

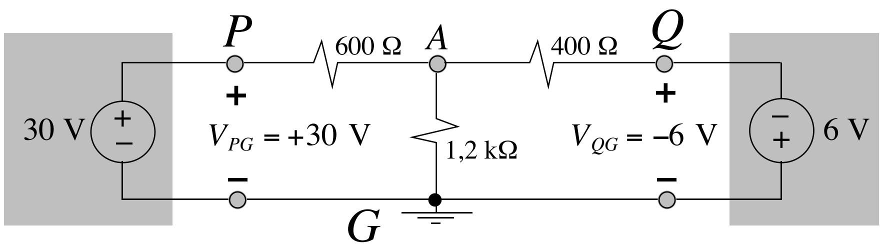
11. Irudiko zirkuituan, kalkula ezazu *A* puntuko tentsioa.



Ebazpena:

Zirkuituaren irudiari erreparatuz gero, badirudi zirkuitu hau ez dela aurreko ariketetan analizatutakoen antzekoa, irudian ez baitago sorgailurik, ez eta korronte elektrikoa igarotzeko bide itxirik ere! Baina hori irudipen hutsa besterik ez da. Izan ere, goiko bi puntuetan ageri diren tentsioek bi puntu horien eta erreferentziazko puntu baten artean tentsio-sorgailu bana dagoela adierazten dute. Nola identifikatu zirkuitu bateko erreferentziazko puntua edo 0 volteko puntua? Bada, horretarako ikur berezia erabiltzen da; honako hau: ⏚.

Hori guztia gogoan hartuz, ondorioztatzen da ezen zirkuituko goi aldeko bi puntuen tentsioak (+30 V eta –6 V) beheko puntuarekiko emanak direla, eta bi puntu horien eta beheko puntuaren artean bi tentsio-sorgailuk egon behar dutela. Agerikoa da, beraz, ondoko irudiko zirkuitua dela analizatu behar duguna.



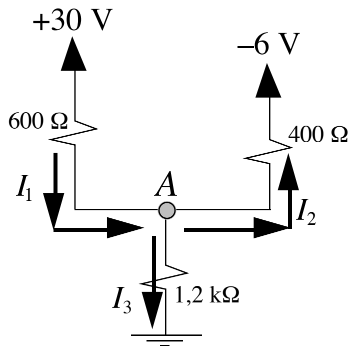
Bi irudietako zirkuituak berdinak direnez gero, lehenengo irudiaren gainean egingo dugu analisia, irakurlea ohitu dadin. (Zirkuituak irudikatzeko modu hau —bertikalean eta sorgailuak marraztu gabe, hain zuzen—, oso arrunta da zirkuitu elektronikoetan, batez ere irudiak sinplifikatzeko asmoz. Horrexegatik aztertuko dugu hemen, metodoa berdin erabiltzen dela agerian uzteko. Horrela, zirkuitu elektronikoak analizatu behar ditugunean, analisia egin ahal izateko, ez da beharrezkoa izango zirkuituaren irudia aldatzea.)

1. Bilatu zirkuituaren korapiloak.

Goiko irudian agerikoa denez, zirkuitu honetan bi korapilo baino ez daude, *A* eta *G*, azken hau izanik erreferentziazkoa (0 volteko puntua).

2. Aukeratu arbitrarioki adarretako korronteen noranzkoak, korronte-sorgailuak dituzten adarretan izan ezik.

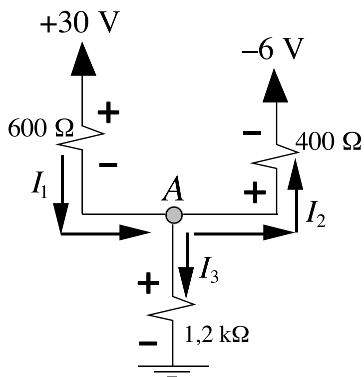
Arbitrarioki aukeratu beharrean, badakigu batzuetan korronteen benetako noranzkoa aurreikustea zaila ez dela, zirkuituan sorgailu gutxi dagoenean batik bat, elementu pasiboetan korronte elektrikoa beti tentsio altuetatik tentsio baxuetara igarotzen baita. Eskuartean daukagun zirkuitua horietakoa da: logikoena dirudi ezkerreko adarreko korrontea goitik behera joatea, goiko puntuko tentsioa zirkuituko altuena baita (+30 V); beste horrenbeste esan daiteke eskuineko adarreko korronteaz, baina kasu honetan behetik gora joango da, eskuineko goiko puntuan zirkuituko tentsiorik baxuena baitago (–6 V). Beste adarreko korrontearen noranzkoa aurreikustea hain agerikoa izan ez arren, tentsio-sorgailuen eta erresistentzien balio erlatiboak aztertuz antzeman daiteke. Dena den, badakigu aurrikuspena egitean ez asmatzea ez dela arazoa, korronte negatiboa aterako baita, besterik gabe. Ondoko irudian, hiru adarretako korronteak ageri dira.



Korronte ezezagunen kopurua = 3 : I_1, I_2 eta I_3.

Zirkuitu honetan korronte-sorgailurik ez dagoenez gero, 3. pausoa alde batera utziko dugu, zuzen-zuzenean 4.era pasatzeko.

4. Finkatu erresistentzietako tentsioen zeinuak Ohm-en legearen arabera, eta aplikatu Ohm-en legea, erresistentzietako tentsioak adarretako korronteen funtzioan izateko.



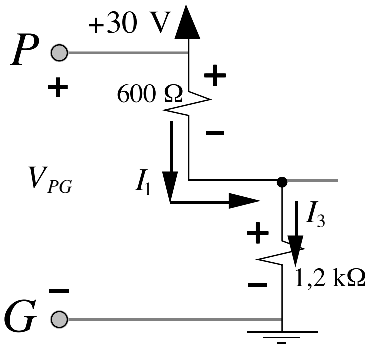
5b. Idatzi zirkuituari dagozkion ekuazioak.

- Aplikatu Kirchhoff-en korronteen legea (KKL) korapilo guztietan batean izan ezik: ekuazio-kopurua = 2 – 1 = 1.

KKL *A* korapiloan: 1. ekuazioa: $I_1 = I_2 + I_3$

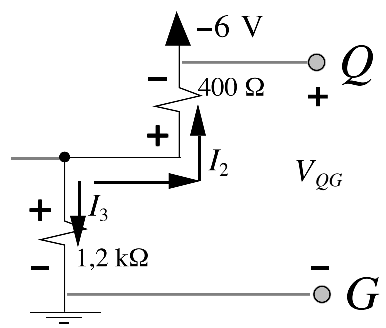
- Aplikatu Kirchhoff-en tentsioen legea (KTL) maila guztietan (maila-kopurua = *MK* = 2), bi ekuazio lortzeko.

Honelako zirkuituetan, KTLri dagozkion ekuazioak idazteko, bi punturen arteko tentsioa beti berdina dela gogoratu behar dugu, edozein izanda puntu batetik bestera joateko aukeratutako ibilbidea. Hori dela eta, beti berdinduko ditugu ezagunak diren tentsioak (kasu honetan, +30 V eta –6 V) puntu horietatik erreferentziazko puntura joateko bideetan aurkitutako tentsioen baturekin. Hona hemen:



ezker aldeko mailan:

2. ekuazioa: $0,6I_1 + 1,2I_3 = 30$ V



eskuin aldeko mailan:

3. ekuazioa: $-0,4I_2 + 1,2I_3 = -6$ V

Korronteen balioak mA-tan lortuko ditugu, erresistentziak kΩ-etan ipini baititugu.

6b. Idatzi elementu bereziei dagozkien portaera-ekuazioak.

Kasu honetan, ez dago elementu berezirik.

7. Ebatzi horrela lortutako ekuazio-sistema.

Hona hemen, berridatzita, lortu ditugun ekuazioak:

Zirkuituari dagozkion ekuazioak:

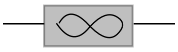
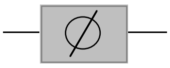
❶ $I_1 = I_2 + I_3$
❷ $0,6I_1 + 1,2I_3 = 30$
❸ $-0,4I_2 + 1,2I_3 = -6$

Soluzioa: $I_1 = 38,3$ mA, $I_2 = 32,5$ mA, $I_3 = 5,8$ mA

Orain *A* puntuko tentsioa kalkulatzea berehalakoa da, 1,2 kΩ-eko erresistentziaren muturren arteko tentsioa baita.

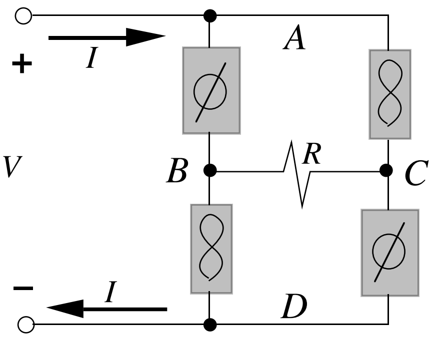
$$V_A = 1,2\ \text{k}\Omega \cdot I_3 \quad \rightarrow \quad \boxed{V_A = 7\ \text{V}}$$

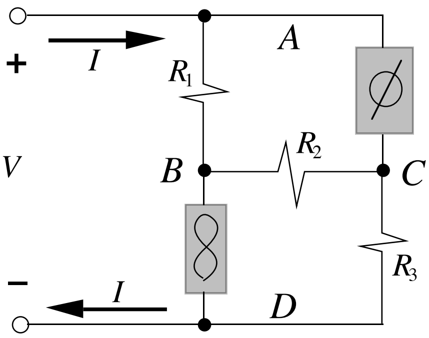
12. Zientzialari batzuek beren aplikazioetan behar dituzten zirkuituetarako ondoko bi elementu bereziak asmatu eta definitu dituzte:

ikurra	izena	funtzioa
	**Noradorea**:	tentsioa eta intentsitatea arbitrarioak dira
	**Nulorea**:	tentsioa eta intentsitatea nuluak dira

a) Bilatu zein den *V* eta *I* balioen arteko erlazioa ezkerreko zirkuituan.

b) Kalkula ezazu zein izan behar den eskuineko irudiko zirkuituko R_1, R_2 eta R_3 erresistentzien balioen arteko erlazioa zirkuitu horretan *V* eta *I* balioen arteko erlazioa ezkerreko zirkuitukoaren berdina izan dadin.





Ebazpena:

a) Zirkuitu honetan elementu guztiz berriak dauden arren, zirkuituak ebazteko metodoa inolako arazorik gabe aplika daiteke, elementu horien portera-ekuazioak ezagunak diren heinean. Oraingo honetan, elementu berri horiek asmatutakoak direnez gero, agian ez dira oso interesgarriak edo erabilgarriak ikuspuntu praktikotik, baina bai, ordea, metodoaren baliagarritasuna azpimarratzeko, zeren agerikoa baita, aztertu beharreko zirkuitu batean edozein motatako elementuak agertzen direla ere, metodoa aplikagarria dela funtsezko aldaketarik egin behar izan gabe, baldin eta elementuen portaera-ekuazioak ezagunak badira.

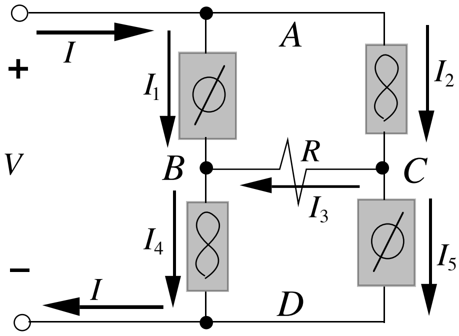
Hona hemen, bada, ezkerreko zirkuituari dagokion analisia:

1. Bilatu zirkuituaren korapiloak (korapilo-kopurua = *N*).

Kasu honetan, ez ditugu korapiloak bilatu behar, irudian agerian utzi baitira: *A*, *B*, *C* eta *D*. Agerikoa da, baita ere, *A* eta *D* korapiloak direla elementu-elkarketa hori zirkuitu aktibo batekin (sorgailuak dituen batekin, alegia) konektatzeko erabili behar direnak. Horrexegatik, hain zuzen ere, balizko sorgailu batek emango lituzkeen *V* eta *I* magnitudeak, bi korapilo horien artekoak dira.

2. Aukeratu arbitrarioki adarretako korronteen noranzkoak.

Kasu honetan ez dago ez korronte-sorgailurik, ez elementu aktiborik; hori dela eta, elkarketak jasoko duen korronte bakarra *A* korapilotik iritsiko zaion *I* korrontea da; eta gainera, *D* korapilotik itzuli behar dio eman dion zirkuituari. Horretan oinarriturik, adarretako korronteen noranzkoak ez ditugu arbitrarioki finkatuko, denak goitik behera joango direla baitakigu. Zalantza bakarra *R* erresistentziatik igarotzen dena da, hori horizontalean baitago; ondorioz, hori bai, arbitrarioki aukera dezakegu noranzko batean zein bestean. Hona hemen, beraz, aukeratutako adarretako korronteak:



Korronte ezezagunen kopurua = $AK - KS = 5 - 0 = 5$: I_1, I_2, I_3, I_4 eta I_5.

Korronte horiez gain, sarrerako magnitudeak ere —tensioa, *V*, eta korrontea, *I*—, ezezagunak dira. Beraz:

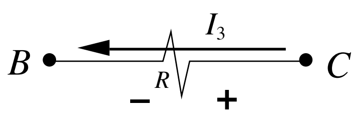
Korronte eta tentsio ezezagunen kopurua = 7 : $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I$ eta V.

Orain, zirkuitu honetan korronte-sorgailurik ez dagoenez gero, 3. pausoa alde batera utziko dugu, zuzen-zuzenean 4.era pasatzeko.

4. Finkatu erresistentzietako tentsioen zeinuak Ohm-en legearen arabera, eta aplikatu Ohm-en legea, erresistentzietako tentsioak adarretako korronteen funtzioan izateko.

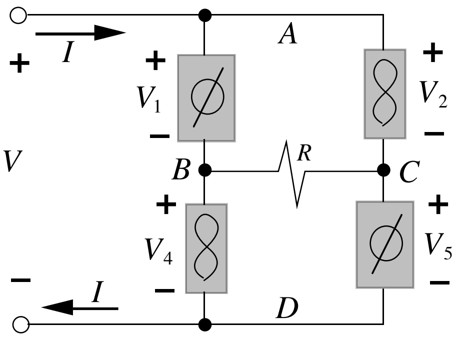
Kasu honetan, erresistentzia bakarra dago, *R*, eta bere muturren arteko tentsioa hauxe da:

$$V_R = R \cdot I_3$$



Dena den, Ohm-en legeari esker, ezezagunen kopurua handitu ez arren (erresistentzietako muturren arteko tentsioak adar-korronteen menpekoak baitira), kasu honetan, erresistentziez gain, elementu berriak daude, eta horietan ez dago esaterik (*a priori* ez, behinik-behin), muturren arteko tentsioak korronteen menpekoak direnik. Hori dela eta, elementu berri horien muturren arteko tentsioak ere ezezagunak dira:

Korronte eta tentsio ezezagunen kopurua = 7 + 4 = 11 : $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I, V,$
V_1, V_2, V_4 eta V_5



Ondorioz, hamaika ekuazio behar dira, zirkuituaren soluzioa aurkituko bada.

5b. Idatzi zirkuituari dagozkion ekuazioak.

- Aplikatu Kirchhoff-en korronteen legea (KKL) korapilo guztietan batean izan ezik: ekuazio-kopurua = $N - 1 = 3$.

Betearaz diezaiogun zirkuituari KKL legea hiru korapilotan:

KKL *A* korapiloan:	$I = I_1 + I_2$	1. ekuazioa
KKL *B* korapiloan:	$I_1 + I_3 = I_4$	2. ekuazioa
KKL *C* korapiloan:	$I_2 = I_3 + I_5$	3. ekuazioa

Irakurleak egiazta dezake, *D* beheko korapiloan KKL aplikatuz gero, aurreko ekuazioen konbinazio lineala den beste bat lortzen dela.

- Aplikatu Kirchhoff-en tentsioen legea (KTL) maila guztietan (maila-kopurua = $MK = 3$).

KTL eskuineko goiko mailan:	$V_1 = V_2 + RI_3$	4. ekuazioa
KTL eskuineko beheko mailan:	$V_5 = RI_3 + V_4$	5. ekuazioa
KTL ezkerreko mailan:	$V = V_1 + V_4$	6. ekuazioa

6b. Idatzi elementu berriei dagozkien portaera-ekuazioak.

Kasu honetan, elementuen definizioa da kontuan hartu behar dena:

Nulorea: tentsioa eta korrontea nuluak dira. Ondorioz:

$V_1 = 0$ (7. ekuazioa), $I_1 = 0$ (8. ekuazioa)

$V_5 = 0$ (9. ekuazioa), $I_5 = 0$ (10. ekuazioa)

Noradorea: tentsioa eta korrontea arbitrarioak dira. Honek argi eta garbi esan nahi du, bi magnitude horien artean ez dagoela inolako loturarik; hots, noradorea izeneko elementuak ez duela portaera-ekuaziorik.

Honaino, beraz, zirkuitu honetan lor daitezkeen ekuazio guztiak lortu ditugu; hamar besterik ez!; eta ezezagunak hamaika dira.

Horrexegatik hamaika ezezagun horien artean bat parametro gisa hartu beharko dugu, soluzioa bilatu ahal izateko. Zein? Bada, V eta I-ren arteko erlazioa besterik eskatzen ez digutenez gero, I izango da parametro hori. (Irakurleak asmatuko zuen, dagoeneko, falta den ekuazio hori ezkerrean konektatuko den balizko zirkuituaren menpekoa izango dela; izan ere, zirkuitu horrek V-I motako beste erlazio bat ezarriko baitio aztertzen ari garen elementu-elkarketari; eta bi erlazioak berdinduz, 11. ekuazioa lortzen da.)

7. Ebatzi horrela lortutako ekuazio-sistema.

Hona hemen, berridatzita, lortu ditugun ekuazioak:

Zirkuituari dagozkion ekuazioak:

❶ $I = I_1 + I_2$
❷ $I_1 + I_3 = I_4$
❸ $I_2 = I_3 + I_5$
❹ $V_1 = V_2 + RI_3$
❺ $V_5 = V_4 + RI_3$
❻ $V = V_1 + V_4$

nuloreen portaera-ekuazioak:

❼ $V_1 = 0$
❽ $I_1 = 0$
❾ $V_5 = 0$
❿ $I_5 = 0$

Hona hemen soluzioa, I korrontea parametrotzat hartuta:

$$I_1 = 0\ \text{A},\ I_2 = I_3 = I_4 = I,\ I_5 = 0\ \text{A},$$

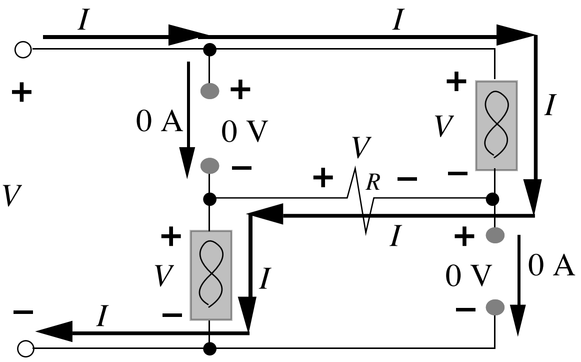
$$V_1 = 0\ \text{V},\ V_2 = V_4 = -RI,\ V_5 = 0\ \text{V},\ V = -RI$$

Orain, eskatzen diguten V-I erlazioa kalkulatzea berehalakoa da:

$$\boxed{\frac{V}{I} = -R}$$

Erlazio horretatik honako hau ondorioztatzen da: aztertu dugun elementu-elkarketa horrek erresistentzia negatiboa bailitzan jokatzen du.

Ondoko irudian zirkuituaren soluzioa aurkeztu da:



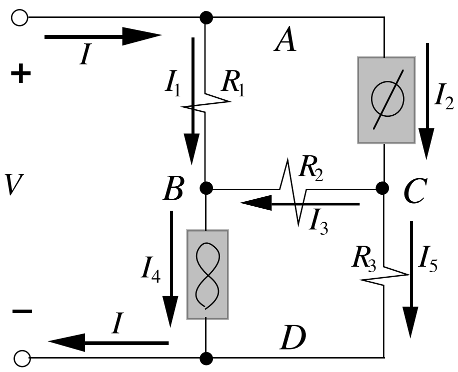
b) Oraingo honetan pauso guztiak berdin-berdin egin beharko ditugu.

1. Bilatu zirkuituaren korapiloak (korapilo-kopurua = N).

Zirkuitu bera denez gero, lehengo korapiloak ditugu: A, B, C eta D.

2. Aukeratu arbitrarioki adarretako korronteen noranzkoak.

Lehen esandako guztiak balio du hemen ere:



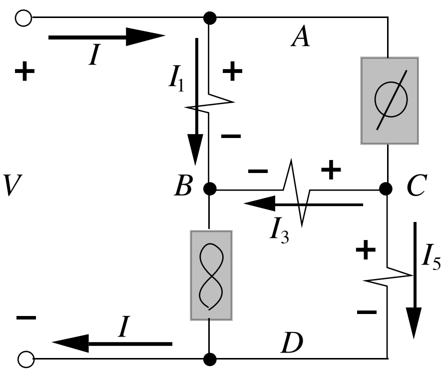
Lehen bezala:

Korronte eta tentsio ezezagunen kopurua = 7 : I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I eta V.

Orain, zirkuitu honetan ere korronte-sorgailurik ez dagoenez gero, 3. pausoa alde batera utziko dugu, zuzen-zuzenean 4.era pasatzeko.

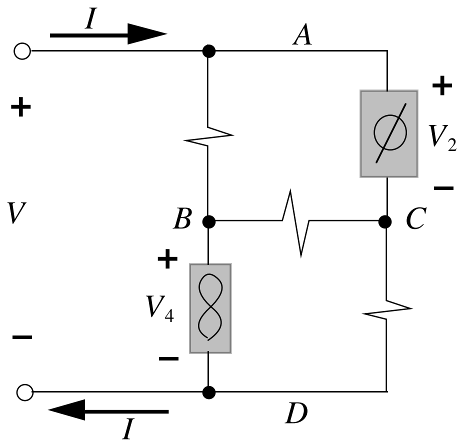
4. Finkatu erresistentzietako tentsioen zeinuak Ohm-en legearen arabera, eta aplikatu Ohm-en legea, erresistentzietako tentsioak adarretako korronteen funtzioan izateko.

Kasu honetan, hiru erresistentzia daude:



Beste bi elementuen tentsio ezezagunak kontuan hartuz:

Korronte eta tentsio ezezagunen kopurua = 9 : I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I, V, V_2 eta V_4.



Ondorioz, bederatzi ekuazio behar dira zirkuituaren soluzioa bilatzeko.

5b. Idatzi zirkuituari dagozkion ekuazioak.

- Aplikatu Kirchhoff-en korronteen legea (KKL) korapilo guztietan batean izan ezik: ekuazio-kopurua = $N - 1 = 3$.

Lehengo ekuazio berberak lortzen dira:

KKL *A* korapiloan:	$I = I_1 + I_2$	1. ekuazioa
KKL *B* korapiloan:	$I_1 + I_3 = I_4$	2. ekuazioa
KKL *C* korapiloan:	$I_2 = I_3 + I_5$	3. ekuazioa

- Aplikatu Kirchhoff-en tentsioen legea (KTL) maila guztietan (maila-kopurua = $MK = 3$).

Hauek, ordea, ez dira lehengoen berdinak:

KTL eskuineko goiko mailan:	$R_1 I_1 = V_2 + R_2 I_3$	4. ekuazioa
KTL eskuineko beheko mailan:	$R_3 I_5 = R_2 I_3 + V_4$	5. ekuazioa
KTL ezkerreko mailan:	$V = R_1 I_1 + V_4$	6. ekuazioa

6b. Idatzi elementu berriei dagozkien portaera-ekuazioak.

Nulorea: tentsioa eta korrontea nuluak dira. Ondorioz:

$V_2 = 0$ (7. ekuazioa), $I_2 = 0$ (8. ekuazioa)

Noradorea: gogoratu portaera-ekuaziorik ez duela.

Honaino, beraz, zirkuitu honetan lor daitezkeen ekuazio guztiak lortu ditugu; zortzi besterik ez!; eta ezezagunak bederatzi dira.

Beraz, lehen bezala, ezezagun horien arteko bat parametro gisa hartu beharko dugu, soluzioa bilatu ahal izateko: *I*.

7. Ebatzi horrela lortutako ekuazio-sistema.

Hona hemen, berridatzita, lortu ditugun ekuazioak:

Zirkuituari dagozkion ekuazioak:

❶ $I = I_1 + I_2$

❷ $I_1 + I_3 = I_4$

❸ $I_2 = I_3 + I_5$

❹ $R_1 I_1 = V_2 + R_2 I_3$

❺ $R_3 I_5 = R_2 I_3 + V_4$

❻ $V = R_1 I_1 + V_4$

nulorearen portaera-ekuazioak:

❼ $V_2 = 0$

❽ $I_2 = 0$

Hona hemen soluzioa, *I* korrontea parametrotzat hartuta:

$$I_1 = I,\ I_2 = 0\ \mathrm{A},\ I_3 = \frac{R_1}{R_2} \cdot I,\ I_4 = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \cdot I,\ I_5 = -\frac{R_1}{R_2} \cdot I,$$

$$V_2 = 0\ \mathrm{V},\ V_4 = -\frac{R_1 (R_2 + R_3)}{R_2} \cdot I,\ V = -\frac{R_1 \cdot R_3}{R_2} \cdot I$$

Azken emaitzatik, bigarren zirkuitu honi dagokion *V-I* erlazioa kalkula daiteke:

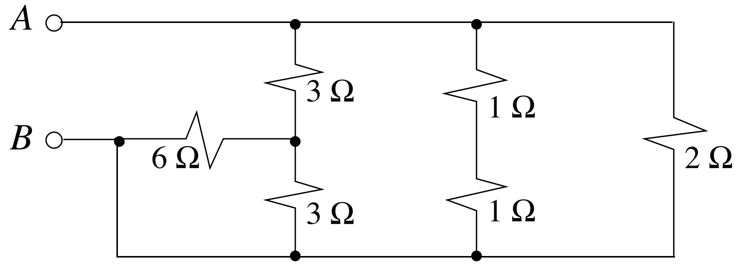
$$\frac{V}{I} = -\frac{R_1 \cdot R_3}{R_2}$$

Orain, erlazio hori lehengo zirkuitukoaren berdina izatea nahi dugunez gero, R_1, R_2 eta R_3 erresistentzien balioek honako erlazio hau bete behar dutela ondorioztatzen da:

$$\boxed{\frac{R_1 \cdot R_3}{R_2} = R}$$

3.3. Elementuen elkarketak eta horien aplikazioak

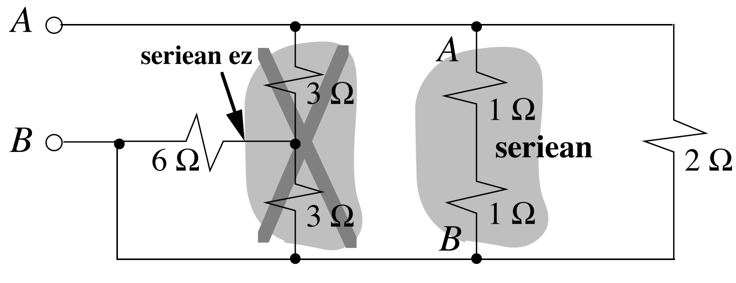
1. Kalkula ezazu irudiko erresistentzia-elkarketaren erresistentzia baliokidea, *A* eta *B* puntuen artean:



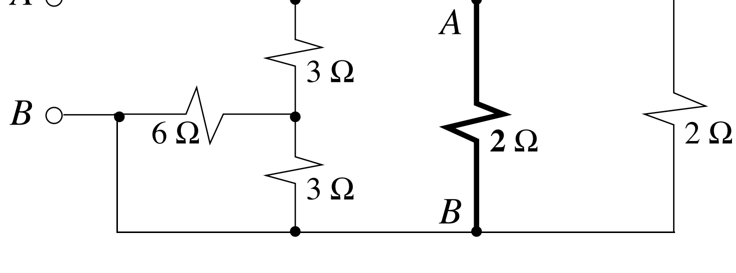
Ebazpena:

Esan bezala, erresistentzia-elkarketa baten erresistentzia baliokidea lortzeko, "sinplifikatzen" hasiko gara, lehenengo gainbegirada batean antzematen diren elkarketa sinpleetatik abiatuta. Horretarako, eskarmentua gureganatu behar dugu serie- eta paralelo-elkarketak bereizten.

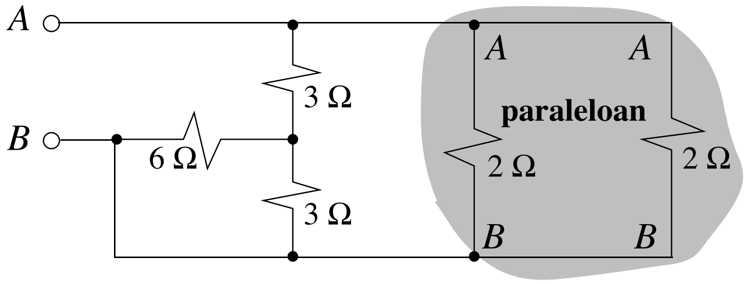
Kasu honetan, nabaria da erdiko adarreko 1 Ω-eko bi erresistentziak seriean daudela; baina are nabarmenagoa izan behar da 3 Ω-ekoak seriean ez daudela, erdiko puntuan beste lerro bat abiatzen baita beste bide batetik.



Hori dela eta, 1 Ω-eko bi erresistentzien baliokidea bien batura izango da, 2 Ω-eko erresistentzia bat, alegia, *A* eta *B* puntuen artean konektatuta. (Gogoratu, erresistentzien serie-elkarketa baten erresistentzia baliokidea: $R_{bs} = \left(R_1 + R_2\right) = 1\ \Omega + 1\ \Omega = 2\ \Omega$)

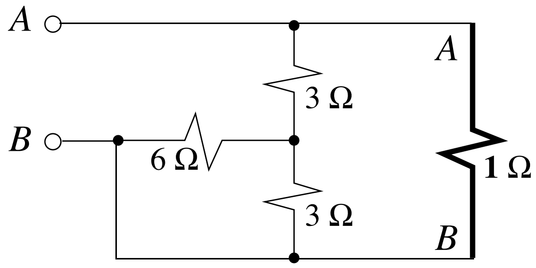


Orain, nabaria da eskuinaldeko 2 Ω-eko bi erresistentziak paraleloan daudela.

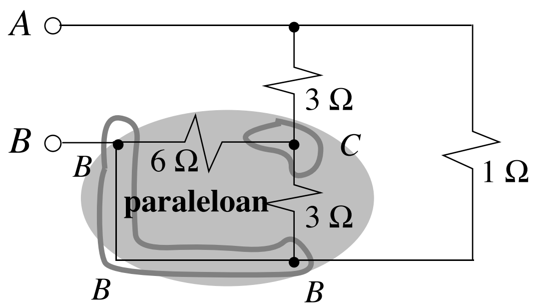


Bi horien erresistentzia baliokidea, beraz, 1 Ω-eko erresistentzia da. Gogoratu nola kalkulatzen den erresistentzien paralelo-elkarketa baten erresistentzia baliokidea:

$$R_{bp} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{2\ \Omega \cdot 2\ \Omega}{2\ \Omega + 2\ \Omega} = 1\ \Omega$$

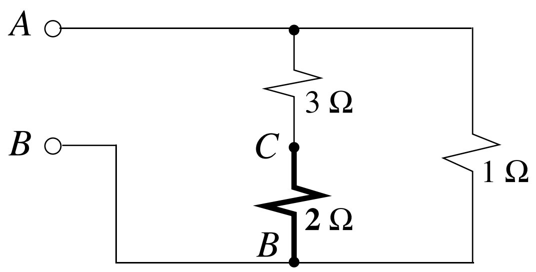


Orain, elkarketa geratu den bezala, eskarmenturik ez duen begirale batentzat agian ez da hain nabaria izango 6 Ω-eko eta beheko 3 Ω-eko erresistentziak paraleloan daudela. Hori hasierako unetik ikus zitekeen, baina orain behartuta gaude, dagoeneko begibistakoak ziren elkarketak ordezkatu ditugulako: bi erresistentzia horiek bi mutur komun dituzte (biak daude konektatuta *B* eta *C* puntuen artean); beraz, paraleloan daude.

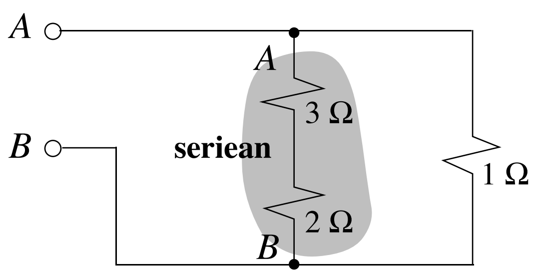


Bi horien erresistentzia baliokidea, beraz, 2 Ω-eko erresistentzia da, zirkuituko *B* eta *C* puntuen artean konektatuta:

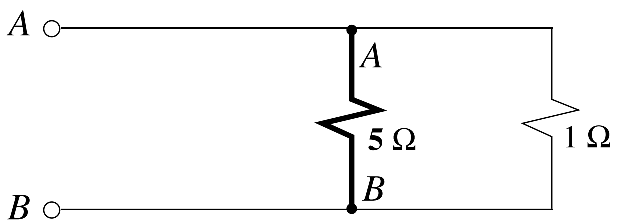
$$R_{bp} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{3\ \Omega \cdot 6\ \Omega}{3\ \Omega + 6\ \Omega} = 2\ \Omega$$



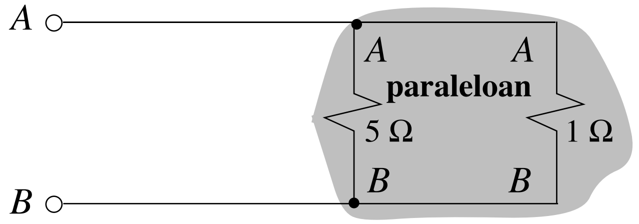
Orain, agerikoa da, erdiko 2 Ω-eko eta 3 Ω-eko erresistentziak seriean daudela.



Bi horien erresistentzia baliokidea, beraz, 5 Ω-eko erresistentzia da, *A* eta *B* puntuen artean konektatuta.

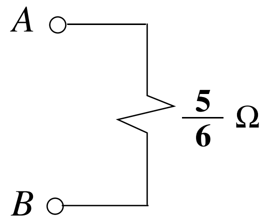


Orain, nabaria da, geratzen diren 5 Ω-eko eta 1 Ω-eko erresistentziak paraleloan daudela.



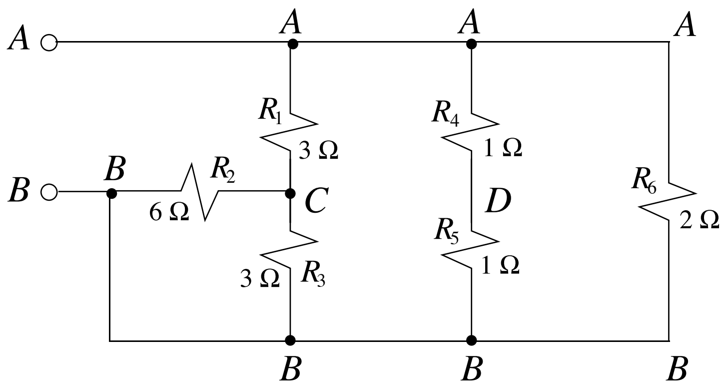
Bi horien erresistentzia baliokidea, beraz, 5/6 Ω-eko erresistentzia da, eta horixe da, hain zuzen ere, elkarketa osoaren erresistentzia baliokidea, *A* eta *B* puntuen artean.

$$R_{bp} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{5\ \Omega \cdot 1\ \Omega}{5\ \Omega + 1\ \Omega} = \frac{5}{6}\ \Omega$$



Liburuaren egileon ustez, ariketan zehar azaldutako prozedura erraza da, eta, ondorioz, baliagarria, edozein erresistentzia-elkarketaren baliokidea lortzeko. Dena den, gerta zitekeen irakurleren batek bitarteko pausoren bat berehala ez ikustea. Horrelako bitarteko elkarketak (seriea eta paraleloa) berehala antzemateko behar den eskarmentua hau bezalako sinplifikazio-ariketa asko eginez lortzen den arren, hemen saiatuko gara metodo sistematiko bat aurkezten, balizko zailtasunak saihesten laguntzeko asmoz. Hona hemen metodoa:

1. Lehenengo urratsa, elkarketako konexio-puntu eta erresistentzia guztiak zenbatzea edo izandatzea da (adi! izendatu behar direnak ez dira korapiloak, konexio-puntuak baizik; hots, bi elementu besterik elkartzen ez direnean ere, konexio-puntu bat izango dugu, korapiloa izan ez arren). Kasu honetan, A, B, C eta D konexio-puntuak eta R_1, R_2, R_3, R_4, R_5 eta R_6 erresistentziak ditugu:



2. Ondoren, bigarren urratsean, taula bat egingo dugu erresistentzien eta konexio-puntuen arteko loturak agerian uzteko: bertan, erresistentzia bakoitzaren bi muturrak zein konexio-puntutan dauden adieraziko dugu. Horrez gain, geroxeago ikusiko dugun arazo bat saihesteko, erresistentzia-elkarketa kanpoko "munduarekin" konektatzeko erabiliko diren bi konexio-puntuak agerian utziko ditugu, beraietan, elkarketatik kanpoko beste elementuren bat konektatzea posible baita:

	A	B	C	D
R_1	✓		✓	
R_2		✓	✓	
R_3		✓	✓	
R_4	✓			✓
R_5		✓		✓
R_6	✓	✓		
Kanpoko konexio-puntuak	✓	✓		

3. Hirugarren urratsa, taula aztertzea izango da, bertan erresistentzien arteko serie- eta paralelo-elkarketak bilatzeko.

- Bi erresistentzia (edo gehiago) paraleloan daude, baldin eta beren muturrak konexio-puntu beretan loturik badaude.
  Esate baterako, aurreko taulan, lehenengo gainbegirada batean agerikoa da R_2 eta R_3 erresistentziak paraleloan daudela, bien muturrak B eta C puntuetan lotuta baitaude:

R_2 eta R_3 **paraleloan** *B-C*

	A	B	C	D
R_1	✓		✓	
R_2		✓	✓	
R_3		✓	✓	
R_4	✓			✓
R_5		✓		✓
R_6	✓	✓		
Kanpoko konexio-puntuak	✓	✓		

  Paralelo-elkarketa hori dela eta, R_2 eta R_3 erresistentziak B eta C puntuen artean dagoen 2 Ω-eko erresistentzia bakar batez ordezka daitezke (R_{2p3} izendatuko dugu). (Gogoan izan paralelo-elkarketaren erresistentzia baliokidea kalkulatzeko formula.)
  (Oharra: honez gero, irakurlea konturatuko zen, R_6 erresistentzia eta kanpoko konexio-puntuak ere paraleloan daudela; baina ez dago paralelo-elkarketa hori elementu baliokide batez ordezkatzerik, ez baitakigu kanpoko konexio-puntu horien artean zer motatako elementua konektatuko den erresistentzia-elkarketatik kanpoan.)

- Bi erresistentzia seriean daude, baldin eta mutur komun bakarra badute, konexio-puntu berean lotuta, eta gainera puntu komun horretan beste ezer konektatuta ez badago, hots, taulako zutabe horretan bi erresistentzia horiei dagozkien bi markak baino ez badaude. (Oharra: hemen bai, kanpoko konexio--puntuei dagozkien markak kontuan hartzen dira, berebiziko garrantzia baitute bi erresistentziaren arteko balizko serie-elkarketa bat "apurtzeko", geroxeago ikusiko dugun legez.)

Esate baterako, aurreko taulan R_4 eta R_5 erresistentziak seriean daudela antzematen da, D konexio-puntuan mutur bana baitute eta bertan (D puntuan, alegia) ez baitago konektatuta beste elementurik:

	A	B	C	D
R_1	✓		✓	
R_2		✓	✓	
R_3		✓	✓	
R_4	✓			✓
R_5		✓		✓
R_6	✓	✓		
Kanpoko konexio-puntuak	✓	✓		

libre

R_4 eta R_5 **seriean**

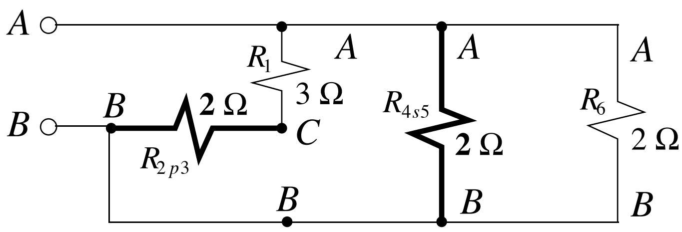
A-D, D-B = A-B

libre

Serie-elkarketa hori dela eta, R_4 eta R_5 erresistentziak A eta B puntuen artean dagoen 2 Ω-eko erresistentzia bakar batez ordezka daitezke (R_{4s5} izendatuko dugu). (Gogoan izan serie-elkarketaren erresistentzia baliokidea kalkulatzeko formula.)
Kontuan izan D tarteko puntua desagertu egingo dela.

4. Hori guztia kontuan hartuz, laugarren urratsari ekin diezaiokegu: ordezkatu antzemandako elkarketa soilak beren baliokideez.

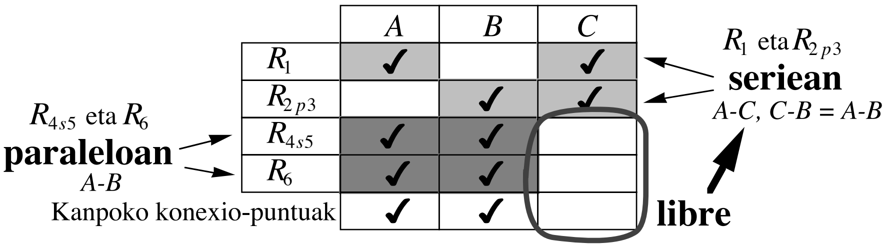
Kasu honetan, honako elkarketa baliokide hau lortzen da:



Orain, bigarren urratsari ekin behar diogu berriro, taula berria lortzeko.

	A	B	C
R_1	✓		✓
R_{2p3}		✓	✓
R_{4s5}	✓	✓	
R_6	✓	✓	
Kanpoko konexio-puntuak	✓	✓	

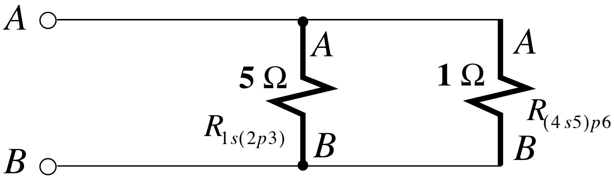
Taula berrian oinarriturik, hirugarren urratsari ekin diezaiokegu elkarketa berriak bilatzeko asmoz. Oraingo honetan, agerikoa da R_1 eta R_{2p3} seriean daudela, C puntu komunean ez baitago beste elementurik; eta, halaber, R_{4s5} eta R_6 paraleloan daudela A eta B puntuen artean:



Laugarren urratsean bi elkarketa horiek ordezkatuz gero, ondoko irudiko elkarketa berria lortzen da:

R_1 eta R_{2p3} erresistentzien ordez, A eta B puntuen artean dagoen 5 Ω-eko erresistentzia bakarra dago orain ($R_{1s(2p3)}$ izendatuko dugu). Kontuan izan oraingo honetan C puntua desagertu dela.

R_{4s5} eta R_6 erresistentzien ordez, A eta B puntuen artean dagoen 1 Ω-eko erresistentzia bakarra dago ($R_{(4s5)p6}$ izendatuko dugu).



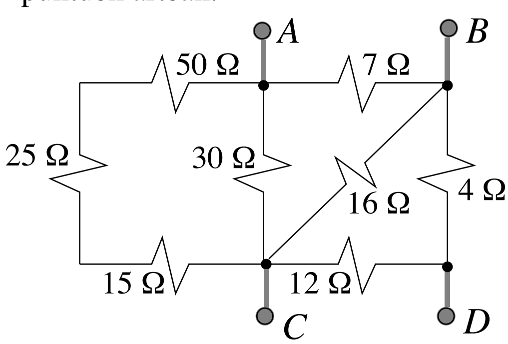
Orain agerikoa da, geratzen diren 5 Ω-eko eta 1 Ω-eko erresistentziak paraleloan daudela; eta horien baliokidea 5/6 Ω-eko erresistentzia da, lehen kalkulatu dugun bezala.

2. Kalkula ezazu irudiko erresistentzia-elkarketaren erresistentzia baliokidea, elkarketa zirkuitu batean ondoko moduetan konektatzen bada:

a) A eta B puntuen artean.

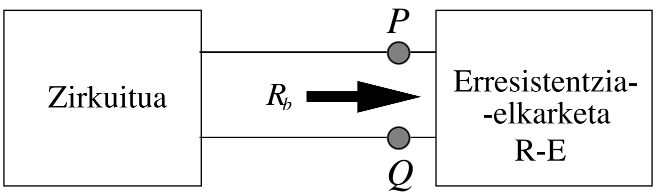
b) A eta C puntuen artean.

c) C eta D puntuen artean.

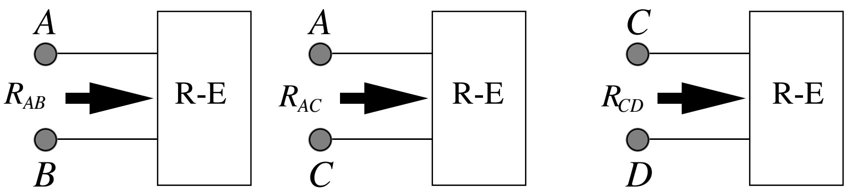


Ebazpena:

Ariketa honen bitartez, honako hau azpimarratu nahi dugu: erresistentzia-elkarketa baten erresistentzia baliokidea kalkulatzerakoan, zenbateraino diren garrantzitsuak elkarketako kanpoko bi konexio-puntuak. Izan ere, elkarketa hori zirkuitu batean sartzeko erabiltzen di-ren bi puntuak (*P* eta *Q*) zein diren arabera, emaitzak oso ezberdinak izan daitezke.

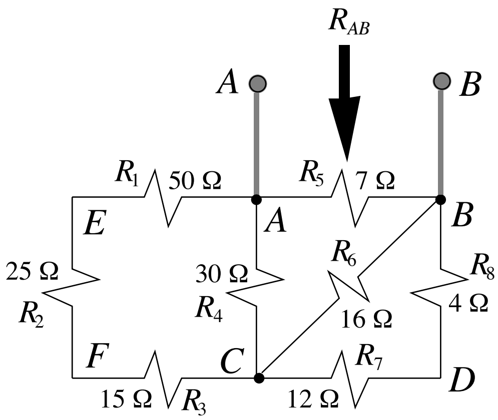


Kasu honetan, honako konexio hauek izango genituzke:



Ikus ditzagun, bada, ezberdintasun horiek:

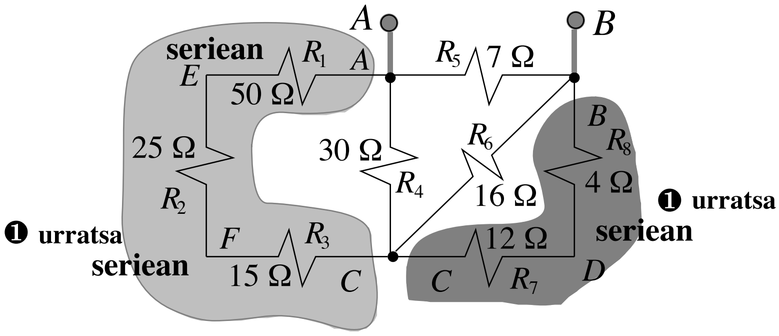
a) Erresistentzia-elkarketa hori zirkuitu batean *A* eta *B* puntuen bitartez konektatzen bada, elkarketako beste puntu guztiak elkarketaren barnekoak dira; hots, ez dira atzigarriak izango kanpotik. Ondorioz, analizatu beharreko elkarketa honako hau izango da:



Orain, aurreko ariketan bezalaxe, elkarketa sinpleak (seriea zein paraleloa) bilatzeari ekin diezaiokegu, lehenengo begirada batean antzematen direnak hartuz, edo taula erabiliz.

	A	*B*	*C*	*D*	*E*	*F*
R_1	✓				✓	
R_2					✓	✓
R_3			✓			✓
R_4	✓		✓			
R_5	✓	✓				
R_6		✓	✓			
R_7			✓	✓		
R_8		✓		✓		
Kanpoko konexio-puntuak	✓	✓				

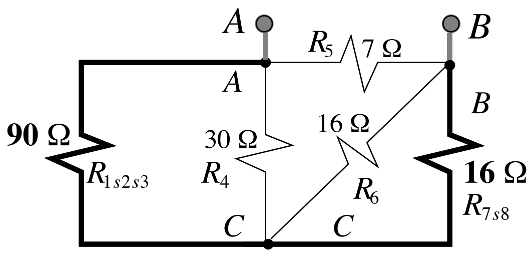
Kasu honetan, agerikoa da ezkerreko adarrean dauden hiru erresistentziak (R_1, R_2 eta R_3) seriean daudela, baita eskuineko adarreko bi erresistentziak ere (R_7 eta R_8), hurrenez hurren:



R_1 eta R_2 **seriean**
R_2 eta R_3 **seriean**
A-E, E-F, F-C = A-C
❶ **urratsa**
R_7 eta R_8 **seriean**
C-D, D-B = C-B

	A	*B*	*C*	*D*	*E*	*F*
R_1	✓				✓	
R_2					✓	✓
R_3			✓	**libre**		✓
R_4	✓		✓		**libre**	**libre**
R_5	✓	✓				
R_6		✓	✓			
R_7			✓	✓		
R_8		✓		✓		
Kanpoko konexio-puntuak	✓	✓				

Bi serie-elkarketa horien baliokideak $R_{1s2s3} = 50\ \Omega + 25\ \Omega + 15\ \Omega = 90\ \Omega$ (*A* eta *C* puntuen artean konektatuta) eta $R_{7s8} = 12\ \Omega + 4\ \Omega = 16\ \Omega$ (*B* eta *C* puntuen artean konektatuta) izango dira, hurrenez hurren.



Eta elkarketa baliokide honi dagokion taula berria hauxe da:

	A	B	C
R_{1s2s3}	✓		✓
R_4	✓		✓
R_5	✓	✓	
R_6		✓	✓
R_{7s8}		✓	✓
Kanpoko konexio-puntuak	✓	✓	

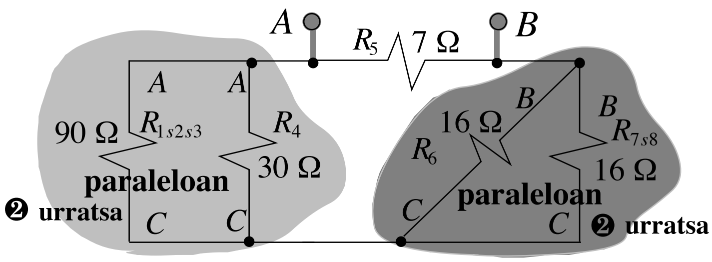
Orain, agerikoa da ezkerreko 90 Ω-eko eta 30 Ω-eko erresistentziak (R_{1s2s3} eta R_4) paraleloan daudela, A eta C puntuen artean, baita eskuineko 16 Ω-eko bi erresistentziak ere (R_6 eta R_{7s8}), B eta C puntuen artean, hurrenez hurren:

R_{1s2s3} eta R_4 **paraleloan** *A-C*

❷ urratsa

R_6 eta R_{7s8} **paraleloan** *B-C*

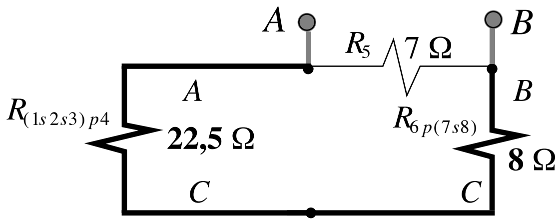
	A	B	C
R_{1s2s3}	✓		✓
R_4	✓		✓
R_5	✓	✓	
R_6		✓	✓
R_{7s8}		✓	✓
Kanpoko konexio-puntuak	✓	✓	



Bi paralelo-elkarketa horien baliokideak honako hauek dira, hurrenez hurren:

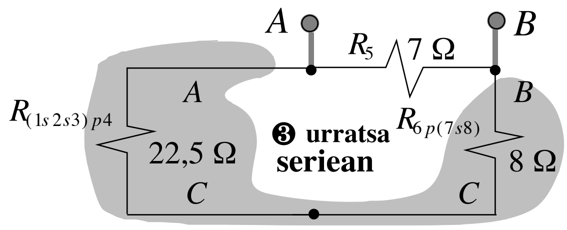
$$R_{(1s2s3)p4} = \frac{R_{1s2s3} \cdot R_4}{R_{1s2s3} + R_4} = \frac{90\ \Omega \cdot 30\ \Omega}{90\ \Omega + 30\ \Omega} = 22{,}5\ \Omega$$

$$R_{6p(7s8)} = \frac{R_6 \cdot R_{7s8}}{R_6 + R_{7s8}} = \frac{16\ \Omega \cdot 16\ \Omega}{16\ \Omega + 16\ \Omega} = 8\ \Omega$$



	A	*B*	*C*
$R_{(1s2s3)p4}$	✓		✓
R_5	✓	✓	
$R_{6p(7s8)}$		✓	✓
Kanpoko konexio-puntuak	✓	✓	

Orain, agerikoa da 22,5 Ω-eko eta 8 Ω-eko erresistentziak ($R_{(1s2s3)p4}$ eta $R_{6p(7s8)}$) seriean daudela, *A* eta *B* puntuen artean:

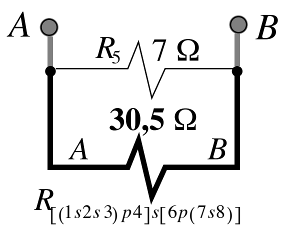


❸ urratsa
$R_{(1s2s3)p4}$ eta $R_{6p(7s8)}$
seriean
A-C, C-B = A-B

	A	*B*	*C*
$R_{(1s2s3)p4}$	✓		✓
R_5	✓	✓	
$R_{6p(7s8)}$		✓	✓
Kanpoko konexio-puntuak	✓	✓	

libre

Serie-elkarketa horren baliokidea: $R_{[(1s2s3)p4]s[6p(7s8)]} = 22,5\ \Omega + 8\ \Omega = 30,5\ \Omega$, *A* eta *B* puntuen artean konektatuta.

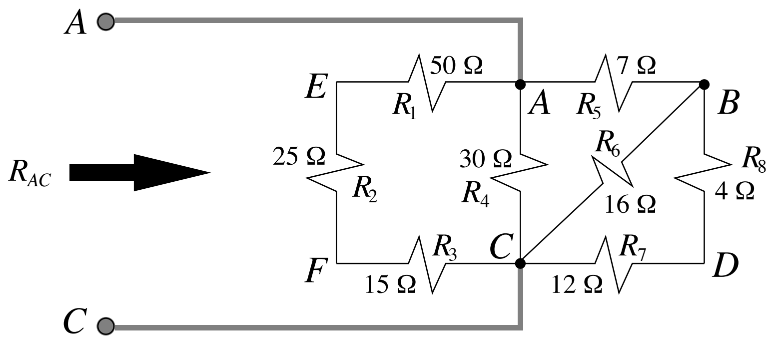


Orain, berriro ere agerikoa da azken bi erresistentziak paraleloan daudela, *A* eta *B* puntuen artean; ondorioz, horien erresistentzia baliokidea 5,7 Ω-ekoa da:

$$R_{AB} = \frac{R_5 \cdot R_{[(1s2s3)p4]s[6p(7s8)]}}{R_5 + R_{[(1s2s3)p4]s[6p(7s8)]}} = \frac{7\ \Omega \cdot 30,5\ \Omega}{7\ \Omega + 30,5\ \Omega} = 5,7\ \Omega$$

$$\boxed{R_{AB} = 5,7\ \Omega}$$

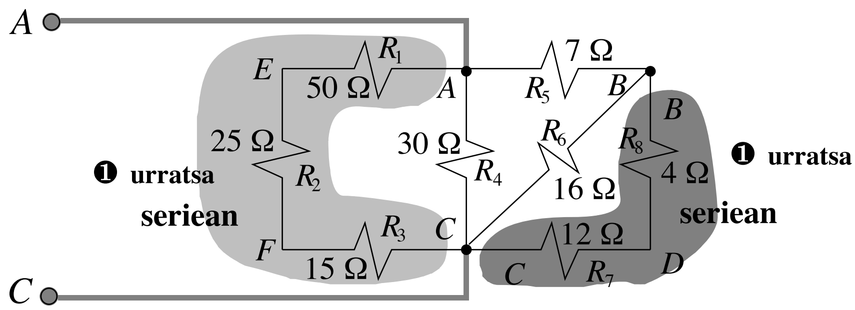
b) Erresistentzia-elkarketa hori zirkuitu batean *A* eta *C* puntuen bitartez konektatzen bada, analizatu beharreko elkarketa honako hau izango da:



	A	B	C	D	E	F
R_1	✓				✓	
R_2					✓	✓
R_3			✓			✓
R_4	✓		✓			
R_5	✓	✓				
R_6		✓	✓			
R_7			✓	✓		
R_8		✓		✓		
Kanpoko konexio-puntuak	✓		✓			

Azken taula hau R_{AB} elkarketari dagokionarekin alderatuz gero, agerikoa da berdinak direla kanpoko konexio-puntuak izan ezik, hauexek baitira aldatu diren bakarrak. Ikusiko dugun legez, aldaketa hori nahikoa da erresistentzia baliokidearen balioa errotik aldatzeko, elkarketa sinpleak ez baitira lehengoen berdinak izango. Ekin diezaiogun, bada, elkarketa "berri" hau aztertu eta sinplifikatzeari:

Taulan zein irudian, agerikoa da ezkerreko adarreko hiru erresistentziak seriean daudela, baita eskuineko adarreko bi erresistentziak ere, hurrenez hurren, lehen bezala; beraz, horretan, kanpoko konexio-puntuek ez dute eraginik izan:



R_1 eta R_2 **seriean**
R_2 eta R_3 **seriean**
A-E, E-F, F-C = A-C

❶ **urratsa**

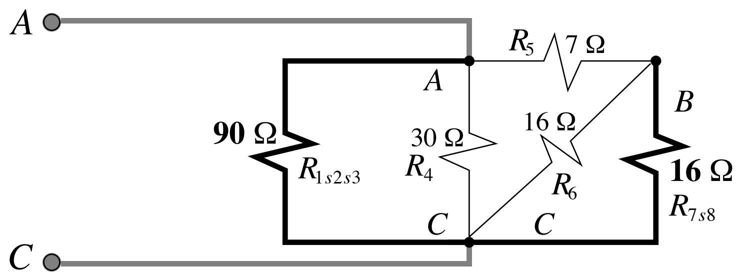
R_7 eta R_8 **seriean**
C-D, D-B = C-B

	A	*B*	*C*	*D*	*E*	*F*
R_1	✓				✓	
R_2					✓	✓
R_3			✓			✓
R_4	✓		✓	**libre**		
R_5	✓	✓				
R_6		✓	✓		**libre**	**libre**
R_7			✓	✓		
R_8		✓		✓		
Kanpoko konexio-puntuak	✓		✓			

Bi serie-elkarketa horien baliokideak, beraz, lehengoen berdinak dira:

$R_{1s2s3} = 90\ \Omega$ (*A* eta *C* puntuen artean konektatuta)

$R_{7s8} = 16\ \Omega$ (*B* eta *C* puntuen artean konektatuta).



Eta elkarketa baliokide honi dagokion taula berria hauxe da:

	A	*B*	*C*
R_{1s2s3}	✓		✓
R_4	✓		✓
R_5	✓	✓	
R_6		✓	✓
R_{7s8}		✓	✓
Kanpoko konexio-puntuak	✓		✓

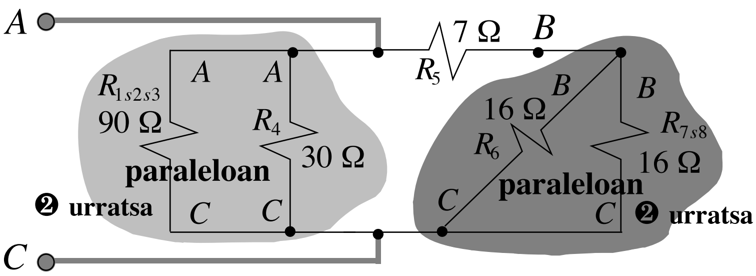
Lehen bezala, orain ere agerikoa da ezkerreko erresistentziak (R_{1s2s3} eta R_4) paraleloan daudela, *A* eta *C* puntuen artean; baita eskuineko bi erresistentziak ere (R_6 eta R_{7s8}), *B* eta *C* puntuen artean. Beraz, honetan ere, kanpoko konexio-puntuen aldatzeak ez du eraginik izan:

R_{1s2s3} eta R_4 **paraleloan** *A-C*

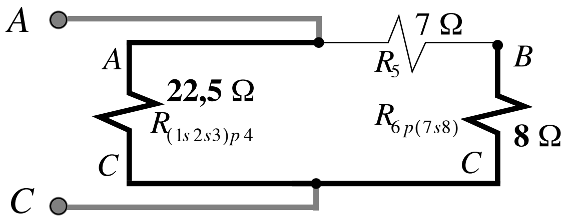
❷ **urratsa**

R_6 eta R_{7s8} **paraleloan** *B-C*

	A	*B*	*C*
R_{1s2s3}	✓		✓
R_4	✓		✓
R_5	✓	✓	
R_6		✓	✓
R_{7s8}		✓	✓
Kanpoko konexio-puntuak	✓		✓



Bi paralelo-elkarketa horien baliokideak lehengoen berdinak dira: 22,5 Ω eta 8 Ω, hurrenez hurren:



Eta orain dator ezberdintasunik nabarmenena, kanpoko konexio-puntuen zuzeneko eragina hain zuzen:

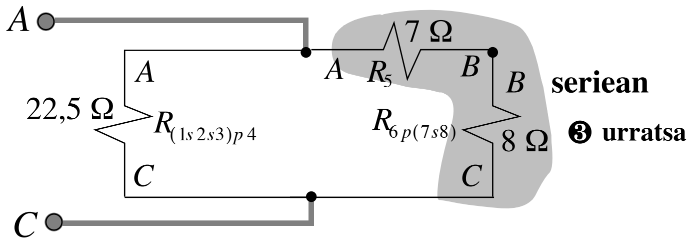
Lehen ez bezala, orain $R_{(1s2s3)p4}$ eta $R_{6p(7s8)}$ erresistentzia horiek ez daude seriean, tartean C kanpoko konexio-puntua baitago, eta horrek apurtu egiten baitu lehen agertzen zen serie-elkarketa hori. Orain, ordea, eta berriro ere lehen ez bezala, agerikoa da R_5 eta $R_{6p(7s8)}$ erresistentziak seriean daudela, A eta B puntuen artean, zeren orain B puntua barneko puntua baita eta bertan ez baitago ezer konektatuta:

❸ urratsa
R_5 eta $R_{6p(7s8)}$
seriean
A-B, B-C = A-C

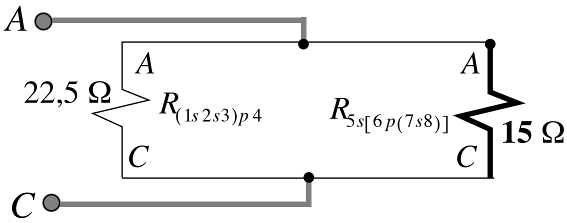
	A	B	C
$R_{(1s2s3)p4}$	✓	**libre**	✓
R_5	✓	✓	
$R_{6p(7s8)}$		✓	✓
Kanpoko konexio-puntuak	✓	**libre**	✓

$R_{(1s2s3)p4}$ eta $R_{6p(7s8)}$
seriean EZ

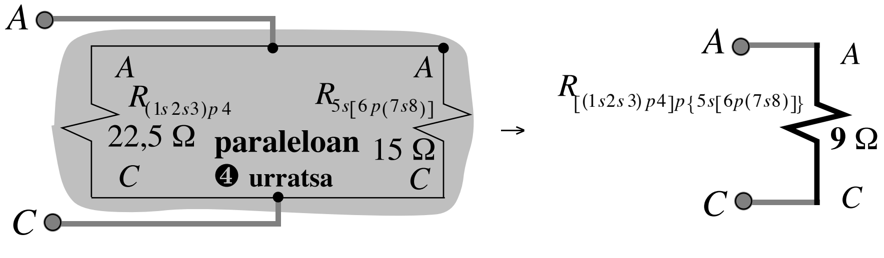
ez libre



Serie-elkarketa horren baliokidea: $R_{5s[6p(7s8)]}$ = 7 Ω + 8 Ω = 15 Ω, A eta C puntuen artean konektatuta.

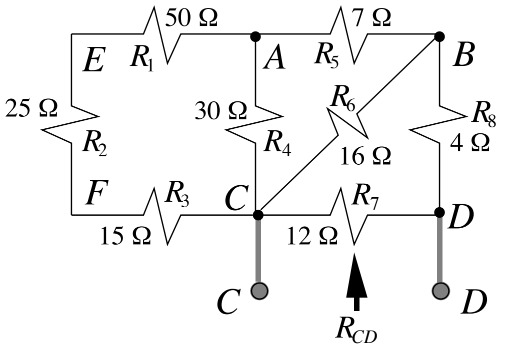


Orain, berriro ere agerikoa da azken bi erresistentziak paraleloan daudela, A eta C puntuen artean; ondorioz, horien erresistentzia baliokidea 9 Ω-ekoa da:



$$R_{AC} = \frac{R_{(1s2s3)p4} \cdot R_{5s[6p(7s8)]}}{R_{(1s2s3)p4} + R_{5s[6p(7s8)]}} = \frac{22{,}5\ \Omega \cdot 15\ \Omega}{22{,}5\ \Omega + 15\ \Omega} = 9\ \Omega \quad \Rightarrow \quad \boxed{R_{AC} = 9\ \Omega}$$

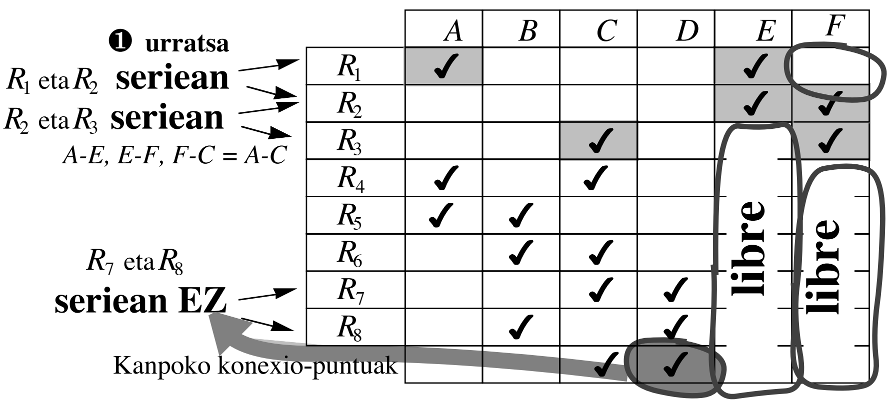
c) Erresistentzia-elkarketa hori zirkuitu batean C eta D puntuen bitartez konektatzen bada, analizatu beharreko elkarketa honako hau izango da:

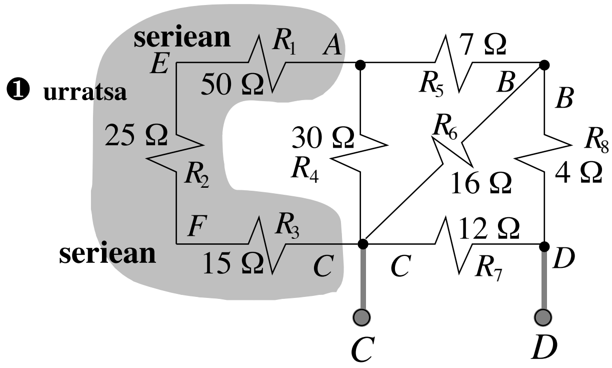


Elkarketa horri dagokion taula aurreko bi kasuetakoen berdina da, kanpoko konexio-puntuak izan ezik:

	A	B	C	D	E	F
R_1	✓				✓	
R_2					✓	✓
R_3			✓			✓
R_4	✓		✓			
R_5	✓	✓				
R_6		✓	✓			
R_7			✓	✓		
R_8		✓		✓		
Kanpoko konexio-puntuak			✓	✓		

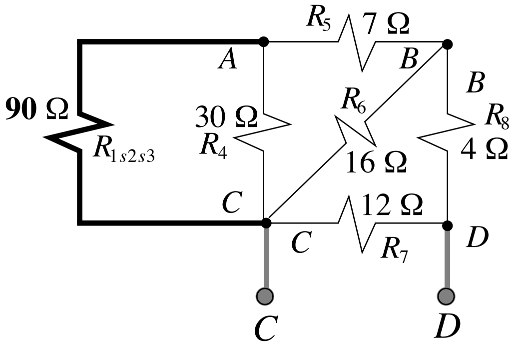
Aurreko bi kasuetan bezala, ezkerreko adarreko hiru erresistentziak (R_1, R_2 eta R_3) seriean daude; baina oraingo honetan eskuineko adarreko bi erresistentziak (R_7 eta R_8) ez daude seriean, D puntuan kanpoko konexio bat egingo baita:





Beraz, serie-elkarketa horren baliokidea lehengoaren berdina da:

R_{1s2s3} = 90 Ω (*A* eta *C* puntuen artean konektatuta)



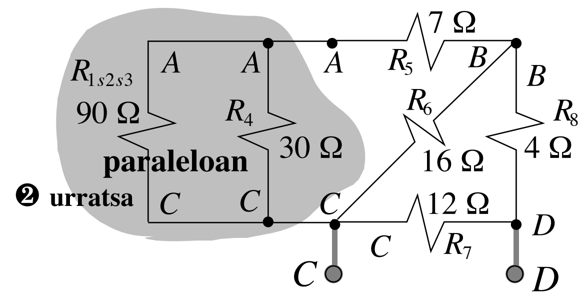
Eta elkarketa baliokide honi dagokion taula berria hauxe da:

	A	*B*	*C*	*D*
R_{1s2s3}	✓		✓	
R_4	✓		✓	
R_5	✓	✓		
R_6		✓	✓	
R_7			✓	✓
R_8		✓		✓
Kanpoko konexio-puntuak			✓	✓

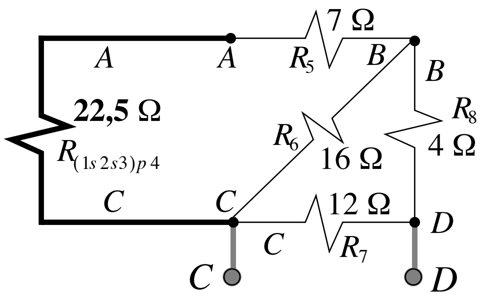
Taula hori aztertuz, lehen bezala orain ere agerikoa da ezkerreko erresistentziak (R_{1s2s3} eta R_4) paraleloan daudela, *A* eta *C* puntuen artean; baina lehen ez bezala, hemen ez dago beste elkarketa sinplerik, aurreko hori bere baliokideaz ordezkatu arte:

❷ urratsa
R_{1s2s3} eta R_4
paraleloan
A-C

	A	*B*	*C*	*D*
R_{1s2s3}	✔		✔	
R_4	✔		✔	
R_5	✔	✔		
R_6		✔	✔	
R_7			✔	✔
R_8		✔		✔
Kanpoko konexio-puntuak			✔	✔



Paralelo-elkarketa horren baliokidea lehengoaren berdina da: $R_{(1s2s3)p4} = 22{,}5\ \Omega$. Hots:



Konexio-taula berria hauxe da:

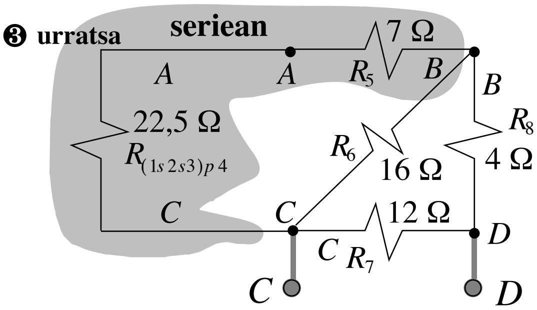
	A	*B*	*C*	*D*
$R_{(1s2s3)p4}$	✔		✔	
R_5	✔	✔		
R_6		✔	✔	
R_7			✔	✔
R_8		✔		✔
Kanpoko konexio-puntuak			✔	✔

Agerikoa denez, taula berri horrek ez du antz handirik aurreko biekin.

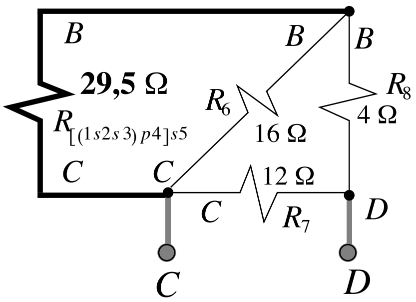
Bertan agerikoa da $R_{(1s2s3)p4}$ eta R_5 seriean daudela:

❸ urratsa
$R_{(1s2s3)p4}$ eta R_5
seriean
C-A, A-B = C-B

	A	B	C	D
$R_{(1s2s3)p4}$	✓		✓	
R_5	✓	✓		
R_6	libre	✓	✓	
R_7			✓	✓
R_8		✓		✓
Kanpoko konexio-puntuak			✓	✓



Serie-elkarketa horren baliokidea honako hau da: $R_{[(1s2s3)p4]s5}$ = 22,5 Ω + 7 Ω = 29,5 Ω, *B* eta *C* puntuen artean konektatuta (kontuan izan, oraingo honetan *A* puntua dela desagertu dena).

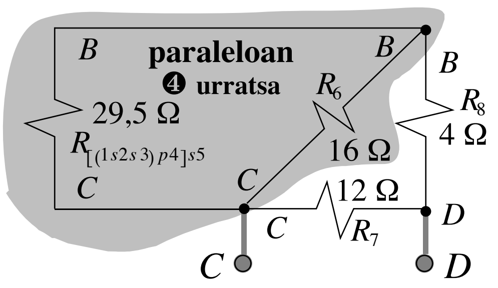


	B	C	D
$R_{[(1s2s3)p4]s5}$	✓	✓	
R_6	✓	✓	
R_7		✓	✓
R_8	✓		✓
Kanpoko konexio-puntuak		✓	✓

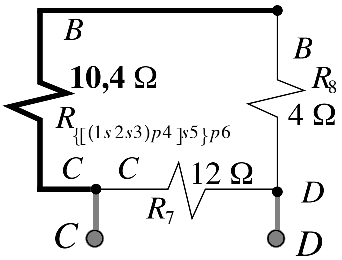
Orain, agerikoa da ezkerreko bi erresistentziak ($R_{[(1s2s3)p4]s5}$ eta R_6), paraleloan daudela, *B* eta *C* puntuen artean:

❹ urratsa
$R_{[(1s2s3)p4]s5}$ eta R_6
paraleloan
B-C

	B	C	D
$R_{[(1s2s3)p4]s5}$	✓	✓	
R_6	✓	✓	
R_7		✓	✓
R_8	✓		✓
Kanpoko konexio-puntuak		✓	✓



Paralelo-elkarketa horren baliokidea hauxe da: $R_{\{[(1s2s3)p4]s5\}p6}$ = 10,4 Ω, *B* eta *C* puntuen artean konektatuta.

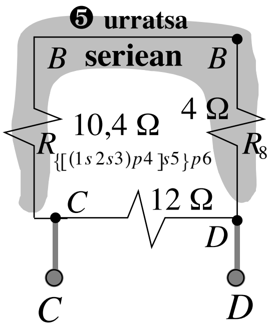


	B	C	D
$R_{\{[(1s2s3)p4]s5\}p6}$	✓	✓	
R_7		✓	✓
R_8	✓		✓
Kanpoko konexio-puntuak		✓	✓

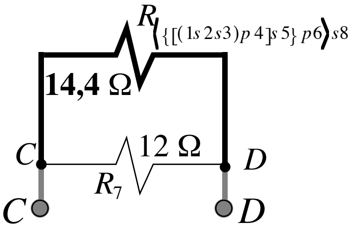
Orain, agerikoa da ezkerreko eta eskuineko erresistentziak ($R_{\{[(1s2s3)p4]s5\}p6}$ eta R_8), seriean daudela, *C* eta *D* puntuen artean:

❺ **urratsa**
$R_{\{[(1s2s3)p4]s5\}p6}$ eta R_8
seriean
C-B, B-D = C-D

	B	C	D
$R_{\{[(1s2s3)p4]s5\}p6}$	✓	✓	
R_7		✓	✓
R_8	✓		✓
Kanpoko konexio-puntuak	**libre**	✓	✓



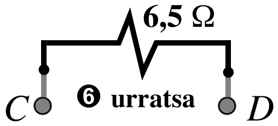
Serie-elkarketa horren baliokidea honako hau da: $R_{[\{[(1s2s3)p4]s5\}p6]s8}$ = 14,4 Ω, *C* eta *D* puntuen artean konektatuta.



	C	D
$R_{\langle\{[(1s2s3)p4]s5\}p6\rangle s8}$	✓	✓
R_7	✓	✓
Kanpoko konexio-puntuak	✓	✓

Orain, agerikoa bi erresistentziak paraleloan daudela, C eta D puntuen artean:

$$R_{CD} = \frac{R_7 \cdot R_{\langle\{[(1s2s3)p4]s5\}p6\rangle s8}}{R_7 + R_{\langle\{[(1s2s3)p4]s5\}p6\rangle s8}} = \frac{12\ \Omega \cdot 14{,}4\ \Omega}{12\ \Omega + 14{,}4\ \Omega} = 6{,}5\ \Omega$$



$$\rightarrow \qquad \boxed{R_{CD} = 6{,}5\ \Omega}$$

Beraz, hiru emaitzak alderatuz, agerikoa da oso desberdinak direla, elkarketako kanpoko bi konexio-puntuak aldatzearen eraginez. Eta ez bakarrik zenbakizko azken balioak; balio horiek lortzeko egindako tarteko elkarketak edo urratsak ere desberdinak dira. Hona hemen, laburbilduta, analizatu ditugun hiru kasuak (garbi dago, irakurleak nahi adina ariketa desberdin egin dezakeela, kanpoko bi konexio-puntuak aldatuz, edozein erresistentzia-elkarketatan):

a) R_{AB} = 5,7 Ω, honako modu honetan lortua:

$\{[(R_1$ serie R_2 serie $R_3)$ paralelo $R_4]$ serie $[R_6$ paralelo $(R_7$ serie $R_8)]\}$ paralelo R_5

urratsak: ❶ ❶ ❷ ❸ ❷ ❶ ❹

b) R_{AC} = 9 Ω, honako modu honetan lortua:

$[(R_1$ serie R_2 serie $R_3)$ paralelo $R_4]$ paralelo $\{R_5$ serie $[R_6$ paralelo $(R_7$ serie $R_8)]\}$

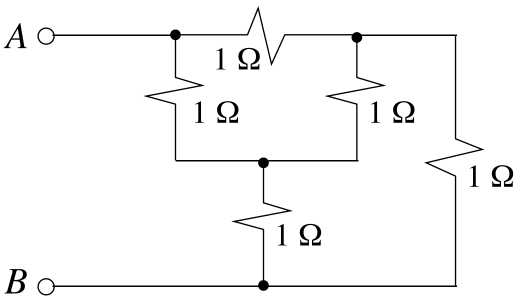
urratsak: ❶ ❶ ❷ ❹ ❸ ❷ ❶

c) R_{CD} = 6,5 Ω, honako modu honetan lortua:

$\{[\{[(R_1$ serie R_2 serie $R_3)$ paralelo $R_4]$ serie $R_5\}$ paralelo $R_6]$ serie $R_8\}$ paralelo R_7

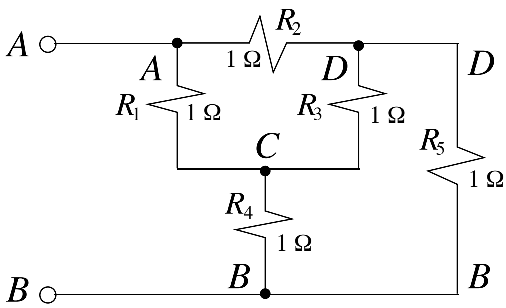
urratsak: ❶ ❶ ❷ ❸ ❹ ❺ ❻

3. Kalkula ezazu irudiko erresistentzia-elkarketaren erresistentzia baliokidea, A eta B puntuen artean:



Ebazpena:

Irudiari begira eta begira egon gaitezke denbora luzez eta ez dugu antzemango elkarketa sinplerik, ez eta taula egin ondoren ere, kasu honetan ez baitago ez serie-elkarketarik ez paralelo-elkarketarik.



Izan ere, R_1 eta R_4 erresistentziak ez daude seriean, C erdiko puntuan beste bat dagoelako. Beste horrenbeste esan daiteke R_3 eta R_4 edo R_2 eta R_5 erresistentziei buruz. Beste aldetik, R_1 eta R_3 erresistentziak ez daude paraleloan, goiko muturrak ez baitaude puntu berean lotuta. Hori guztia agerikoa da ondoko taulan: ez dago serie-elkarketarik, taulako zutabe guztietan bi marka baino gehiago dagoelako; ez dago paralelo-elkarketarik, ez baitago erresistentzia-parerik bina mutur zutabe beretan dituenik.

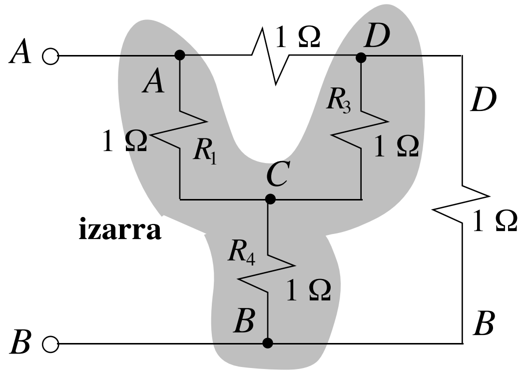
	A	B	C	D
R_1	✓		✓	
R_2	✓			✓
R_3			✓	✓
R_4		✓	✓	
R_5		✓		✓
Kanpoko konexio-puntuak	✓	✓		

Hortik abiatuta, erresistentzia-elkarketa hori sinplifikaezina dela pentsa genezake, hots, ez dagoela erresistentzia bakar batez ordezkatzerik; baina oker egongo ginateke, hipotesi hori guztiz faltsua baita. Ikus dezagun zergatik. Adibide hau berezia da: bertan, triangelu-elkarketa bat dago, R_1, R_2 eta R_3 erresistentziek osatzen dutena, eta izar-elkarketa bat ere, R_1, R_3 eta R_4 erresistentziek osatzen dutena, hain zuzen. Badakigu elkarketa berezi horiek ere ordezka daitezkeela, serie- eta paralelo-elkarketak bezain sinpleak izan ez arren: triangelu-elkarketa izar-elkarketa batez eta izar-elkarketa triangelu-elkarketa batez ordezka daitezke. Gainera, sarri, ordezkatu ondoren, serie- eta paralelo-elkarketa sinpleak agertzen dira zirkuitu baliokidean.

Beraz, izar- eta triangelu-elkarketak bereizten ere eskarmentua lortu behar da. Gogora dezagun triangelu-elkarketan zein izar-elkarketan, hiru erresistentzia elkartzen direla. Hemen ere, serie- eta paralelo-elkarketa sinpleekin bezala, ezin gara fidatu irudiaren itxuraz; hots, grafikoki elkarketa horiek modu askotan irudika daitezkeen arren, elektrikoki konexio bakarra osatzen dute, honako ezaugarri hauen arabera zehazki definituta dagoena:

- **Izar-elkarketan**, hiru erresistentziek mutur komun bana dute eta puntu horretan ez dago beste ezer konektatuta.

  Adibide honetan, gorago esan bezala, R_1, R_3 eta R_4 erresistentziek izar-elkarketa bat osatzen dute.



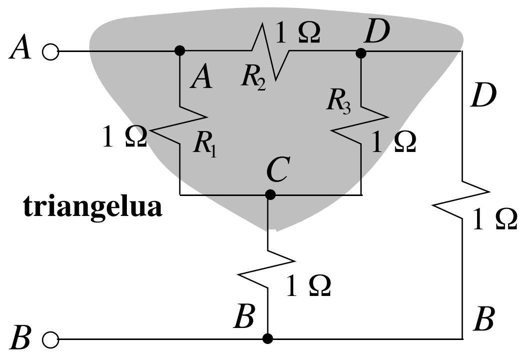
Taulan ere agerikoa da hiru erresistentzia horien arteko izar-elkarketa.

R_1 , R_3 eta R_4
izarrean
A-C, D-C, B-C

	A	*B*	*C*	*D*
R_1	✓		✓	
R_2	✓		**libre**	✓
R_3			✓	✓
R_4		✓	✓	
R_5		✓	**libre**	✓
Kanpoko konexio-puntuak	✓	✓	**libre**	

- **Triangelu-elkarketan**, berriz, erresistentzien muturrak binaka daude lotuta.

  Adibide honetan, gorago esan bezala, R_1, R_2 eta R_3 erresistentziek triangelu--elkarketa bat osatzen dute.

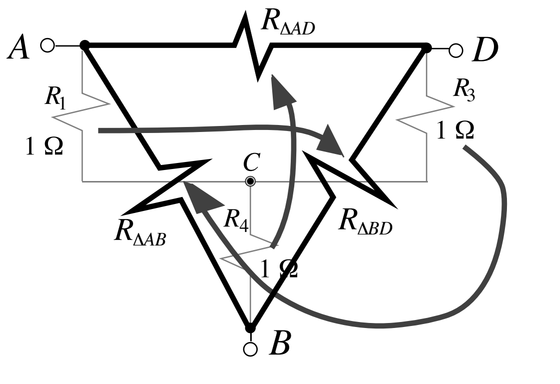


R_1, R_2 eta R_3
triangeluan
A - C, A - D, C - D

	A	B	C	D
R_1	✓		✓	
R_2	✓			✓
R_3			✓	✓
R_4		✓	✓	
R_5		✓		✓
Kanpoko konexio-puntuak	✓	✓		

Elkarketa osoa sinplifikatzeko unean, aurreko elkarketa horietako bat bakarrik hartu behar dugu abiapuntu gisa, hori ordezkatu ondoren bestea desagertu egingo baita. Dena den, hori agerian uzteko asmoz, adibide honetan bi aukerak aurkeztuko ditugu; eta bukatzean, emaitza bera lortzen dela ikusiko dugu, edozein izanda ere abiapuntua.

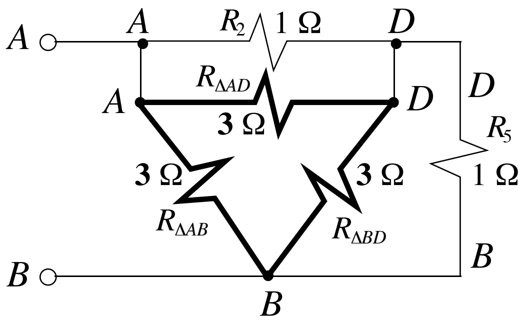
Has gaitezen, bada, R_1, R_3 eta R_4 erresistentziek osatutako izar-elkarketa aintzat hartzen. Badakigu, izar-elkarketa hori triangelu-elkarketa baliokide batez ordezka daitekeela, izararen kanpo aldeko hiru puntuen artean (adibide honetan *A*, *B* eta *D*), eta horrela izarraren erdiko puntu komuna desagertuko dela (adibide honetan, *C* puntua desagertuko da). Triangelua osatuko duten hiru erresistentzien balioak honako hauek izango dira, testuan ikusitako formulak aplikatuz:



$$R_{\Delta AD} = \frac{R_1 \cdot R_3 + R_3 \cdot R_4 + R_4 \cdot R_1}{R_4} = \frac{1 \cdot 1 + 1 \cdot 1 + 1 \cdot 1}{1} = 3\ \Omega$$

Beste bi formulak aurrekoaren antzekoak direnez eta izarra osatzen duten hiru erresistentziak berdinak direnez (hiruak 1 Ω-ekoak), triangelua osatuko duten hiru erresistentzien balioak berdinak izango dira, 3 Ω-ekoak hain zuzen ere, kalkulatu dugun legez. Beraz: $R_{\Delta AD} = R_{\Delta AB} = R_{\Delta BD} = 3\ \Omega$.

Hiru erresistentzia berri horiek sartuz gero, agerikoa da lehen zeuden izar- eta triangelu--elkarketak, biak desagertu direla, eta horien ordez triangelu-elkarketa berria agertu dela. Erresistentzia guztiak lotuz, honako elkarketa baliokide hau lortuko dugu (kontuz! $R_{\Delta AD}$ erresistentzia *A* eta *D* puntuen artean konektatzean, ez dugu lehen zegoen R_2 erresistentzia "matxakatu" behar!):



Eta elkarketa berri horri dagokion taula berria honako hau da:

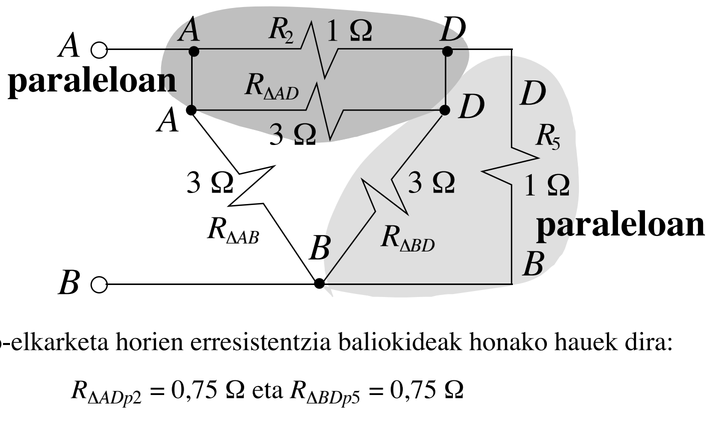
	A	B	D
$R_{\Delta AD}$	✔		✔
$R_{\Delta AB}$	✔	✔	
$R_{\Delta BD}$		✔	✔
R_2	✔		✔
R_5		✔	✔
Kanpoko konexio-puntuak	✔	✔	

Taula horretan agerikoa da $R_{\Delta AD}$ eta R_2 paraleloan daudela, eta baita $R_{\Delta BD}$ eta R_5 ere:

$R_{\Delta AD}$ eta R_2
paraleloan
A-D

	A	B	D
$R_{\Delta AD}$	✔		✔
$R_{\Delta AB}$	✔	✔	
$R_{\Delta BD}$		✔	✔
R_2	✔		✔
R_5		✔	✔
Kanpoko konexio-puntuak	✔	✔	

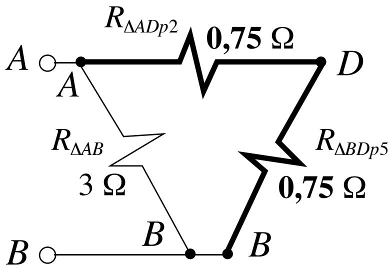
$R_{\Delta BD}$ eta R_5
paraleloan
B-D



Bi paralelo-elkarketa horien erresistentzia baliokideak honako hauek dira:

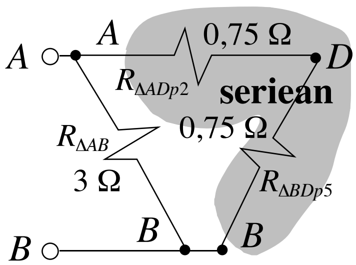
$$R_{\Delta ADp2} = 0{,}75\ \Omega \text{ eta } R_{\Delta BDp5} = 0{,}75\ \Omega$$

Biak ordezkatuz, honako elkarketa berri hau lortzen da:



	A	B	D
$R_{\Delta ADp2}$	✓		✓
$R_{\Delta AB}$	✓	✓	
$R_{\Delta BDp5}$		✓	✓
Kanpoko konexio-puntuak	✓	✓	

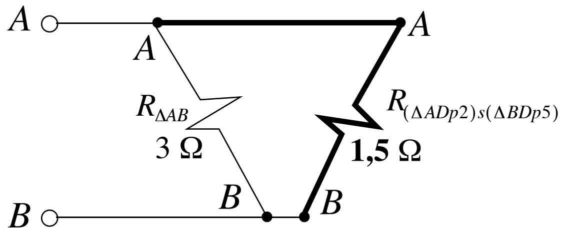
Irudian zein taulan, agerikoa da $R_{\Delta ADp2}$ eta $R_{\Delta BDp5}$ seriean daudela:



$R_{\Delta ADp2}$ eta $R_{\Delta BDp5}$
seriean
A-D-B

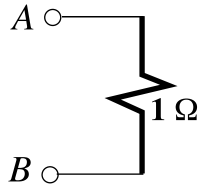
	A	B	D
$R_{\Delta ADp2}$	✓		✓
$R_{\Delta AB}$	✓	✓	**libre**
$R_{\Delta BDp5}$		✓	✓
Kanpoko konexio-puntuak	✓	✓	**libre**

Serie-elkarketa horren erresistentzia baliokidea hauxe da: $R_{(\Delta ADp2)s(\Delta BDp5)} = 1{,}5\ \Omega$, *A* eta *B* puntuen artean konektatuta.



Orain, agerikoa da bi erresistentzia horiek paraleloan daudela, *A* eta *B* puntuen artean:

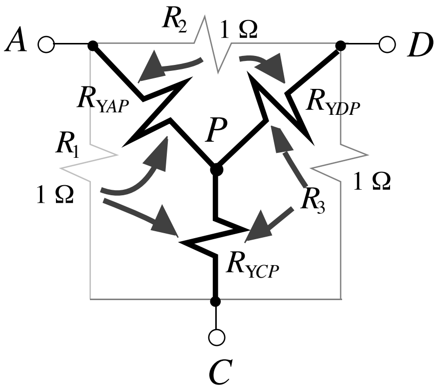
$$R_{AB} = \frac{R_{\Delta AB} \cdot R_{(\Delta ADp2)s(\Delta BDp5)}}{R_{\Delta AB} + R_{(\Delta ADp2)s(\Delta BDp5)}} = \frac{3\ \Omega \cdot 1{,}5\ \Omega}{3\ \Omega + 1{,}5\ \Omega} = 1\ \Omega$$



Hots, 1 Ω-eko erresistentzia batzuk modu arras konplexu batean konektatu arren, kanpotik begiratuta elkarketa horrek 1 Ω-eko erresistentzia soil bat bailitzen jokatzen du!

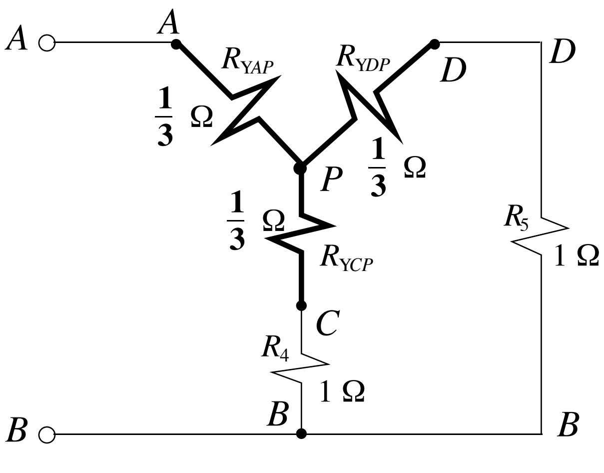
Saia gaitezen orain lehen aipatu dugun beste bideari jarraitzen: hots, har dezagun aintzat R_1, R_2 eta R_3 erresistentziek osatutako triangelu-elkarketa. Badakigu triangelu-elkarketa hori izar-elkarketa baliokide batez ordezka daitekeela triangeluaren hiru erpinen artean (kasu honetan *A*, *C* eta *D*); eta izarraren erdiko puntua berria izango da.

Izarra osatuko duten hiru erresistentzien balioak honako hauek izango dira, testuan ikusitako formulak aplikatuz. Triangelua osatzen duten hiru erresistentziak berdinak direnez gero, izarra osatuko dutenak ere berdinak izango dira:



$$R_{YAP} = R_{YCP} = R_{YDP} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{1\ \Omega \cdot 1\ \Omega}{1\ \Omega + 1\ \Omega + 1\ \Omega} = \frac{1}{3}\ \Omega$$

Hiru erresistentzia berri horiek sartuz gero, agerikoa da lehen zeuden izar- eta triangelu--elkarketak, biak desagertu direla. Eta horien ordez izar-elkarketa berria agertu da, eta baita lehen ez zegoen *P* konexio-puntu berria ere. Erresistentzia guztiak lotuz, honako elkarketa baliokide hau lortuko dugu:



Eta elkarketa berri horri dagokion taula berria honako hau da:

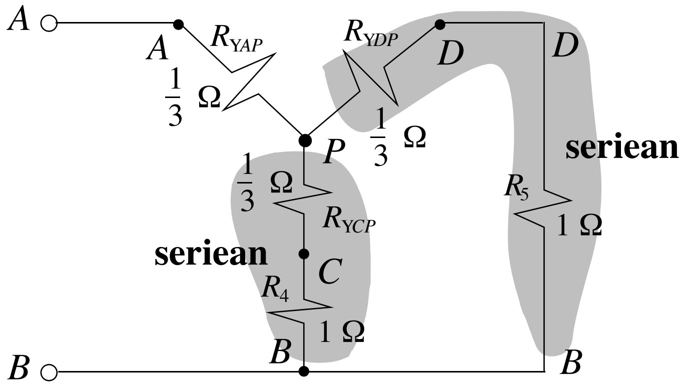
	A	B	C	D	P
R_{YAP}	✓				✓
R_{YCP}			✓		✓
R_{YDP}				✓	✓
R_4		✓	✓		
R_5		✓		✓	
Kanpoko konexio-puntuak	✓	✓			

Taula horretan agerikoa da R_{YCP} eta R_4 seriean daudela, eta baita R_{YDP} eta R_5 ere:

R_{YCP} eta R_4 **seriean** *P-C-B*

	A	B	C	D	P
R_{YAP}	✓		**libre**	**libre**	✓
R_{YCP}			✓		✓
R_{YDP}			**libre**	✓	✓
R_4		✓	✓	**libre**	
R_5		✓	**libre**	✓	
Kanpoko konexio-puntuak	✓	✓		**libre**	

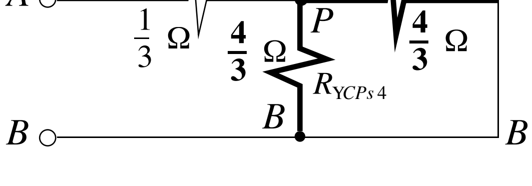
R_{YDP} eta R_5 **seriean** *P-D-B*



Bi serie-elkarketa horien erresistentzia baliokideak honako hauek dira:

$$R_{YCPs4} = \frac{4}{3}\ \Omega \text{ eta } R_{YDPs5} = \frac{4}{3}\ \Omega$$

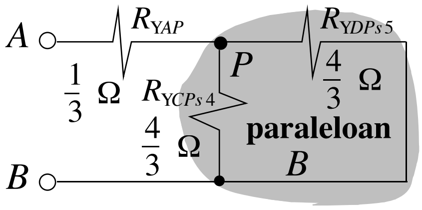
Biak ordezkatuz, honako elkarketa berri hau lortzen da:



Eta elkarketa berri horri dagokion taula berria honako hau da:

	A	B	P
R_{YAP}	✓		✓
R_{YCPs4}		✓	✓
R_{YDPs5}		✓	✓
Kanpoko konexio-puntuak	✓	✓	

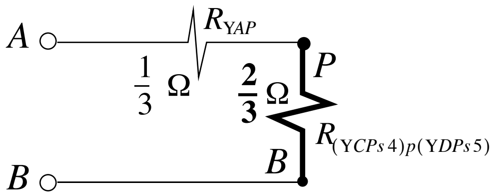
Bai irudian bai taulan, agerikoa da R_{YCPs4} eta R_{YDPs5} paraleloan daudela:



R_{YCPs4} eta R_{YDPs5} **paraleloan** B-P

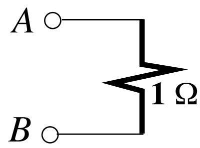
	A	B	P
R_{YAP}	✓		✓
R_{YCPs4}		✓	✓
R_{YDPs5}		✓	✓
Kanpoko konexio-puntuak	✓	✓	

Paralelo-elkarketa horren erresistentzia baliokidea ondokoa da: $R_{(YCPs4)p(YDPs5)} = \frac{2}{3}\ \Omega$, P eta B puntuen artean konektatuta.



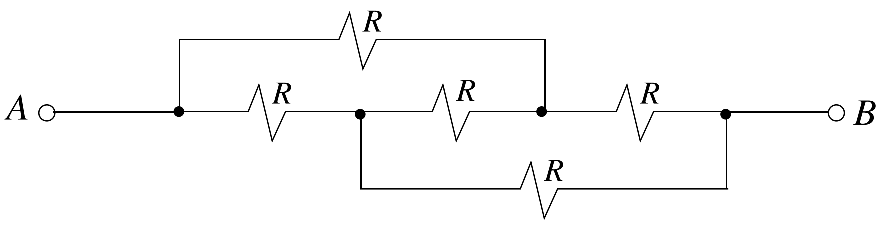
Orain, agerikoa da bi erresistentzia horiek seriean daudela, A eta B puntuen artean:

$$R_{AB} = R_{YAP} + R_{(YCPs4)p(YDPs5)} = \frac{1}{3}\ \Omega + \frac{2}{3}\ \Omega = 1\ \Omega$$



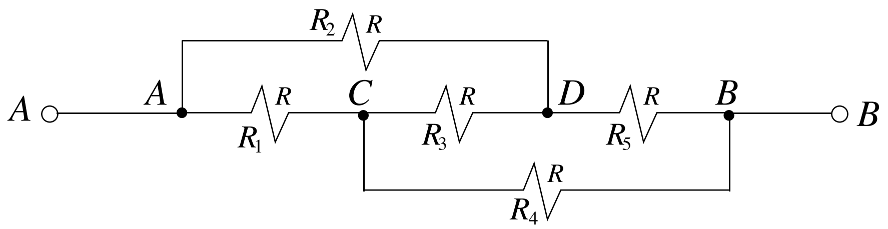
Hots, espero genuen legez, lehen lortu dugun emaitza bera lortu dugu.

4. Kalkula ezazu irudiko erresistentzia-elkarketaren erresistentzia baliokidea, A eta B puntuen artean:



Ebazpena:

Lehenik eta behin, etiketa jarriko diegu erresistentzien arteko konexio-puntuei eta erresistentziei:



Ondorioz, honako konexio-taula hau izango dugu:

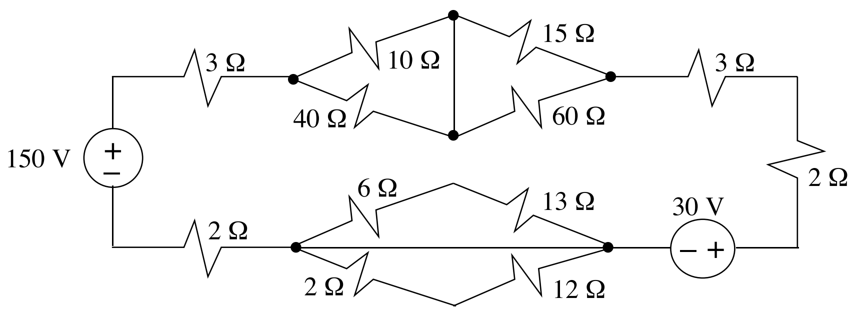
	A	B	C	D
R_1	✓		✓	
R_2	✓			✓
R_3			✓	✓
R_4		✓	✓	
R_5		✓		✓
Kanpoko konexio-puntuak	✓	✓		

Aurreko ariketako zirkuituari dagokion taularekin alderatuz gero, segituan ohartuko gara guztiz berdinak direla!, hots, irudiak desberdinak izan arren, zirkuitu edo erresistentzia--elkarketa bera dugu esku artean, 1 Ω-eko erresistentzien ordez *R* balioa duten erresistentziak izanik. Hori dela eta, lehengo emaitza bera lortuko dugu izar- edo triangelu--elkarketak ordezkatuz.

$$\boxed{R_{AB} = R}$$

Ariketa honen ondorioa hauxe da: irudiak askotan ez digu behar adina informaziorik ematen erresistentzia-elkarketak sinplifikatzeko. Izan ere, batzuetan oinarrizko elkarketak agerian utzi beharrean, irudiak izkutatu egiten ditu; eta orduan beharrezkoa izaten da konexio-taula bezalako metodoren bat, elkarketa soil horiek bilatu ahal izateko.

5. Analiza ezazu irudiko zirkuitua.

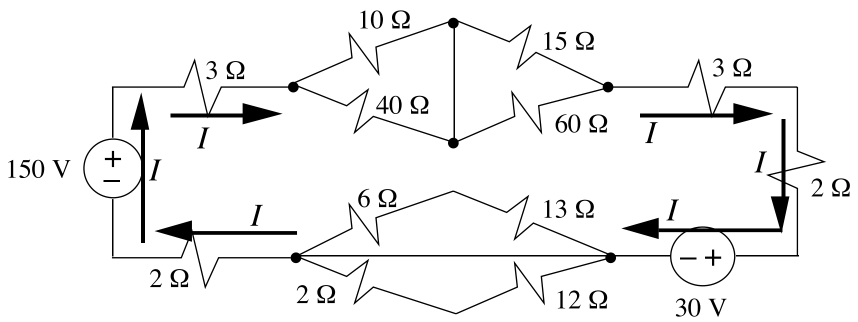


Ebazpena:

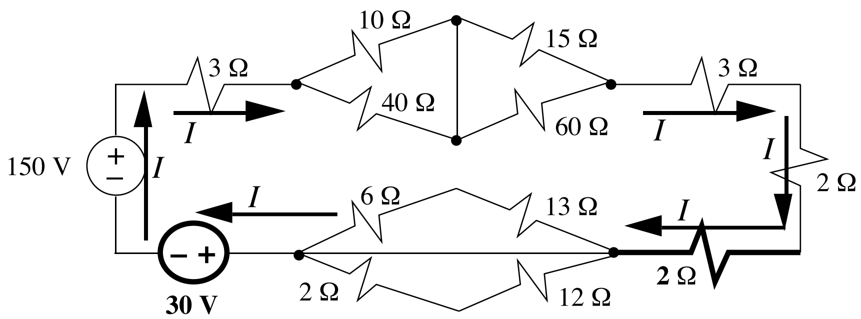
Zirkuitu hori modu askotan analiza daitekeen arren, atal honetan elementuen elkarketak (serie- eta paralelo-elkarketak; eta bestelakoak ere: izar- eta triangelu-elkarketak) eta horien aplikazioak (tentsio- eta korronte-zatitzaileak) aztertzen ari garenez gero, modu horretan analizatuko dugu zirkuitua. Hots, lehenik, elementuen elkarketen baliokideak bilatuko ditugu, zirkuitua sinplifikatzeko; eta ondoren, kalkuluak egingo ditugu, elementu guztien korronteak eta tentsioak bilatzeko.

Analizatu behar dugun zirkuituan bi motatako elementuak baino ez daude: tentsio-sorgailuak eta erresistentziak. Elementuen arteko elkarketak bilatzerakoan, elementu-mota bakoitza bere aldetik kontsideratu behar dugu.

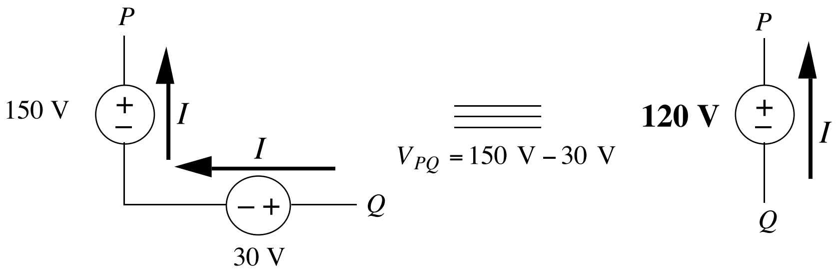
Zirkuituaren irudiari erreparatuz gero, agerikoa da bi tentsio-sorgailuak seriean daudela, bietatik korronte bera, *I*, igarotzen baita.



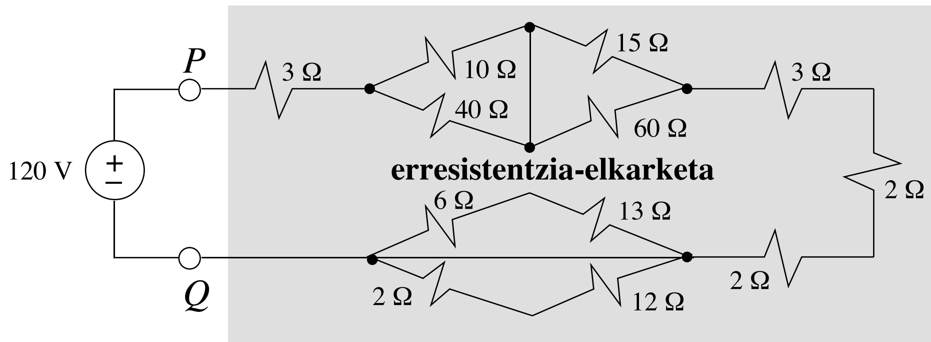
Korrontearen bidean, tentsio-sorgailuez gain, erresistentzia batzuk ere badaude, hots, erresistentzia horiek ere seriean daude tentsio-sorgailuekin eta beren artean; baina elkarketak sinplifikatzeko, dagoeneko esan dugu elementu-mota bakoitza bere aldetik elkartu behar dela, eta, horrexegatik, erresistentzien elkarketak geroko utziko ditugu. Dena den, irakurleak oso garbi izan behar du zirkutuko elementuen kokapenak ez duela eraginik portaera elektrikoaren gainean; hots, elementuen ordena aldatu egin daiteke zirkuitua aldatu barik. Esate baterako, beheko ezkerreko 2 Ω-eko erresistentzia eta 30 V-eko tentsio-sorgailuaren posizioak trukatuz gero:



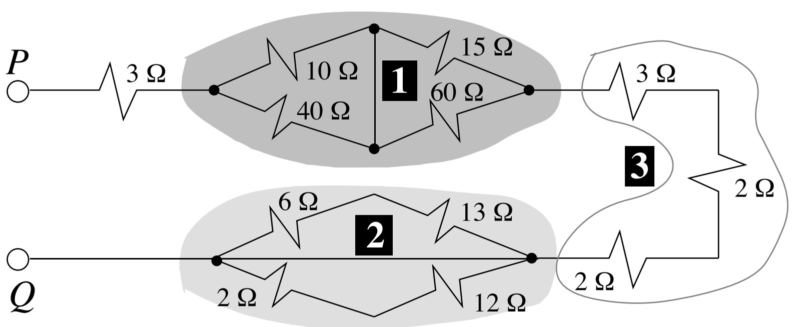
Horren ondorioz, bi tentsio-sorgailuak tentsio-sorgailu baliokide bakar batez ordezka ditzakegu, sorgailu baliokidearen balioa besteen batura edo kendura izanik, zeinuen arabera. Kasu honetan, korrontearen noranzkoa kontrakoa da bi tentsio-sorgailuetan: batean, korrontea negatibotik positibora doa, eta bestean alderantziz, positibotik negatibora (hori horrela da edozein izanda ere korrontearen benetako noranzkoa, irudian arbitrarioki jarri duguna edo kontrakoa). Hori dela eta, tentsio-sorgailu baliokidearen balioa beste bien kendura izango da:



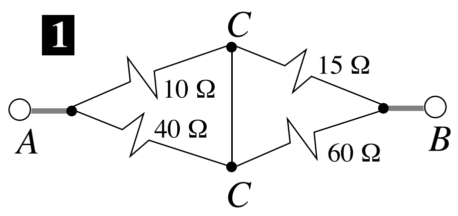
Zirkuitu baliokidea honako hau izango da:



Orain erresistentzia-elkarketa sinplifikatzeari ekin diezaiokegu. Hamabi erresistentzia daudenez gero, konexio-taula idaztea nekeza eta aspergarria izan daiteke. Horrexegatik, lehendabizi irudian bertan elkarketa sinpleak antzematen saiatuko gara. Hona hemen begi-bistan agerikoak diren hiru multzo:



1 eta 2 multzoetan, launa erresistentzia daude eta 3 multzoan, berriz, beste guztiak, seriean. Azter ditzagun multzo horiek banan-banan.



	A	*B*	*C*
10 Ω	✓		✓
40 Ω	✓		✓
15 Ω		✓	✓
60 Ω		✓	✓
Konexio-puntuak	✓	✓	

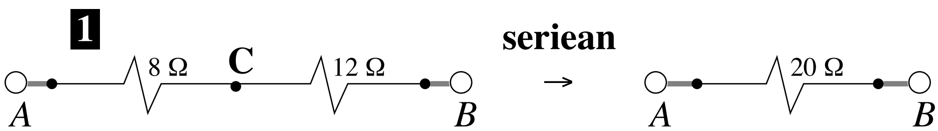
Aurreko irudian agerikoa da 1 multzoan hiru konexio-puntu daudela: *A*, *B* eta *C*, elkarketa hori besteekin konektatzeko erabilitako kanpoko konexio-puntuak *A* eta *B* izanik. Taulak, bere aldetik, agerian uzten du agian irudian hain begi-bistakoa ez dena, hots, erresistentzia horiek paraleloan daudela binaka:

paraleloan *A-C*

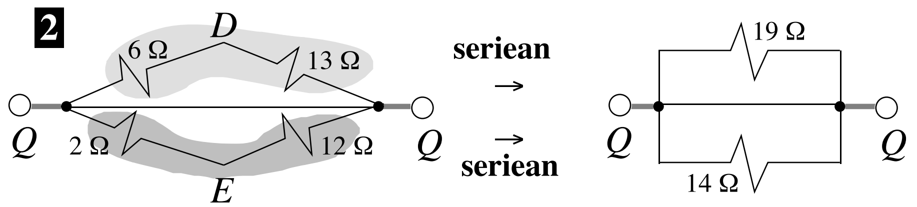
	A	*B*	*C*
10 Ω	✓		✓
40 Ω	✓		✓
15 Ω		✓	✓
60 Ω		✓	✓
Konexio-puntuak	✓	✓	

paraleloan *B-C*

Baliokideak: $R_{AC} = \dfrac{10\ \Omega \cdot 40\ \Omega}{10\ \Omega + 40\ \Omega} = 8\ \Omega$ eta $R_{BC} = \dfrac{15\ \Omega \cdot 60\ \Omega}{15\ \Omega + 60\ \Omega} = 12\ \Omega$

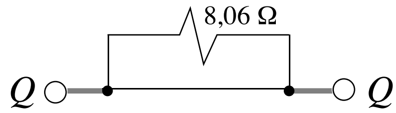


2 izeneko multzoan ere, lau erresistentzia eta hiru konexio-puntu daude: *Q*, *D* eta *E*. Baina oraingo honetan, erdiko marrak zirkuitulaburra egiten du ezkerreko eta eskuineko muturren artean (*Q* puntua), elkarketa kanpoko munduarekin konektatzeko erabilitako kanpoko konexio-puntuak horiek izanik hain zuzen ere, ondoko irudian ikus daitekeen legez. Hori dela eta, lau erresistentzia horien baliokidea zirkuitulaburra da. Ikus dezagun zergatik. Lehenik, goiko eta beheko erresistentzien serie-elkarketak ordezkatuko ditugu:

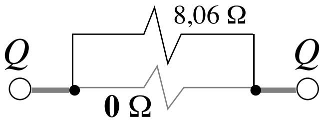


Ondoren, goiko eta beheko erresistentzien paralelo-elkarketa ordezkatuko dugu:

$$R_{QQ}^{I} = \frac{14\ \Omega \cdot 19\ \Omega}{14\ \Omega + 19\ \Omega} = 8{,}06\ \Omega$$



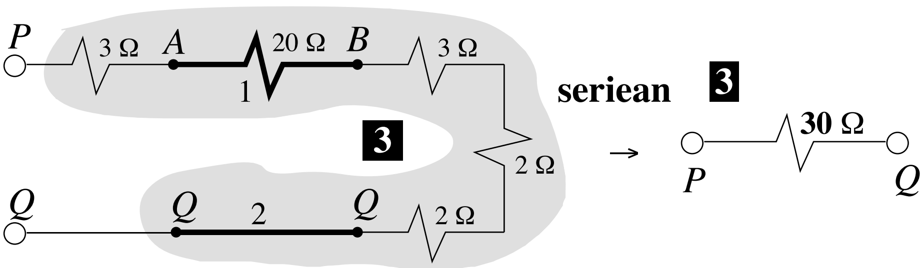
Bukatzeko, gogoratu behar dugu 2. gaian (26. orrialdean) ikusitakoa: zirkuitulaburra erresistentzia linealen kasu berezi bat besterik ez dela, R = 0 Ω-ekoa hain zuzen. Hori dela eta, azken elkarketan bi erresistentzien paralelo-elkarketa kalkulatzen badugu:



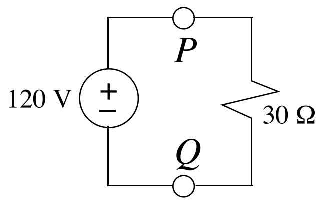
$$R_{QQ}^{II} = \frac{0\ \Omega \cdot 8{,}06\ \Omega}{0\ \Omega + 8{,}06\ \Omega} = 0\ \Omega \quad \rightarrow \text{zirkuitulaburra}$$

Zirkuitulaburraren eraginez, berarekin paraleloan dauden erresistentzietatik ez da korronterik igarotzen, horien muturren arteko tentsioa zero baita.

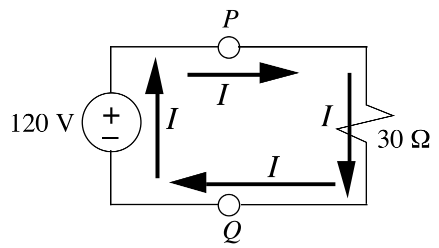
Orain elkarketa osoan 1 eta 2 multzoen baliokideak ordezkatzen baditugu, ondoko baliokidea izango dugu. Bertan, agerikoa da erresistentzia horiek guztiak seriean daudela; ondorioz, horien baliokidea denen batura izango da:



Erresistentzia baliokide hori jatorrizko zirkuituan ordezkatzen badugu, honako zirkuitu sinple hau lortuko dugu:

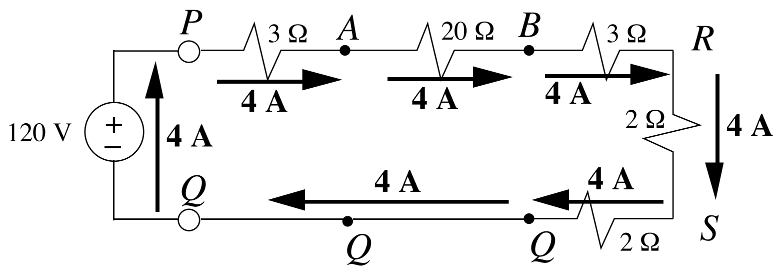


Zirkuitu horretatik igarotzen den korrontea kalkulatzea berehalakoa da, hain baita sinplea zirkuitua: KTL eta Ohm-en legea baino ez dira aplikatu behar:



$$\boxed{I = \frac{120\ \text{V}}{30\ \Omega} = 4\ \text{A}}$$

Eta I korronte hori da, hain zuzen ere, seriean konektaturiko elementu guztietatik igarotzen den korrontea.



Orain, erresistentzien muturren arteko tentsioak kalkulatzeko, Ohm-en legea aplika dezakegu zuzenean; edota, bestela, tentsio-zatitzailearen formula (ikus 70. orrialdea):

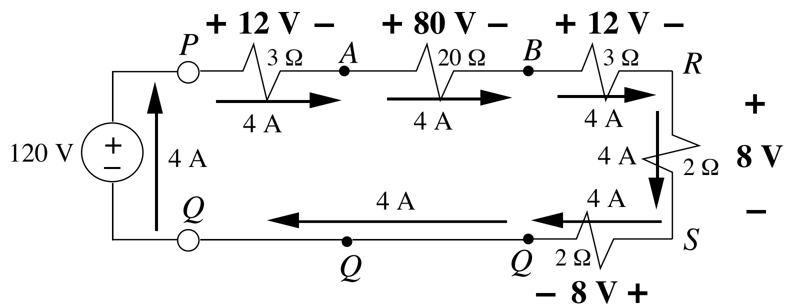
$$V_{R_i} = \frac{R_i}{R_{bs}} \cdot V_{osoa}$$

non R_{bs} serie-elkarketaren erresistentzia baliokidea eta V_{osoa} serie-elkarketari ezarritako tentsioa diren.

Hemen, azken hori da egingo duguna, praktikatzeko asmoz; eta gero, Ohm-en legearen bitartez lortutako tentsioak egiaztapen gisa erabiliko ditugu.

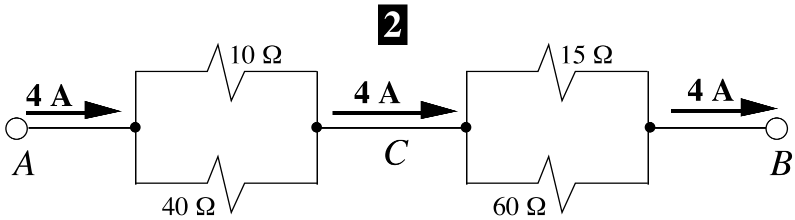
$$V_{PA} = \frac{3\ \Omega}{30\ \Omega} \cdot 120\ \text{V} = 12\ \text{V},\ V_{AB} = \frac{20\ \Omega}{30\ \Omega} \cdot 120\ \text{V} = 80\ \text{V},\ V_{BR} = \frac{3\ \Omega}{30\ \Omega} \cdot 120\ \text{V} = 12\ \text{V},$$

$$V_{RS} = \frac{2\ \Omega}{30\ \Omega} \cdot 120\ \text{V} = 8\ \text{V},\ V_{SQ} = \frac{2\ \Omega}{30\ \Omega} \cdot 120\ \text{V} = 8\ \text{V}$$



Gogoan izan behar dugu 20 Ω-eko erresistentzia paralelo-elkarketa biren serie-baliokidea dela (2 multzoa). Paralelo-elkarketa horiek osatzen dituzten erresistentzietatik igarotzen diren korronteak kalkulatzeko, korronte-zatitzailearen formulak erabiliko ditugu (ikus 71. orrialdea):

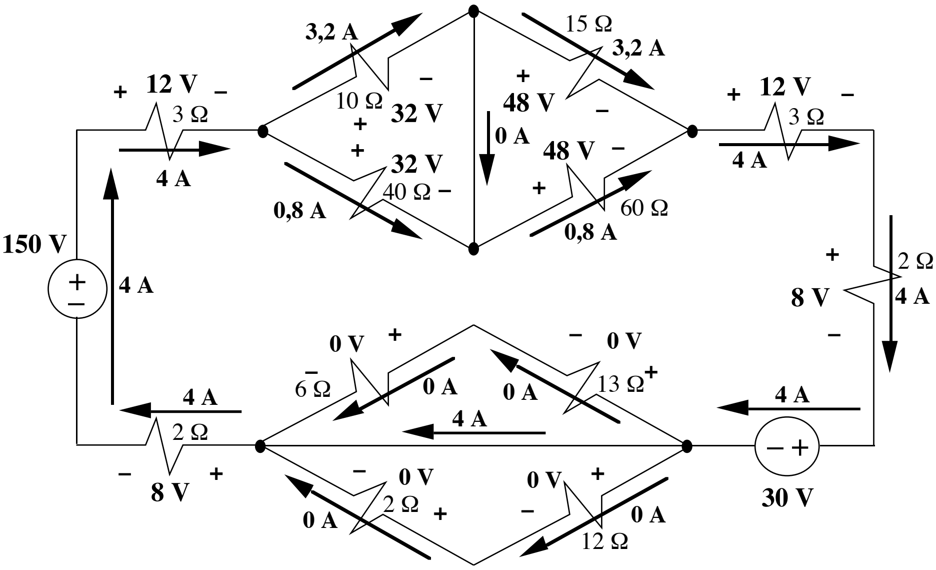
$$I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot I_{osoa} \qquad \text{eta} \qquad I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot I_{osoa}$$



$$I_{10\Omega} = \frac{40\ \Omega}{10\ \Omega + 40\ \Omega} \cdot 4\ \text{A} = 3{,}2\ \text{A}, \quad I_{15\Omega} = \frac{60\ \Omega}{15\ \Omega + 60\ \Omega} \cdot 4\ \text{A} = 3{,}2\ \text{A}$$

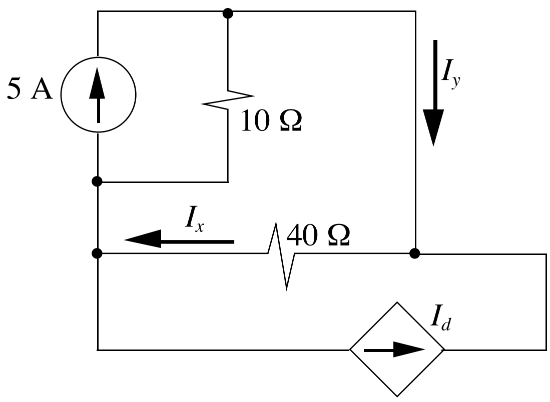
$$I_{40\Omega} = \frac{10\ \Omega}{10\ \Omega + 40\ \Omega} \cdot 4\ \text{A} = 0{,}8\ \text{A}, \quad I_{60\Omega} = \frac{15\ \Omega}{15\ \Omega + 60\ \Omega} \cdot 4\ \text{A} = 0{,}8\ \text{A}$$

Beraz, dagoeneko, jatorrizko zirkuituaren analisia egin dugu, soluzioa lortu baitugu, hots, elementu guztien korronteak eta tentsioak:



Beti bezala, irakurleak potentzien balantzea egin dezake soluzioa egiaztatzeko.

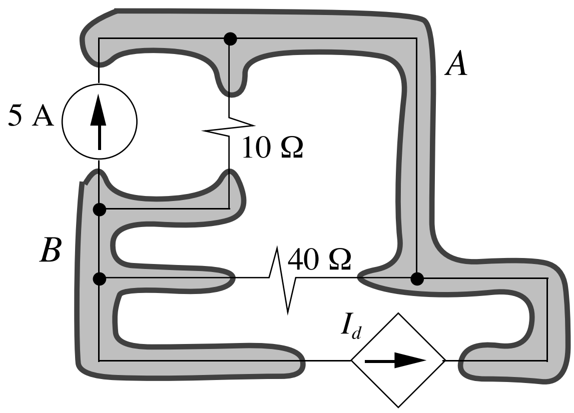
6. Kalkula ezazu irudiko zirkuituko 10 Ω-eko erresistentziatik igarotzen den korrontea eta 40 Ω-eko erresistentziaren muturren arteko tentsioa, korronte-zatitzailearen eta tentsio-zatitzailearen formulak erabiliz, honako bi kasuetan: a) Korronte-sorgailu menpekoaren balioa $I_d = 0{,}8 I_x$ denean, eta b) $I_d = 0{,}8 I_y$ denean.



Ebazpena:

Aurreko ariketa batean bezalaxe, oraingo honetan ere irudiak ez ditu agerian uzten elementuen arteko elkarketa soilak. Hori dela eta, zirkuitua berriro marraztea edo konexio--taula egitea komeni zaigu.

Horretarako, lehendabizi zirkuituko korapiloak eta konexio-puntuak bilatu behar ditugu. Kasu honetan, bi korapilo baino ez daude, *A* eta *B*:



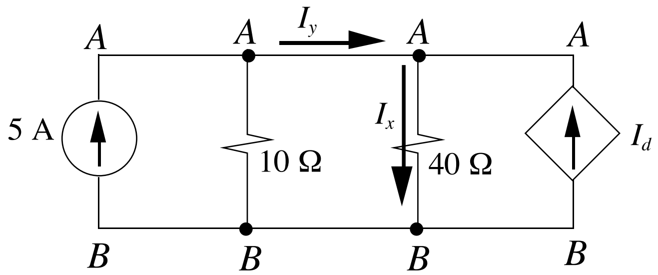
Hori dela eta, ondoko irudiko moduan ere marraz dezakegu zirkuitua, honako xehetasunak kontuan hartuz:

1) 5 A-ko korronte-sorgailua *A* eta *B* puntuen artean dago konektatuta, gezia *B*-tik *A*-rantz zuzenduta dagoela.

2) 10 Ω-eko eta 40 Ω-eko erresistentziak ere *A* eta *B* puntuen artean daude. Jatorrizko zirkuituan, I_x korrontea 40 Ω-eko erresistentziatik igarotzen da, eskuinetik ezkerrera, hots, *A* puntutik *B* puntura.

3) Korronte-sorgailu menpekoa ere *A* eta *B* puntuen artean dago konektatuta, eta korrontearen gezia *B*-tik *A*-ra zuzenduta dago.

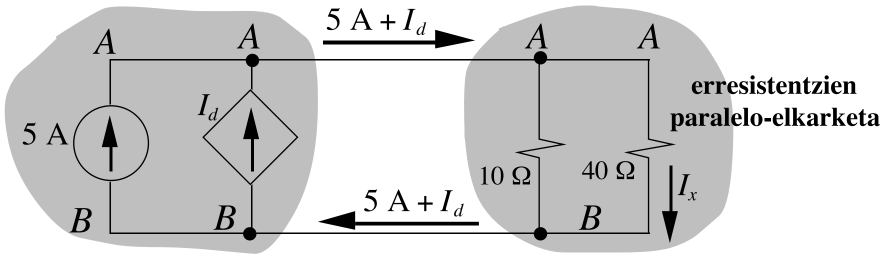
4) Jatorrizko zirkuituan, I_y korrontea *A* korapiloan dago, 5 A-ko korronte-sorgailuak eta 10 Ω-eko erresistentziak osatutako multzotik kanpora zuzenduta.



Orain bai, agerikoak dira elkarketa soilak, begi-bistakoa baita zirkuitua osatzen duten elementu guztiak paraleloan daudela *A* eta *B* puntuen artean. (Irakurleak garbi izan beharko luke ondorio bera lortuko genukeela konexio-taula erabiliz gero.)

Ondorioz, erresistentzietatik igarotzen diren korronteak kalkulatzeko korronte-zatitzailearen formulak erabil ditzakegu batere arazorik gabe, erresistentziak paraleloan baitaude. Gogoratu behar dugu ezen, korronte-zatitzailearen formuletan, erresistentzien paralelo--elkarketara iristen den korronte osoak ezaguna izan behar duela. Kasu honetan, zirkuituan lau elementu besterik ez dagoenez gero, bi erresistentzietara iritsiko den korronte osoa beste bi elementuetatik etorriko da, hots: $I_{osoa} = 5\text{ A} + I_d$.

Hori agerian uzteko asmoz, elementuen kokapena alda dezakegu, korronte-sorgailuak alde batera eta erresistentziak beste aldera mugituz:



Orain bi erresistentzietatik igarotzen diren korronteak kalkula ditzakegu:

$$I_{40\,\Omega} = I_x = \frac{10\ \Omega}{10\ \Omega + 40\ \Omega} \cdot \left(5 + I_d\right), \qquad I_{10\,\Omega} = \frac{40\ \Omega}{10\ \Omega + 40\ \Omega} \cdot \left(5 + I_d\right)$$

Ikus ditzagun orain aztertu beharreko bi kasuak:

a) $I_d = 0{,}8 I_x \quad \rightarrow \quad I_{40\Omega} = I_x = \dfrac{10\ \Omega}{10\ \Omega + 40\ \Omega} \cdot \left(5 + 0{,}8 I_x\right) \quad \rightarrow$

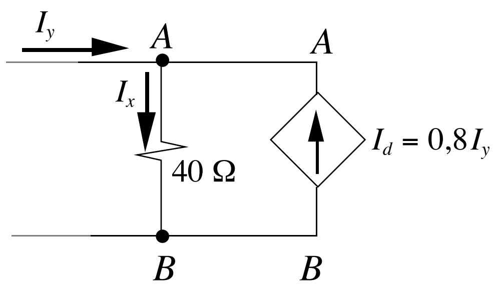
$5 I_x = 5 + 0{,}8 I_x \quad \rightarrow \quad I_x = \dfrac{5}{4{,}2}\ \text{A} \quad \rightarrow \quad I_x = 1{,}19\ \text{A}$

$\rightarrow \quad I_d = 0{,}95\ \text{A} \quad \rightarrow \quad \boxed{I_{10\Omega} = 4{,}76\ \text{A}}$

40 Ω-eko erresistentziaren muturren arteko tentsioa Ohm-en legea aplikatuz kalkulatuko dugu:

$V_{40\Omega} = 40\ \Omega \cdot I_{40\Omega} = V_{10\Omega} = 10\ \Omega \cdot I_{10\Omega} \quad \rightarrow \quad \boxed{V_{40\Omega} = 47{,}6\ \text{V}}$

b) $I_d = 0{,}8 I_y \rightarrow$ *A* korapiloaren eskuineko zatian KKL aplikatuz:



KKL: $I_x = I_y + I_d = I_y + 0{,}8 I_y = 1{,}8 I_y \quad \rightarrow$

$I_{40\Omega} = I_x = \dfrac{10\ \Omega}{10\ \Omega + 40\ \Omega} \cdot \left(5 + 0{,}8 I_y\right) = 1{,}8 I_y \quad \rightarrow \quad 5 + 0{,}8 I_y = 9 I_y$

$\rightarrow \quad I_y = 0{,}61\ \text{A} \quad \rightarrow \quad I_x = 1{,}1\ \text{A} \quad \rightarrow \quad I_d = 0{,}49\ \text{A} \quad \rightarrow$

$\boxed{I_{10\Omega} = 4{,}39\ \text{A}}$

40 Ω-eko erresistentziaren muturren arteko tentsioa Ohm-en legea aplikatuz kalkulatuko dugu:

$V_{40\Omega} = 40\ \Omega \cdot I_{40\Omega} = V_{10\Omega} = 10\ \Omega \cdot I_{10\Omega} \quad \rightarrow \quad \boxed{V_{40\Omega} = 43{,}9\ \text{V}}$

3.4. Tentsio- eta korronte-neurketak: voltmetroa eta anperemetroa

1. Voltmetroa tentsioak neurtzeko tresna da. Neurtu nahi den tentsioarekin paraleloan konektatzen da; hots, bi punturen arteko potentzial-diferentzia neurtu behar duenez gero, bi puntu horien artean konektatzen da voltmetroa.

Voltmetro baten *ezaugarria* zenbaki bat da, Ω/V-etan eman ohi dena.

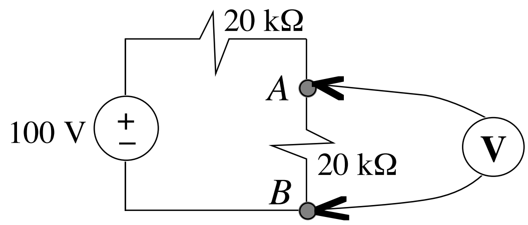
Voltmetro baten *irismena*, voltmetroak neur dezakeen tentsiorik handienaren balioa da. Bi balio horietan oinarriturik, voltmetro erreal baten barne-erresistentzia kalkula daiteke, honelaxe:

$$R_V = \text{ezaugarria} \cdot \text{irismena}$$

Adibidez: ezaugarria = 20000 Ω/V, irismena = 100 V → R_V = 2 MΩ

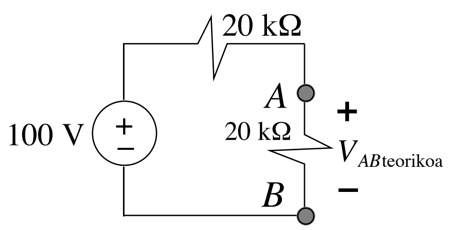
Voltmetroaren ezaugarria infinitua balitz ($R_V = \infty$), voltmetroa ideala izango litzateke, eta zirkuitu ireki gisa jokatuko luke.

Hori guztia kontuan hartuz, kalkula ezazu V_{AB} tentsioa ondoko irudiko zirkuituan honako kasu hauetan: **a)** voltmetrorik gabe; **b)** voltmetroa ideala balitz; **c)** voltmetroaren ezaugarria 100 Ω/V eta irismena 100 V badira; **d)** voltmetroaren ezaugarria 1000 Ω/V eta irismena 100 V badira.



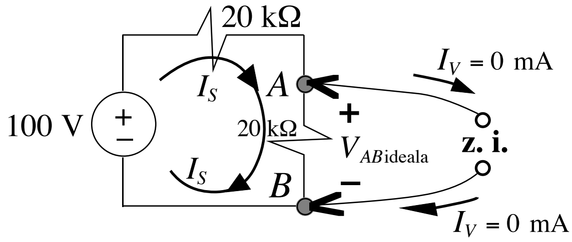
Ebazpena:

a) Zirkuituan voltmetrorik ez badago, berehalakoa da V_{AB} potentzial-diferentzia kalkulatzea tentsio-zatitzailearen formula erabiliz, erresistentzien serie-elkarketa bat eta tentsio-sorgailu bat baino ez baitaude zirkuituan. Izan ere:



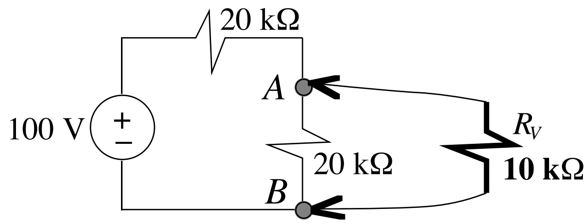
$$V_{AB\text{teorikoa}} = \frac{R_i}{R_{bs}} \cdot V_S = \frac{20\ \text{k}\Omega}{20\ \text{k}\Omega + 20\ \text{k}\Omega} \cdot 100\ \text{V} \quad \rightarrow \quad \boxed{V_{AB\text{teorikoa}} = 50\ \text{V}}$$

b) Zirkuituan konektatzen den voltmetroa ideala baldin bada, aurreko ataleko zirkuitu bera aztertu beharko da, voltmetroaren ordez zirkuitu irekia ipini behar baita; ondorioz, bi erresistentzietatik korronte bera igaroko da, serie-elkarketan bezalaxe:



$$\rightarrow \quad \boxed{V_{AB\text{ideala}} = 50\ \text{V}}$$

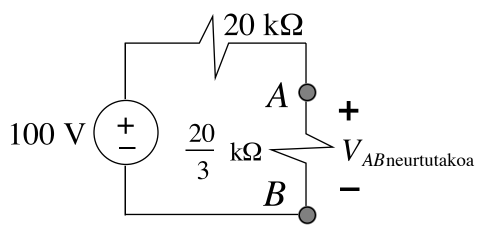
c) Voltmetroaren ezaugarria 100 Ω/V eta irismena 100 V izanik, voltmetroaren barne-erresistentzia $R_V = 100 \cdot 100 = 10.000\ \Omega = 10\ \text{k}\Omega$ izango da. Hori dela eta, aztertu beharreko zirkuitua ondoko irudikoa izango da:



Tentsio-zatitzailearen formula erabili ahal izateko, lehendabizi behe aldeko paralelo-elkarketaren baliokidea kalkulatu behar da:

$$R_{bp} = \frac{10\ \text{k}\Omega \cdot 20\ \text{k}\Omega}{10\ \text{k}\Omega + 20\ \text{k}\Omega} = \frac{20}{3}\ \text{k}\Omega$$

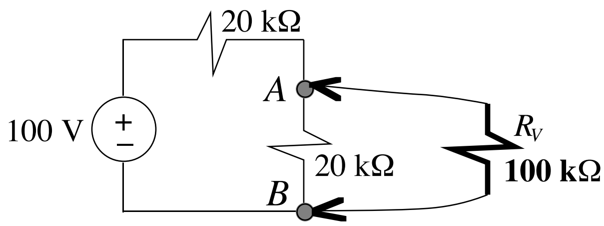
Eta paralelo-elkarketa hori ordezkatu ondoren geratzen den zirkuitu baliokidea, tentsio-zatitzailea da:



$$V_{AB\text{neurtutakoa}} = \frac{R_i}{R_{bs}} \cdot V_S = \frac{\frac{20}{3}\ \text{k}\Omega}{\frac{20}{3}\ \text{k}\Omega + 20\ \text{k}\Omega} \cdot 100\ \text{V} \quad \rightarrow \quad \boxed{V_{AB\text{neurtutakoa}} = 25\ \text{V}}$$

Agerikoa da neurtutako tentsioa eta teorikoa oso desberdinak direla; errore absolutua 25 V-ekoa da eta erlatiboa %50-ekoa!, hori onartezina izanik. Teorian aipatu genuenaren arabera, arrazoia agerikoa da: voltmetroaren erresistentzia txikiegia da, zirkuituan daudenak baino txikiagoa hain zuzen ere; eta horrek errore handiak sortzen ditu neurketetan.

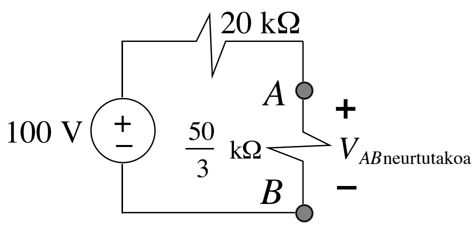
d) Voltmetroaren ezaugarria 1000 Ω/V eta irismena 100 V izanik, voltmetroaren barne-erresistentzia $R_V = 1000 \cdot 100 = 100.000\ \Omega = 100\ \text{k}\Omega$ izango da. Hori dela eta, aztertu beharreko zirkuitua ondoko irudikoa izango da:



Tentsio-zatitzailearen formula erabili ahal izateko, lehendabizi behe aldeko paralelo-elkarketaren baliokidea kalkulatu behar da:

$$R_{bp} = \frac{100\ \text{k}\Omega \cdot 20\ \text{k}\Omega}{100\ \text{k}\Omega + 20\ \text{k}\Omega} = \frac{50}{3}\ \text{k}\Omega$$

Eta paralelo-elkarketa hori ordezkatu ondoren geratzen den zirkuitu baliokidea, tentsio-zatitzailea da:



$$V_{AB\text{neurtutakoa}} = \frac{R_i}{R_{bs}} \cdot V_S = \frac{\frac{50}{3}\ \text{k}\Omega}{\frac{50}{3}\ \text{k}\Omega + 20\ \text{k}\Omega} \cdot 100\ \text{V} \ \rightarrow$$

$$\boxed{V_{AB\text{neurtutakoa}} = 45,45\ \text{V}}$$

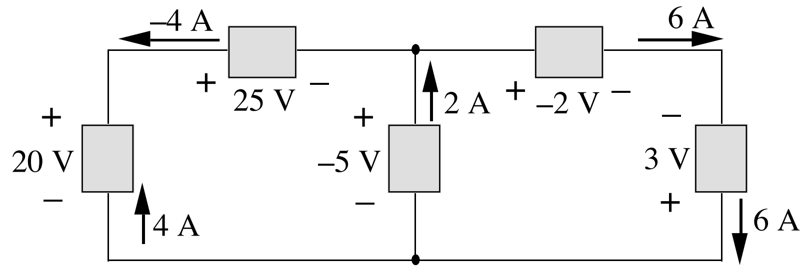
Oraingo honetan errore absolutua 4,55 V-ekoa da eta erlatiboa %9,1-ekoa, aurrekoa baino bost aldiz txikiagoa (gutxi gorabehera). Berriro ere, arrazoia agerikoa da: aurreko kasuarekin alderatuz gero, oraingo honetan voltmetroaren erresistentzia zirkuituan daudenak baino bost aldiz handiagoa da; eta horrek errorea murrizten du zertxobait.

C) Proposaturiko ariketak

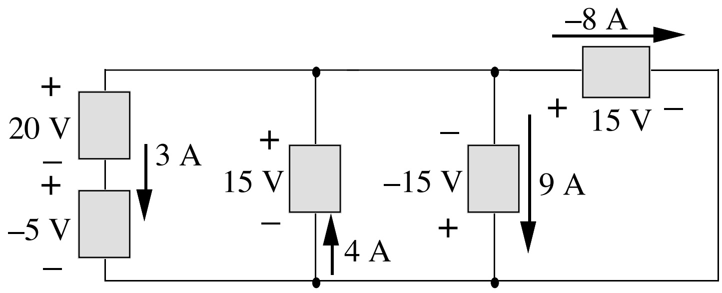
3.1. Kirchhoff-en legeak

1. Egiazta ezazu ondoko zirkuituetan Kirchhoff-en legeak betetzen direla.

a

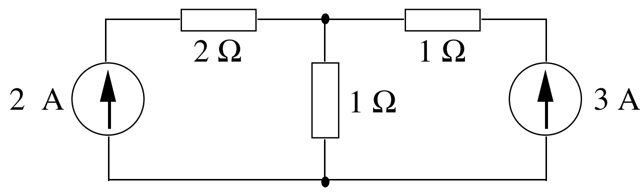


b

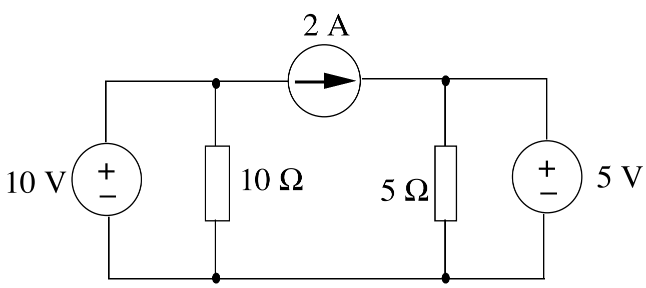


2. Analiza itzazu ondoko irudietako zirkuituak, Kirchhoff-en legeak eta elementuen ekuazioak besterik ez erabiliz. Emaitzak egiaztatzeko, egin ezazu potentzien balantzea.

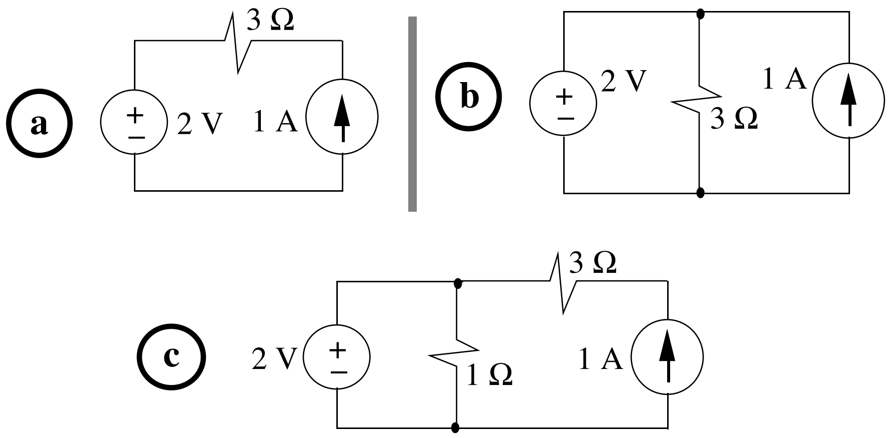
a



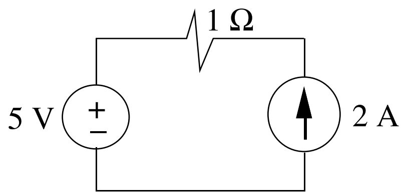
b



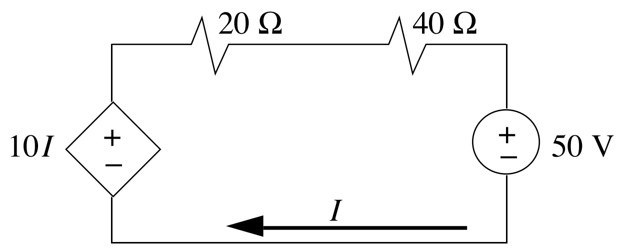
3. Analiza itzazu ondoko irudietako zirkuituak:



4. Irudiko zirkuituan, kalkula ezazu sorgailu bakoitzak ematen duen potentzia.

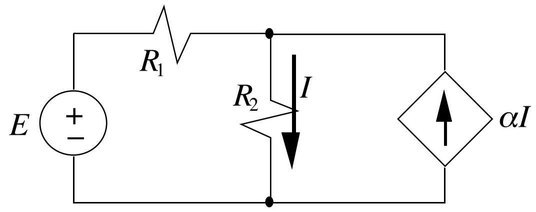


5. Ondoko irudiko zirkuituan, kalkula ezazu I korrontearen intentsitatea, Kirchhoff-en legeak eta elementuen ekuazioak besterik ez erabiliz.

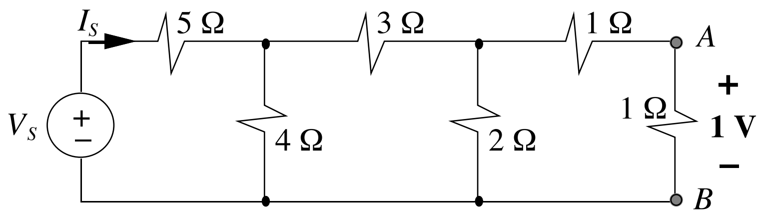


6. Ondoko irudiko zirkuituan, kalkula itzazu R_1 erresistentziatik igarotzen den korrontea eta R_2 erresistentziaren muturren arteko tentsioa, Kirchhoff-en legeak eta elementuen ekuazioak besterik ez erabiliz.

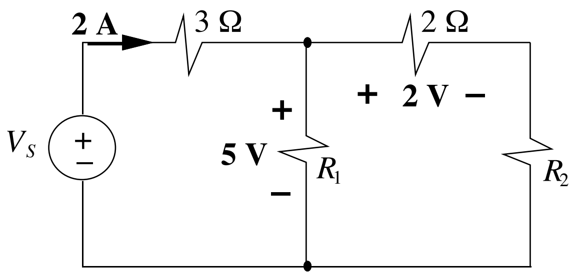
Oharra: Irudian ageri diren parametro guztiak, I korrontea izan ezik, ezagunak dira: E, R_1, R_2 eta α. Beraz, soluzioak parametro horien menpekoak izango dira, eta ez I-ren menpekoak.



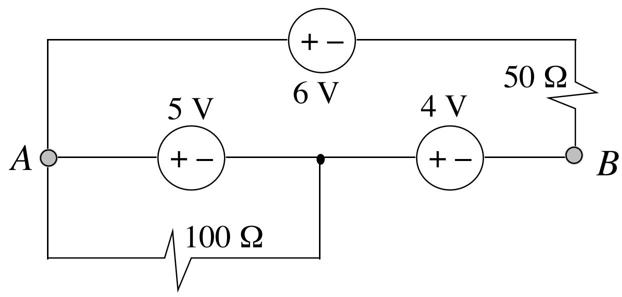
7. Irudiko zirkuituan erresistentzien balioak, korronte batzuen noranzkoak eta A eta B puntuen arteko potentzial-diferentzia ezagunak dira. Kalkula ezazu V_S sorgailuaren tentsioa.



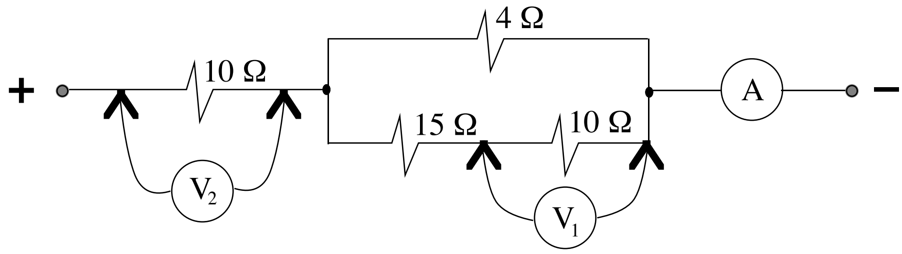
8. Irudian ageri diren datuak erabiliz, aurki itzazu R_1 eta R_2 erresistentzien balioak eta V_S tentsio-sorgailuarena.



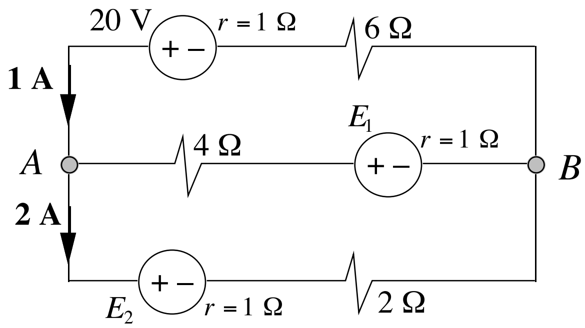
9. Irudiko zirkuituan kalkula itzazu erresistentzia bakoitzetik igarotzen den korrontea eta V_{AB} potentzial-diferentzia.



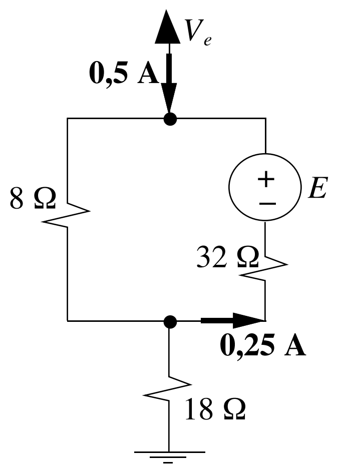
10. Irudiko zirkuituko 4 Ω-ko erresistentzian 24 kaloria xahutzen dira segundoko. Aurki itzazu V_1 eta V_2 voltmetroek eta A anperemetroak neurtuko dituzten balioak.



11. Irudiko zirkuituan kalkulatu E_1, E_2 eta A eta B puntuen arteko potentzial-diferentzia, sorgailu errealak direla eta bakoitzaren barne-erresistentzia ondoan adierazitakoa dela kontuan izanik.

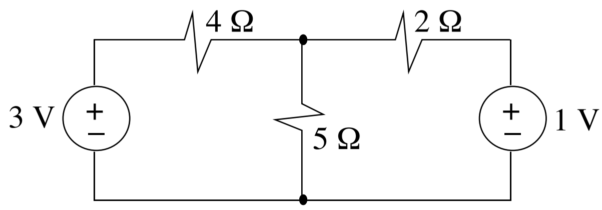


12. Irudiko zirkuituan kalkula itzazu V_e eta E.

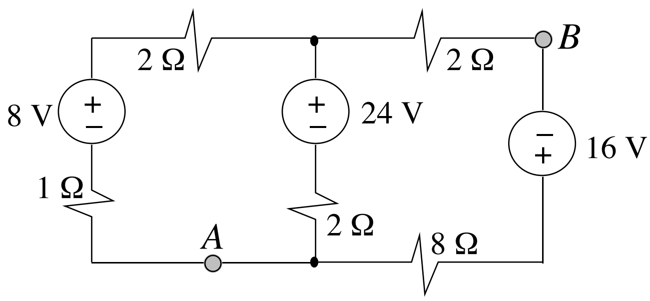


3.2. Zirkuituen ebazpide arrunta

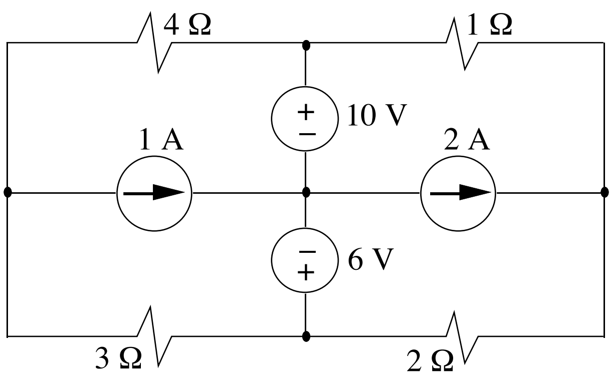
1. Irudiko zirkuituan, kalkula itzazu:
- **a)** Intentsitate guztiak.
- **b)** 3 V-eko sorgailuak hornitzen duen potentzia.
- **c)** Erresistentzietan xahututako potentzia osoa.
- **d)** Egin ezazu potentzien balantze osoa.



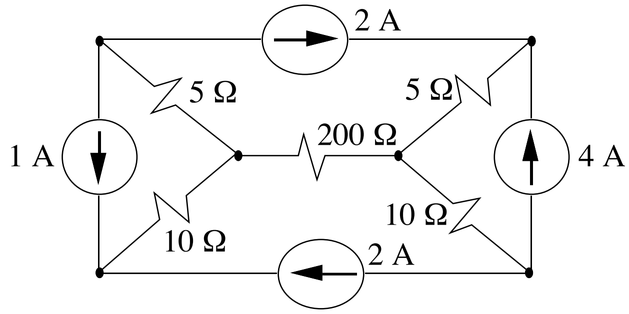
2. Irudiko zirkuituan, kalkula itzazu:
- **a)** Elementu bakoitzeko korrontearen intentsitatea.
- **b)** $V_B - V_A$.



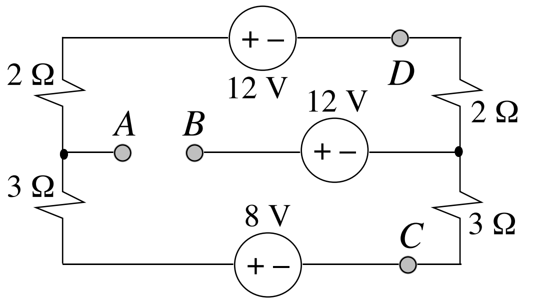
3. Egin ezazu irudiko zirkuituaren analisia; hots, kalkula itzazu elementu guztietako tentsioak eta korronteak.



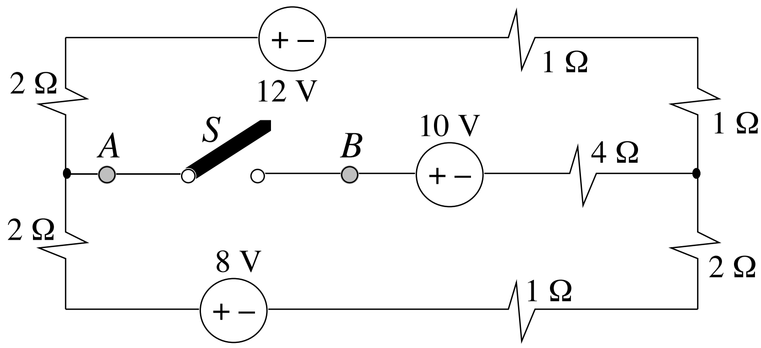
4. Irudiko zirkuituan, kalkula ezazu elementu bakoitzak eman edo hartzen duen potentzia. Egiaztatu emaitzak, potentzien balantzea eginez.



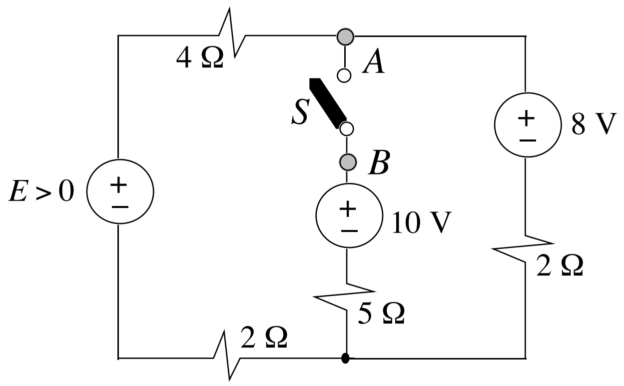
5. Irudiko zirkuituan, kalkula itzazu:
a) *A* eta *B* puntuen arteko potentzial-diferentzia.
b) *A* eta *B* puntuak zirkuitulabur baten bidez konektatzen badira, kalkula itzazu: 8 volteko sorgailutik igarotzen den korrontea, V_{BC} eta V_{AD}.



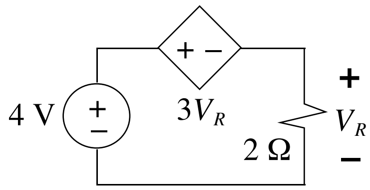
6. Ondoko zirkuituan kalkula itzazu: **a)** *A* eta *B* puntuen arteko potentzial-diferentzia, etengailua irekita dagoenean. **b)** Adar bakoitzeko korrontearen intentsitatea, etengailua ixten denean.



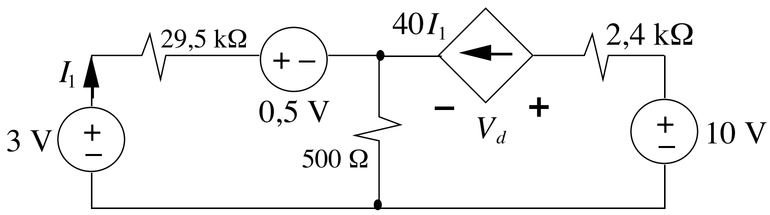
7. Etengailua irekita dagoenean 4 Ω-eko erresistentzian 3,84 kaloria xahutzen dira segundoko. Egoera horretan, zein da *A* eta *B* puntuen arteko potentzial-diferentzia? Etengailua ixten denean, zenbatekoa da 4 Ω-eko erresistentzian xahutzen den potentzia?



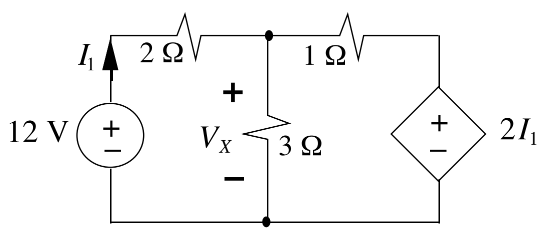
8. Kalkula ezazu V_R irudiko zirkuituan.



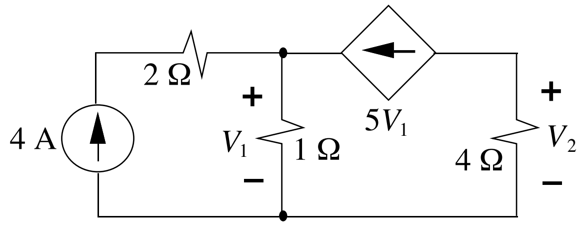
9. Kalkula itzazu V_d eta I_1 irudiko zirkuituan.



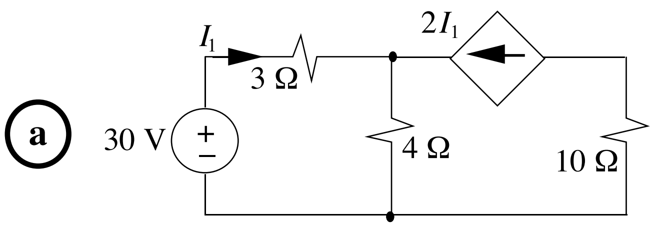
10. Kalkula itzazu V_X eta I_1 irudiko zirkuituan.

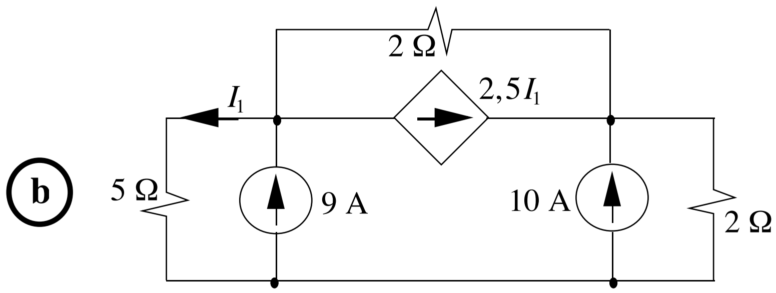


11. Kalkula itzazu V_1 eta V_2 irudiko zirkuituan.

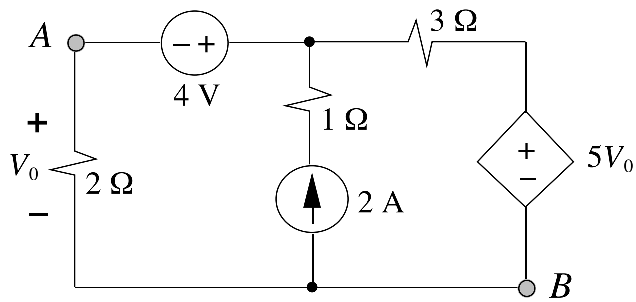


12. Analiza itzazu ondoko zirkuituak Kirchhoff-en legeak erabiliz. Zein dira b) zirkuituko sorgailu independenteen borneen arteko potentzial-diferentziak?

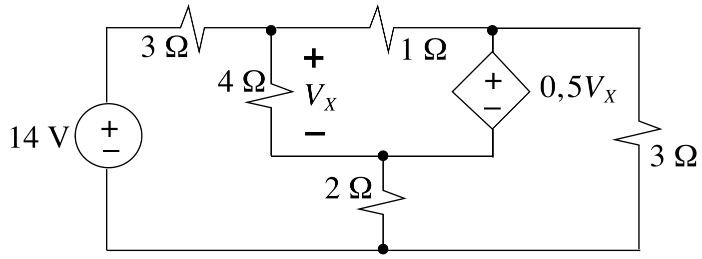




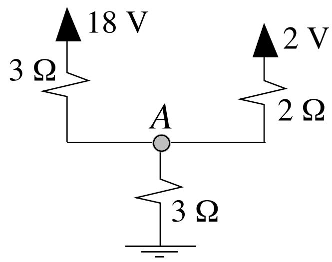
13. Irudiko zirkuituan, kalkula itzazu: **a)** 3 Ω-eko erresistentziatik igarotzen den korrontea. **b)** Korronte-sorgailuko borneen arteko tentsioa. **c)** $V_A - V_B$. **d)** Egiazta ezazu emandako potentzia eta xurgatutakoa berdinak direla.



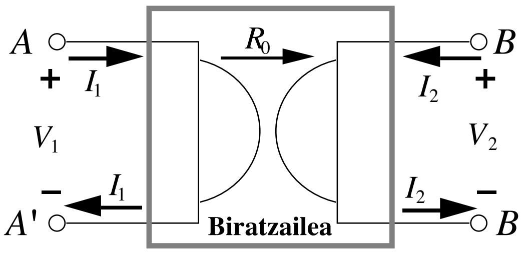
14. Analiza ezazu irudiko zirkuitua.



15. Irudiko zirkuituan, kalkula ezazu *A* puntuaren tentsioa.



16. Zientzialari batzuek "biratzailea" izeneko osagai elektriko berri bat asmatu dute. Irudian, osagai berri horren ikurra ageri da eta bai beraren portaera elektrikoa adierazten duten portaera-ekuazioak ere:

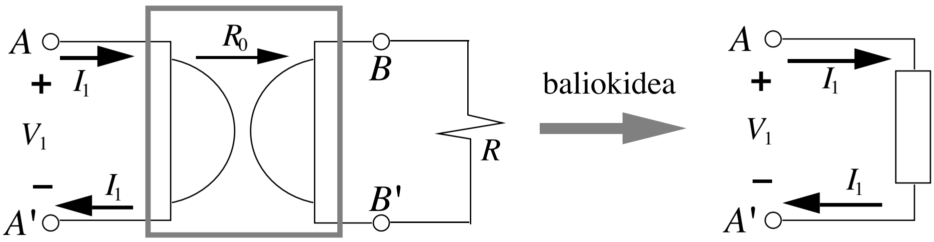


portaera-ekuazioak:

$$V_1 = R_0 \cdot I_2$$

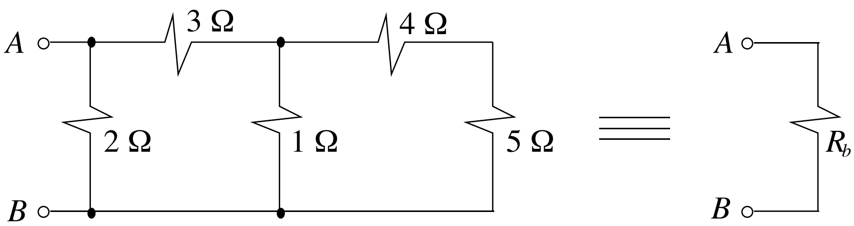
$$V_2 = -R_0 \cdot I_1$$

Osagai hori erabiliz, ondoko irudiko zirkuitua eraiki dute. Zein izango da zirkuituaren baliokidea *A* eta *A'* puntuen artean?



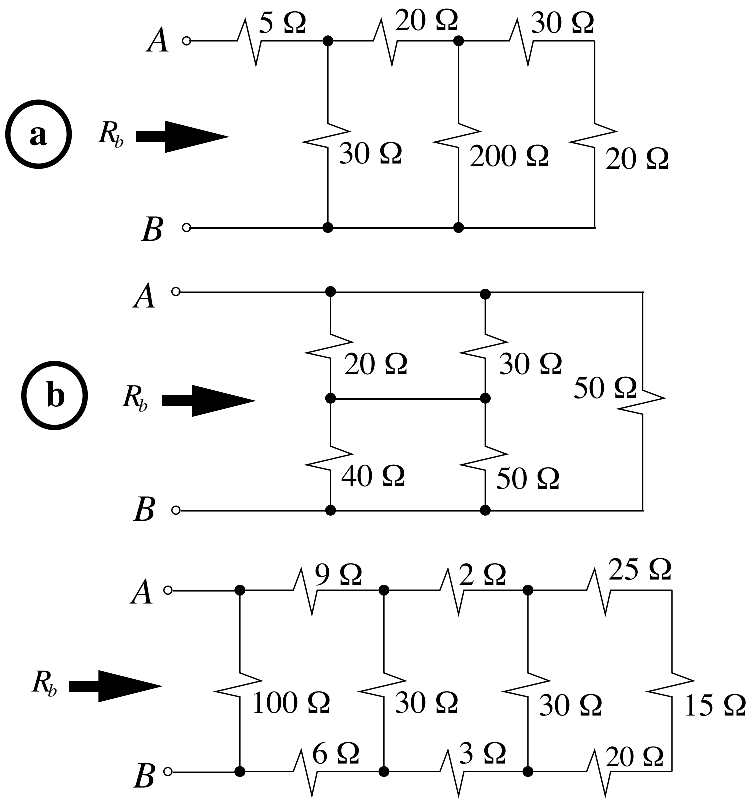
3.3. Elementuen elkarketak eta horien aplikazioak

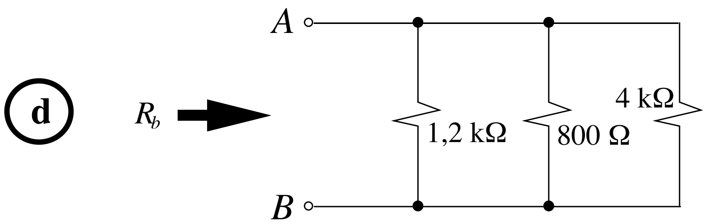
1. Kalkula ezazu irudiko erresistentzia-elkarketaren erresistentzia baliokidea, *A* eta *B* puntuen artean:

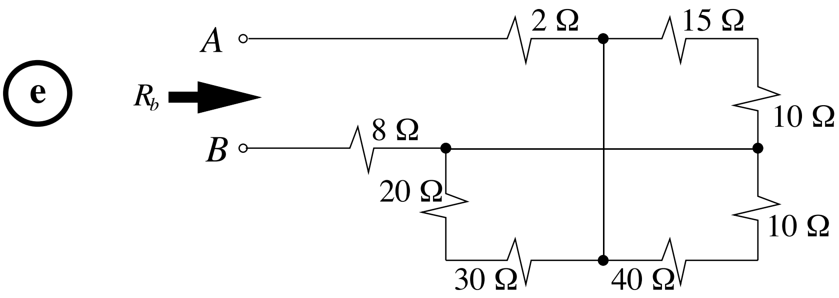


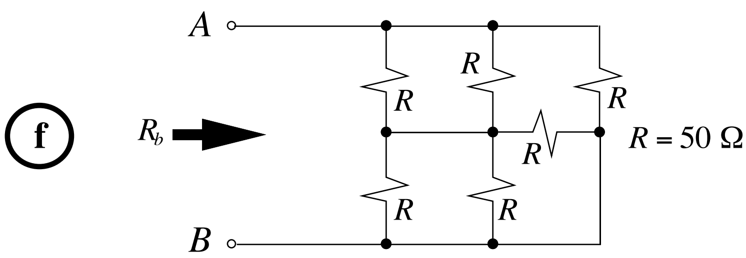
2. Paraleloan konektatuta dauden bi erresistentziaren erresistentzia baliokidea 1 kΩ-ekoa da. Erresistentzia baten balioa bestearena halako bi baldin bada, zenbatekoak dira bi erresistentzia horiek?

3. Kalkula itzazu irudiko erresistentzia-elkarketen erresistentzia baliokideak, *A* eta *B* puntuen artean:





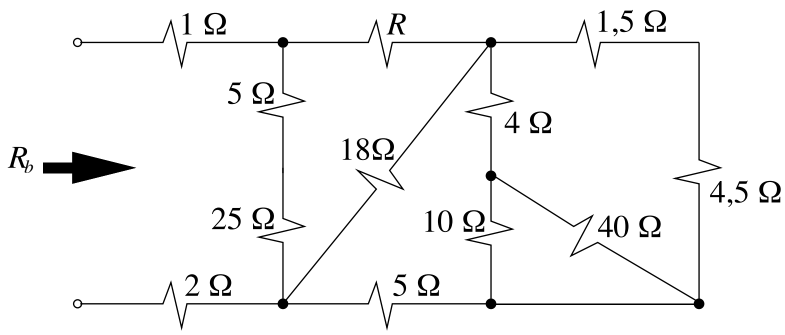




4. Irudiko elkarketarako:

a) Kalkula ezazu erresistentzia baliokidea, R = 14 Ω-ekoa baldin bada.

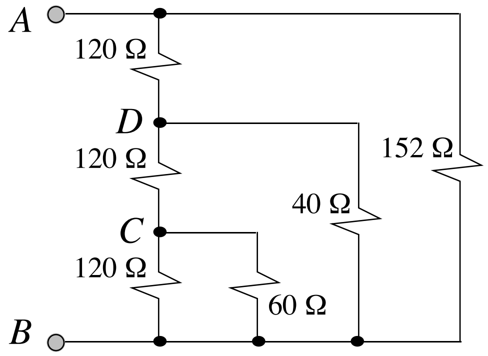
b) Kalkula ezazu R-ren balioa, erresistentzia baliokidea 14 Ω-ekoa baldin bada.



5. Irudian agertzen den zirkuituan honako hauek kalkulatzea eskatzen da:

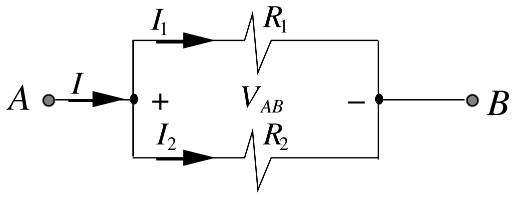
a) *A* eta *B* puntuen arteko erresistentzia baliokidea.

b) *A* eta *B* puntuen artean 190 V-eko potenzial-diferentzia ezartzen bada, kalkula ezazu *C* eta *D* puntuen artean sortzen den potentzial-diferentzia.

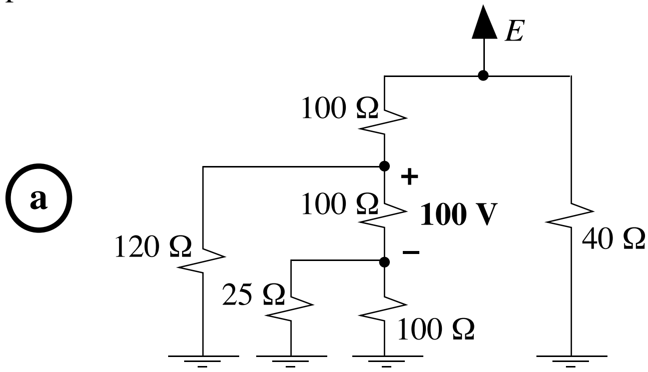


6. **a)** Kalkula itzazu I_1 eta I_2 korronteak, R_1, R_2 eta I ezagunak direla jakinik.

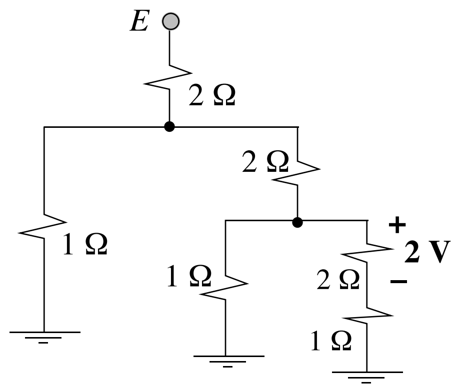
b) Errepika ezazu aurreko ataleko kalkulua, I ezagutu beharrean, V_{AB} ezagutzen baldin bada.



7. Irudiko zirkuituetan kalkula itzazu goiko puntuan ezarritako tentsioa, erresistentzietatik igarotzen diren intentsitateak eta horien muturren arteko potentzial-diferentziak.

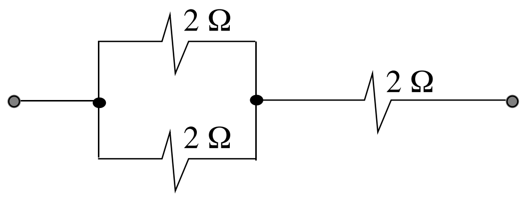


b



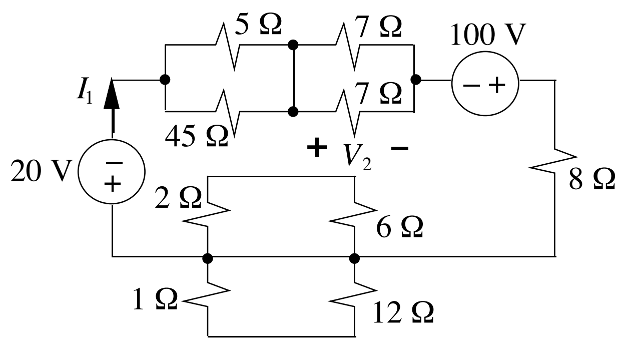
8. R_1 eta R_2 erresistentziak seriez konektatu dira eta elkarteari V_0 tentsioa ezarri zaio. Egoera horretan multzoak 400 watt kontsumitzen ditu. R_1 eta R_2 erresistentziak paraleloan konektatzen badira eta elkarteari tentsio berbera (V_0) ezartzen bazaio, zenbat watt kontsumituko ditu multzoak, $R_2 = 2R_1$ dela jakinik?

9. Irudiko erresistentzia bakoitzak 18 W xahu ditzake erre gabe. Zein da zirkuituak xahu dezakeen potentzia maximoa?

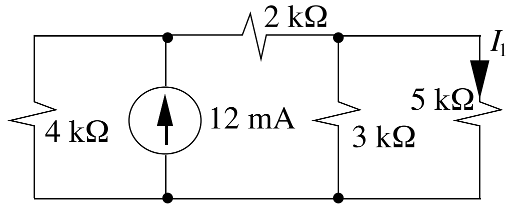


10. Irudietako zirkuituetan kalkula itzazu bertan adierazitako korronteak eta tentsioak, lehenik erresistentzia-elkarketak beren erresistentzia baliokideez ordezkatuz.

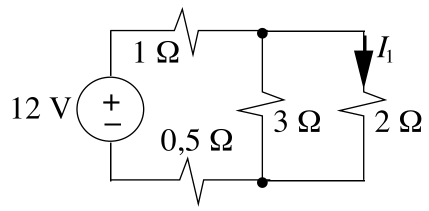
a



b



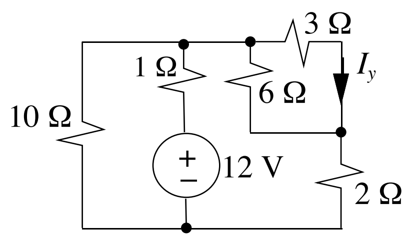
c



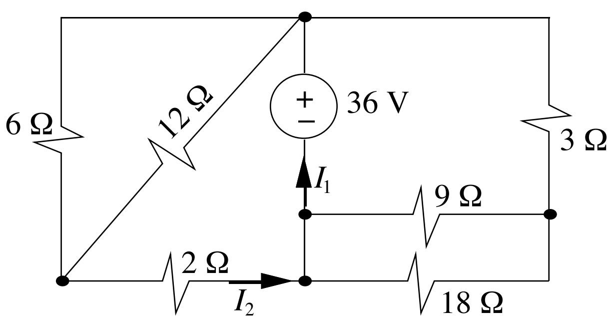
11. Irudiko zirkuituan erresistentzia-elkarketak beren erresistentzia baliokideez ordezkatuz eta tentsio- eta korronte-zatitzaileen aplikazioak kontuan hartuz, erantzun ondoko galderei:

a) Zenbat balio du I_y korronteak?

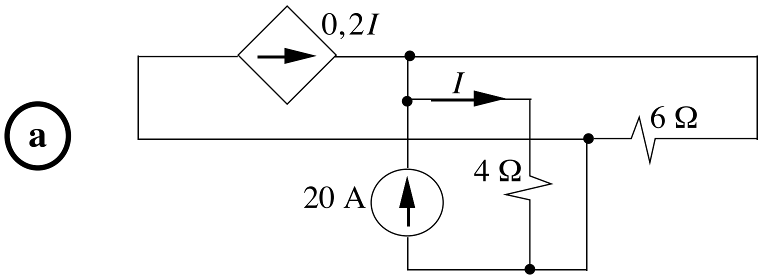
b) Zein izan beharko luke 3 Ω-eko erresistentziaren balioak, I_y = 1 A izan zedin?

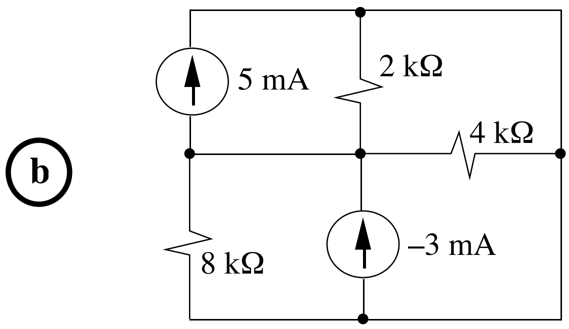


12. Kalkula ezazu irudian agertzen den erresistentzia-multzoaren erresistentzia baliokidea. Aurki itzazu I_1 eta I_2 intentsitateak.

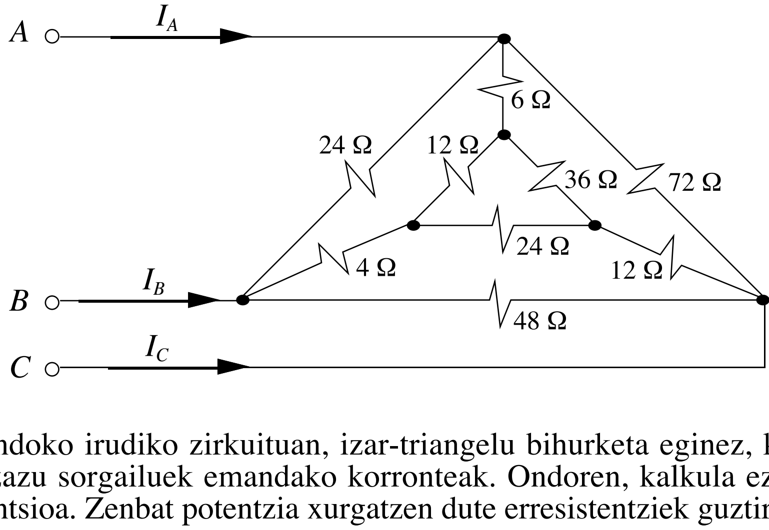


13. Kalkula ezazu irudietako zirkuituetako elementuetan xahutzen den potentzia.

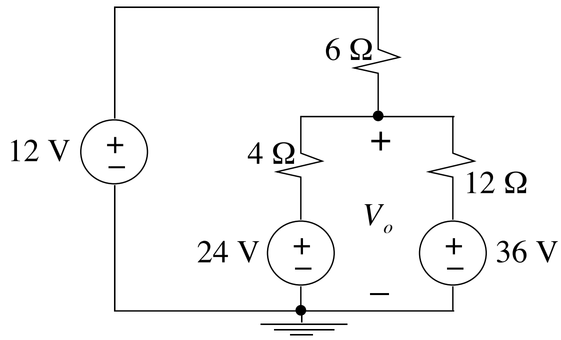




14. Irudiko erresistentzia-elkarketan, izar-triangelu eta triangelu-izar bihurketak eginez, kalkula itzazu V_{AB} eta V_{CB} tentsioen balioak, $I_A = 2$ A eta $I_B = 3$ A izanik. Zenbat balio du I_C korronteak?



15. Ondoko irudiko zirkuituan, izar-triangelu bihurketa eginez, kalkula itzazu sorgailuek emandako korronteak. Ondoren, kalkula ezazu V_o tentsioa. Zenbat potentzia xurgatzen dute erresistentziek guztira?

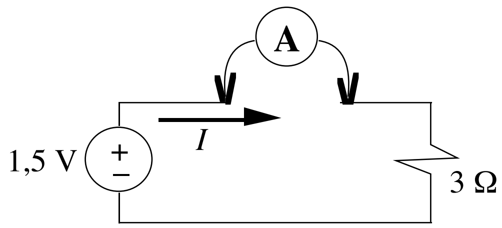


3.4. Tentsio- eta korronte-neurketak: voltmetroa eta anperemetroa

1. Anperemetroa korronteak neurtzeko tresna da. Neurtu nahi den korrontearen bidean konektatzen da; hots, seriean sartu behar da zirkuituan.
Anperemetro baten *ezaugarria* zenbaki bat da, V-etan emanda, eta ahal duen korronterik handiena neurtzean anperemetroaren muturren arteko potentzial-diferentzia zenbatekoa den adierazten du.
Anperemetro baten *irismena*, neur dezakeen korronterik handienaren balioa da.
Bi balio horietan oinarriturik, anperemetro erreal baten barne-erresistentzia kalkula daiteke, honelaxe:

$$R_A = \frac{ezaugarria}{irismena}$$

Adibidez: ezaugarria = 0,1 V, irismena = 1 A → R_A = 0,1 Ω.
Anperemetroaren ezaugarria zero balitz (R_A = 0), anperemetroa ideala izango litzateke, eta zirkuitulabur gisa jokatuko luke.
Hori guztia kontuan hartuz, kalkula ezazu *I* korrontea ondoko irudiko zirkuituan honako kasu hauetan: **a)** anperemetrorik gabe; **b)** anperemetroa ideala balitz; **c)** anperemetroaren ezaugarria 1 V eta irismena 1 A badira; **d)** anperemetroaren ezaugarria 10 mV eta irismena 1 A badira.



4. Zirkuituak analizatzeko oinarrizko metodoak

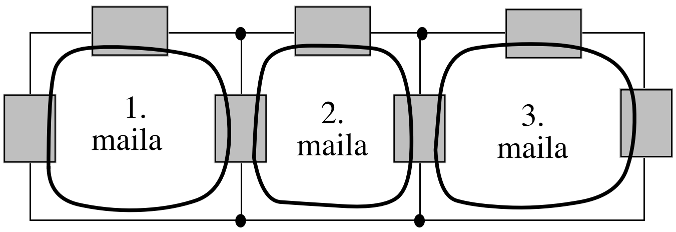
A) Jakin beharreko kontzeptuak

• Mailen metodoa (maila-korronteen metodoa)

Metodo honen funtsa azaldu baino lehen, gogora dezagun zer den maila bat (ikus 3. gaia, 54. orrialdea).

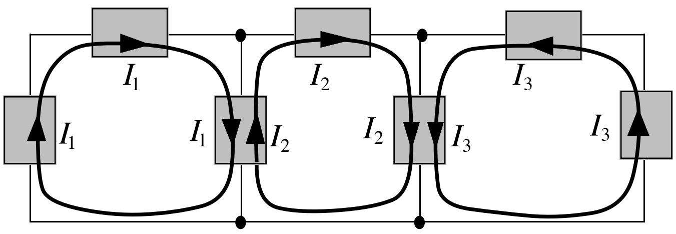
Maila: Barruan adarrik hartzen ez duen begizta.

Adibidez, irudiko zirkuituan hiru maila daude.

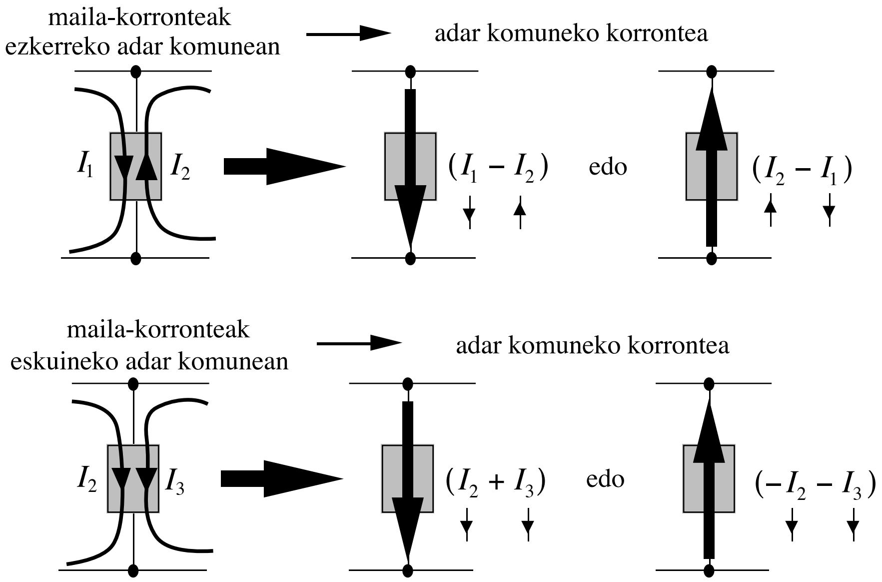


Eta defini dezagun orain maila-korrontea, orain arte adarretako korronteak besterik ez baititugu kontuan hartu.

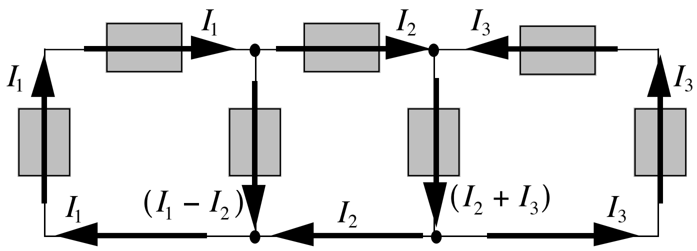
Maila-korrontea: maila baten perimetroan dauden elementu guztietatik igarotzen den korrontea.



Maila-korrontearen definizioa dela kausa, goiko irudian agerikoa da, bi mailetako adar komunetako elementuetatik korronte desberdinak igarotzen direla, aintzat hartzen den mailaren arabera. Horrek honako hau besterik ez du adierazi nahi: adar komunetako elementuetatik bi maila-korronteak aldi berean igarotzen ari direla eta, ondorioz, benetan igarotzen ari den korronte bakarra bien batura edo kendura, noranzkoen arabera, izango dela. Goiko irudiko zirkuituan bi adar komun daude, bata 1. eta 2. mailen artekoa eta bestea 2. eta 3. mailen artekoa.



Hori kontuan izanik, aurreko zirkuituko adarretatik, benetan, honako korronte hauek igarotzen dira:



Zirkuituen ebazpidea, mailen metodoari jarraituz:

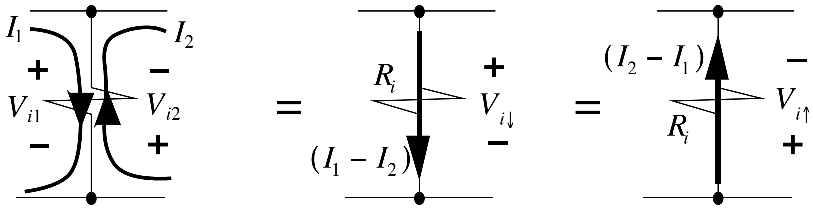
Hona hemen, egoera egonkorrean eta korronte zuzenean, tentsio-sorgailuak eta erresistentziak soilik dituen zirkuituaren soluzioa mailen metodoa erabiliz sistematikoki bilatzeko jarraitu beharreko urratsak, metodologia gisa:

1. Aurkitu zirkuituaren mailak (MK = maila-kopurua).

2. Finkatu arbitrarioki maila-korronteen noranzkoak (maila-korronte ezezagunen kopurua = MK).

3. Finkatu erresistentzietako tentsioen zeinuak maila bakoitzean, maila-korronteen noranzkoen arabera.

Adar komunetako erresistentzietan, bertatik pasatzen diren bi maila-korronteek eragindako tentsioen zeinuak hartu behar dira kontuan. Esate baterako, 1. eta 2. mailen artean dagoen R_i erresistentzian:



$V_{i1} = R_i I_1$ eta $V_{i2} = R_i I_2 \rightarrow V_{i\downarrow} = R_i(I_1 - I_2) = V_{i1} - V_{i2}$ edo $V_{i\uparrow} = V_{i2} - V_{i1}$

4. Aplikatu Kirchhoff-en tentsioen legea (KTL) maila bakoitzean (ekuazio-kopurua = *MK*).
   Kontuan izan behar da, adar komunetako erresistentzietan bi tentsio agertuko zaizkigula, goian aipatu den legez, eta bi mailetako KTLren adierazpenetan bi tentsio horien batura edo kendura agertuko dela. (Kontuz! hori erresistentziekin bakarrik gertatzen da, ez beste edozein motatako elementuekin.)

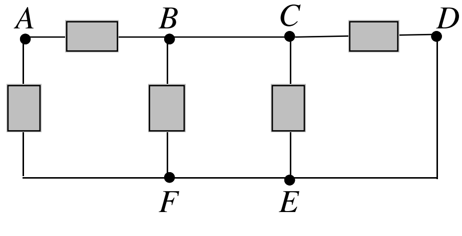
5. Ebatzi lortutako ekuazio-sistema eta, ondoren, kalkulatu korronte eta tentsio guztien balioak, Ohm-en legea eta Kirchhoff-en legeak aplikatuz.

Hori metodo orokorra izanik, hasieran baldintza bat ezarri dugula gogoratu behar dugu, tentsio-sorgailuak eta erresistentziak soilik dituen zirkuituaren soluzioa bilatzeko metodoa dela esan baitugu. Murriztapen hori dela eta, hainbat salbuespen ager daitezke zirkuitua osatzen duten elementuei dagokienez; esate baterako, korronte-sorgailuak daudenean, adar komunetan zein independentetan. Salbuespen horiek ariketen bidez azalduko ditugun arren, metodoa kasu horietan ere baliagarria dela azpimarratu behar dugu hemen, baina ezezagunen kopurua handiagoa izango da, maila-korronteez gain korronte-sorgailuen muturren arteko tentsioak ere ezezagunak baitira; ondorioz, ekuazio gehiago behar dira, ez baita nahikoa maila guztietan KTL aplikatzea (*MK* ekuazio besterik ez baita lortzen), eta ekuazio berri horiek korronte-sorgailuen portaera-ekuaziotik ondorioztatzen dira, korronte-sorgailuak finkatzen baitu bere barnetik igarotzen den korrontearen balioa, korronte-sorgailua dagoeneko adar-korrontea, hain zuzen.

• Korapiloen metodoa

Korapiloa: zirkuitu batean hiru elementu edo gehiago elkartzen direneko puntua (ikus 3. gaia, 53. orrialdea).

Ondoko zirkuituan, adibidez, hainbat konexio-puntu bereiz daitezkeen arren (*A*, *B*, *C*, *D*, *E* eta *F*), bi korapilo besterik ez dago:

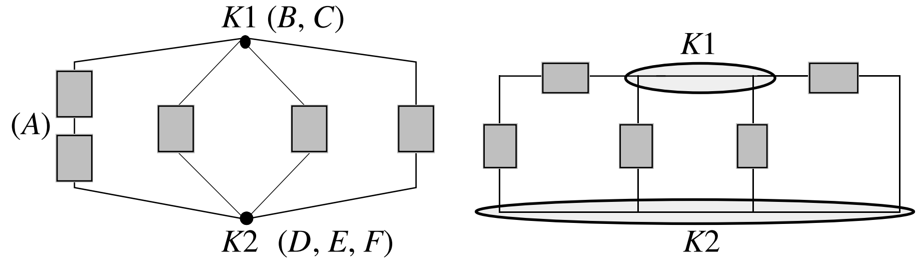


— *A* eta *D* puntuek bi elementu baino ez dituzte lotzen; ondorioz, gure definizioaren arabera, ez dira korapiloak.

— *B* eta *C* puntuen artean ez dago elementurik, konexio-lerro bat baizik, hori dela eta, elektrikoki puntu bakarra osatzen dute beraien artean haria besterik ez baitago.

— *D*, *F* eta *E* puntuekin gauza bera gertatzen da.

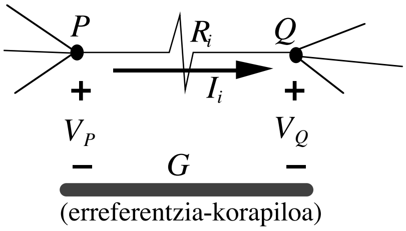
Argiago ikusteko, berriro marraz dezakegu zirkuitua, edo, besterik gabe, jatorrizko zirkuituan azaldu.



Zirkuituen ebazpidea, korapiloen metodoari jarraituz:

Korapiloen metodoa erabiliz, egoera egonkorrean eta korronte zuzenean, korronte-sorgailuak eta erresistentziak soilik agertzen diren kasuan jarraitu beharreko pausoak:

1. Identifikatu zirkuituko korapiloak (korapilo-kopurua = *N*).
2. Aukeratu korapiloetariko bat erreferentzia-korapilo gisa. Komenigarriena, adar gehien konektatuak dituen korapiloa aukeratzea da.
3. Definitu korapilo-tentsioak, zirkuituaren eskeman, erreferentzia-korapiloarentzat ez beste guztientzat. Korapilo baten tentsioa erreferentzia-korapiloaren eta korapilo horren artean dagoen potentzial-diferentzia da. *N* korapilo badaude, (*N*–1) korapilo-tentsio ezezagun izango dira.
4. Idatzi adar guztietako korronteak. Korronte-sorgailuen kasuan, adar-korronte horiek ezagunak dira; erresistentzien kasuan, ordea, korapiloen tentsioen funtzioan lortuko ditugu, Ohm-en legea aplikatuz:



$$I_i = \frac{V_P - V_Q}{R_i}$$

5. Aplikatu Kirchhoff-en korronteen legea (KKL) korapiloetan; *N* korapilo badaude, *N*–1 ekuazio idatzi behar dira (erreferentzia-korapiloa ez den korapilo bakoitzeko, bana).

6. Ebatzi lortutako ekuazio-sistema, eta, ondoren, kalkulatu korronte eta tentsio guztien balioak.

Mailen metodoaren antzera, korapiloen metodo hau ere erabil daiteke zirkuituko osagaien artean, korronte-sorgailuak eta erresistentziez gain, tentsio-sorgailuak ere daudenean. Metodoa zertxobait aldatuz, ezezagun bakarrak (N–1) korapilo-tentsioak izatea lortzen da, eta ez tentsio-sorgailuetatik igarotzen diren korronteak. Hau guztia ariketetan azalduko dugu sakonkiago.

• Linealtasuna

Analizatu behar ditugun zirkuituetako osagaiak linealak direnean, linealtasunaren printzipioa aplika dezakegu: zirkuitu bateko sorgailu guztien balioak konstante batez biderkatzen baditugu, zirkuitu osoaren emaitzak konstante berarekin biderkatuak aterako dira.

Hau dela eta, sorgailu bakar bat eta erresistentziak besterik ez dituzten zirkuituetan ebazpide erraza lor dezakegu, ariketetan ikusiko dugun legez.

Ebazpidearen funtsa, kalkulatu nahi den magnitudearen balioa suposatzean datza; horren arabera, suposatutako magnitude hori lortzeko sorgailuaren balioak zenbatekoa izan beharko lukeen kalkulatu behar da. Ondoren, hiruko erregela aplikatzen da suposatutako eta lortutako balioekin, sorgailuaren benetako balioa kontuan hartuz; eta horrela lortzen da kalkulatu beharreko magnitudearen benetako balioa.

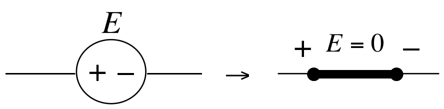
• Gainezarpen printzipioa

Zirkuitu lineal batean sorgailu independente bat baino gehiago badago, emaitza orokorra sorgailu guztiek banan-banan sortzen dituzten emaitza partzialak batuz lortzen da, beste guztiak ez baleude bezala sorgailu bakoitza bere aldetik kontuan hartuz.

Hau da, zirkuituaren soluzioa bilatzeko, sorgailu-kopurua adina zirkuitu analizatu behar dira; zirkuitu partzial horietako bakoitzean sorgailu bat besterik ez dagoenez gero, emaitza partzialak kalkulatzea berehalakoa izan ohi da.

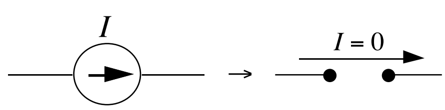
Sorgailuak aintzakotzat banan-banan hartu behar direnez, sorgailu bakoitzeko emaitza partzial bat lortzeko, beharrezkoa da sorgailu independenteak, bat izan ezik, nolabait desagertaraztea, zirkuituaren gainean duten eragina deuseztеko. Horretarako, ordezkatu egingo ditugu sorgailu guztiak, bat izan ezik: tentsio-sorgailuak zirkuitulaburraz (V = 0 egitea baita tentsio-sorgailuen eragina deuseztea) eta korronte-sorgailuak, berriz, zirkuitu irekiaz (I = 0 egitea baita korronte-sorgailuen eragina deuseztea).

tentsio-sorgailua:



zirkuitulaburra

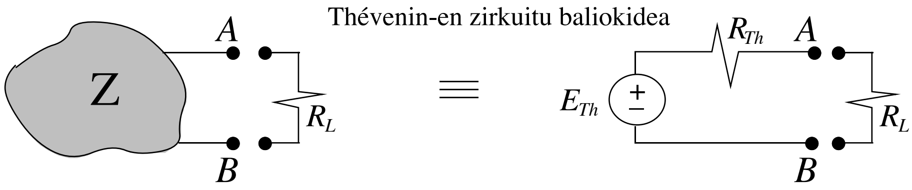
korronte-sorgailua:



zirkuitu irekia

• Thévenin-en teorema

Edozein zirkuitu lineal, oso konplexua izan arren, seriean konektatutako tentsio-sorgailu batek eta erresistentzia batek osatutako sistema sinple batez ordezka daiteke, bi puntu jakinen artean beti.



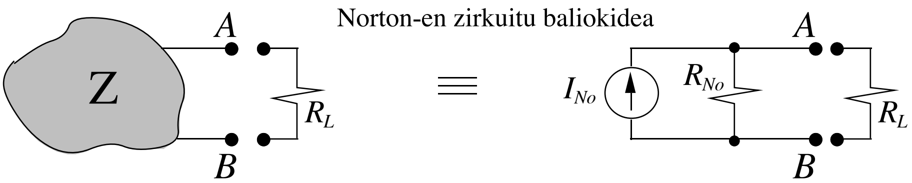
Thévenin-en zirkuitu baliokidean, E_{Th} Thévenin-en tentsio baliokidea da, eta R_{Th}, Thévenin-en erresistentzia baliokidea. Bi parametro horiek modu errazean kalkula daitezke. Hona hemen dagozkien definizioak:

E_{Th}: jatorrizko zirkuituan, *A* eta *B* puntuen arteko potentzial-diferentzia, bi puntu hauen artean zirkuitu irekia izanik.

R_{Th}: jatorrizko zirkuituan, *A* eta *B* puntuen arteko erresistentzia baliokidea sorgailu guztiak kenduta. Honetarako, gogoratu gainezarpen printzipioan esandakoa: tentsio-sorgailuak zirkuitulaburraz ordezkatuko ditugu, eta korronte-sorgailuak, berriz, zirkuitu irekiaz.

• Norton-en teorema

Edozein zirkuitu lineal, oso konplexua izan arren, paraleloan konektatutako korronte-sorgailu batek eta erresistentzia batek osatutako sistema sinple batez ordezka daiteke, bi puntu jakinen artean beti.



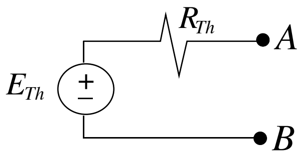
Norton-en zirkuitu baliokidean, I_{No} Norton-en korronte baliokidea da, eta R_{No}, Norton-en erresistentzia baliokidea. Bi parametro horiek modu errazean kalkula daitezke dagokien definizioa kontuan izanik:

I_{No}: *A* puntutik *B* puntura igarotzen den korrontea jatorrizko zirkuituan, bi puntu hauen artean zirkuitulaburra dagoenean.

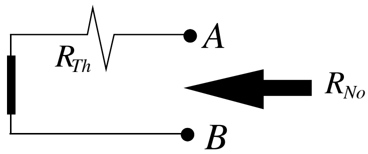
R_{No}: jatorrizko zirkuituan, *A* eta *B* puntuen arteko erresistentzia baliokidea sorgailu guztiak kenduta. Honetarako, gogoratu tentsio-sorgailuak zirkuitulaburraz ordezkatuko ditugula eta korronte-sorgailuak, berriz, zirkuitu irekiaz.

• Thévenin-en eta Norton-en zirkuitu baliokideen arteko erlazioa

a) Thévenin-en zirkuitu baliokide baten Norton-en baliokidea kalkulatzen badugu:

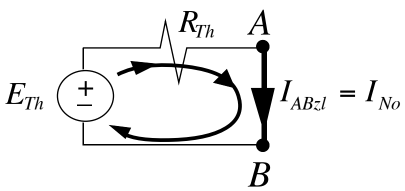


- **Norton-en erresistentzia baliokidea**, R_{No}: A eta B puntuen arteko erresistentzia baliokidea, sorgailuak kenduta (kasu honetan, tentsio-sorgailua zirkuitulaburtuz):



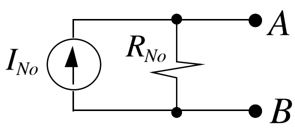
→ $\boxed{R_{No} = R_{Th}}$

- **Norton-en korronte baliokidea**, I_{No}: A-tik B-ra igarotzen den korrontea, jatorrizko zirkuituan, A eta B-ren artean zirkuitulaburra eginez:

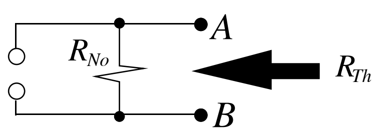


→ $\boxed{I_{No} = \dfrac{E_{Th}}{R_{Th}}}$

b) Norton-en zirkuitu baliokide baten Thévenin-en baliokidea kalkulatzen badugu:

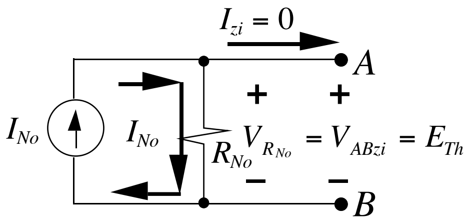


- **Thévenin-en erresistentzia baliokidea,** R_{Th}: A eta B puntuen arteko erresistentzia baliokidea, sorgailuak behar den moduan kenduta (kasu honetan korronte-sorgailuaren ordez zirkuitu irekia utziz).



→ $\boxed{R_{Th} = R_{No}}$

- **Thévenin-en sorgailu baliokidea**, E_{Th}: jatorrizko zirkuituan *A* eta *B* puntuen arteko potentzial-diferentzia, *A* eta *B*-ren artean zirkuitu irekia izanik.



→ $\boxed{E_{Th} = R_{No} \cdot I_{No}}$

Laburpen gisa:

$$\boxed{R_{No} = R_{Th} = \frac{E_{Th}}{I_{No}}} \qquad \boxed{E_{Th} = R_{No} \cdot I_{No}} \qquad \boxed{I_{No} = \frac{E_{Th}}{R_{Th}}}$$

Ondorioak:

1. Thévenin-en zirkuitu baliokidea ezagutzen badugu, Norton-en zirkuitu baliokidea zuzenean kalkula dezakegu; eta alderantziz ere bai.

2. Norton-en eta Thévenin-en teoremak sorgailu independenteak bakarrik agertzen diren kasuetarako definitzen diren arren, menpeko sorgailuak dituzten zirkuituetarako ere lor daitezke Norton-en zirkuitu baliokidea eta Thévenin-en zirkuitu baliokidea.

   Thévenin-en eta Norton-en sorgailu baliokideak kasu arruntean egiten den modu berean kalkulatzen dira.

   Erresistentzia baliokideak, ordea, ezin dira kalkulatu sorgailuak deuseztuz, menpeko sorgailuak ezin baitira ordezkatu. Baina ikusi berri dugun moduan, Thévenin-en eta Norton-en sorgailu baliokideak ezagutuz Thévenin-en edo Norton-en erresistentzia baliokideak kalkula daitezke.

$$\boxed{R_{No} = R_{Th} = \frac{E_{Th}}{I_{No}}}$$

• Potentziaren transferentzia maximoaren teorema

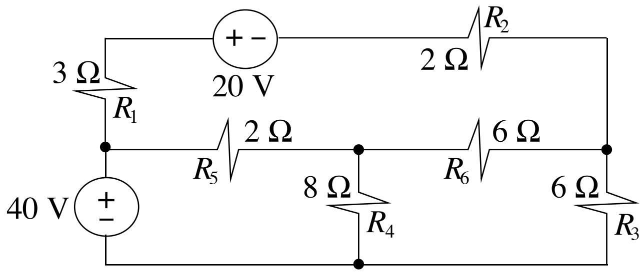
Zirkuitu bateko bi punturen artean xurgatzen den potentzia maximoa izatea nahi bada, tartean konektatu beharreko erresistentziaren balioak, zirkuitu beraren bi puntu horien arteko Thévenin-en erresistentzia baliokidearen berdina izan behar du.

Ariketa baten bitartez egingo dugu teorema honen froga.

B) Ariketa ebatziak

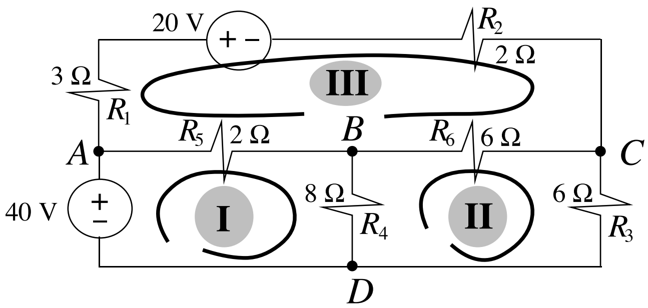
4.1. Mailen metodoa

1. Ondoko zirkuituan, kalkula itzazu elementu guztietako tentsioak eta korronteak, mailen metodoa erabiliz.



Ebazpena

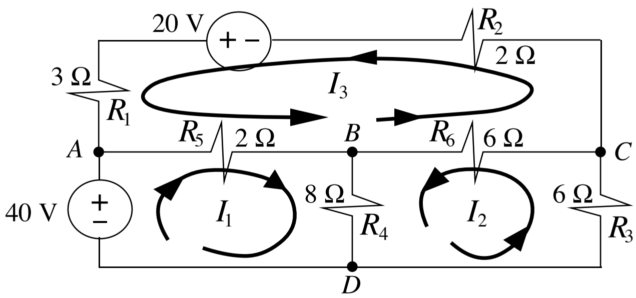
1) Lehenengo pausoa mailak bilatzea da. Kasu honetan, hiru dira hain zuzen ere:



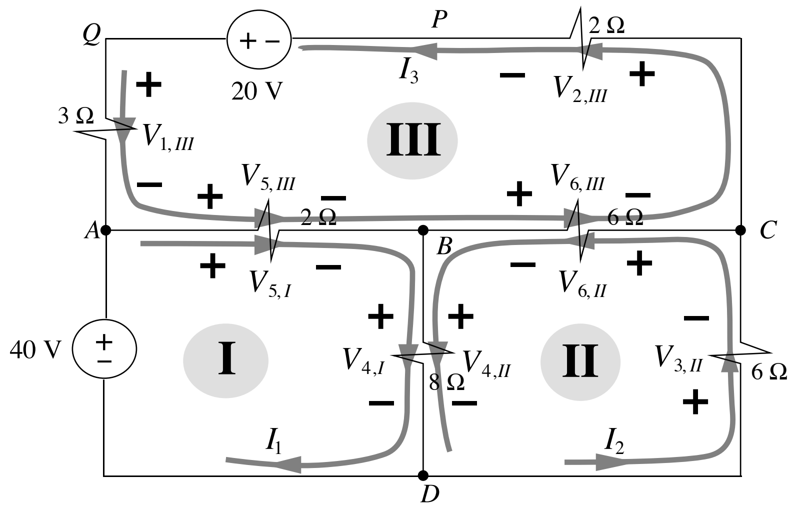
korapiloak:
A, *B*, *C* eta *D*

mailak:
I maila: *A-B-D-A*
II maila: *B-C-D-B*
III maila: *A-B-C-A*

2) Mailak aurkitu ondoren, maila-korronteen noranzkoak arbitrarioki finkatzea da hurrengo pausoa, maila bakoitzeko maila-korronte bat hain zuzen ere. Korronte horien noranzkoak arbitrarioki aukeratuko ditugunez gero, ariketa ebatzitakoan lortutako zeinuek adieraziko digute benetako noranzkoak zein diren.



3) Hirugarren pausoa erresistentzietako tentsioen zeinuak jartzea izango da.



KONTUZ! Esan bezala, adar komunetako erresistentziei irudian bi tentsio dagozkien arren (bana parte hartzen duen maila bakoitzeko korronteagatik), benetan tentsio bakarra dagokie: irudiko bi tentsioen batura edo kendura (korronteen noranzkoen arabera).

Esate baterako, irudiko zirkuituko R_5 erresistentziari, I eta III mailen artean egoteagatik, $V_{5,I}$ eta $V_{5,III}$ tentsioak esleitu dizkiogu goiko irudian, eta erresistentziaren muturren arteko tentsioa $V_{R_5(AB)} = V_{5,I} + V_{5,III}$ izango da, bi maila-korronteak, I_1 eta I_3, noranzko berean igarotzen baitira (biak eskuinerantz) erresistentzia horretatik.

Kontrako adibidea da R_6 erresistentzia. Honi, II eta III mailen artean egoteagatik, $V_{6,II}$ eta $V_{6,III}$ tentsioak esleitu dizkiogu goiko irudian, eta erresistentziaren muturren arteko tentsioa bien kendura izango da, bi maila-korronteak, I_2 eta I_3, kontrako noranzkoan igarotzen baitira erresistentzia horretatik: $V_{R_6(BC)} = V_{6,III} - V_{6,II}$ edota $V_{R_6(CB)} = V_{6,II} - V_{6,III}$.

4) Maila-korronteak, tentsioen zeinuak eta gainerakoak finkatu ondoren, maila bakoitzean KTL aplikatu eta ekuazioak idatzi behar dira.

I maila (*A-B-D-A*): $V_{R_5(AB)} + V_{R_4(BD)} = 40 \;\rightarrow\; \left(V_{5,I} + V_{5,III}\right) + \left(V_{4,I} + V_{4,II}\right) = 40$

II maila (*B-D-C-B*): $V_{R_4(BD)} + V_{R_3(DC)} + V_{R_6(CB)} = 0 \;\rightarrow$

$$\left(V_{4,II} + V_{4,I}\right) + \left(V_{3,II}\right) + \left(V_{6,II} - V_{6,III}\right) = 0$$

III maila (*A-B-C-A*): $V_{R_5(AB)} + V_{R_6(BC)} + V_{R_2(CP)} + V_{R_1(QA)} = 20 \;\rightarrow$

$$\left(V_{5,III} + V_{5,I}\right) + \left(V_{6,III} - V_{6,II}\right) + \left(V_{2,III}\right) + \left(V_{1,III}\right) = 20$$

Aurreko ekuazioak tentsioen menpe idatzi ordez korronteen funtzioan idazten baditugu, horretarako erresistentzietan Ohm-en legea betetzen dela kontuan hartuz, ($V_{5,I} = R_5 I_1 = 2I_1$; $V_{6,III} = R_6 I_3 = 6I_3$) hiru ekuazio eta hiru ezezaguneko sistema lortuko dugu:

I maila:	$\left(2I_1 + 2I_3\right) + \left(8I_1 + 8I_2\right) = 40$
II maila:	$\left(8I_2 + 8I_1\right) + \left(6I_2\right) + \left(6I_2 - 6I_3\right) = 0$
III maila:	$\left(2I_3 + 2I_1\right) + \left(6I_3 - 6I_2\right) + \left(2I_3\right) + \left(3I_3\right) = 20$

Ekuazio hauek askatuz gero, I_1, I_2, eta I_3 maila-korronteen balioak lortuko ditugu; baina hori egin aurretik ordenatu egingo ditugu ekuazio horiek zein itxura duten aztertzeko:

I maila:	$10I_1 + 8I_2 + 2I_3 = 40$
II maila:	$8I_1 + 20I_2 - 6I_3 = 0$
III maila:	$2I_1 - 6I_2 + 13I_3 = 20$

Sistema hori matrizeak erabiliz idatziz gero:

$$\begin{pmatrix} 10 & 8 & 2 \\ 8 & 20 & -6 \\ 2 & -6 & 13 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 40 \\ 0 \\ 20 \end{pmatrix}$$

Berdintzaren eskuin aldeko elementuek, maila bakoitzean dauden tentsio-sorgailuen batura (zeinuak kontuan hartuz) adierazten digute, maila-korrontearen kontrako noranzkoan hartuak. Koefiziente-matrizearen diagonaleko elementuek, berriz, maila bakoitzeko erresistentzia guztien batura dute balio gisa (lehenengo lerrokoak lehenengo mailakoa...); eta gainerako elementuak adar komunetan azaltzen diren erresistentzien adierazgarri dira, zeinua korronteen noranzkoaren araberakoa izango delarik. Hau dela eta, koefiziente-matrizea simetrikoa da.

Ekuazio-sistema hori askatuz, hiru maila-korronteen balioak lortuko ditugu.

$$\boxed{I_1 = 6{,}34 \text{ A},\ I_2 = -2{,}75 \text{ A},\ I_3 = -0{,}71 \text{ A}}$$

Bi korronteren balioak (I_2 eta I_3-renak) negatiboak dira. Zer adierazten du honek? Hasieran arbitrarioki aukeratu ditugun maila-korronteen noranzkoak ez datozela bat korronteek benetan dituzten noranzkoekin, hain zuzen ere.

5) I_1, I_2 eta I_3 korronteen balioak ezagututa, zirkuituan agertzen diren korronte guztien balioak kalkula ditzakegu; eta, ondorioz, baita tentsio guztienak ere.

Adar komunetako korronteak:

$$I_{R_5(A\to B)} = I_{1,3(A\to B)} = I_1 + I_3 = 5{,}63 \text{ A}$$

$$I_{R_4(B\to D)} = I_{1,2(B\to D)} = I_1 + I_2 = 3{,}59 \text{ A}$$

$$I_{R_6(B\to C)} = I_{2,3(B\to C)} = I_3 - I_2 = 2{,}04 \text{ A}$$

Tentsioak: $V_{R_1(QA)} = V_{1,III} = 3I_3 = -2{,}13 \text{ V}$,

$V_{R_2(CP)} = V_{2,III} = 2I_3 = -1{,}42 \text{ V}$,

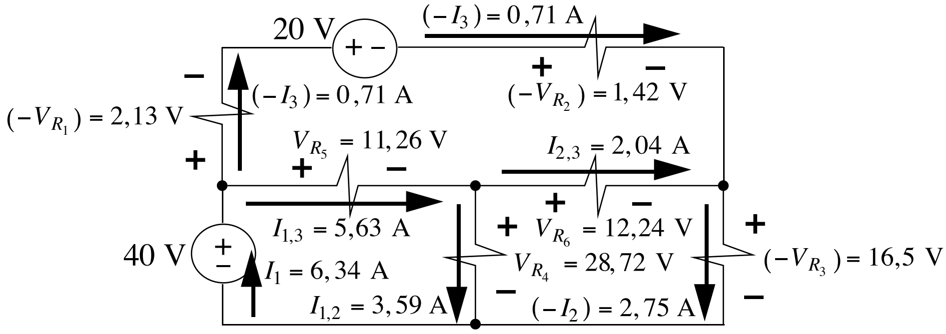
$V_{R_3(DC)} = V_{3,II} = 6I_2 = -16{,}5 \text{ V}$,

$V_{R_4(BD)} = V_{4,I} + V_{4,II} = 8I_1 + 8I_2 = 28{,}72 \text{ V}$,

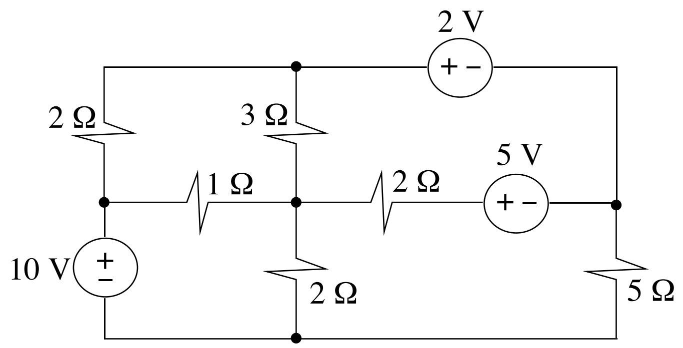
$V_{R_5(AB)} = V_{5,I} + V_{5,III} = 2I_1 + 2I_3 = 11{,}26 \text{ V}$,

$V_{R_6(BC)} = V_{6,III} - V_{6,II} = 6I_3 - 6I_2 = 12{,}24 \text{ V}$

Hona hemen, beraz, zirkuituaren soluzioa:



2. Ondoko zirkuituan, kalkula itzazu elementu guztietako korronteak eta tentsioak, mailen metodoa erabiliz.

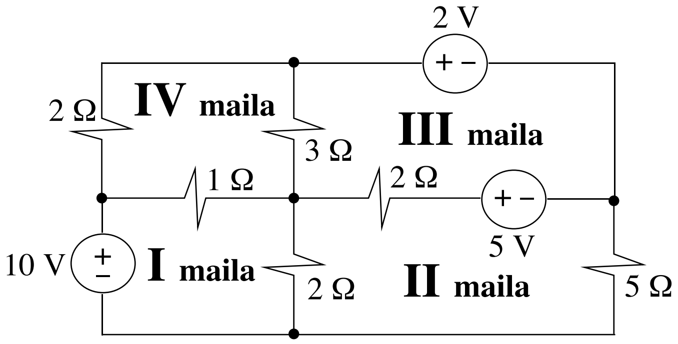


OHARRA:

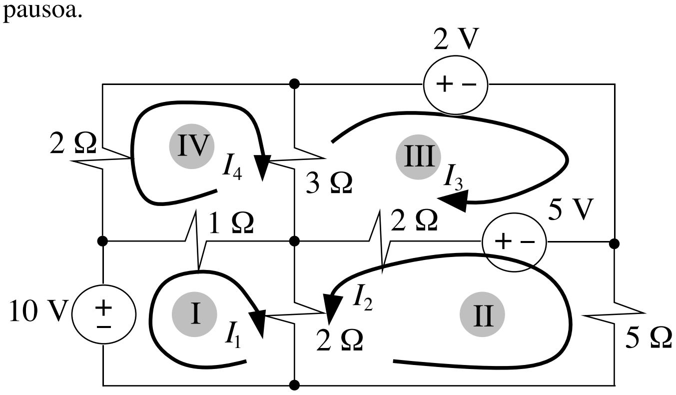
Irudiko zirkuituak dituen osagaiak, aurreko ariketakoaren moduan, tentsio-sorgailuak eta erresistentziak dira. Desberdintasun bakarra da, bigarren honetan tentsio-sorgailu bat agertzen dela adar komun batean. Honek ez dio zailtasunik gehituko zirkuituaren ebazpenari: nahikoa izango dugu, bi mailen ekuazioak idaztean tentsio-sorgailu horren eragina aintzakotzat hartzea, adar komunetako erresistentzietako tentsioekin egiten dugun modu berean.

Ebazpena

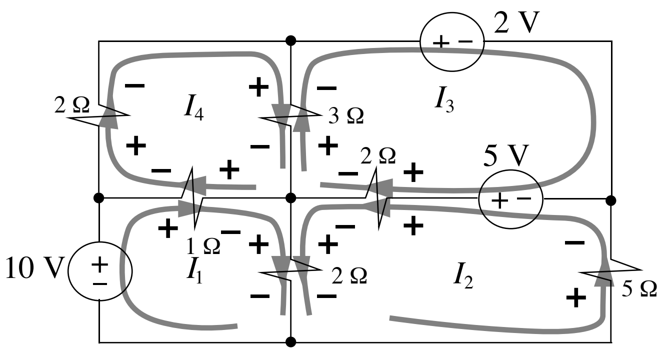
1) Lehenengo pausoa mailak bilatzea da. Kasu honetan lau maila daude, hain zuzen ere.



2) Mailak aurkitu ondoren, maila-korronteen noranzkoak arbitrarioki finkatzea da hurrengo pausoa.



3) Hirugarren pausoa erresistentzietako tentsioen zeinuak jartzea izango da.



4) Maila-korronteen noranzkoak, tentsioen zeinuak eta gainerakoak finkatu ondoren, maila bakoitzean KTL aplikatu eta ekuazioak idatzi behar dira.

I maila: $\left(1I_1 - 1I_4\right) + \left(2I_1 + 2I_2\right) = 10$

II maila: $\left(2I_2 + 2I_1\right) + \left(5I_2\right) + \left(2I_2 + 2I_3\right) = 5$

III maila: $\left(2I_2 + 2I_3\right) + \left(3I_3 - 3I_4\right) = 5 - 2$

IV maila: $\left(3I_4 - 3I_3\right) + \left(1I_4 - 1I_1\right) + \left(2I_4\right) = 0$

Ekuazio hauek askatuz gero, I_1, I_2, I_3 eta I_4 maila-korronteen balioak lortuko ditugu. Lehen bezala, hori egin aurretik, ordenatu egingo ditugu ekuazio horien itxura aztertzeko:

I maila: $3I_1 + 2I_2 \qquad - \mathrm{I}_4 = 10$

II maila: $2I_1 + 9I_2 + 2\mathrm{I}_3 \qquad = 5$

III maila: $2I_2 + 5I_3 - 3\mathrm{I}_4 = 3$

IV maila: $-I_1 \qquad - I_3 + 6\mathrm{I}_4 = 0$

Matrizialki idatziz gero:

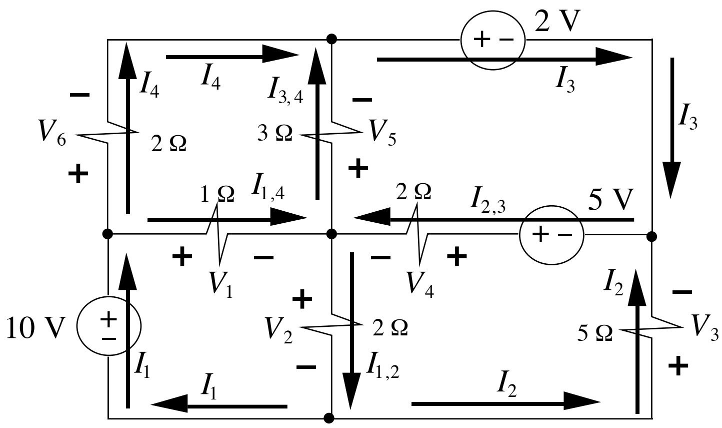
$$\begin{pmatrix} 3 & 2 & 0 & -1 \\ 2 & 9 & 2 & 0 \\ 0 & 2 & 5 & -3 \\ -1 & 0 & -3 & 6 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 10 \\ 5 \\ 3 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Esanahia lehen ikusi dugun bera da.

Hori askatuz, lau maila-korronteen balioak lortuko ditugu.

$$\boxed{I_1 = 2{,}34\ \mathrm{A},\ I_2 = 1{,}68\ \mathrm{A},\ I_3 = 0{,}18\ \mathrm{A},\ I_4 = 0{,}42\ \mathrm{A}}$$

I_1, I_2, I_3 eta I_4 korronteen balioak ezagututa, zirkuituan agertzen diren korronte guztien balioak kalkula ditzakegu; eta, ondorioz, baita tentsio guztienak ere.



Hona hemen soluzioa:

Adar komunetako korronteak

$$I_{1,2} = I_1 + I_2 = 4,02 \text{ A}$$

$$I_{2,3} = I_2 + I_3 = 1,86 \text{ A}$$

$$I_{3,4} = I_3 - I_4 = -0,24 \text{ A}$$

$$I_{1,4} = I_1 - I_4 = 1,92 \text{ A}$$

Tentsioak

$$V_1 = V_{1,I} - V_{1,IV} = 1I_{1,4} = 1,92 \text{ V}$$

$$V_2 = V_{2,I} + V_{2,II} = 2I_{1,2} = 8,04 \text{ V}$$

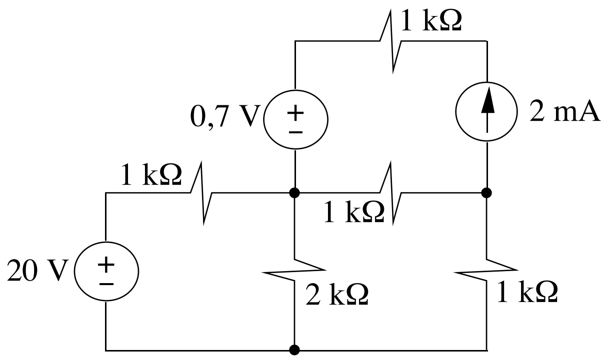
$$V_3 = V_{3,II} = 5I_2 = 8,4 \text{ V}$$

$$V_4 = V_{4,II} + V_{4,III} = 2I_2 + 2I_3 = 3,72 \text{ V}$$

$$V_5 = V_{5,III} - V_{5,IV} = 3I_3 - 3I_4 = -0,72 \text{ V}$$

$$V_6 = V_{6,IV} = 2I_4 = 0,84 \text{ V}$$

3. Ondoko zirkuituan, kalkula itzazu elementu guztietako tentsioak eta korronteak, mailen metodoa erabiliz.



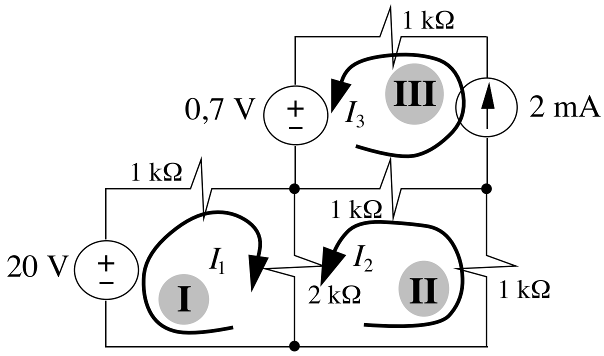
OHARRA:

Irudiko zirkuituak, aurreko ariketetakoek baino osagai-mota gehiago ditu, tentsio-sorgailuak eta erresistentziak edukitzeaz gain, adar independente batean dagoen korronte-sorgailu bat ere baitu**.** Mailen metodoa orain arte bezala aplikatzen badugu, maila-korronteez gain (kasu honetan, hiru), korronte-sorgailuaren muturren arteko tentsioa ere ezezaguna izango da (lau ezezagun guztira, beraz). Hori dela eta, KTL mailetan aplikatzean lortutako ekuazioez gain, korronte-sorgailuaren portaera-ekuazioa ere beharrezkoa izango da. Hori guztiz zilegia izan arren, guk ebazpidea zertxobait aldatuko dugu, posible baita ezezagunen kopurua ez handitzea, hots, ezezagun bakarrak maila-korronteak soilik izatea, aurreko ariketetan bezalaxe. Aldatutako ebazpidea aurrekoa bezain erraza da: alde batetik, korronte-sorgailuak bere barnetik igarotzen den korrontea finkatzen duela kontuan hartuz, maila-korronteen arteko ekuazio bat lortuko dugu (korronte-sorgailu adina ekuazio, zehatz-mehatz); beste aldetik, KTL aplikatzean, korronte-sorgailuak barnean hartzen dituzten mailetan aplikatu beharrean, korronte-sorgailurik ez duten begiztetan aplikatuko dugu, agerikoa baita begizta horiek mailen elkarketak izango direla; modu horretan, korronte-sorgailuaren muturren arteko tentsioa ez da agertuko gure ekuazioetan. Ikus dezagun, bada, era horretan aldatutako ebazpidea.

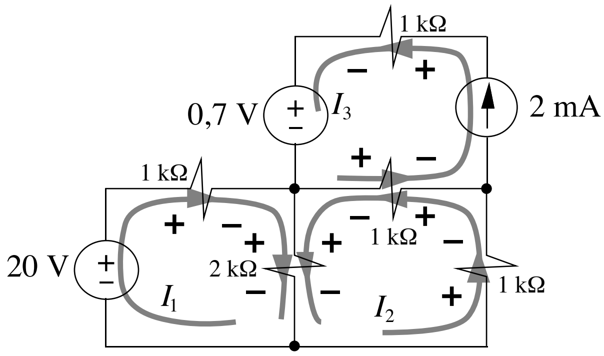
Ebazpena

1) Lehenengo pausoa mailak bilatzea da. Kasu honetan hiru maila daude.

2) Mailak aurkitu ondoren, maila-korronteen noranzkoak arbitrarioki finkatzea da hurrengo pausoa.



3) Hirugarren pausoa erresistentziei dagozkien tentsioen zeinuak jartzea izango da.



4) Orain, ekuazioak idatzi behar dira, korronte-sorgailurik ez dagoen maileTan KTL aplikatuz, eta beharrezkoa denean korronte-sorgailua kontuan hartuz. (Erresistentziak kΩ-etan daudenez gero, ekuazioetatik lortuko ditugun korronteak mA-tan egongo dira.)

I maila: $\left(1I_1\right)+\left(2I_1+2I_2\right)=20$

II maila: $\left(2I_2+2I_1\right)+\left(1I_2\right)+\left(1I_2-1I_3\right)=0$

Aipatu den moduan, hirugarren mailan KTL aplikatuko bagenu, 2 mA-ko korronte-sorgailuaren tentsioa ezezaguna denez, maila-korronteez gain ezezagun berri bat agertuko litzaiguke ekuazioan. Hiru ekuazio eta lau ezezagun edukiko genituzke. Baina, badakigu korronte-sorgailutik igarotzen den korrontea 2mA-koa dela, eta horixe izango litzateke laugarren ekuazioa.

Dena den, modu horretan egin beharrean, beste bideren bat bilatuko dugu ezezagun berririk ez gehitzeko; hots, ezezagun bakarrak maila-korronteak izan daitezen. Horretarako, korronte-sorgailuaren portaera-ekuazioa erabiliko dugu, besterik gabe; kasu honetan, III mailan kokatuta dagoenez gero, I_3 da bertatik pasatzen den korrontea. Beraz:

III maila**:** $\quad I_3 = 2\ \text{mA}$

Ekuazio horiek askatuz gero, I_1, I_2, eta I_3 maila-korronteen balioak lortuko ditugu. Kasu honetan, ekuazioak berriro ordenatu eta matrizialki idatziko bagenitu, ez genuke aurrekoetan lortzen zen matrizearen ezaugarri berdinak dituen matrizerik lortuko. Dena den, errazago ebaztearren, ordenatu egingo ditugu ekuazioak.

I maila: $\quad 3I_1 + 2I_2 = 20$

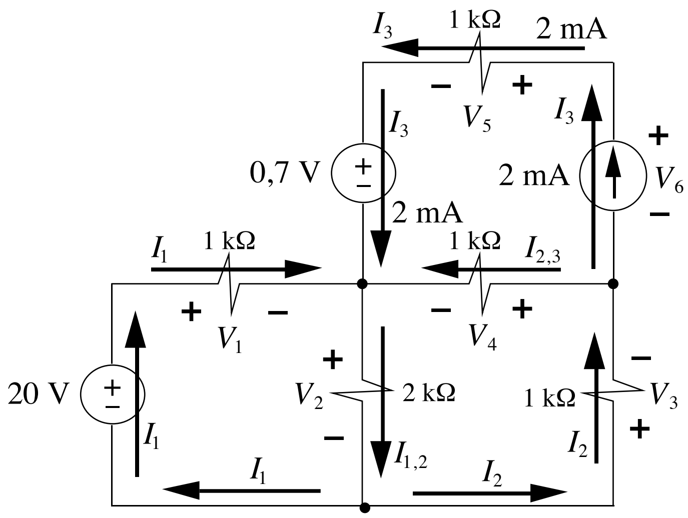
II maila: $\quad 2I_1 + 4I_2 - I_3 = 0$

III maila: $\quad I_3 = 2$

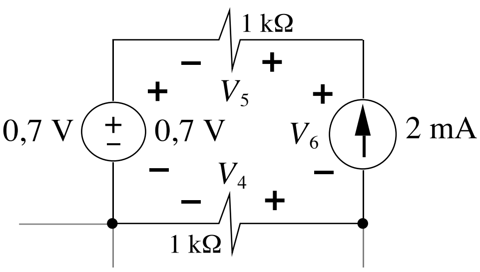
Sistema hori askatuz, hiru maila-korronteen balioak lortuko ditugu.

$$\boxed{I_1 = 9{,}5\ \text{mA}\,,\ I_2 = -4{,}25\ \text{mA}\,,\ I_3 = 2\ \text{mA}}$$

5) I_1, I_2 eta I_3 korronteen balioak ezagututa, zirkuituan agertzen diren korronte guztien balioak kalkula ditzakegu; eta, ondorioz, baita tentsio guztienak ere.



Aurreko kasuetan, korronteak kalkulatu ondoren, erresistentzien tentsioak kalkulatzeko, nahikoa zen Ohm-en legea aplikatzea. Kasu honetan, erresistentzien tentsioaz gain, korronte-sorgailuarena ere kalkulatu behar dugu. Horretarako, korronte-sorgailua barnean hartzen duen maila bat aukeratu eta KTL aplikatu beharko dugu. Kasu honetan, III mailan zehar aplikatuko dugu KTL.



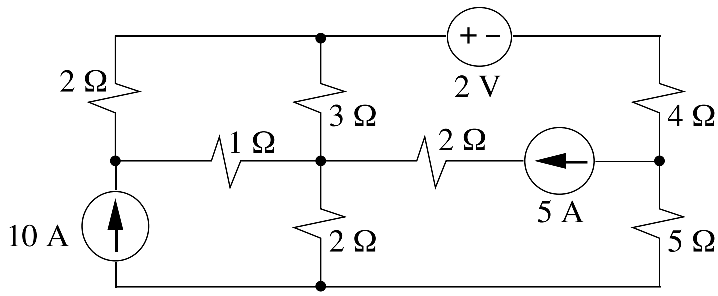
$$0,7 = -V_5 + V_6 + V_4 \quad \rightarrow$$

$$V_6 = 0,7 + V_5 - V_4$$

Hona hemen soluzioa:

Adar komunetako korronteak	**Tentsioak**
	$V_1 = 1I_1 = 9,5$ V
$I_{1,2} = I_1 + I_2 = 5,25$ mA	$V_2 = 2I_{1,2} = 10,5$ V
$I_{2,3} = I_2 - I_3 = -6,25$ mA	$V_3 = 1I_2 = -4,25$ V
	$V_4 = 1I_{2,3} = -6,25$ V
	$V_5 = 1I_3 = 2$ V
	$V_6 = 0,7 + V_5 - V_4 = 0,7 + 2 - (-6,25) = 8,95$ V

4. Ondoko zirkuituan, kalkula itzazu elementu guztietako tentsioak eta korronteak, mailen metodoa erabiliz.



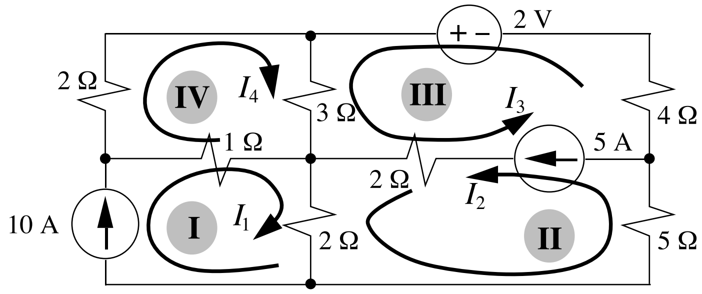
OHARRA:

Irudiko zirkuituaren berezitasuna, aurrekoekin alderatuz gero, hauxe da: adar komun batean dagoen korronte-sorgailu bat ere baduela**.** Honek ere ez dio zailtasunik gehituko zirkuituaren ebazpenari. Aurreko ariketarekin konparatuta, aldaketa bakarra korronte--sorgailuaren portaera-ekuazioa aplikatzean lorturiko ekuazioaren itxura da: aurreko ariketan, korronte-sorgailuak maila-korronte bat finkatzen zuen kanpo aldeko adar batean baitzegoen; oraingo honetan, berriz, bi mailen arteko adar komun batean egoteagatik, korronte-sorgailuak finkatzen duena adar horretako korrontea da, hots, bi maila-korronte horien batura edo kendura (noranzkoen arabera). Ikus dezagun, bada.

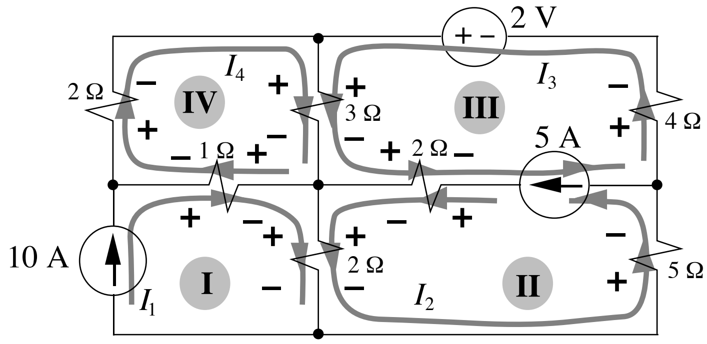
Ebazpena

1) Lehenengo pausoa mailak bilatzea da. Kasu honetan lau dira.

2) Mailak aurkitu ondoren, maila-korronteen noranzkoak finkatzea da bigarren pausoa.



3) Hirugarren pausoa erresistentzien tentsioen zeinuak jartzea izango da.



4) Aurrekoak finkatu ondoren, ekuazioak idatzi behar dira, ahal denean KTL aplikatuz, eta, bestela, korronte-sorgailuak kontuan hartuz.

ARAZOA:

IV maila da korronte-sorgailurik ez duen bakarra. Beraz, besterik gabe maila horretan soilik aplikatuko dugu KTL, ezezagun berririk gehituko ez badugu, behinik behin. Dena den, lehenengo mailan, korronte-sorgailua adar independente batean dago eta honek finkatuko du I_1 korrontearen balioa.

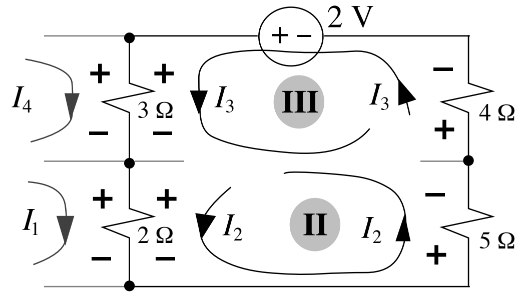
I maila: $I_1 = 10\ \mathrm{A}$

IV maila: $\left(2I_4\right) + \left(3I_4 + 3I_3\right) + \left(1I_4 - 1I_1\right) = 0$

Bi ekuazio falta zaizikigu oraindik! Lehenengoa, bigarren eta hirugarren mailen artean dagoen korronte-sorgailuak emandako informazioa erabiliz lortuko dugu**.** Adar horretatik pasatzen den korrontearen balioa, korronte-sorgailuak ematen digu. Beraz:

II/III mailak $I_2 - I_3 = 5\ \mathrm{A}$

Falta den ekuazioa lortzeko, zer egingo dugu? II eta III mailetan KTL aplikatzen badugu, 5 A-ko korronte-sorgailuaren tentsioa agertuko da. Hori saihesteko, KTL mailetan ez, baizik eta korronte-sorgailurik ez duen begizta batean aplikatuko dugu, II eta III mailen kanpoko perimetroan hain zuzen ere.



KONTUZ! Kontuan hartu behar ditugun tentsioak eta korronteak lehen finkatutako maila eta korronteei dagozkienak dira (horiek baitira kalkulatuko ditugunak).

II/III mailak $\quad (5I_2)+(4I_3)+(3I_3+3I_4)+(2I_2+2I_1)=2$

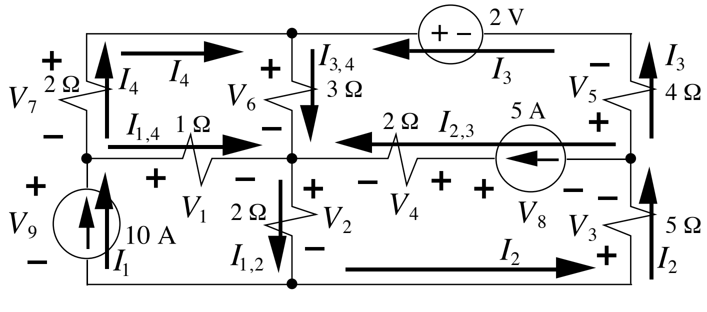
Beraz, azkenean lau ekuazio eta lau ezezaguneko sistema lortu dugu. Ekuazio horiek askatuz gero, I_1, I_2, I_3 eta I_4 maila-korronteen balioak lortuko ditugu. Errazago ebaztearren, ordenatu egingo ditugu ekuazioak.

I maila:	$I_1=10$	(korronte-sorgailuaren portaera-ekuazioa)
IV maila:	$-I_1+3I_3+6I_4=0$	
II/III mailak	$I_2-I_3=5$	(korronte-sorgailuaren portaera-ekuazioa)
II/IIImailak	$2I_1+7I_2+7I_3+3I_4=2$	(KTL II eta III mailen perimetroan)

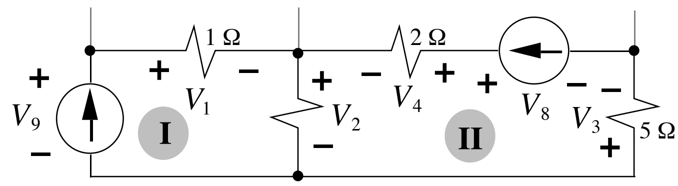
Sistema hori askatuz, lau maila-korronteen balioak lortuko ditugu.

$$\boxed{I_1=10\text{ A},\ I_2=0{,}46\text{ A},\ I_3=-4{,}64\text{ A},\ I_4=3{,}99\text{ A}}$$

5) I_1, I_2, I_3 eta I_4 korronteen balioak ezagututa, zirkuituan agertzen diren korronte guztien balioak kalkula ditzakegu eta, ondorioz, baita tentsio guztienak ere.



Erresistentzien muturren arteko tentsioak kalkulatzeko, Ohm-en legea aplikatzea nahikoa da; baina erresistentzien tentsioez gain, korronte-sorgailuenak ere kalkulatu behar ditugu. Horretarako, behar adina maila aukeratu behar dira, non bakoitzean korronte-sorgailu bat azaltzen den; eta horietan KTL aplikatu beharko dugu.



KTL I mailan: $V_9 = V_1 + V_2$

KTL II mailan: $V_8 = V_4 + V_2 + V_3$

Hona hemen soluzioa:

Adar komunetako korronteak

$I_{1,2} = I_1 + I_2 = 10,46$ A

$I_{2,3} = I_2 - I_3 = 5$ A

$I_{1,4} = I_1 - I_4 = 6,01$ A

$I_{3,4} = I_3 + I_4 = -0,65$ A

Tentsioak

$V_1 = 1I_{1,4} = 6,01$ V

$V_2 = 2I_{1,2} = 20,92$ V

$V_3 = 5I_2 = 2,3$ V

$V_4 = 2I_{2,3} = 10$ V

$V_5 = 4I_3 = -18,56$ V

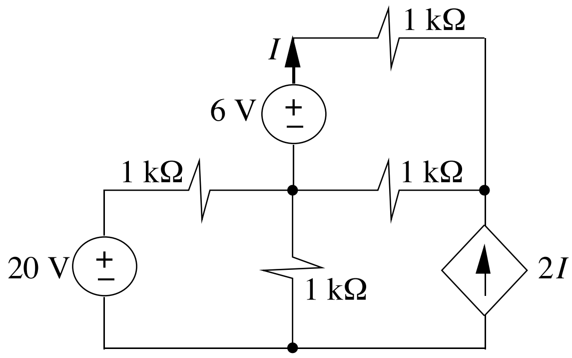
$V_6 = 3I_{3,4} = -1,95$ V

$V_7 = 2I_4 = 7,98$ V

$V_8 = V_4 + V_2 + V_3 = 33,22$ V

$V_9 = V_1 + V_2 = 26,93$ V

5. Ondoko zirkuituan, kalkula itzazu elementu guztietako tentsioak eta korronteak, mailen metodoa erabiliz.



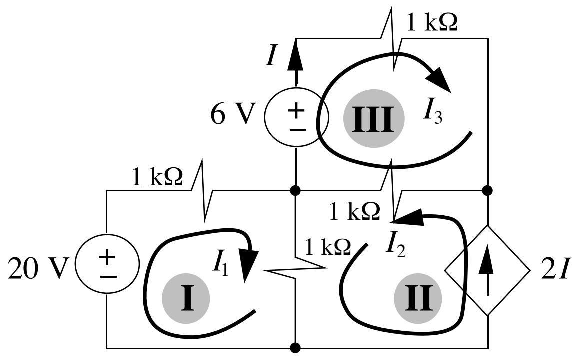
OHARRA:

Oraingo honetan, korronte-sorgailu menpeko bat dago adar independente batean. Horrek ez du ebazpidearen gaineko eraginik. Kontuan izan, korronte-sorgailu menpekotik igarotzen den korrontea ez dela erabat ezaguna (kasu honetan beste korronte baten menpe baitago)**.** Baina, dena den, korronte-sorgailuak ematen digun informazioa erabil dezakegu; korronte-sorgailuak, kokatuta dagoen adarretik igarotzen den korrontearen balioa finkatuko du, beste korronte baten menpe; eta beste korronte hori beste adar-korronte bat da, maila-korronteen konbinazio lineala, beraz**.**

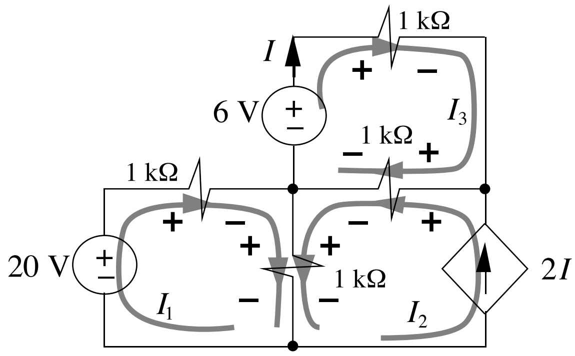
Ebazpena

1) Lehenengo pausoa mailak bilatzea da. Kasu honetan hiru dira.

2) Mailak aurkitu ondoren, maila-korronteen noranzkoak aukeratzea da hurrengo pausoa.



3) Hirugarren pausoa erresistentzien tentsioen zeinuak jartzea izango da.



4) Aurrekoak finkatu ondoren, ekuazioak idatzi behar dira.

Lehenik eta behin, zirkuitua aztertuz, agerikoa da I_3 eta I berdinak direla ($I_3 = I$). Gainerako ekuazioak honako hauek izango dira:

I maila: $(1I_1)+(1I_1+1I_2)=20$ (KTL)

II maila: $I_2=2I=2I_3$ (Korronte-sorgailuaren portaera-ekuazioa)

III maila $(1I_3)+(1I_3+1I_2)=6$ (KTL)

Hiru ekuazio eta hiru ezezagun ditugu, beraz. Ekuazioak ordenatuz, eta, ondoren askatuz, korronteen balioak lortuko ditugu zuzenean.

I maila: $2I_1+I_2=20$

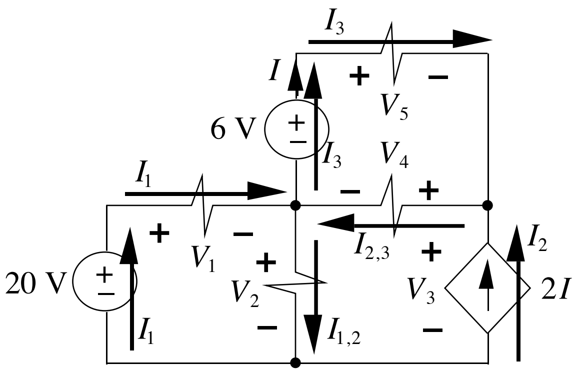
II maila: $I_2=2I_3$

III maila: $2I_3+I_2=6$

Sistem ahori askatuz, hiru maila-korronteen balioak lortuko ditugu.

$$\boxed{I_1=8{,}5\ \text{mA},\ I_2=3\ \text{mA},\ I_3=I=1{,}5\ \text{mA}}$$

5) I_1, I_2 eta I_3 korronteen balioak ezagututa, zirkuituan agertzen diren korronte guztien balioak kalkula ditzakegu; eta, ondorioz, bai eta tentsio guztienak ere.



Erresistentzien tentsioak kalkulatzeko, nahikoa da Ohm-en legea aplikatzea. Baina kasu honetan, erresistentzien tentsioez gain, korronte-sorgailu menpekoarena ere kalkulatu behar dugu. Horretarako, korronte-sorgailua barnean hartzen duen maila bat aukeratu eta KTL aplikatu beharko dugu. Esate baterako, II mailan: $V_3=V_4+V_2$.

Soluzioa:

Adar komunetako korronteak	**Tentsioak**
	$V_1=1I_1=8{,}5$ V
$I_{1,2}=I_1+I_2=11{,}5$ mA	$V_2=1I_{1,2}=11{,}5$ V
$I_{2,3}=I_2+I_3=4{,}5$ mA	$V_4=1I_{2,3}=4{,}5$ V
	$V_5=1I_3=1{,}5$ V
	$V_3=V_2+V_4=16$ V

6. Ondoko ekuazio-multzoa mailen metodoa erabiliz lortutakoa dela kontuan izanik, zein zirkuituri dagokio?

$$22I_1 + 18I_2 = 120$$

$$18I_1 + 27I_2 = 0$$

Ebazpena

Atal honetako lehenengo ariketan, mailen metodoa erabiliz lortutako ekuazioen esanahia aztertu dugu. Esanahi hori kontuan izanik eta mailen metodoa erabiliz lortutako ekuazio--multzotik abiatuz, tentsio-sorgailuek eta erresistentziek osatutako zirkuituen sintesia egin dezakegu. Horretarako, ekuazioak hartu eta mailaz maila eraikiko dugu zirkuitua.

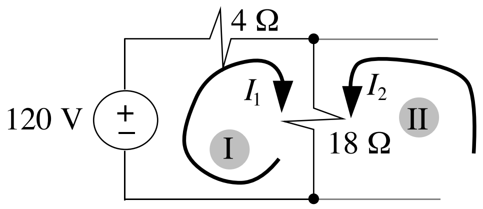
Bi ekuazioko sistema baten aurrean gaudenez, bi mailako zirkuitua izango da ariketa honen emaitza, ekuazio bakoitzak maila bat deskribatzen baitu, beste mailekin duen erlazioa eta guzti.

1) Lehenengo ekuaziotik abiatuz, lehenengo mailan agertzen diren erresistentziak, beste mailekiko adar komunetan agertzen diren erresistentziak eta maila honetako tentsio-sorgailuak zein diren ondorioztatu behar dugu.

I maila: $22I_1 + 18I_2 = 120$

Sorgailuen batura:	**120 V**	(= 120)
I mailako erresistentzia guztien batura:	**22** Ω	($22I_1$)
Erresistentziak II mailarekiko adar komunean:	**18** Ω	($18I_2$)
Erresistentzia adar independenteetan:	**4** Ω	($22 - 18$)
I_1 eta I_2 noranzko berdinarekin adar komunean		(**+** $18I_2$)

Marraz dezagun orain ezaugarri hauek guztiak betetzen dituen maila bat.

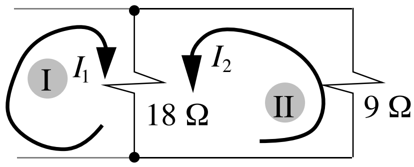


2) Bigarren ekuazioa erabiliz, berriz, bigarren mailari dagokion informazio guztia lortu behar dugu.

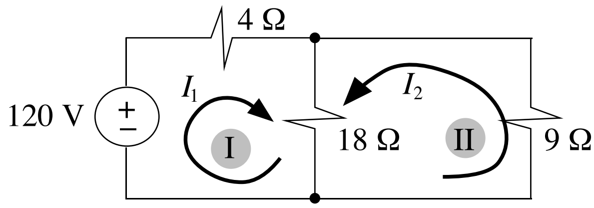
II maila: $18I_1 + 27I_2 = 0$

Sorgailuen batura:	**0 V**	(= 0 ; maila honetan ez dago sorgailurik)
II mailako erresistentzia guztien batura:	**27** Ω	($27I_2$)
Erresistentziak I mailarekiko adar komunean:	**18** Ω	($18I_1$)
Erresistentzia adar independenteetan:	**9** Ω	($27 - 18$)
I_1 eta I_2 noranzko berdinarekin adar komunean		(**+** $18I_1$)

Marraz dezagun orain ezaugarri hauek guztiak betetzen dituen maila bat.



3) Maila guztiak banaka lortu ondoren, elkartzea besterik ez zaigu falta zirkuitu osoa lortzeko. Lehenengo eta bigarren maila elkartu beharko ditugu, adar komuneko erresistentzia bi mailen artean jarriz.



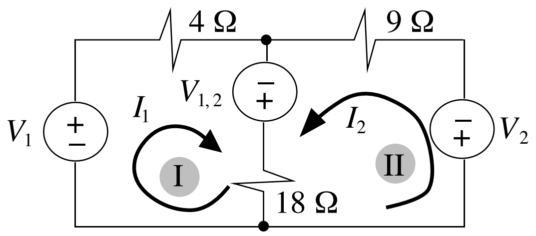
Hemen soluzio bat lortu dugu, baina azpimarratu beharra dago soluzio hau ez dela bakarra, analisian ez bezala. Izan ere, ekuazio-sistema berdina ematen duten zirkuitu desberdin asko dago.

Esate baterako, lehenengo ekuaziotik, adar independente batean I mailan 120 V-eko tentsio-sorgailu bat dagoela ondorioztatu dugu; baina hori sinplifikazio bat besterik ez da izan, jakin baitakigu balio hori dela I mailan dauden tentsio-sorgailu guztien batura.

Adibidez, I mailan bi tentsio-sorgailu daudela suposa genezake, bata adar independente batean (nahi dugun baliokoa, V_1) eta bestea II mailarekiko adar komunean (honen balioa, $V_{1,2}$, bestearenak finkatuta dago, $V_1 + V_{1,2} = 120$ betetzen baita).

Hori irakurri ondoren, irakurleak pentsa dezake soluzio hori ezinezkoa dela, II mailan ez baitago tentsio-sorgailurik!; baina hori ere sinplifikazio bat besterik ez da, ekuazioetatik ondorioztatzen den gauza bakarra hauxe baita: II mailan dauden tentsio-sorgailu guztien batura zero dela, eta horrek ez du esan nahi, inolaz ere, tentsio-sorgailurik ez dagoenik.

Adibidez, I mailarekiko adar komunean $V_{1,2}$ balioko tentsio-sorgailua baldin badago, horrek esan nahi du II mailako adar independente batean $V_{1,2}$ balio berdina duen beste tentsio-sorgailu bat ere badagoela, kontrako noranzkoan ipinita, bien batura zero izateko moduan:



I mailan:

$V_1 + V_{1,2} = 120$ V

II mailan:

$-V_2 + V_{1,2} = 0 \rightarrow V_2 = V_{1,2}$

7. Ondoko ekuazio-multzoa mailen metodoa erabiliz lortutakoa dela kontuan izanik, zein zirkuituri dagokio?

$$10I_1 + 8I_2 + 2I_3 = 40$$
$$8I_1 + 20I_2 - 6I_3 = 0$$
$$2I_1 - 6I_2 + 12I_3 = 20$$

Ebazpena

Aurreko ariketan bezala, honetan ere zirkuitu baten **sintesia** egin nahi dugu, maila--ekuazioak hartu eta mailaz maila zirkuitua eraikiz.

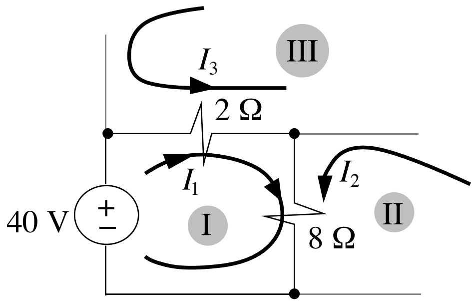
Hiru ekuazioko sistema baten aurrean gaudenez, hiru mailako zirkuitua izango da ariketa honen emaitza, ekuazio bakoitzak maila bat deskribatzen baitu, beste mailekin duen erlazioa barne.

1) Lehenengo ekuaziotik abiatuz, lehenengo mailan agertzen diren erresistentziak, beste mailekiko adar komunetan agertzen diren erresistentziak eta maila honetako tentsio-sorgailuak zein diren ondorioztatu behar dugu.

I maila: $10I_1 + 8I_2 + 2I_3 = 40$

Sorgailuen batura:	**40 V**	(= 40)
I mailako erresistentzia guztien batura:	**10 Ω**	($10I_1$)
Erresistentziak II mailarekiko adar komunean:	**8 Ω**	($8I_2$)
Erresistentziak III mailarekiko adar komunean:	**2 Ω**	($2I_3$)
Erresistentzia adar independenteetan:	**0 Ω**	(10 – 8 – 2)
I_1 eta I_2 noranzko berdinarekin adar komunean		(**+** $8I_2$)
I_1 eta I_3 noranzko berdinarekin adar komunean		(**+** $2I_3$)

Marraz dezagun orain ezaugarri horiek guztiak betetzen dituen maila bat.

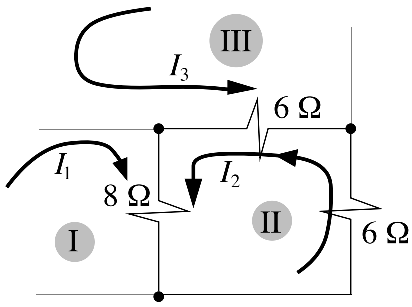


2) Bigarren ekuazioa erabiliz, berriz, bigarren mailari dagokion informazio guztia lortu behar dugu.

II maila: $8I_1 + 20I_2 - 6I_3 = 0$

Sorgailuen batura: **0 V**		(= 0; maila honetan ez dago sorgailurik)
II mailako erresistentzia guztien batura:	**20** Ω	$(20I_2)$
Erresistentziak I mailarekiko adar komunean:	**8** Ω	$(8I_1)$
Erresistentziak III mailarekiko adar komunean:	**6** Ω	$(6I_3)$
Erresistentzia adar independenteetan:	**6** Ω	$(20-8-6)$
I_1 eta I_2 noranzko berdinarekin adar komunean		$(+\,8I_1)$
I_3-k I_2-ren kontrako noranzkoa du adar komunean		$(-6I_3)$

Marraz dezagun orain ezaugarri hauek guztiak betetzen dituen maila bat.

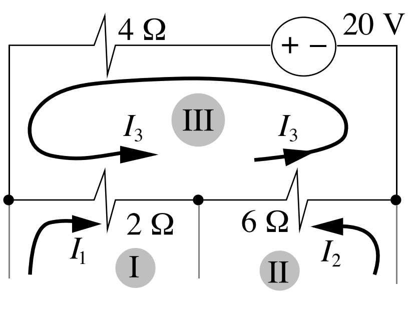


3) Hirugarren ekuazioa erabiliz, azkenik, hirugarren mailari dagokion informazio guztia lortuko dugu.

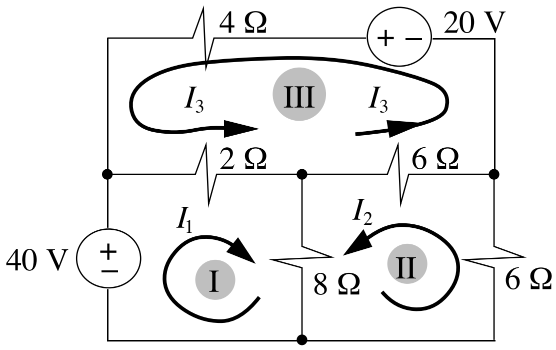
III maila $\quad 2I_1 - 6I_2 + 12I_3 = 20$

Sorgailuen batura:	**20 V**	(= 20)
III mailako erresistentzia guztien batura:	**12** Ω	$(12I_3)$
Erresistentziak I mailarekiko adar komunean:	**2** Ω	$(2I_1)$
Erresistentziak II mailarekiko adar komunean:	**6** Ω	$(6I_2)$
Erresistentzia adar independenteetan:	**4** Ω	$(12-2-6)$
I_1 eta I_3 noranzko berdinarekin adar komunean		$(+\,2I_1)$
I_2-k I_3-ren kontrako noranzkoa du adar komunean		$(-6I_2)$

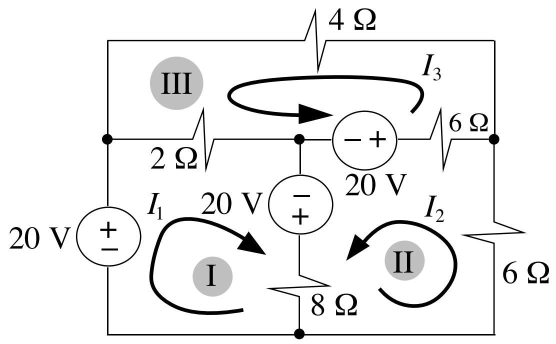
Marraz dezagun orain ezaugarri horiek guztiak betetzen dituen maila bat.



4) Hiru mailak banan-banan lortu ondoren, elkartzea besterik ez zaigu falta, zirkuitu osoa lortzeko. Hiru emaitza partzialetan lortutakoa hartu beharko dugu kontuan:



Berriro ere azpimarratu behar dugu, soluzio hori ez dela bakarra. Ariketa moduan, aurreko ariketan aipatutakoaren ildotik, irakurleak egiazta dezake honako hau ere soluzioa dela, eta beste soluzio batzuk ere bila ditzake:



8 Ondoko ekuazio-multzoa mailen metodoa erabiliz lortutakoa dela kontuan izanik, zein zirkuituri dagokio?

$$\begin{aligned} 8I_1 + 6I_2 \quad\quad\quad &= 4 \\ 6I_1 + 15I_2 - 6I_3 &= 4 \\ -6I_2 + 10I_3 &= 5 \end{aligned}$$

Ebazpena

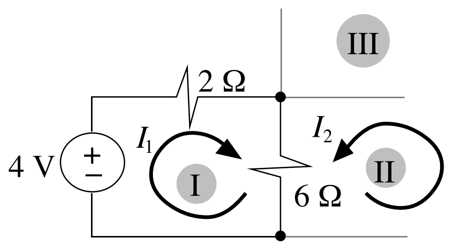
Ekuazioak hartu eta mailaz maila zirkuitua eraiki beharko dugu aurreko kasuetan egin dugun moduan. Hiru ekuazioko sistema baten aurrean gaudenez, hiru mailako zirkuitua izango da ariketa honen emaitza, ekuazio bakoitzak maila bat deskribatzen baitu, beste mailekin duen erlazioa barne.

1) Lehenengo ekuaziotik abiatuz, lehenengo mailan agertzen diren erresistentziak, beste mailekiko adar komunetan agertzen diren erresistentziak eta maila honetako tentsio-sorgailuak zein diren ondorioztatu behar dugu.

I maila: $8I_1 + 6I_2 = 4$

Sorgailuen batura:	**4 V**	(= 4)
I mailako erresistentzia guztien batura:	**8 Ω**	($8I_1$)
Erresistentziak II mailarekiko adar komunean:	**6 Ω**	($6I_2$)
Erresistentziak III mailarekiko adar komunean:	**ez dago**	($0I_3$)
Erresistentzia adar independenteetan:	**2 Ω**	(8 – 6)
I_1 eta I_2 noranzko berdinarekin adar komunean		(**+** $6I_2$)

Marraz dezagun orain ezaugarri horiek guztiak betetzen dituen maila bat.

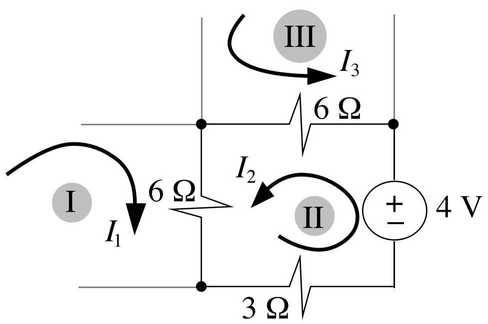


2) Bigarren ekuazioa erabiliz, berriz, bigarren mailari dagokion informazio guztia lortu behar dugu.

II maila: $6I_1 + 15I_2 - 6I_3 = 4$

Sorgailuen batura:	**4 V**	(= 4)
Erresistentzien batura:	**15 Ω**	($15I_2$)
Erresistentziak I mailarekiko adar komunean:	**6 Ω**	($6I_1$)
Erresistentziak III mailarekiko adar komunean:	**6 Ω**	($6I_3$)
Erresistentzia adar independenteetan:	**3 Ω**	(15 – 6 – 6)
I_1 eta I_2 noranzko berdinarekin adar komunean		(**+** $6I_1$)
I_3-k I_2-ren kontrako noranzkoa du adar komunean		($-6I_3$)

Marraz dezagun orain ezaugarri horiek guztiak betetzen dituen maila bat.

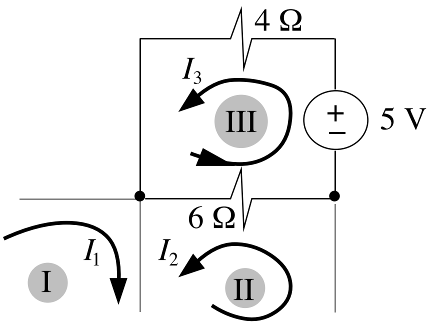


3) Hirugarren ekuazioa erabiliz, azkenik, hirugarren mailari dagokion informazio guztia lortuko dugu.

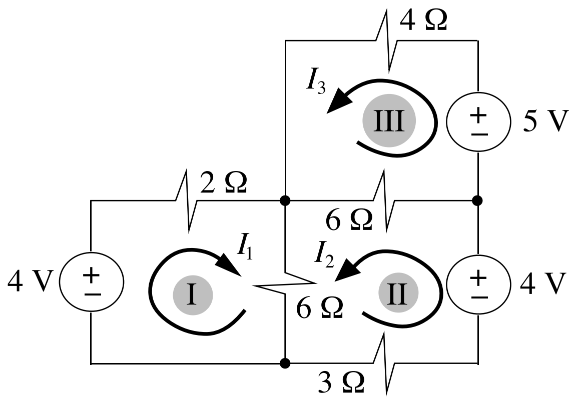
III maila $\quad -6I_2 + 10I_3 = 5$

Sorgailuen batura:	**5 V**	(= 5)
III mailako erresistentzia guztien batura:	**10 Ω**	($10I_3$)
Erresistentziak I mailarekiko adar komunean:	**ez dago**	
Erresistentziak II mailarekiko adar komunean:	**6 Ω**	($6I_2$)
Erresistentzia adar independenteetan:	**4 Ω**	(10 –6)
I_2-k I_3-ren kontrako noranzkoa du adar komunean		($-6I_2$)

Marraz dezagun orain ezaugarri horiek guztiak betetzen dituen maila bat.

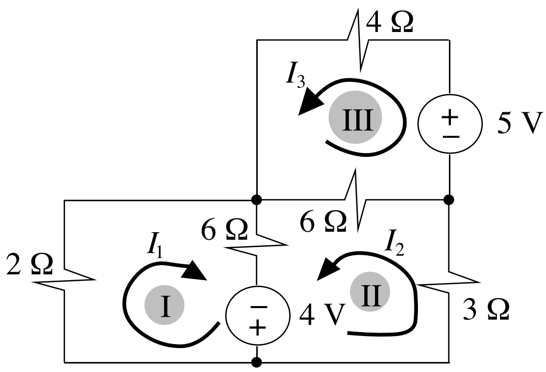


4) Hiru mailak banan-banan lortu ondoren, elkartzea besterik ez zaigu falta, zirkuitu osoa lortzeko. Hiru emaitza partzialetan lortutakoa hartu beharko dugu kontuan.



Hemen ere soluzio bat lortu dugu, baina ekuzioak geldiro aztertuz gero, berriro ere soluzio hau bakarra ez dela konturatuko gara.

Lehenengo eta bigarren mailak aztertzen baditugu, bietan 4 V-eko tentsio-sorgailua dagoela ikusiko dugu eta gainera zeinu berekoa. Zer adierazten du horrek? Bada, 4 V-eko tentsio-sorgailu hori lehenengo eta bigarren mailen arteko adar komunean jar daitekeela, adar independenteetan jarri ordez. Horrela, ondoko zirkuitua lortuko genuke:



Zalantzak argitzeko eta bi zirkuituen portaerak berdinak direla ziurtatzeko, zirkuituetatik abiatu eta mailen ekuazioak idatziz gero, begi-bistakoa da ekuazio berdinak lortzen direla bi zirkuituetan:

I maila: $(2I_1)+(6I_1+6I_2)=4 \quad \rightarrow \quad 8I_1+6I_2=4$

II maila: $(6I_2+6I_1)+(3I_2)+(6I_2-6I_3)=4 \quad \rightarrow \quad 6I_1+15I_2-6I_3=4$

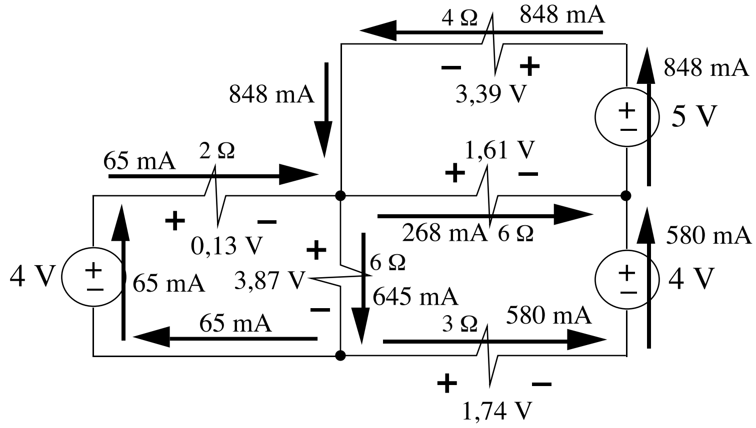
III maila: $(4I_3)+(6I_3-6I_2)=5 \quad \rightarrow \quad -6I_2+10I_3=5$

Lortutako ekuazioak berdinak dira bi kasuetan; izan ere ariketaren hasieran emandakoak dira. Beraz, bi zirkuituen portaera berdina dela esan dezakegu. Kalkula dezagun zirkuituen soluzioa eta azter dezagun zer gertatzen den potentziarekin, sorgailuek emandako potentziekin batik bat.

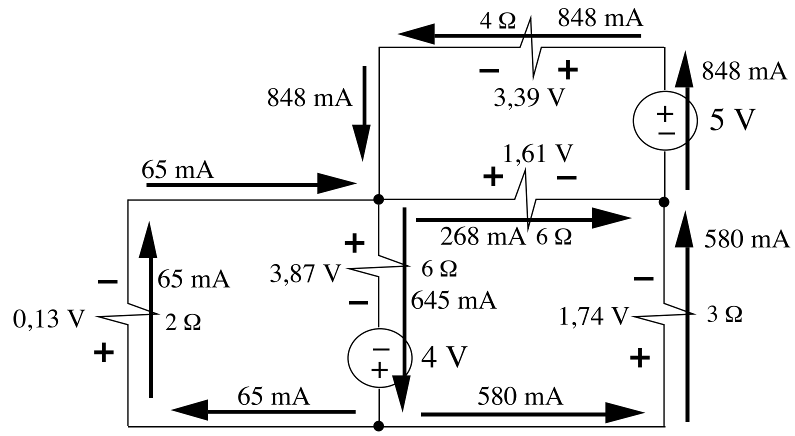
$$\boxed{I_1 = 65\text{ mA},\ I_2 = 580\text{ mA},\ I_3 = 848\text{ mA}}$$

Hiru korronte hauetan oinarrituz, zirkuituaren soluzioa kalkula dezakegu bi kasuetarako:

a) Bi sorgailu jarriz:



b) Adar komunean sorgailu bakarra jarriz:



Elementu guztietako korronteak eta tentsioak —eta ondorioz potentziak ere— berdinak dira bi kasuetan, 4V-eko tentsio-sorgailuarenak izan ezik, noski. Baina azter dezagun zer gertatzen den potentziarekin 4 V-eko sorgailu hauen kasuan.

a kasuan:

I mailako sorgailua: $P_{4\text{V}}^{\text{I}} = 4\ \text{V} \cdot 0{,}065\ \text{mA} = 0{,}26\ \text{W}$, emandakoa

II mailako sorgailua: $P_{4\text{V}}^{\text{II}} = 4\ \text{V} \cdot 0{,}58\ \text{mA} = 2{,}32\ \text{W}$, emandakoa

4 V-eko bi tentsio-sorgailuek emandako potentzia osoa: $\Sigma P_{4\text{V}} = 2{,}58\ \text{W}$

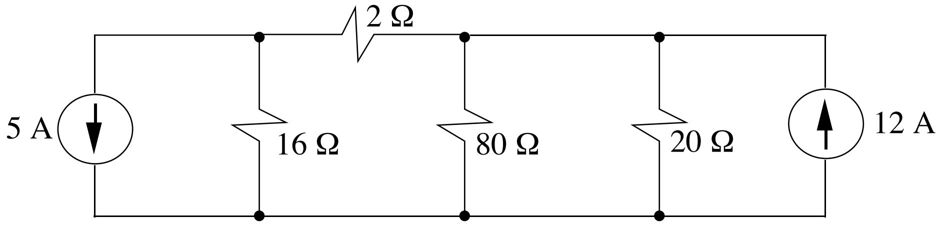
b kasuan:

I/II mailak: $P_{4\text{V}} = 4\ \text{V} \cdot 0{,}645\ \text{mA} = 2{,}58\ \text{W}$, emandakoa

Alegia, a zirkuituan bi sorgailuek ematen duten potentziaren batura eta b zirkuituan agertzen den 4 V-eko sorgailu bakarrak ematen duen potentzia berdinak dira. Argiago geratzen da honekin bi zirkuituak baliokideak direla.

4.2. Korapiloen metodoa

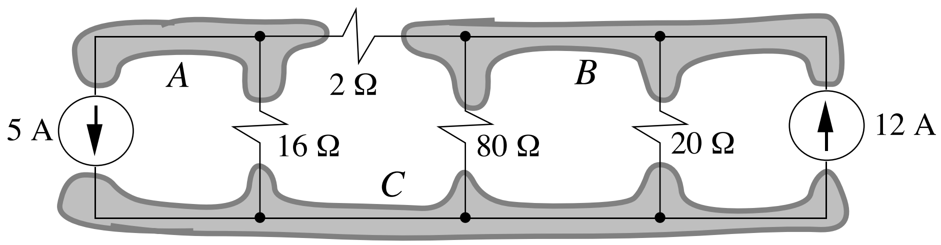
1. Lor ezazu ondoko zirkuituaren soluzioa, korapiloen metodoa erabiliz.



Ebazpena

Metodoari jarraituz, pausoz pauso ebatziko dugu zirkuitua.

1) Lehenengo pausoa zirkuituko korapiloak identifikatzea da. Agerikoa da korapilo-kopurua hiru dela.

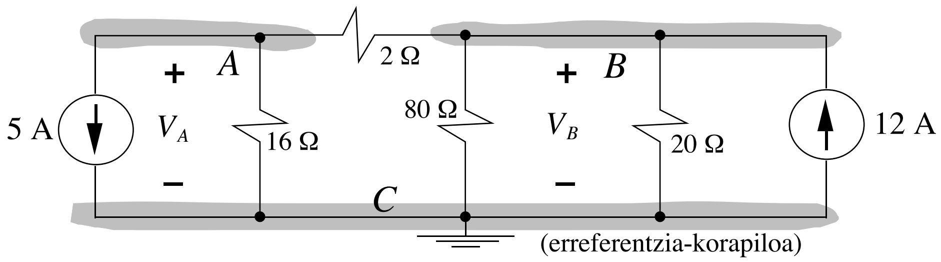


2) Aukeratu korapiloetako bat erreferentzia-korapilo gisa. Komenigarriena, adar gehien konektatuak dituen korapiloa aukeratzea da.

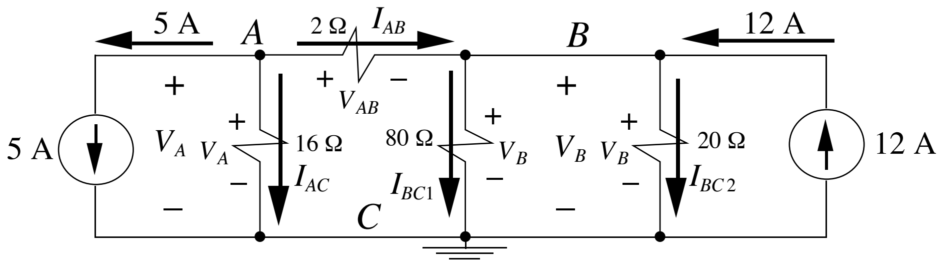
Kasu honetan argi dago *C* korapiloa dela adar gehien konektatzen dituena, bost hain zuzen ere; *C* korapiloa izango da, beraz, gure erreferentzia-korapiloa.

3) Definitu korapiloen tentsioak irudian, erreferentzia-korapiloarentzat ez beste korapilo guztientzat.

Kasu honetan, *C* erreferentzia-korapiloaz gain beste bi korapilo agertzen direnez, bi horien tentsioak definitu beharko ditugu.



4) Idatzi adar guztietako korronteak korapiloen tentsioen funtzioan, korronte-sorgailuak dituzten adarretan izan ezik, korronte horiek ezagunak baitira. Horretarako, marraz ditzagun adar guztietako korronteak lehengo irudian.



Erresistentzietako korronte guztiak korapiloen tentsioen menpe idatziko ditugu; modu horretan bi ezezagun baino ez ditugu izango: V_A eta V_B korapilo-tentsioak. Erresistentzia guztietan Ohm-en legea aplikatuz:

$$V_{16\Omega} = V_A = 16 I_{AC}\ ,\ V_{80\Omega} = V_B = 80 I_{BC1},\ V_{20\Omega} = V_B = 20 I_{BC2},\ V_{2\Omega} = V_{AB} = 2 I_{AB}$$

Agerikoa da 2 Ω-eko erresistentziaren kasuan ez direla korapilo-tentsioak (V_A eta V_B) agertzen, V_{AB} baizik, hots, *A* eta *B* korapiloen artekoa. Hori saihesteko, gogora dezagun bi punturen arteko potentzial-diferentziaren definizioa edo aplika dezagun KTL 2 Ω-eko erresistentzia barnean hartzen duen edozein begiztatan:

$$V_{AB} = V_A - V_B$$

Ekuazio horiek guztiak konbinatuz, adar-korronte guztiak V_A eta V_B-ren funtzioan idatz ditzakegu:

$$I_{AC} = \frac{V_A}{16},\ I_{BC1} = \frac{V_B}{80},\ I_{BC2} = \frac{V_B}{20},\ I_{AB} = \frac{V_A - V_B}{2}$$

Orain irakurleak oso garbi izan beharko luke, adar-korronteen ekuazio horiek zuzen zuzenean lortzen direla korapiloen tentsioak kontuan hartuta, Ohm-en legea zuzenean aplikatuz.

5) Aplikatu Kirchhoff-en korronteen legea (KKL) korapiloetan**.** Kasu honetan, Kirchhoff-en korronteen legea *A* eta *B* korapiloetan aplikatu beharko dugu.

KKL *A* korapiloan: $I_{AB} + I_{AC} + 5 = 0 \quad \rightarrow \quad \frac{V_A - V_B}{2} + \frac{V_A}{16} + 5 = 0$

KKL *B* korapiloan: $I_{BC1} + I_{BC2} - I_{AB} = 12 \quad \rightarrow \quad \frac{V_B}{80} + \frac{V_B}{20} + \frac{V_B - V_A}{2} = 12$

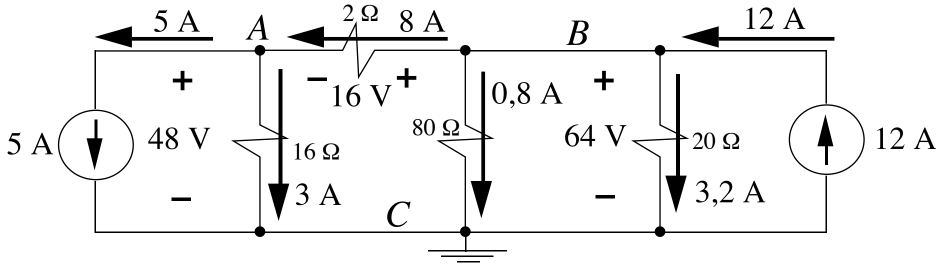
Hots, bi ezezaguneko bi ekuazioko sistema lortu dugu.

6) Ebatzi ekuazioak eta lortu zirkuituko tentsio eta korronte guztien balioak.

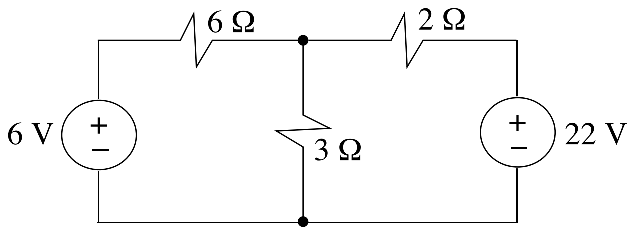
Hona hemen soluzioa: **Tentsioak**: $V_A = 48\ \text{V},\ V_B = 64\ \text{V},\ V_{AB} = -16\ \text{V}$

Korronteak: $I_{AC} = 3\ \text{A},\ I_{AB} = -8\ \text{A},\ I_{BC1} = 0{,}8\ \text{A},\ I_{BC2} = 3{,}2\ \text{A}$

Emaitza grafikoki azaltzen badugu:



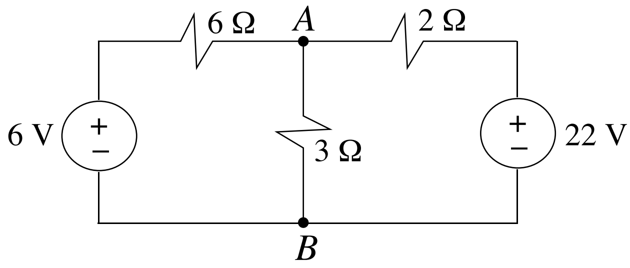
2. Lor ezazu ondoko zirkuituaren soluzioa, korapiloen metodoa erabiliz.



Ebazpena

Aurreko atalean deskribatutako moduan, pausoz pauso ebatziko dugu zirkuitua, baina oraingo honetan korronte-sorgailurik ez dago, eta tentsio-sorgailuak daude zirkuituan. Ikus dezagun, bada, nola erabili korapiloen metodoa honelako kasuetan.

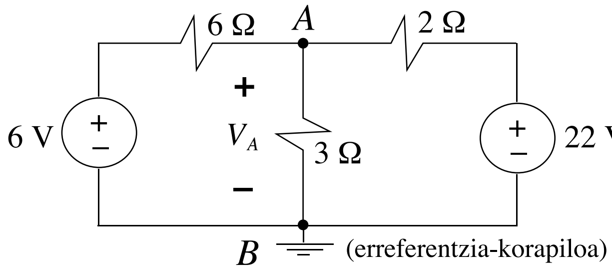
1) Lehenengo pausoa, zirkuituko korapiloak identifikatzea da. Zirkuitu sinple honetan, bi korapilo baino ez dira ageri.



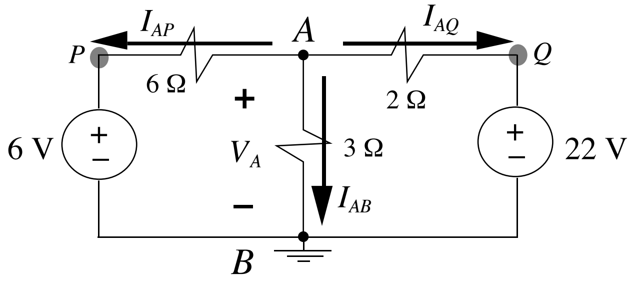
2) Aukeratu korapiloetako bat erreferentzia-korapilo gisa. Komenigarriena, adar gehien konektatuak dituen korapiloa aukeratzea da.

Kasu honetan, bi korapiloek hiruna adar konektatzen dituztenez gero, edozein aukeratuko dugu: normalean, behe aldekoa aukeratu ohi da, hots, *B* korapiloa.

3) Definitu korapiloen tentsioak irudian, erreferentzia-korapiloarentzat ez beste korapilo guztientzat. Kasu honetan tentsio bakarra definitu beharko dugu, *A* korapiloarena, hain zuzen ere, V_A.



4) Idatzi adar guztietako korronteak korapiloen tentsioen funtzioan**.** Horretarako marraz ditzagun korronte hauek lehengo irudian.



Kasu honetan korapilo-tentsio bakarra dugu: V_A. Beraz, korronte guztiak honen menpe idaztea lortu beharko dugu. Ohm-en legea aplikatuz:

$$I_{AP} = \frac{V_{AP}}{6\ \Omega} = \frac{V_A - V_P}{6\ \Omega} = \frac{V_A - 6\ \text{V}}{6\ \Omega},\ I_{AQ} = \frac{V_{AQ}}{2\ \Omega} = \frac{V_A - V_Q}{2\ \Omega} = \frac{V_A - 22\ \text{V}}{2\ \Omega}$$

$$I_{AB} = \frac{V_{AB}}{3\ \Omega} = \frac{V_A}{3\ \Omega}$$

Ekuazio horiek, tentsio-sorgailuen portaera-ekuazioa kontuan hartuz lortu ditugu; hots, tentsio-sorgailu batek bere muturren arteko tentsioa finkatzen du. Kasu honetan, beraz: $V_P = V_{PB} = 6$ V eta $V_Q = V_{QB} = 22$ V.

5) Aplikatu KKL korapiloetan. Kasu honetan, korapilo bakar batean aplikatu behar dugu KKL, *A* korapiloan hain zuzen ere.

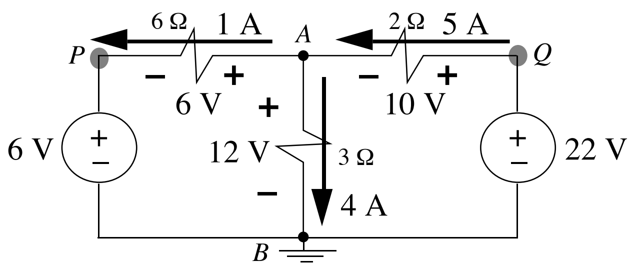
KKL *A* korapiloan: $$\frac{V_A - 6}{6} + \frac{V_A - 22}{2} + \frac{V_A}{3} = 0$$

Hots, ezezagun bakarreko ekuazio bat lortu dugu.

6) Korapiloen tentsioen balioak eta aurretik lortutako espresioak erabiliz, zirkuituaren soluzioa lortuko dugu.

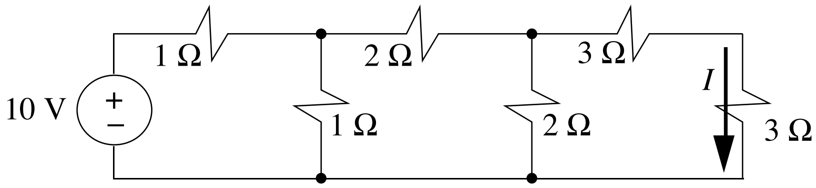
$$\boxed{V_A = 12\ \text{V}}$$

Eta baita zirkuituaren soluzio osoa ere:



4.3. Linealtasuna

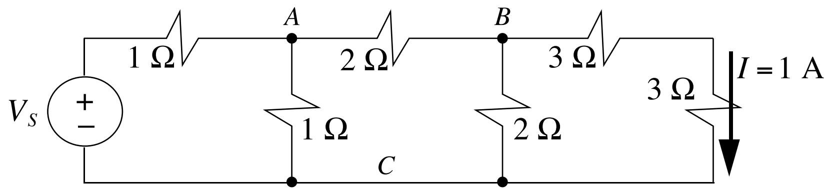
1. Irudiko zirkuituan, kalkula ezazu I korrontea.



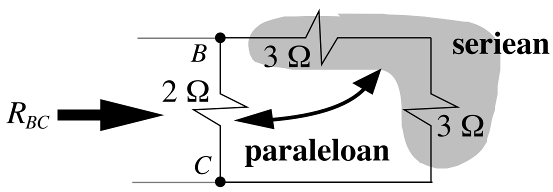
Ebazpena

Zirkuitua mailaz maila ebatzi ordez, eskuineko adarreko I korronteari balio bat emango diogu (esate baterako, 1 A) eta honek ematen digun informazioa erabiliz, adarrez adar eta mailaz maila atzera joz, erraz kalkulatuko dugu, I korrontearen balioa suposatu duguna izateko tentsio-sorgailuak eduki beharko zukeen balioa. Hori jakinik, jatorrizko tentsio-sorgailuaren balioa ezaguna denez, erabili beharreko proportzionaltasun konstantea kalkula dezakegu.

Demagun, beraz, I = 1 A dela eta horretan oinarrituz kalkula ditzagun gainontzeko korronteei eta 10 V-eko sorgailuari dagozkien balioak.



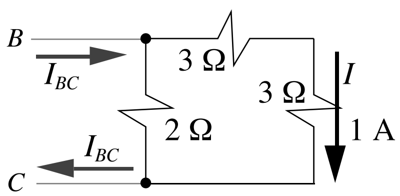
Horretarako, korronte- eta tentsio-zatitzaileak erabiliko ditugu. Lehenik eta behin, agerikoa da eskuin aldeko 3 Ω-eko bi erresistentziak seriean daudela eta biek osatutako serie--elkarketa hori paraleloan dagoela 2 Ω-eko erresistentzia bertikalarekin:



$$R_{BC} = \frac{(3\ \Omega + 3\ \Omega) \cdot 2\ \Omega}{(3\ \Omega + 3\ \Omega) + 2\ \Omega}$$

$$R_{BC} = 1{,}5\ \Omega$$

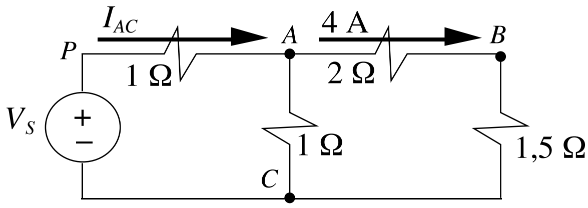
Hots, korronte-zatitzailearen formula erabiliz, eskuineko bi adar horietara B korapiloaren ezker aldetik iritsiko den korronte osoa kalkula dezakegu, zuzen zuzenean:



$$I_{3\Omega} = I = \frac{2\ \Omega}{(3\ \Omega + 3\ \Omega) + 2\ \Omega} \cdot I_{BC} \quad \rightarrow$$

$$I_{BC} = \frac{(3\ \Omega + 3\ \Omega) + 2\ \Omega}{2\ \Omega} \cdot 1\ \text{A} \rightarrow \ I_{BC} = 4\ \text{A}$$

Orain daukagun zirkuitu baliokidea, honako hau da:

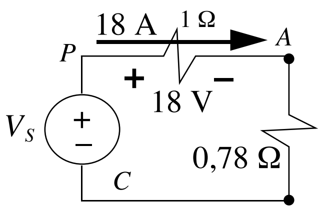


Berriro ere agerikoa da 2 Ω-eko eta 1,5 Ω-eko erresistentziek osatutako serie-elkarketa eta 1 Ω-eko erresistentzia bertikala paraleloan daudela, hots, korronte-zatitzailea osatzen dutela horiek ere. Ondorioz, lehen erabilitako formula bera erabil dezakegu, paralelo-elkarketa horretara iritsiko den I_{AC} korronte osoa kalkulatzeko:

$$I_{AC} = \frac{(2\ \Omega + 1,5\ \Omega) + 1\ \Omega}{1\ \Omega} \cdot 4\ \text{A} = 18\ \text{A}$$

Orain, 1 Ω-eko erresistentzia horizontalaren muturren arteko tentsioa kalkula dezakegu Ohm-en legea aplikatuz: V_{PA} = 18 V.

Bestetik, 1 Ω-eko erresistentzia horizontala eta besteen erresistentzia baliokidea seriean daudela kontuan hartuz, V_S tentsio-sorgailuaren balioa kalkulatzeko, tentsio-zatitzailearen formula erabil dezakegu:



$$V_{PA} = \frac{R_{PA}}{R_{osoa}} \cdot V_S \qquad \rightarrow \qquad V_S = \frac{R_{osoa}}{R_{PA}} \cdot V_{PA}$$

$$V_S = \frac{1\ \Omega + 0,78\ \Omega}{1\ \Omega} \cdot 18\ \text{V} = 32\ \text{V}$$

Beraz, dagoeneko zirkuituaren soluzio bat kalkulatu dugu, baina ez jatorrizko zirkuituarena: eskuineko adarretik 1 A-ko korrontea igaro dadin, tentsio-sorgailuaren balioak V_S = 32 V izan behar du eta jatorrizko zirkuituan, berriz, tentsio-sorgailuaren balioa 10 V-ekoa da.

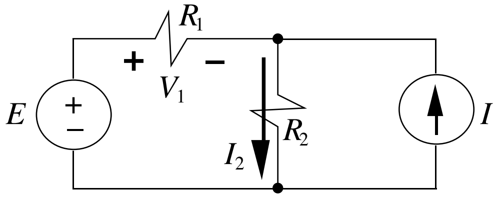
Analizatu dugun zirkuituko osagai guztiak linealak direla kontuan hartuz, linealtasun printzipioa aplika dezakegu, hots, proportzionaltasun konstantea zein den kalkula dezakegu, hiruko erregela eginez:

$$V_S = 32\ \text{V} \quad \rightarrow \quad I = 1\ \text{A}$$
$$V_S = 10\ \text{V} \quad \rightarrow \quad I = ?$$

$$I = \frac{10\ \text{V}}{32\ \text{V}} \cdot 1\ \text{A} = \frac{10}{32}\ \text{A} = \frac{5}{16}\ \text{A} \qquad \rightarrow \qquad \boxed{I = 312,5\ \text{mA}}$$

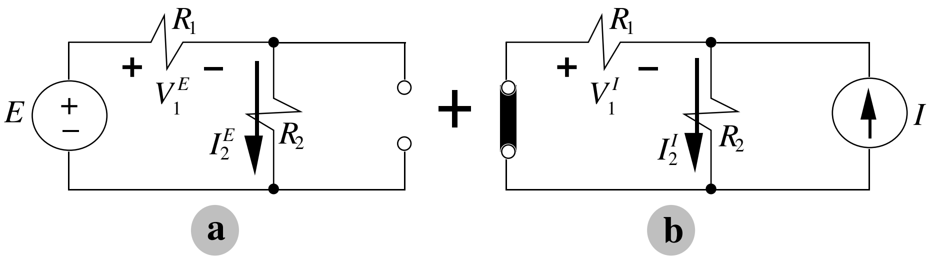
4.4. Gainezarpen printzipioa

1. Kalkula itzazu ondoko zirkuituan V_1 tentsioaren balioa eta I_2 korrontearen balioa, gainezarpen printzipioa erabiliz.



Ebazpena

Azalpen teorikoan adierazitako moduan, zirkuituaren soluzioa soluzio partzialen batura da. Beraz, zirkuitu honetan V_1 eta I_2 kalkulatu ahal izateko, sorgailu bakarreko bi zirkuitu ebatzi beharko ditugu, bat tentsio-sorgailua soilik duena eta bestea korronte-sorgailua soilik duena:

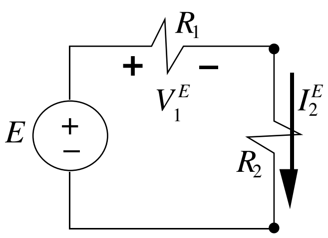


Bi zirkuitu hauetan lortutako soluzio partzialak batuz, V_1 eta I_2-ren balioak lortuko ditugu:

$$V_1 = V_1^E + V_1^I \text{ eta } I_2 = I_2^E + I_2^I$$

a) Lehenengo soluzio partziala, jatorrizko zirkuituan korronte-sorgailua zirkuitu irekiaz ordezkatzean geratzen zaigun zirkuitua ebatziz lortuko dugu (goiko irudiko ezkerreko zirkuitua, *a*).

Kasu honetan, sorgailu bakarra dago zirkuituan eta gainera, maila bakar bateko zirkuitua da:



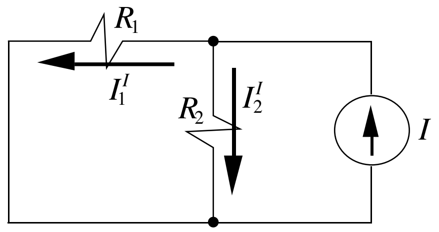
KTL mailan: $E = R_1 I_2^E + R_2 I_2^E \rightarrow \boxed{I_2^E = \dfrac{E}{R_1 + R_2}}$

R_1 erresistentzian Ohm-en legea aplikatuz:

$$V_1^E = R_1 I_2^E \qquad \rightarrow \qquad \boxed{I_2^E = \frac{E}{R_1 + R_2}}$$

b) Bigarren soluzio partziala, jatorrizko zirkuituan tentsio-sorgailua zirkuitulaburraz ordezkatzean geratzen zaigun zirkuitua ebatziz lortuko dugu (lehengo irudiko eskuineko zirkuitua, *b*).

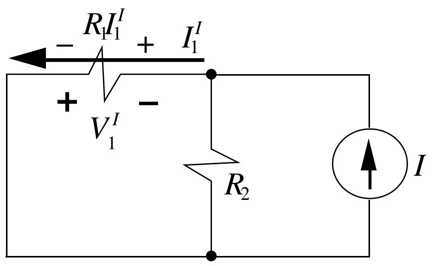
Orain ere, ebatzi behar duguna sorgailu bakarreko zirkuitua da, kasu honetan korronte-sorgailua. R_1 eta R_2 erresistentziak paraleloan egonik eta korronte osoa ezaguna izanik, korronte-zatitzailearen formula erabil dezakegu erresistentzia bakoitzetik igarotzen den korrontea kalkulatzeko:



$$\boxed{I_2^I = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot I}$$

$$I_1^I = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot I$$

Ohm-en legea aplikatuz R_1 erresistentziaren muturren arteko tentsioa kalkula dezakegu. Ondoko irudian agerikoa da tentsio horren positiboa eskuin aldean egongo dela, korrontea ezkerrerantz igarotzen baita. Guk kalkulatu behar dugun tentsioa kontrako noranzkoan doanez gero, negatiboa aterako zaigu:



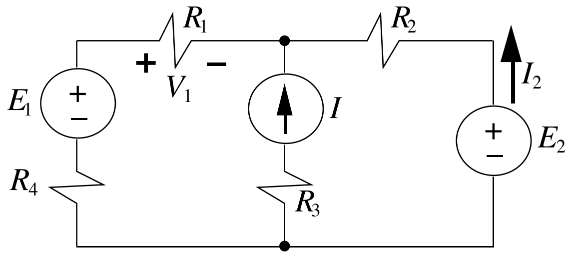
$$V_1^I = -R_1 I_1^I$$

$$\boxed{V_1^I = -\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \cdot I}$$

Dagoeneko soluzio partzial guztiak lortu ditugu. Orain, azken soluzioa topatzeko, horiek batzea besterik ez zaigu falta.

a) zirkuituan	$I_2^E = \frac{E}{R_1 + R_2}$	$V_1^E = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot E$
b) zirkuituan	$I_2^I = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot I$	$V_1^I = -\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \cdot I$
Emaitza osoa:	$I_2 = I_2^E + I_2^I$ $\boxed{I_2 = \frac{E + R_1 I}{R_1 + R_2}}$	$V_1 = V_1^E + V_1^I$ $\boxed{V_1 = R_1 \cdot \frac{E - R_2 I}{R_1 + R_2}}$

2. Kalkula itzazu ondoko zirkuituan V_1 tentsioaren balioa eta I_2 korrontearen balioa, gainezarpen printzipioa erabiliz.



Ebazpena

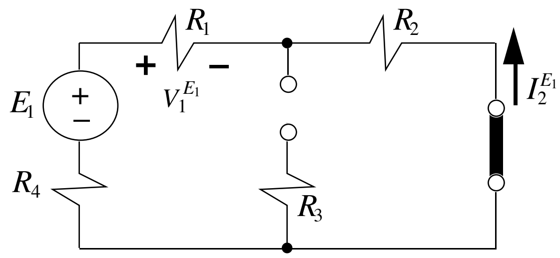
Azalpenetan adierazitako moduan, zirkuituaren soluzioa soluzio partzialen batura da. Beraz, zirkuitu honetan V_1 eta I_2 kalkulatu ahal izateko, sorgailu bakarreko hiru zirkuitu ebatzi beharko ditugu: bi, tentsio-sorgailu bana soilik dutenak, eta bestea, korronte-sorgailua soilik duena.

Hiru zirkuitu horietan lortutako soluzio partzialak batuz, V_1 eta I_2-ren balioak lortuko ditugu:

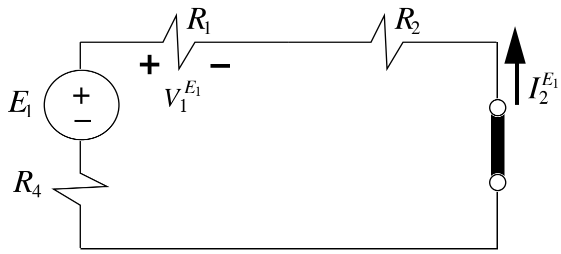
$$V_1 = V_1^{E_1} + V_1^{I} + V_1^{E_2} \quad \text{eta} \quad I_2 = I_2^{E_1} + I_2^{I} + I_2^{E_2}$$

a) Lehenengo soluzio partziala, jatorrizko zirkuituan E_1 tentsio sorgailua bakarrik utziz —hau da, beste tentsio-sorgailua zirkuitulaburraz ordezkatuz eta korronte--sorgailua zirkuitu irekiaz ordezkatuz— geratzen zaigun zirkuitua ebatziz lortuko dugu.

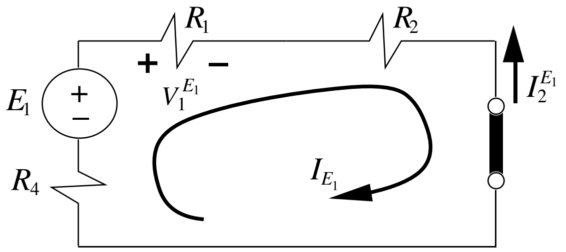
a



Kasu honetan, sorgailu bakarra dago zirkuituan; eta, gainera, maila bakar bateko zirkuitua da, erdiko adarretik ez baita korronterik igarotzen, zirkuitu irekia izateagatik:



Maila honetan KTL aplikatuz, R_2-tik pasatzen den korrontearen balioa eta, hori ezagutu eta gero, R_1-en tentsioa ere kalkula ditzakegu. Sorgailu bakarra dagoenez gero, sorgailuak finkatzen du mailatik igaroko den korrontearen noranzkoa, sorgailua baita elementu aktibo bakarra. Hori dela eta, korrontea erlojuaren orratzen noranzkoan igaroko da, ondoko irudian islatu dugun legez (kalkulatu behar dugun korrontearen kontrako noranzkoan, beraz).



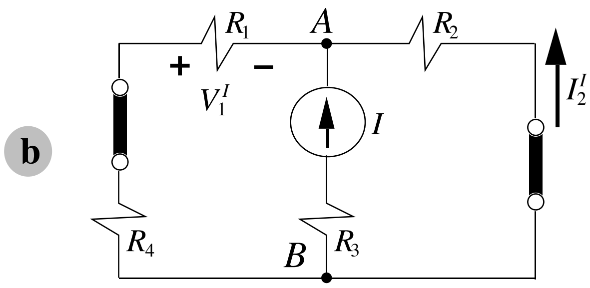
KTL:

$$E_1 = R_1 I_{E_1} + R_2 I_{E_1} + R_4 I_{E_1}$$

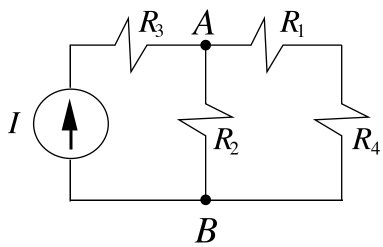
$$I_{E_1} = \frac{E_1}{R_1 + R_2 + R_4}$$

$$V_1^{E_1} = R_1 I_{E_1} \rightarrow \boxed{V_1^{E_1} = \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_4} \cdot E_1}, \quad I_2^{E_1} = -I_{E_1} \rightarrow \boxed{I_2^{E_1} = -\frac{E_1}{R_1 + R_2 + R_4}}$$

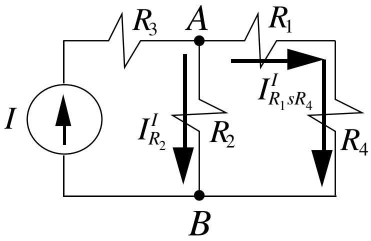
b) Bigarren soluzio partziala, korronte-sorgailua utzi, bi tentsio-sorgailuak kendu, eta geratzen zaigun zirkuitua ebatziz lortuko dugu.



Orain ere, ebatzi behar duguna sorgailu bakarreko zirkuitua da; kasu honetan, korronte-sorgailua. Zirkuitua berriro marraztuz gero, agerian geratuko da korronte-zatitzailea dela:



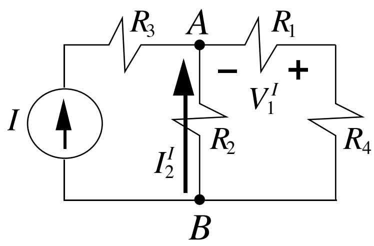
Lehenengo pausoa, korronte-zatitzailearen adarretatik igarotzen diren korronteak kalkulatzea izango da.



$$I_{R_2}^I = \frac{(R_1 + R_4)}{(R_1 + R_4) + R_2} \cdot I$$

$$I_{R_1 s R_4}^I = \frac{R_2}{(R_1 + R_4) + R_2} \cdot I$$

Kalkulatu behar ditugun magnitudeak bilatu behar ditugu zirkuituaren irudi berrian: I_2^I korrontea jatorrizko zirkuituan R_2 erresistentziatik igarotzen dena da, B korapilotik A korapilora zuzenduta; V_1^I tentsioa jatorrizko zirkuituan R_1 erresistentziaren muturren artekoa da, borne negatiboa A korapiloaren aldean duela:

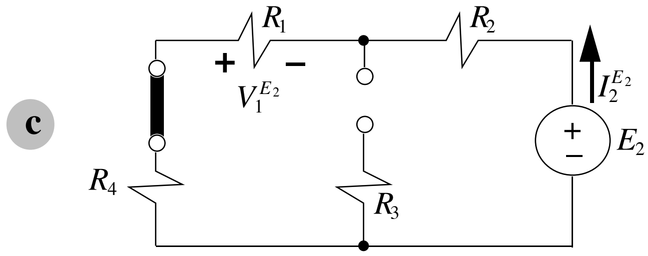


$$I_2^I = -I_{R_2}^I \rightarrow \boxed{I_2^I = -\frac{R_1 + R_4}{R_1 + R_2 + R_4} \cdot I}$$

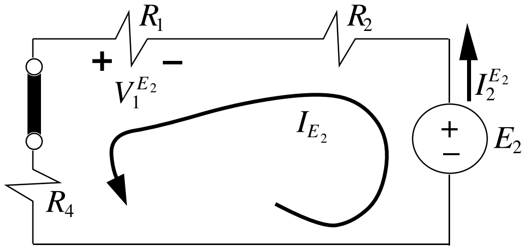
$$V_1^I = -R_1 I_{R_1 s R_4}^I \rightarrow$$

$$\boxed{V_1^I = -\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2 + R_4} \cdot I}$$

c) Hirugarren soluzio partziala, E_2 tentsio-sorgailua utzi, beste bi sorgailuak kendu, eta geratzen zaigun zirkuitua ebatziz lortuko dugu.



Orain ere, ebatzi behar duguna maila bakarreko eta sorgailu bakarreko zirkuitua da, kasu honetan tentsio-sorgailua, *a* atalean bezala:



KTL: $E_2 = R_2 I_{E_2} + R_1 I_{E_2} + R_4 I_{E_2}$

$$\rightarrow \quad I_{E_2} = \frac{E_2}{R_1 + R_2 + R_4}$$

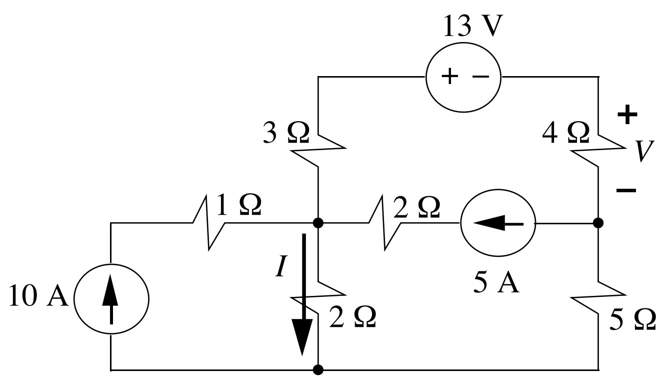
$$I_2^{E_2} = I_{E_2} \quad \rightarrow \quad \boxed{I_2^{E_2} = \frac{E_2}{R_1 + R_2 + R_4}}$$

$$V_1^{E_2} = -R_1 I_{E_2} \quad \rightarrow \quad \boxed{V_1^{E_2} = -\frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_4} \cdot E_2}$$

Beraz, dagoeneko soluzio partzial guztiak lortu ditugu; orain, azken soluzioa topatzeko, horiek batzea besterik ez zaigu falta.

a) zirkuituan	$V_1^{E_1} = \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_4} \cdot E_1$	$I_2^{E_1} = -\frac{E_1}{R_1 + R_2 + R_4}$
b) zirkuituan	$V_1^{I} = -\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2 + R_4} \cdot I$	$I_2^{I} = -\frac{R_1 + R_4}{R_1 + R_2 + R_4} \cdot I$
c) zirkuituan	$V_1^{E_2} = -\frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_4} \cdot E_2$	$I_2^{E_2} = \frac{E_2}{R_1 + R_2 + R_4}$
Emaitza osoa:	$V_1 = V_1^{E_1} + V_1^{I} + V_1^{E_2}$ $\boxed{V_1 = R_1 \cdot \frac{E_1 - R_2 I - E_2}{R_1 + R_2 + R_4}}$	$I_2 = I_2^{E_1} + I_2^{I} + I_2^{E_2}$ $\boxed{I_2 = \frac{-E_1 - \left(R_1 + R_4\right) + E_2}{R_1 + R_2 + R_4}}$

3. Kalkula itzazu ondoko zirkuituan *V* tentsioaren balioa eta *I* korrontearen balioa, gainezarpen printzipioa erabiliz.



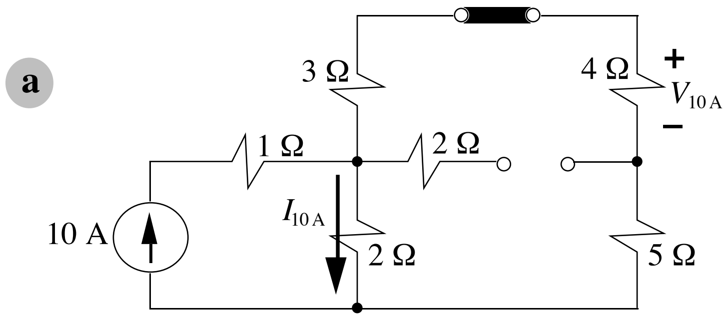
Ebazpena

Azalpenetan adierazitako moduan, zirkuituaren soluzioa soluzio partzialen batura da. Beraz, zirkuitu honetan V eta I kalkulatu ahal izateko, sorgailu bakarreko hiru zirkuitu ebatzi beharko ditugu: bat, tentsio-sorgailua soilik duena, eta beste bi, korronte-sorgailu bana soilik dutenak.

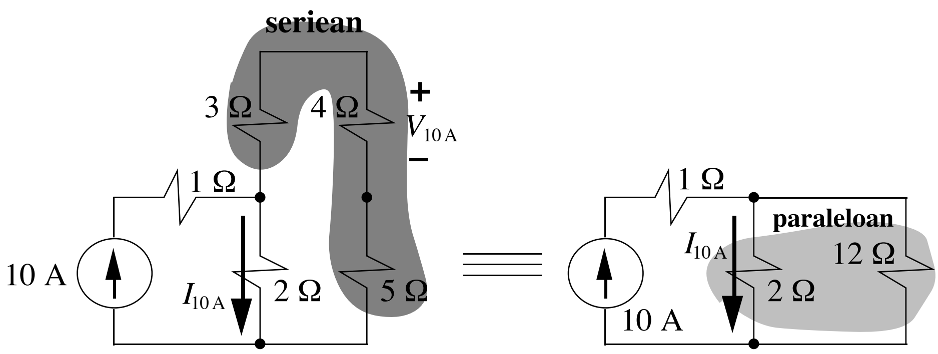
Hiru zirkuitu hauetan lortutako soluzio partzialak batuz, V eta I-ren balioak lortuko ditugu:

$$V = V_{10\,\mathrm{A}} + V_{5\,\mathrm{A}} + V_{13\,\mathrm{V}} \quad \text{eta} \quad I = I_{10\,\mathrm{A}} + I_{5\,\mathrm{A}} + I_{13\,\mathrm{V}}$$

a) Lehenengo soluzio partziala, jatorrizko zirkuituan 10 A-ko korronte-sorgailua bakarrik utziz —hau da, tentsio-sorgailua zirkuitulaburraz ordezkatuz eta beste korronte-sorgailua zirkuitu irekiaz ordezkatuz— geratzen zaigun zirkuitua ebatziz lortuko dugu.



Kasu honetan, sorgailu bakarra dago zirkuituan, 10 A-ko korronte-sorgailua hain zuzen ere; erresistentzien elkarketak direla eta, korronte-zatitzailea dugu:



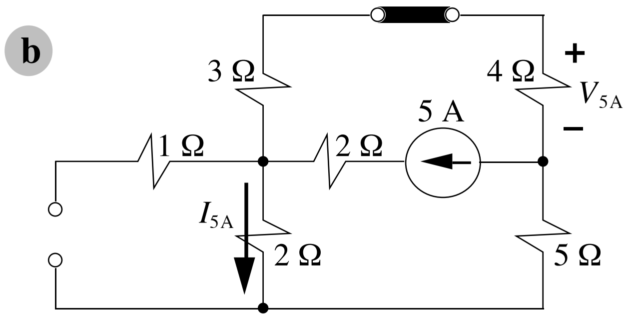
Korronte-zatitzailearen formula erabiliz 2 Ω-eko erresistentziatik pasatzen den korrontearen balioa kalkulatzea berehalakoa da:

$$I_{10\,\mathrm{A}} = \frac{3\ \Omega + 4\ \Omega + 5\ \Omega}{(3\ \Omega + 4\ \Omega + 5\ \Omega) + 2\ \Omega} \cdot 10\ \mathrm{A} \quad \rightarrow \quad \boxed{I_{10\,\mathrm{A}} = \frac{60}{7}\ \mathrm{A}}$$

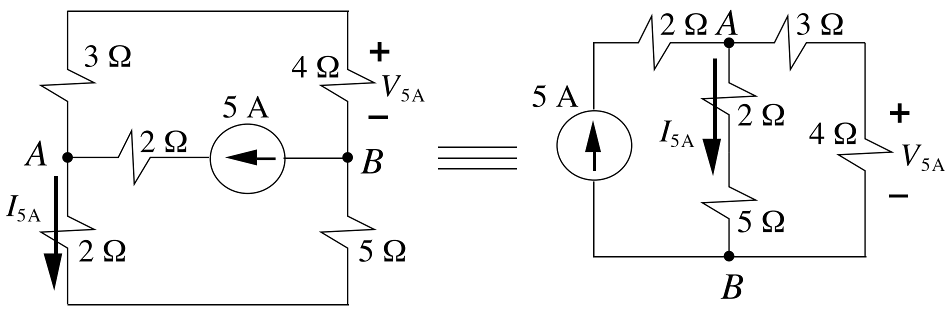
Eta 4 Ω-eko erresistentziaren muturren arteko tentsioa kalkulatzeko, lehendabizi 12 Ω-eko erresistentziatik igarotzen den korrontea kalkulatu, eta gero Ohm-en legea aplikatu beharko dugu:

$$I_{4\Omega}^{10\,\text{A}} = I_{12\Omega}^{10\,\text{A}} = \frac{2\ \Omega}{(3\ \Omega + 4\ \Omega + 5\ \Omega) + 2\ \Omega} \cdot 10\ \text{A} \;\rightarrow\; I_{4\Omega}^{10\,\text{A}} = \frac{10}{7}\ \text{A} \;\rightarrow\; \boxed{V_{10\,\text{A}} = \frac{40}{7}\ \text{V}}$$

b) Bigarren soluzio partziala, 5 A-ko korronte-sorgailua utzi, beste sorgailuak kendu, eta geratzen zaigun zirkuitua ebatziz lortuko dugu.



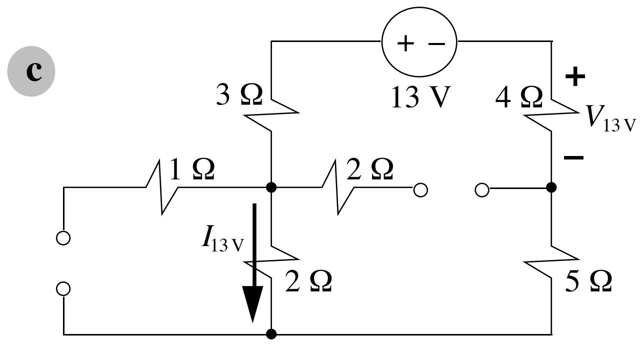
Orain ere, ebatzi behar duguna sorgailu bakarreko zirkuitua da; kasu honetan, korronte-sorgailua. Berriz ere, erresistentzien elkarketak direla eta, korronte-zatitzailea kontuan izanik, $I_{5\text{A}}$ berehala kalkulatuko dugu; ondoren, 4 Ω-eko erresistentziaren tentsioa, $V_{5\text{A}}$ alegia, kalkulatzeko, beste adarreko korrontea ere erabiliko dugu.



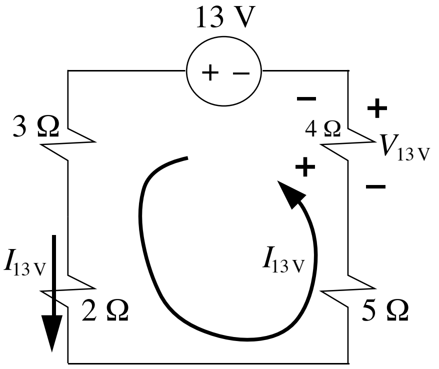
$$I_{5\text{A}} = \frac{(3\ \Omega + 4\ \Omega)}{(3\ \Omega + 4\ \Omega) + (2\ \Omega + 5\ \Omega)} \cdot 5\ \text{A} \;\rightarrow\; \boxed{I_{5\text{A}} = 2{,}5\ \text{A}}$$

$$I_{4\Omega}^{5\,\text{A}} = \frac{(2\ \Omega + 5\ \Omega)}{(3\ \Omega + 4\ \Omega) + (2\ \Omega + 5\ \Omega)} \cdot 5\ \text{A} \;\rightarrow\; I_{4\Omega}^{5\,\text{A}} = 2{,}5\ \text{A} \;\rightarrow\; \boxed{V_{5\text{A}} = 10\ \text{V}}$$

c) Hirugarren soluzio partziala, tentsio-sorgailua utzi, beste bi sorgailuak kendu, eta geratzen zaigun zirkuitua ebatziz lortuko dugu.



Orain ere, ebatzi behar duguna maila bakarreko eta sorgailu bakarreko zirkuitua da.



KTL: $13\ \text{V} = 3I_{13\,\text{V}} + 2I_{13\,\text{V}} + 5I_{13\,\text{V}} + 4I_{13\,\text{V}}$

$$\rightarrow \boxed{I_{13\,\text{V}} = \frac{13}{14}\ \text{A}}$$

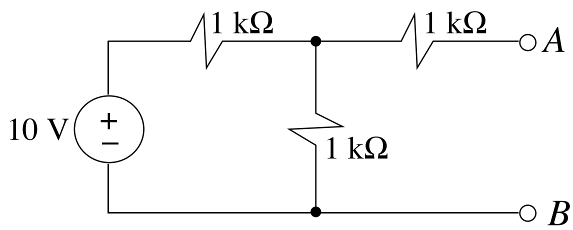
$$\rightarrow V_{13\,\text{V}} = -4I_{13\,\text{V}} \rightarrow \boxed{V_{13\,\text{V}} = -\frac{26}{7}\ \text{V}}$$

Beraz, dagoeneko soluzio partzial guztiak lortu ditugu. Orain, azken soluzioa topatzeko, horiek batzea besterik ez zaigu falta.

a) zirkuituan	$V_{10\,\text{A}} = \frac{40}{7}\ \text{V}$	$I_{10\,\text{A}} = \frac{60}{7}\ \text{A}$
b) zirkuituan	$V_{5\,\text{A}} = 10\ \text{V}$	$I_{5\,\text{A}} = 2{,}5\ \text{A}$
c) zirkuituan	$V_{13\,\text{V}} = -\frac{26}{7}\ \text{V}$	$I_{13\,\text{V}} = \frac{13}{14}\ \text{A}$
Emaitza osoa:	$V = V_{10\,\text{A}} + V_{5\,\text{A}} + V_{13\,\text{V}}$ $V = \left(\frac{40}{7} + 10 - \frac{26}{7}\right)\ \text{V}$ $\boxed{V = 12\ \text{V}}$	$I = I_{10\,\text{A}} + I_{5\,\text{A}} + I_{13\,\text{V}}$ $I = \left(\frac{60}{7} + 2{,}5 + \frac{13}{14}\right)\ \text{A}$ $\boxed{I = 12\ \text{A}}$

4.5. Thévenin-en eta Norton-en teoremak

1. Bila ezazu ondoko irudiko zirkuituaren Thévenin-en zirkuitu baliokidea A eta B puntuen artean.

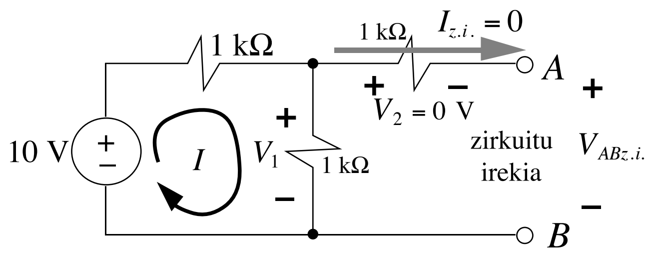


Ebazpena

Thévenin-en zirkuitu baliokidea kalkulatzeko, alde batetik, Thévenin-en tentsio baliokidea, E_{Th}, kalkulatu behar dugu eta, bestetik, Thévenin-en erresistentzia baliokidea, R_{Th}.

a) **Thévenin-en tentsio baliokidea**ren balioa ezagutzeko, jatorrizko zirkuituan A eta B puntuen arteko potentzial-diferentzia zirkuitu irekian ($V_{ABz.i.}$) kalkulatu behar dugu, horretarako ahalik eta bide erosoena erabiliz.

A eta B puntuen artean zirkuitu irekia dagoenez, A puntuarekin lotutako erresistentziatik ez da korronterik pasatuko ($I_{z.i.} = 0$):



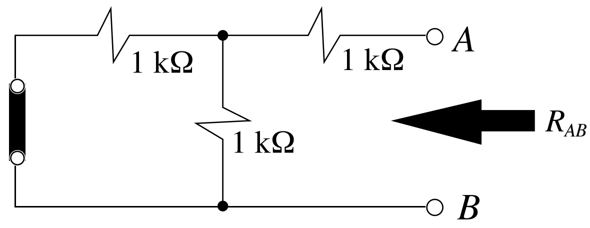
Orduan, ezker aldeko mailan KTL aplikatuz (erresistentziak kΩ-etan daudenez gero, korronteak mA-tan aterako dira):

$$1I + 1I = 10 \qquad \rightarrow \qquad I = 5 \text{ mA}$$

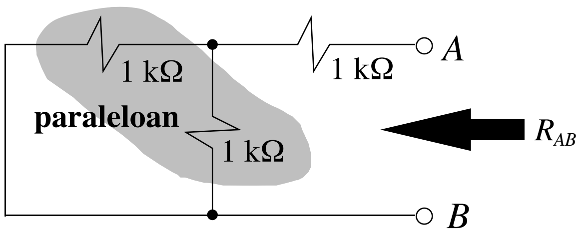
Orain, tentsioak kalkulatu behar ditugu; eskuin aldeko mailan KTL aplikatuz:

$$V_{ABz.i.} = V_1 - V_2 = V_1 = 1I = 5 \text{ V} \qquad \rightarrow \qquad \boxed{E_{Th} = 5 \text{ V}}$$

b) **Thévenin-en erresistentzia baliokidea**ren balioa kalkulatzeko, jatorrizko zirkuituan dauden sorgailu guztiak anulatu eta A eta B puntuen arteko erresistentzia baliokidea kalkulatu beharko dugu. Zirkuituan dagoen tentsio-sorgailua zirkuitulaburraz ordezkatu behar dugu.



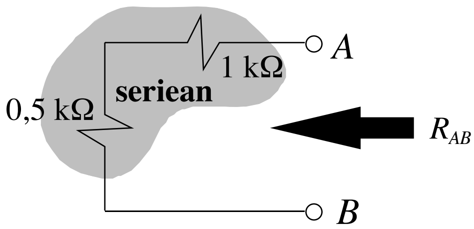
Erresistentzia-elkarketen erresistentzia baliokideak bilatzeko 3. kapituluko ariketak egin ondoren, irakurleak berehala antzeman beharko lituzke adibide honetan dauden erresistentzia-elkarketak: lehenik, ezker aldeko bi erresistentziak paraleloan daude:



$$R_p = \frac{1\ \text{k}\Omega \cdot 1\ \text{k}\Omega}{1\ \text{k}\Omega + 1\ \text{k}\Omega}$$

$$R_p = 0,5\ \text{k}\Omega$$

Orain, paralelo-elkarketa horren baliokidea seriean dago beste erresistentziarekin:



$$R_{AB} = 1\ \text{k}\Omega + 0,5\ \text{k}\Omega$$

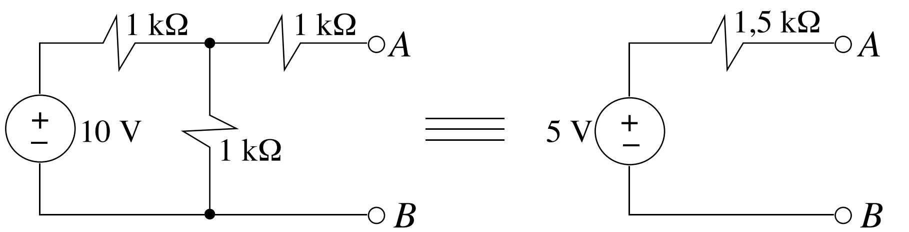
$$\Downarrow$$

$$\boxed{R_{Th} = 1,5\ \text{k}\Omega}$$

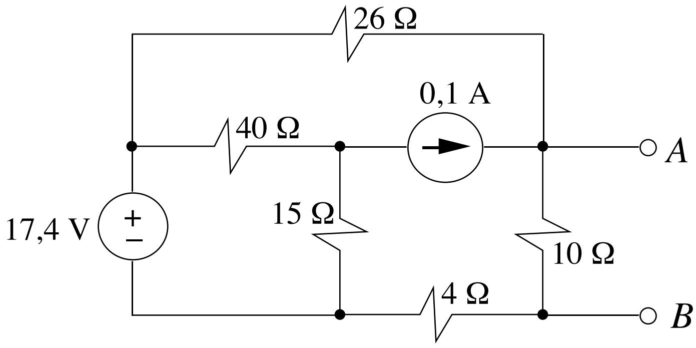
Beraz, dagoeneko lortu ditugu *A* eta *B* puntuen arteko erresistentzia baliokidea eta tentsio baliokidea; hau da, lortu dugu Thévenin-en zirkuitu baliokidea:

jatorrizko zirkuitua

Thévenin-en zirkuitu baliokidea



2. Bila ezazu ondoko irudiko zirkuituaren Thévenin-en zirkuitu baliokidea *A* eta *B* puntuen artean.

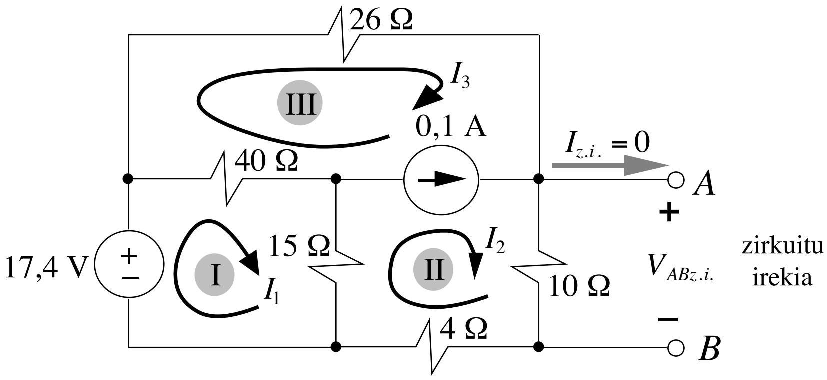


Ebazpena:

Thévenin-en zirkuitu baliokidea lortzeko, alde batetik E_{Th} kalkulatu behar dugu, eta bestetik, R_{Th}.

a) **Thévenin-en sorgailu baliokidea**ren balioa kalkulatzeko, jatorrizko zirkuituan *A* eta *B* puntuen arteko potentzial-diferentzia zirkuitu irekian ($V_{ABz.i.}$) kalkulatu behar dugu, horretarako gehien komeni zaigun bidea erabiliz.

Kasu honetan hiru maila daudenez gero, mailen metodoa aukeratuko dugu, azkarrena delakoan.



I maila:	$55I_1 - 15I_2 - 40I_3 = 17,4$
II/III maila:	$I_2 - I_3 = 0,1$
I/II/III maila:	$14I_2 + 26I_3 = 17,4$

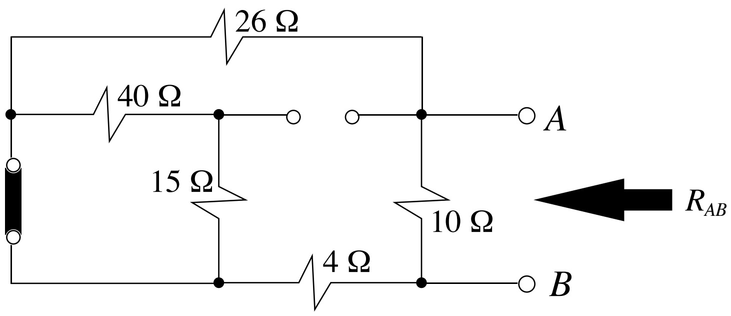
Hiru ekuazio eta hiru ezezaguneko sistema hau ebatziz, honako hiru maila-korronte hauen balioak lortzen dira:

$$I_1 = 0,74 \text{ A};\ I_2 = 0,5 \text{ A};\ I_3 = 0,4 \text{ A}$$

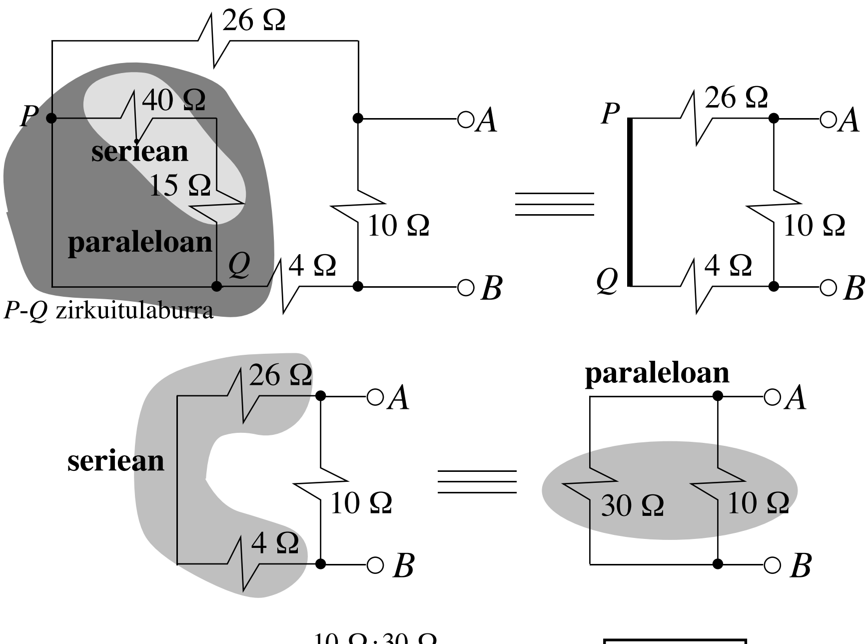
$V_{ABz.i.}$ kalkulatzeko, 10 Ω-eko erresistentziaren tentsioa ezagutu behar dugu, eta horretarako, nahikoa da I_2 -ren balioa ezagutzea. Beraz, dagoeneko Thévenin-en sorgailu baliokidearen balioa kalkula dezakegu:

$$V_{ABz.i.} = 10 I_2 \quad \rightarrow \quad V_{ABz.i.} = 10\ \Omega \cdot 0{,}5\ \mathrm{A} \quad \rightarrow \quad \boxed{E_{Th} = 5\ \mathrm{V}}$$

b) **Thévenin-en erresistentzia baliokidea**ren balioa kalkulatzeko, jatorrizko zirkuituan dauden sorgailu guztiak anulatu eta *A* eta *B* puntuen arteko erresistentzia baliokidea kalkulatu behar dugu. Zirkuituan dagoen tentsio-sorgailua zirkuitulaburraz ordezkatu beharko dugu; eta korronte-sogailua, zirkuitu irekiaz.



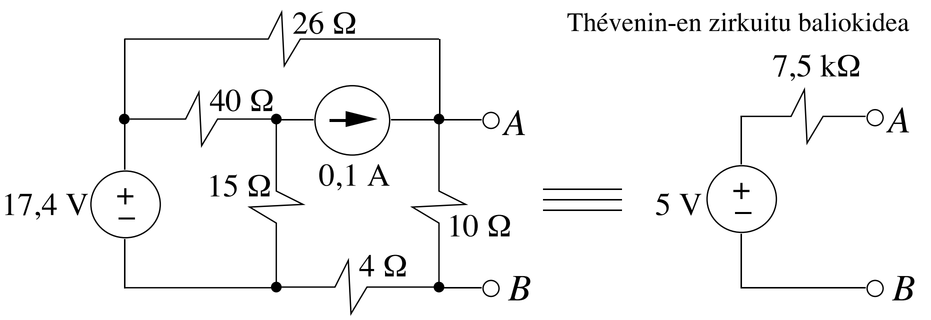
Orain ere, pausoz pauso egingo dugu erresistentzia baliokidearen kalkulua, baina gehiegi azaldu gabe, irakurlea behar adinako abileziaren jabe delakoan:



$$R_{AB} = \frac{10\ \Omega \cdot 30\ \Omega}{10\ \Omega + 30\ \Omega} \quad \rightarrow \quad \boxed{R_{Th} = 7{,}5\ \Omega}$$

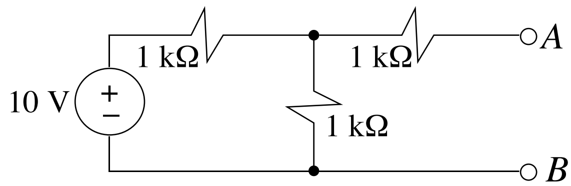
Beraz, dagoeneko lortu ditugu *A* eta *B* puntuen arteko erresistentzia baliokidea eta sorgailu baliokidea; hau da, lortu dugu Thévenin-en zirkuitu baliokidea.

jatorrizko zirkuitua



Bi zirkuituak baliokideak direla esatean, honako hau esaten ari gara: bi zirkuituen portaera elektrikoa *A* eta *B* puntuen artean —dagoen elementua konektatuta dagoela ere— guztiz berdina dela. Ondorioz, jatorrizko zirkuitua bere Thévenin-en zirkuitu baliokideaz ordezka dezakegu, beti ere *A* eta *B* puntuen artean, agerikoa baita Thévenin-en baliokidea jatorrizko zirkuitua baino sinpleagoa dela beti.

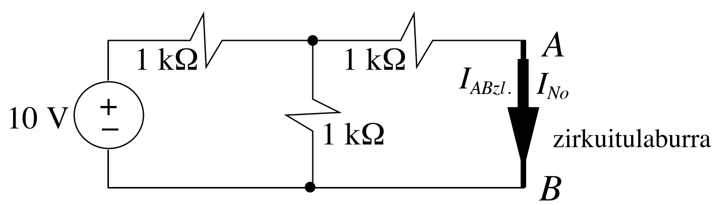
3. Bila ezazu ondoko irudiko zirkuituaren Norton-en zirkuitu baliokidea *A* eta *B* puntuen artean.



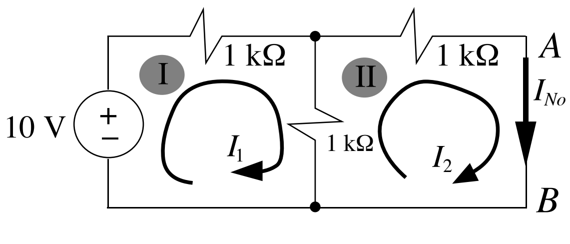
Ebazpena:

Norton-en zirkuitu baliokidea kalkulatzeko, alde batetik I_{No} kalkulatu behar dugu, eta bestetik, R_{No}.

a) **Norton-en sorgailu baliokidea**ren balioa kalkulatzeko, jatorrizko zirkuituan *A* eta *B* puntuen artean zirkuitulaburra jarri eta bertatik pasatzen den korrontea kalkulatu behar dugu ($I_{ABzl.}$), horretarako gehien komeni zaigun bidea erabiliz.



Adibidez, ondoko zirkuitua ebazteko, mailen metodoa erabiltzen badugu:



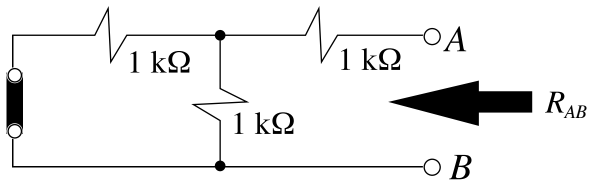
Hauexek izando dira ekuazioak:

$$2I_1 - I_2 = 10$$

$$-I_1 + 2I_2 = 0$$

Guri I_2 interesatzen zaigu bakarrik: $I_2 = \frac{10}{3}$ mA → $\boxed{I_{No} = \frac{10}{3} \text{ mA}}$

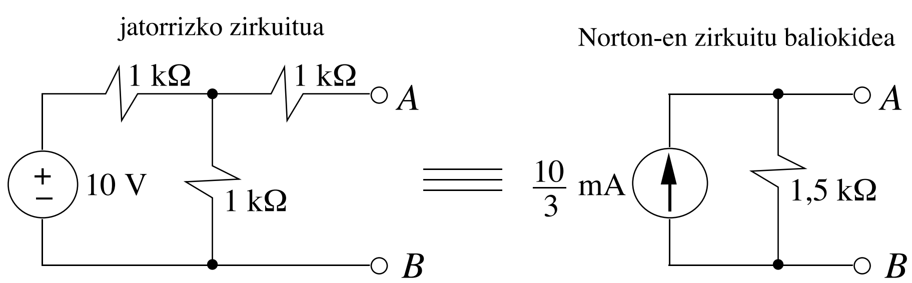
b) **Norton-en erresistentzia baliokidea**ren balioa kalkulatzeko, jatorrizko zirkuituan dauden sorgailu guztiak anulatu eta A eta B puntuen arteko erresistentzia baliokidea kalkulatu beharko dugu. Zirkuituan dagoen tentsio-sorgailua zirkuitulaburraz ordezkatu beharko dugu.



Pausoz pauso jarrai genezake erresistentzia baliokidearen kalkulua; baina zirkuitu honen beraren Thévenin-en zirkuitu baliokidea kalkulatzean (atal honetako 1 ariketan), lan hori burutu dugu dagoeneko, zeren Thévenin-en erresistentzia baliokidearen definizioa eta Norton-en erresistentzia baliokidearena parekatuz gero, berdinak direla nabarmena baita. Hau da, zirkuitu jakin baterako $R_{No} = R_{Th}$ betetzen da. Hori dela eta:

$$\boxed{R_{No} = 1{,}5 \text{ k}\Omega}$$

Beraz, dagoeneko lortu ditugu A eta B puntuen arteko erresistentzia baliokidea eta sorgailu baliokidea, hau da, lortu dugu Norton-en zirkuitu baliokidea.

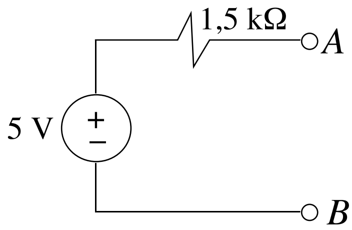


Atal honetako 1. eta 3. ariketetan, beraz, zirkuitu jakin batentzat Thévenin-en eta Norton-en zirkuitu baliokideak kalkulatu ditugu, bietan jatorrizko zirkuitutik abiatuz. Baina horrela egin ordez, bietako bat kalkulatua izanez gero, horixe izan liteke hurrengoa kalkulatzeko abiapuntua.

Demagun aurreko zirkuituaren Norton-en zirkuitu baliokidea lortzeko, abiapuntu gisa Thévenin-en zirkuitu baliokidea hartzen dugula, eta pausoz pauso aurreko kasuan egindako moduan Norton-en sorgailu baliokidearen eta Norton-en erresistentzia baliokidearen balioak kalkulatu ordez, teorian aztertutakoa kontuan izaten dugula, hots, Thévenin-en eta Norton-en zirkuitu baliokideen arteko erlazioa, edo "baliokidetasuna":

$$R_{No} = R_{Th} \text{ eta } I_{No} = \frac{E_{Th}}{R_{Th}}$$

Thévenin-en baliokidea: → Norton-en baliokidea:

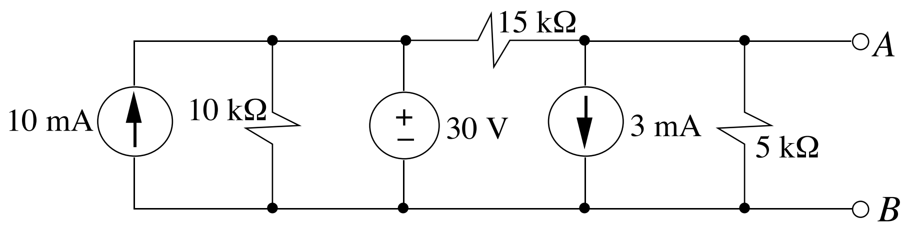


$$\boxed{R_{No} = 1{,}5 \text{ k}\Omega}$$

$$I_{No} = \frac{5 \text{ V}}{\frac{3}{2} \text{ k}\Omega} \rightarrow \boxed{I_{No} = \frac{10}{3} \text{ mA}}$$

Konproba dezakegun moduan, emaitzak berdinak dira bi kasuetan; beraz, aurrezten den lana dela eta, komenigarriagoa da bide hau erabiltzea, baldin eta aldez aurretik beste zirkuitu baliokidea lortu badugu.

4. Bila ezazu ondoko irudiko zirkuituaren Norton-en zirkuitu baliokidea *A* eta *B* puntuen artean.

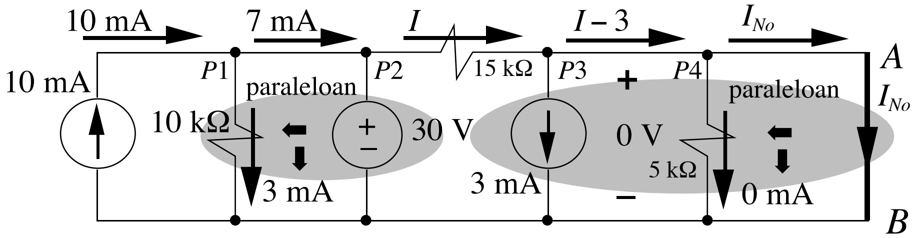


Ebazpena:

Norton-en zirkuitu baliokidea kalkulatzeko, alde batetik I_{No} kalkulatu behar dugu, eta bestetik, R_{No}.

a) **Norton-en sorgailu baliokidea**ren balioa kalkulatzeko, jatorrizko zirkuituan *A* eta *B* puntuen artean zirkuitulaburra jarri eta bertatik pasatzen den korrontea kalkulatu behar dugu ($I_{ABzl.}$), horretarako gehien komeni zaigun bidea erabiliz.

Zirkuitu honetan, korronteen arteko erlazioak kontuan izanik, erraza da $I_{ABzl.}$ edo I_{No}-ren balioa kalkulatzea. Hona hemen:

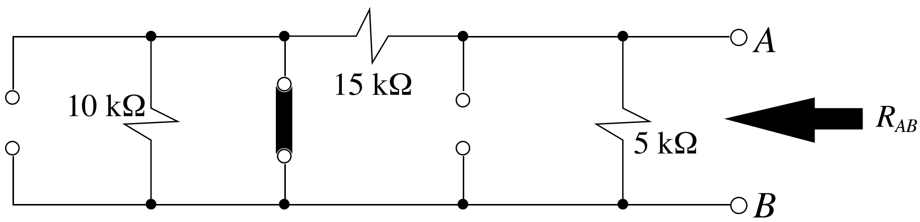


Lehenik, 30 V-eko tentsio-sorgailua eta 10 kΩ-eko erresistentzia paraleloan izateagatik, 10 kΩ-eko erresistentziatik 3 mA-ko korrontea igarotzen da (Ohm-en legea). Ondorioz, *P*1 puntuan KKL aplikatuz eta ezkerretik 10 mA-ko korrontea iristen dela kontuan hartuz, begi-bistakoa da *P*1 puntutik *P*2 puntura 7 mA-ko korrontea igarotzen dela. Baina *P*2 puntuan 30 V-eko tentsio-sorgailua dagoenez gero, ez dago jakiterik zer korronte emango duen horrek; hori dela eta, *P*2 puntutik *P*3 puntura *I* korronte ezezaguna igaroko da. *P*3 puntuan 3 mA-ko korronte-sorgailua dagoenez gero, *P*3 puntutik *P*4 puntura (*I* –3) korrontea igaroko da.

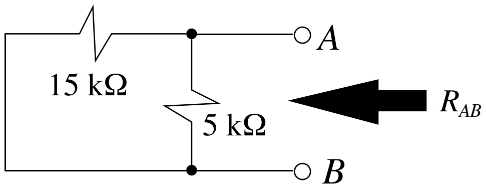
Bestalde, Norton-en intentsitate baliokidea kalkulatzeko, *A* eta *B* puntuen artean egindako zirkuitulaburra dela kausa, 5 kΩ-eko erresistentziaren muturren arteko tentsioa zero da, zirkuitulaburrarekin paraleloan baitago *A* eta *B* puntuen artean. Hori dela eta, Ohm-en legearen arabera, 5 kΩ-eko erresistentziatik ez da korronterik igaroko (0 mA). Ondorioz, *P*4 puntuan KKL aplikatuz gero, agerikoa da I_{No} = *I* –3 izango dela. Modu berean, agerikoa da zirkuituan 3 mA-ko korronte-sorgailua eta 5 kΩ-eko erresistentzia paraleloan daudela; ondorioz, 3 mA-ko korronte--sorgailuaren muturren arteko tentsioa ere zero izango da. Hori dela eta, orain erdiko mailan KTL aplikatzen badugu (30 V-eko tentsio-sorgailua, 15 kΩ-eko erresistentzia eta 3 mA-ko korronte-sorgailua barnean hartzen dituena, alegia), honako hau ondorioztatzen da: 15 kΩ-eko erresistentziaren muturren arteko tentsioa 30 V-ekoa da. Eta, Ohm-en legea aplikatuz gero, *I* = 2 mA-koa dela ateratzen da. Ondorioz, $I_{No} = I - 3$ denez gero:

$$\boxed{I_{No} = -1 \text{ mA}}$$

b) **Norton-en erresistentzia baliokidea**ren balioa kalkulatzeko, jatorrizko zirkuituan dauden sorgailu guztiak anulatu eta *A* eta *B* puntuen arteko erresistentzia baliokidea kalkulatu beharko dugu.



Aurreko irudian agerikoa da 10 kΩ-eko erresistentzia paraleloan dagoela zirkuitulaburrarekin; hori dela eta, bien baliokidea zirkuitulaburra da.

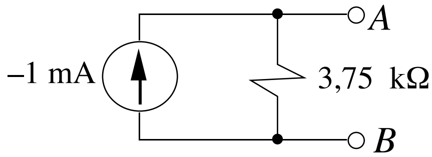


$$R_{AB} = \frac{15\ \text{k}\Omega \cdot 5\ \text{k}\Omega}{15\ \text{k}\Omega + 5\ \text{k}\Omega}$$

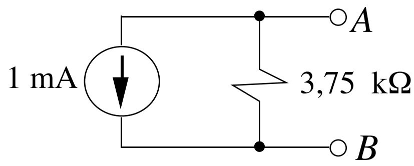
$$\Downarrow$$

$$\boxed{R_{No} = 3{,}75\ \text{k}\Omega}$$

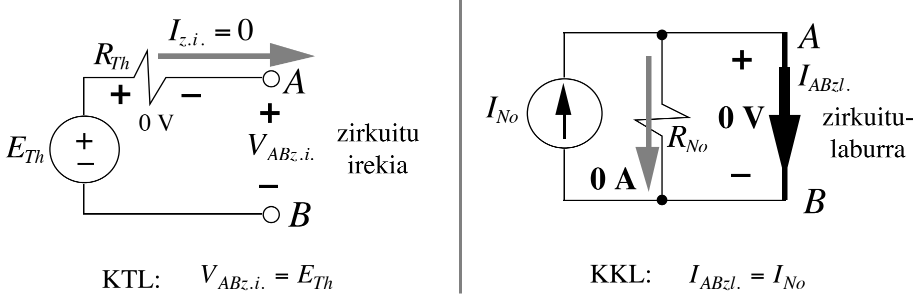
Beraz, dagoeneko lortu ditugu *A* eta *B* puntuen arteko erresistentzia baliokidea eta sorgailu baliokidea; hau da, lortu dugu Norton-en zirkuitu baliokidea:



Une hau sorgailu baliokideen zeinuei buruzko zenbait gauza azaltzeko aprobetxatuko dugu, kasu honetan I_{No} negatiboa atera baitzaigu. Beti bezala, korronte bat negatiboa izateak korronte hori benetan kontrako noranzkoan igarotzen dela esan nahi du bakar-bakarrik; beraz, kasu honetan jatorrizko zirkuituaren Norton-en baliokidea honelaxe irudikatuko genuke:

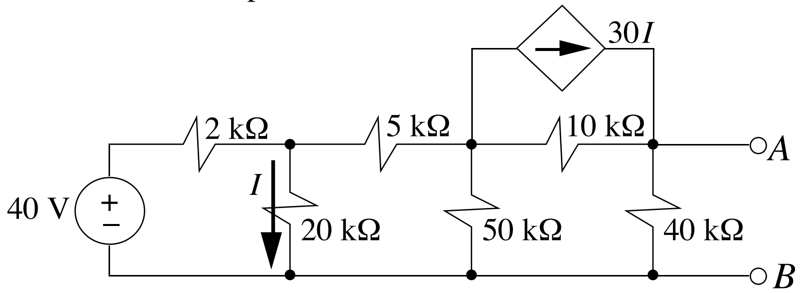


Baina zergatik definitu ditugu Thévenin-en tentsio baliokidea eta Norton-en korronte baliokidea definitu ditugun bezala?; hots, zergatik hartu ditugu *A* eta *B* puntuen arteko potentzial-diferentzia zirkuitu irekian eta *A*tik *B*ra doan korrontea *A* eta *B* puntuen artean zirkuitulaburra egonik, eta ez alderantziz, *B*tik *A*ra? Hori argitzeko, har ditzagun kontuan Thévenin-en motako zirkuitu bat eta Norton-en motako beste bat, eta ikus dezagun zer gertatzen den *A* eta *B* puntuen artean, zirkuitu irekia dagoenean eta zirkuitulaburra dagoenean, hurrenez hurren.



KTL: $V_{ABz.i.} = E_{Th}$ KKL: $I_{ABzl.} = I_{No}$

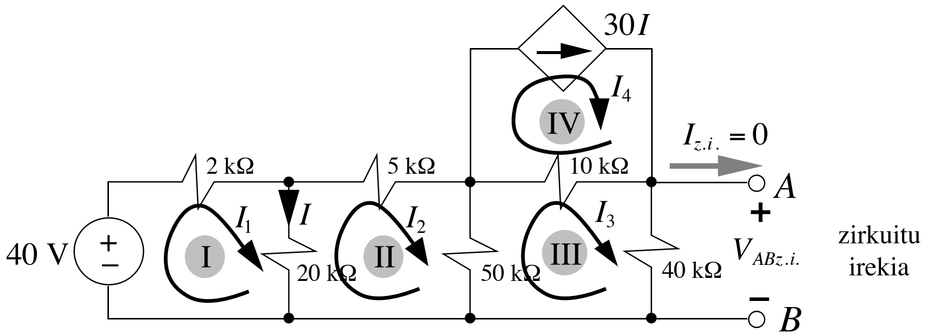
5. Bila itzazu irudiko zirkuituaren Thévenin-en eta Norton-en zirkuitu baliokideak *A* eta *B* puntuen artean.



Ebazpena:

Kasu honetan, menpeko sorgailu bat dagoenez, ezin da zuzenean erresistentzia baliokidea kalkulatu, ezin baita menpeko sorgailua anulatu. Beraz, bi sorgailu baliokideen balioak kalkulatuko ditugu lehendabizi.

a) **Thévenin-en sorgailu baliokidea**ren balioa kalkulatzeko, jatorrizko zirkuituan *A* eta *B* puntuen artean zirkuitu irekian dagoen potentzial-diferentzia kalkulatu behar da.



Mailen metodoa aplikatzen badugu, honako ekuazio hauek lortuko ditugu:

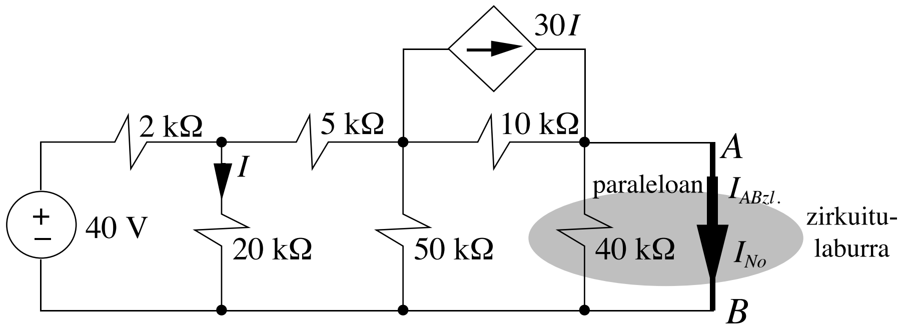
I maila:	$\left(2I_1\right)+\left(20I_1-20I_2\right)=40$
II maila:	$\left(5I_2\right)+\left(50I_2-50I_3\right)+\left(20I_2-20I_1\right)=0$
III maila:	$\left(40I_3\right)+\left(50I_3-50I_2\right)+\left(10I_3-10I_4\right)=0$
IV maila:	$I_4=30I$
I/IImailak:	$I=I_1-I_2$

Bost ekuazio eta bost ezezaguneko sistema hau ebatziz, honako emaitza hauek lortzen dira:

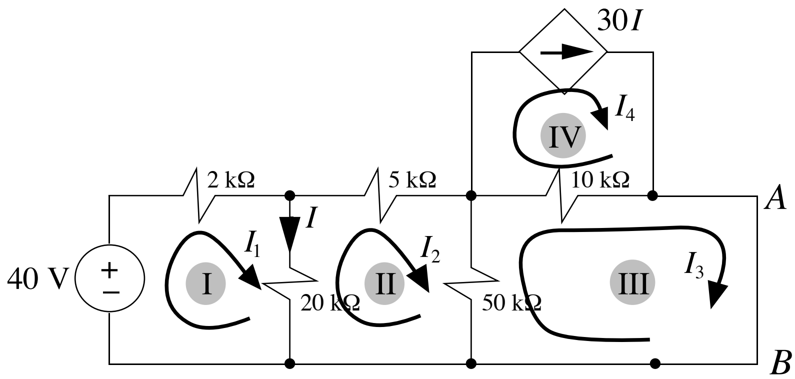
$$I_1=8\text{ mA};\; I_2=6{,}8\text{ mA};\; I_3=7\text{ mA};\; I=1{,}2\text{ mA};\; I_4=36\text{ mA}$$

$$V_{ABz.i.}=40I_3 \quad\rightarrow\quad V_{ABz.i.}=280\text{ V} \quad\rightarrow\quad \boxed{E_{Th}=280\text{ V}}$$

b) **Norton-en sorgailu baliokidea**ren balioa kalkulatzeko, jatorrizko zirkuituan *A* eta *B* puntuen artean zirkuitulaburra jarri eta bertatik pasatzen den korrontea kalkulatu behar dugu ($I_{ABzl.}$), horretarako gehien komeni zaigun bidea erabiliz.



Aurreko kasuan egin dugun moduan, mailen metodoa erabiliz kalkulatuko dugu Norton-en sorgailu baliokidearen balioa. Kontuan izan 40 kΩ-eko erresistentzia paraleloan dagoela zirkuitulaburrarekin eta, ondorioz, bien baliokidea zirkuitulaburra dela, ondoko irudian ageri den legez.



I maila: $\left(2I_1\right)+\left(20I_1-20I_2\right)=40$

II maila: $\left(5I_2\right)+\left(50I_2-50I_3\right)+\left(20I_2-20I_1\right)=0$

III maila: $\left(50I_3-50I_2\right)+\left(10I_3-10I_4\right)=0$

IV maila: $I_4=30I$

I/IImailak: $I=I_1-I_2$

Lortutako emaitzak:

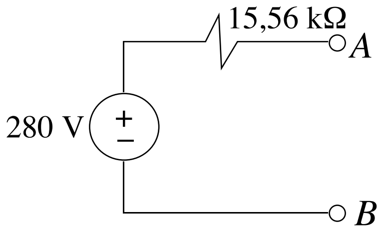
$$I_1=6{,}8\text{ mA};\ I_2=6{,}48\text{ mA};\ I_3=18\text{ mA};\ I=0{,}32\text{ mA};\ I_4=9{,}6\text{ mA}$$

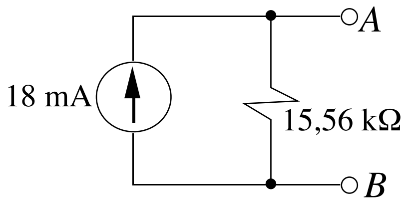
$$I_{ABzl.}=I_3=18\text{ mA}\quad\rightarrow\quad\boxed{I_{No}=18\text{ mA}}$$

Bi balio hauek ezagunak izanik, bai Thévenin-en erresistentzia baliokidea eta, gauza bera dena, Norton-en erresistentzia baliokidea kalkula ditzakegu.

$$R_{Th} = R_{No} = \frac{E_{Th}}{I_{No}} = \frac{280 \text{ V}}{18 \text{ mA}} \qquad \rightarrow \qquad \boxed{R_{Th} = R_{No} = 15{,}56 \text{ k}\Omega}$$

Hona hemen, beraz, bi zirkuitu baliokideak:



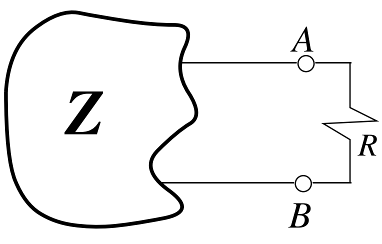


4.6. Potentziaren transferentzia maximoaren teorema

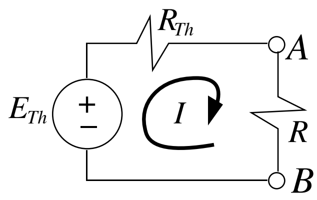
1. Froga ezazu ezen, edozein zirkuitu linealetan bi punturen artean (*A* eta *B*) xurgatzen den energia maximoa izatea nahi bada, bi puntu horien artean kokatu beharreko erresistentzia, Thévenin-en erresistentzia baliokidearen berdina dela. Beste era batean esanda, froga ezazu potentziaren transferentzia maximoaren teorema. Kalkula itzazu, halaber, zenbatekoa den potentzia hori, eta sorgailuak emandako potentziaren eta erresistentziak xurgatzen duenaren arteko erlazioa.

<u>Ebazpena:</u>

a) Demagun edozein zirkuitu lineal dugula, eta bertan, bi punturen artean, erresistentzia bat kokatu nahi dugula, zeinetan xurgatzen den potentzia maximoa den.



Z zirkuitua lineala izanik, *A* eta *B* puntuen artean zirkuitu horren Thévenin-en zirkuitu baliokidea kalkula dezakegu. *A* eta *B* puntuen artean *R* erresistentzia jartzean, badakigu bertatik pasatzen den korrontea berdina izango dela bai jatorrizko zirkuituan eta bai eta Thévenin-en zirkuitu baliokidean ere. Beraz, berdin dio *R* erresistentzian xurgatzen den potentzia jatorrizko zirkuituan kalkulatzea edo Thévenin-en zirkuitu baliokidean kalkulatzea.



Zirkuitu honetan R-tik igarotzen den korrontea erraz kalkula dezakegu:

$$I = \frac{E_{Th}}{R_{Th} + R}$$

Eta korrontea ezagutuz, R erresistentzian xurgatzen den potentzia ondoko formularen bidez kalkulatuko dugu:

$$P_R = RI^2 \qquad \rightarrow \qquad P_R = R \cdot \left(\frac{E_{Th}}{R_{Th} + R} \right)^2$$

Azter dezagun orain R-ren zein baliotarako den maximoa potentzia. Potentzia hau maximoa izan dadin, erresistentziarekiko deribatuak zero izan beharko du:

$$\frac{\partial P_R}{\partial R} = 0$$

Beraz, deriba dezagun eta berdindu dezagun deribatua zerorekin, ea zer gertatzen den ikusteko.

$$\frac{\partial P_R}{\partial R} = E_{Th}^2 \cdot \frac{\left[\left(R_{Th} + R \right)^2 - 2R\left(R_{Th} + R \right) \right]}{\left(R_{Th} + R \right)^4} = 0 \quad \rightarrow$$

$$E_{Th}^2 \cdot \frac{\left(R_{Th} + R - 2R \right)}{\left(R_{Th} + R \right)^3} = 0 \quad \rightarrow \quad \boxed{R = R_{Th}}$$

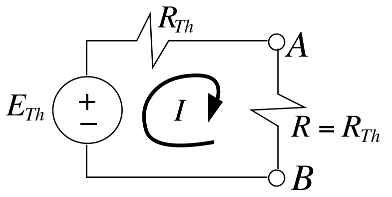
Beraz, badakigu ezen, R-ren balioren baterako, bertan xurgatzen den potentzia maximoa izatekotan, R-k Thévenin-en erresistentzia baliokidearen balio berdina eduki behar duela. Froga dezagun orain, puntu horretan dagoena benetan maximoa dela, eta ez minimo bat. Horretarako, bigarren deribatua negatiboa dela konprobatu beharko dugu.

$$\frac{\partial P_R}{\partial R} = E_{Th}^2 \cdot \frac{\left(R_{Th} - R \right)}{\left(R_{Th} + R \right)^3} \quad \rightarrow$$

$$\frac{\partial^2 P_R}{\partial R^2} = E_{Th}^2 \cdot \frac{-\left(R_{Th} + R \right)^3 - 3\left(R_{Th} - R \right)\left(R_{Th} + R \right)^2}{\left(R_{Th} + R \right)^6} = E_{Th}^2 \cdot \frac{\left(2R - 4R_{Th} \right)}{\left(R_{Th} + R \right)^6}$$

$R = R_{Th}$ denerako sinplifikatuz, argi dago espresio hori negatiboa dela. Beraz, frogatuta geratzen da, potentziaren transferentzia maximoaren teorema. Hau da, R erresistentzian xurgatzen den potentzia $R = R_{Th}$ puntuan dela maximoa.

b) Kalkula dezagun orain zenbatekoa den $R = R_{Th}$ erresistentzian xurgatzen den potentzia. Horretarako, berriz ere, Thévenin-en zirkuitu baliokidera joko dugu.



$$\text{KTL:} \quad I = \frac{E_{Th}}{2R_{Th}}$$

$$P_R = R_{Th} I^2 \quad \rightarrow \quad \boxed{P_R = \frac{E_{Th}^2}{4R_{Th}}}$$

Kalkula dezagun orain sorgailuak emandako potentzia.

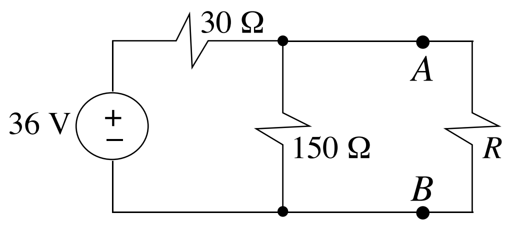
$$P_{sorgailua} = E_{Th} \cdot I \qquad \rightarrow \qquad P_{sorgailua} = \frac{E_{Th}^2}{2R_{Th}}$$

Azkenik, kalkula dezagun bi hauen arteko erlazioa:

$$\frac{P_R}{P_{sorgailua}} = \frac{\dfrac{E_{Th}^2}{4R_{Th}}}{\dfrac{E_{Th}^2}{2R_{Th}}} = 0,5 \qquad \rightarrow \qquad \frac{P_R}{P_{sorgailua}} = \%50$$

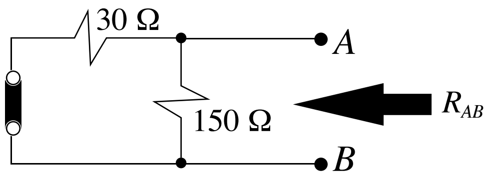
Sorgailuak emandako potentziaren erdia bakarrik xurgatzen du R erresistentziak, eta hori maximoa denean; ondorioz, horrek esan nahi du zirkuituak berak sorgailuak emandako potentziaren erdia baino gehiago xurgatzen duela, eta errendimendua —hots, R kargan jasoko den energiaren zatia, emandakoarekin alderatuta— %50 baino txikiagoa izango dela beti.

2. Ondoko zirkuituan, kalkula ezazu R erresistentziari eman beharreko balioa, bertan xurgatzen den potentzia maximoa izan dadin. Kalkula ezazu, halaber, zenbatekoa den erresistentzia horretan xurgatzen den potentzia maximoa.



Ebazpena:

a) R-ren balioa —zeinarentzat xurgatzen den potentzia maximoa den— kalkulatzeko egin beharrekoa, A eta B puntuen artean Thévenin-en erresistentzia baliokidea kalkulatzea da.



paraleloan:

$$R_{AB} = \frac{30\ \Omega \cdot 150\ \Omega}{30\ \Omega + 150\ \Omega} \;\rightarrow$$

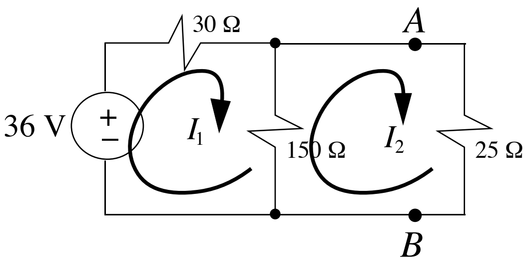
$$R_{Th} = 25\ \Omega \;\rightarrow$$

$$\boxed{R = 25\ \Omega}$$

Hots, $R = 25\ \Omega$ izan behar da, bertan xurgatzen den potentzia maximoa izan dadin.

b) Bigarren pausoa erresistentzia horretan xurgatzen den potentzia zenbatekoa den kalkulatzea da. Horretarako bi aukera ditugu: Jatorrizko zirkuituan *R* ordezkatu eta bertan kalkuluak egin, edo bestela, jatorrizko zirkuituaren Thévenin-en baliokidea kalkulatu eta hori erabiliz kalkuluak egin.

1.- Demagun lehenengo erara egiten dugula, hots, jatorrizko zirkuituaren gainean:



maileteko ekuazioak:

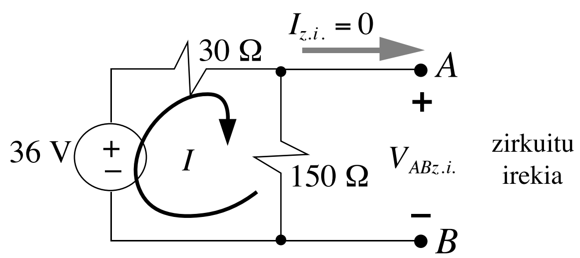
$$180 I_1 - 150 I_2 = 36$$

$$-150 I_1 + 175 I_2 = 0$$

Bi ekuazio hauek ebatzita, I_2 korrontearen balioa lortu eta *R* erresistentzian xurgatutako potentziaren balioa kalkula dezakegu:

$$I_2 = 0{,}6\ \text{A} \quad \rightarrow \quad P_R = R I_2^2 \quad \rightarrow \quad \boxed{P_R = 9\ \text{W}}$$

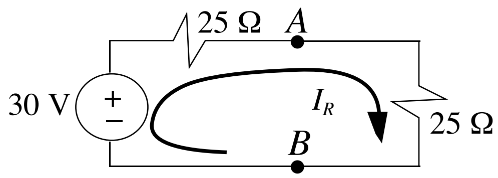
2.- Bigarren erara egiteko, lehendabizi Thévenin-en sorgailu baliokidearen balioa kalkulatu behar dugu; horretarako, jatorrizko zirkuituan *A* eta *B* puntuen artean zirkuitu irekia dagoenean beren artean dagoen potentzial-diferentzia kalkulatu behar da:



I korrontearen balioa kalkulatzeko, ezezagun bakarreko ekuazio bakarra askatu behar dugu.

$$36 = 30I + 150I \quad \rightarrow \quad I = 0{,}2 \text{ A} \quad \rightarrow \quad V_{ABz.i.} = 150I \quad \rightarrow \quad E_{Th} = 30 \text{ V}$$

Beraz, orain, ondoko zirkuitua ebatzi beharko genuke:



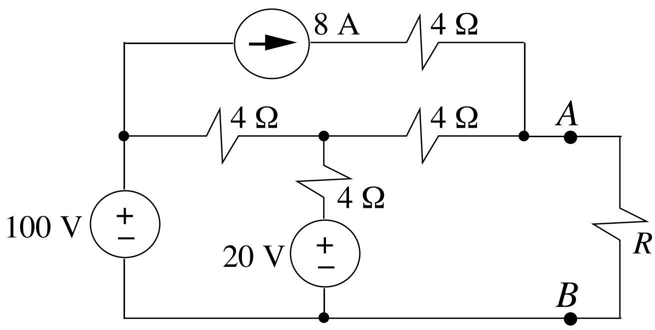
$$30 = 25I_R + 25I_R \quad \rightarrow$$

$$I_R = 0{,}6 \text{ A} \quad \rightarrow$$

$$\boxed{P_R = 9 \text{ W}}$$

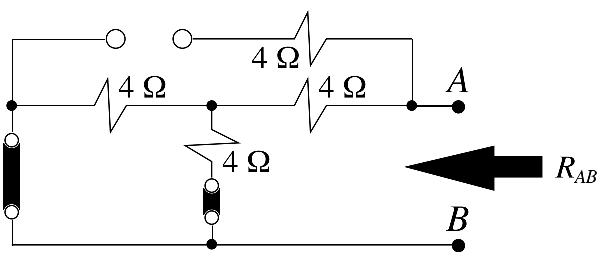
Espero zitekeen moduan, emaitza bera lortu dugu bi kasuetan, R erresistentzian xurgatzen den potentzia kalkulatzeko pauso desberdinak jarraitu baditugu ere. Aldi bakoitzean errazen gertatzen zaigun modua erabili beharko dugu; aurretik Thévenin-en zirkuitu baliokidea kalkulatua badugu, zalantzarik gabe bigarren modua izango da erosoena.

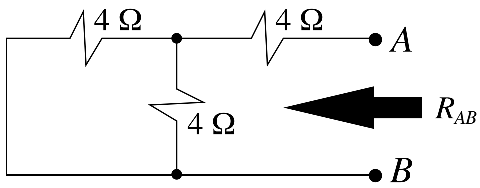
3. Ondoko zirkuituan, kalkula ezazu R erresistentziari eman beharreko balioa, bertan xurgatzen den potentzia maximoa izan dadin. Kalkula ezazu, halaber, erresistentzia horretan xurgatzen den potentzia maximoa zenbatekoa den.



Ebazpena:

a) Bertan xurgatzen den potentzia maximoa izan dadin R-ren balioa kalkulatzeko egin beharrekoa, A eta B puntuen artean Thévenin-en erresistentzia baliokidea kalkulatzea da.





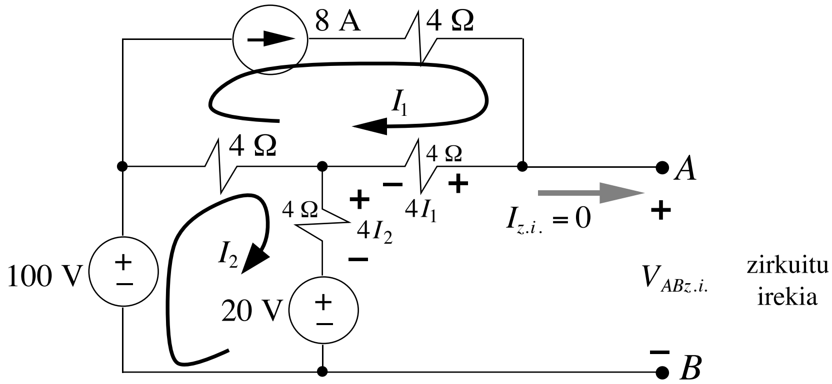
$$R_{AB} = 4\ \Omega + \frac{4\ \Omega \cdot 4\ \Omega}{4\ \Omega + 4\ \Omega} = 6\ \Omega$$

$$R_{Th} = 6\ \Omega \ \rightarrow \ \boxed{R = 6\ \Omega}$$

Beraz, dagoeneko kalkulatua dugu erresistentziaren balioa: $R = 6\ \Omega$ denean, bertan xurgatzen den potentzia maximoa izango da.

b) Bigarren pausoa, erresistentzia horretan xurgatzen den potentzia zenbatekoa den kalkulatzea da. Horretarako, jatorrizko zirkuituaren Thévenin-en sorgailu baliokidea lortu ondoren, Thévenin-en zirkuitu baliokidea erabiliz egingo ditugu kalkuluak.

Thévenin-en sorgailu baliokidea kalkulatzeko, *A* eta *B* puntuen arteko potentzial--diferentzia kalkulatu behar dugu:



Mailetako ekuazioak:

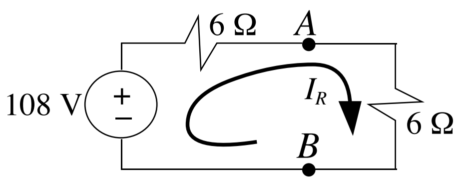
$$I_1 = 8\ \text{A}$$

$$-4I_1 + 8I_2 = 100 - 20$$

Hauek ebatzita, I_2 korrontearen balioa lortu eta Thévenin-en sorgailu baliokidea kalkulatuko dugu:

$$I_2 = 14\ \text{A} \quad \rightarrow \quad V_{ABz.i.} = 4I_1 + 4I_2 + 20 = 108\ \text{V} \quad \rightarrow \quad E_{Th} = 108\ \text{V}$$

Beraz, honako hau da ebatzi beharreko zirkuitua:



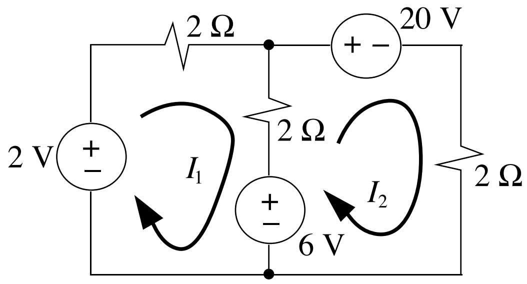
$$108 = 6I_R + 6I_R \quad \rightarrow$$

$$I_R = 9\ \text{A} \quad \rightarrow \quad \boxed{P_R = 486\ \text{W}}$$

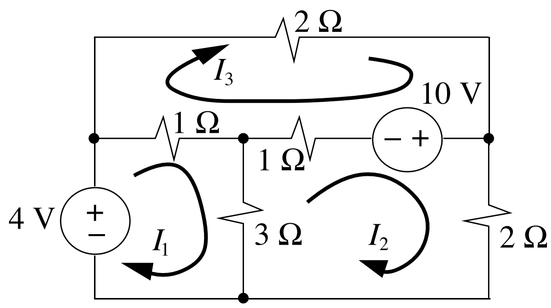
C) Proposaturiko ariketak

4.1. Mailen metodoa

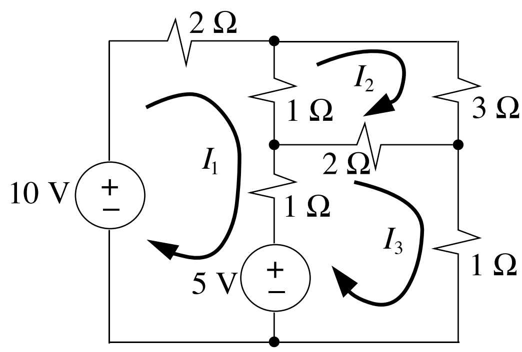
1. Irudiko zirkuituan, kalkula ezazu elementu bakoitzetik igarotzen den korrontea, mailen metodoa erabiliz.



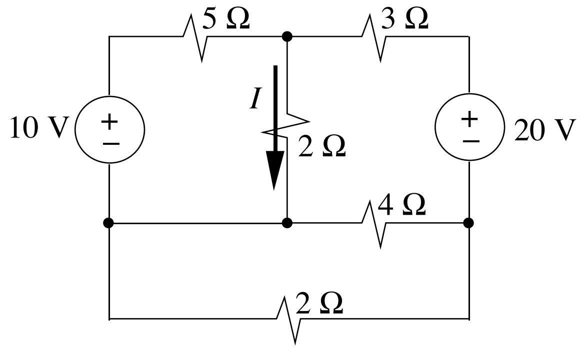
2. Irudiko zirkuituan, kalkula itzazu maila-korronteak eta erresistentziek xahututako potentzia osoa.



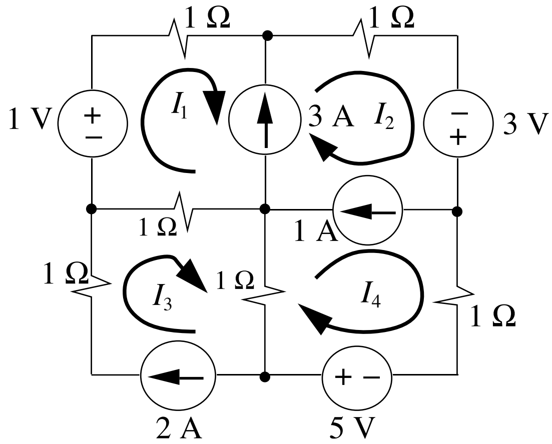
3. Irudiko zirkuiturako, idatz itzazu matrizialki maila-korronteen ekuazioak, hots, [R] [I] = [V] eran. Hau da, bila itzazu [R] eta [V] eta kalkula ezazu [I].



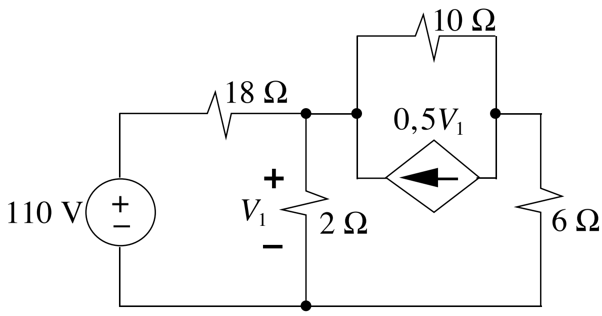
4. Maila-korronteen metodoa erabiliz, kalkula ezazu irudian adierazten den I intentsitatea.



5. Irudiko zirkuituan, kalkula itzazu maila-korronte guztiak, mailen metodoa erabiliz. Ondoren, egin ezazu potentzien balantzea.



6. Analiza ezazu irudiko zirkuitua, maila-korronteen metodoa erabiliz.

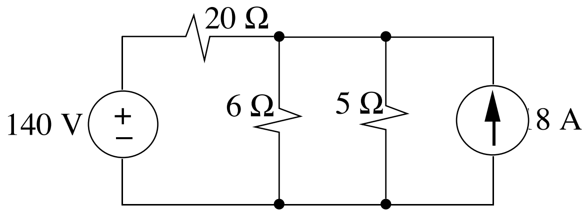


7. Ondoko ekuazio-sistemarako, kalkula itzazu I_1, I_2 eta I_3 maila-korronteak, eta ondoren, marraz ezazu ekuazio-sistema honi dagokion zirkuitua.

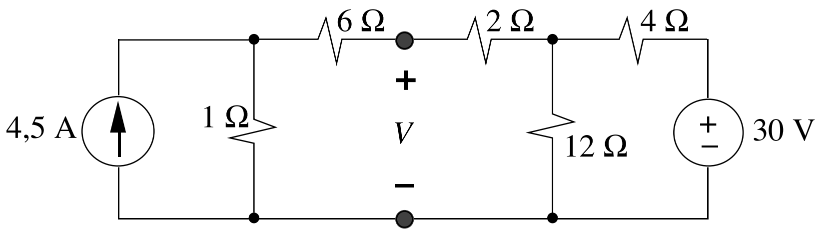
$$4I_1 - I_2 - I_3 = 5$$
$$-I_1 + 6I_2 - 2I_3 = 0$$
$$-I_1 - 2I_2 + 4I_3 = 0$$

4.2. Korapiloen metodoa

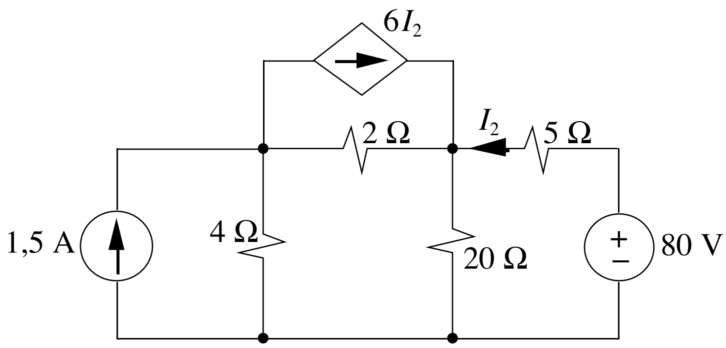
1. Analiza ezazu irudiko zirkuitua, korapiloen metodoa erabiliz.



2. Kalkula ezazu irudiko zirkuituko *V* tentsioa, korapiloen metodoa erabiliz.

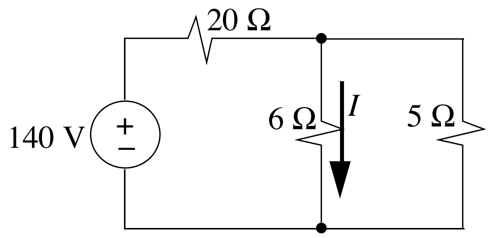


3. Korapiloen metodoa erabiliz, kalkula ezazu irudiko zirkuituko sorgailu bakoitzari dagokion potentzia, eta esan emandakoa ala xurgatutakoa den.

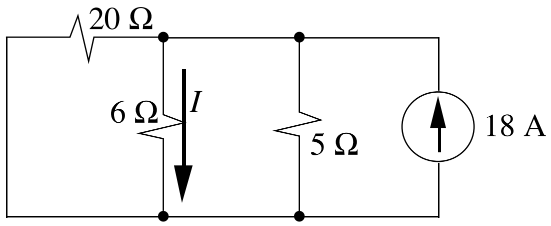


4.3. Linealtasuna

1. Irudiko zirkuituan, kalkula ezazu I korrontea.

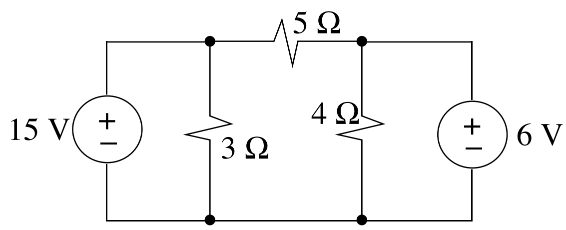


2. Irudiko zirkuituan, kalkula ezazu I korrontea.

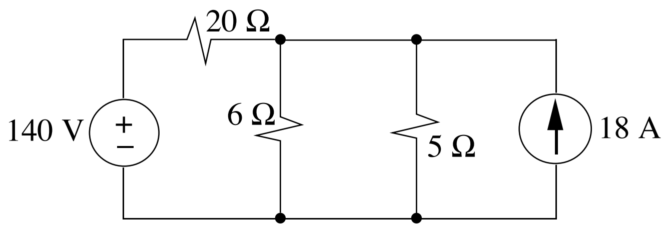


4.4. Gainezarpen printzipioa

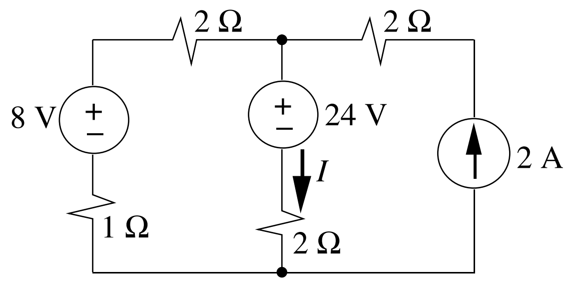
1. Analiza ezazu irudiko zirkuitua, gainezarpen printzipioa erabiliz.



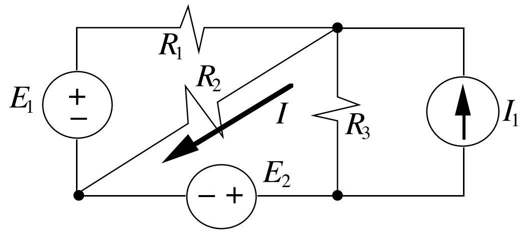
2. Analiza ezazu irudiko zirkuitua, gainezarpen printzipioa erabiliz.



3. Irudiko zirkuituan, kalkula ezazu I intentsitatea, gainezarpen printzipioa erabiliz.

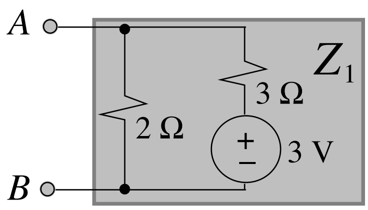


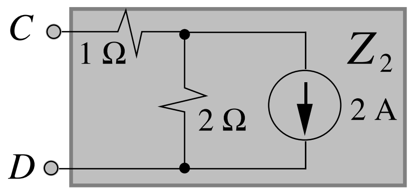
4. Irudiko zirkuituan, kalkula ezazu I intentsitatea, gainezarpen printzipioa erabiliz.



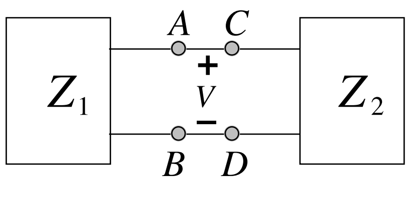
4.5. Thévenin-nen eta Norton-en teoremak

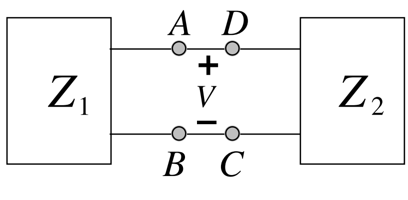
1. Kalkula itzazu irudiko zirkuituen A eta B puntuen arteko Thévenin--en zirkuitu baliokidea eta baita Norton-en zirkuitu baliokidea ere.



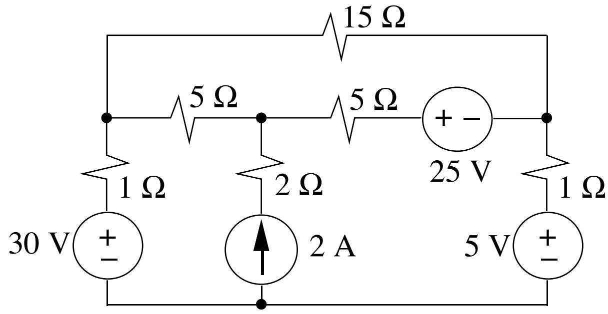


2. Aurreko ariketako bi zirkuituak konektatzen baditugu, zein izango da V tentsioa ondoko bi kasuetan?

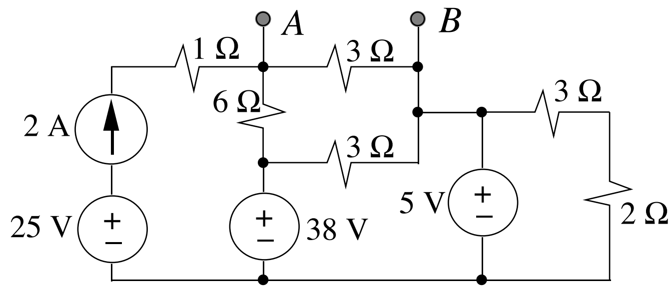




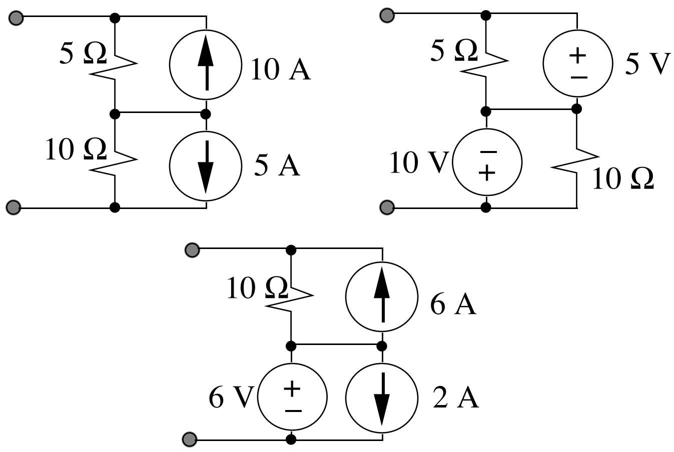
3. Kalkula itzazu 15 Ω-eko erresistentziaren muturren arteko Thévenin--en zirkuitu baliokidea eta Norton-en zirkuitu baliokidea.



4. Kalkula itzazu irudiko zirkuituko *A* eta *B* puntuen arteko Thevenin--en zirkuitu baliokidea eta Norton-en zirkuitu baliokidea.

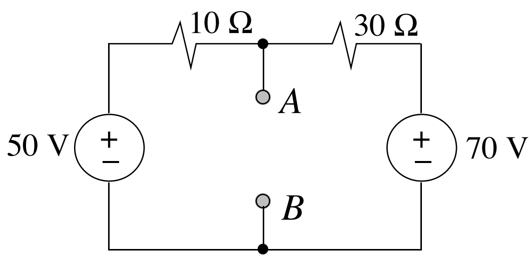


5. Ordezka itzazu irudiko zirkuituak tentsio-sorgailu baten eta erresistentzia baten arteko serie-elkarketaz. Antzeko ordezkapena egin, baina korronte-sorgailu baten eta erresistentzia baten arteko paralelo--elkarketaz.

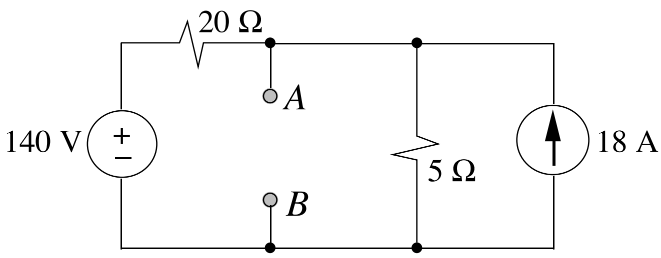


4.6. Potentziaren transferentzia maximoaren teorema

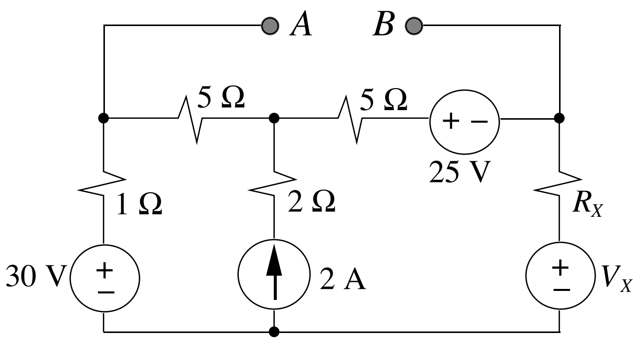
1. Thévenin-en teorema eta potentziaren transferentzia maximoaren teorema erabiliz, zein da irudiko zirkuituko *A* eta *B* puntuen artean konektaturiko erresistentzia batean xahu daitekeen potentzia maximoa?



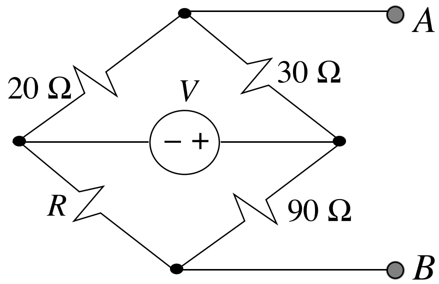
2. Irudiko zirkuituko *A* eta *B* puntuen artean *R* erresistentzia bat konektatu nahi da. Kalkula ezazu *R*-ren balioa, zirkuitutik xurgatzen duen potentzia maximoa izan dadin. Zenbatekoa da potentzia maximoa?



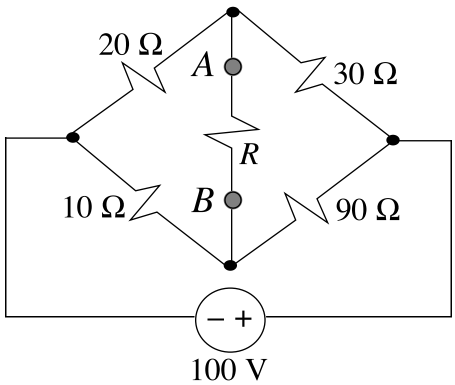
3. Irudiko zirkuituko *A* eta *B* puntuen artean potentzia maximoa (312,5 W) xahutzen duen erresistentziaren balioa 5/3 Ω-ekoa da. Kalkula itzazu V_X eta R_X.



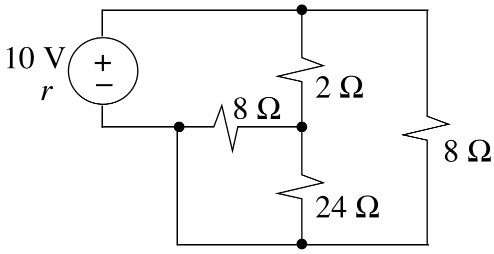
4. Irudiko zirkuituan, kalkula itzazu V eta R magnitudeen balioak, A eta B puntuen artean potentzia maximoa xurgatzen duen erresistentziaren balioa 24 Ω-ekoa eta A eta B puntuen arteko Thévenin-en tentsio baliokidea 30 V-ekoa direla jakinik.



5. Irudiko zirkuituan, kalkula itzazu: a) A eta B puntuen arteko Thévenin-en zirkuitu baliokidea. b) R erresistentziaren balioa bere barnean xahutzen den potentzia maximoa izan dadin. c) Potentzia maximo horren balioa.



6. Irudiko zirkuituan, kalkula ezazu zein izan behar duen sorgailuaren barne-erresistentziaren balioak (r), zirkuituak hartuko duen potentzia maximoa izan dadin. Zein da potentzia maximoaren balioa?



5. Zirkuitu elektrikoen egoera iragankorra: *RC* eta *RL* zirkuituak

A) Jakin beharreko kontzeptuak

• Egoera iragankorra

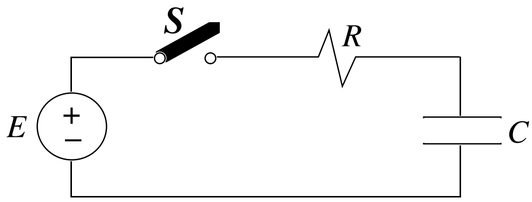
Orain arte ikusitako zirkuituetan, erresistentzia linealak eta sorgailuak baino ez zeuden. Hori dela eta, zirkuituan zerbait aldatzean (etengailu baten posizioa, esate baterako) korronte eta tentsioak ia-ia bat-batean aldatzen dira egoera egonkor batetik beste egoera egonkor berri batera, bien arteko denbora-tartea edo egoera iragankorra laburregia baita kontuan hartua izateko.

Oraingo honetan, berriz, kondentsadoreak eta harilak ere agertuko dira zirkuituetan. Elementu hauen eraginez, zirkuituan zerbait aldatzen denean, egoera iragankorra nabarmena izango da. Hori agerikoa da elementu horien portaera-ekuazioa kontuan hartzen badugu, biak diferentzialak baitira eta ondorioz biek denbora-tarte bat behar baitute beren egoera aldatzeko, kargatzeko zein deskargatzeko.

Beraz, kapitulu honetan horrelako zirkuituen egoera iragankorra aztertuko dugu (gogoratu zein den bi elementu horien portaera egoera egonkorrean). Zailtasun matematikoak saihesteko, oso zirkuitu sinpleak aztertuko ditugu: *RC* eta *RL* direlakoak. Dena den, azpimarratu behar dugu oso baliagarrriak direla beste edozein zirkuitu aztertzeko, Thévenin-en edo Norton-en teoremak aplikatuz lortzen diren zirkuitu baliokideak hemen aztertuko ditugunak bezain sinpleak baitira.

• *RC* zirkuitua

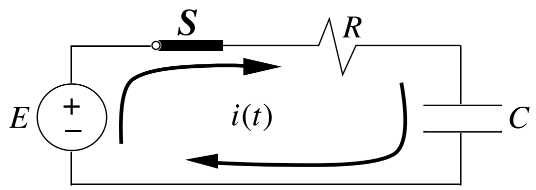
Demagun ondoko irudiko zirkuituaren analisia egin behar dugula, non *S* delakoa etengailua ideala den.



Demagun orain *S* etengailua irekita egon dela denbora luzez; agerikoa da, egoera horretan zirkuitutik ez dela korronterik igarotzen, ez baitago bide itxirik. Hori dela eta, kondentsadorearen portaera-ekuazioa kontuan hartuz, *S* etengailuaren posizioa aldatzen ez den bitartean, kondentsadorearen muturren arteko tentsioa konstante mantentzen dela ondorioztatzen da. Demagun tentsio konstante hori 0 dela, hau da, kondentsadorea guztiz deskargatuta dagoela ($V_C = 0 \rightarrow Q_C = 0$).

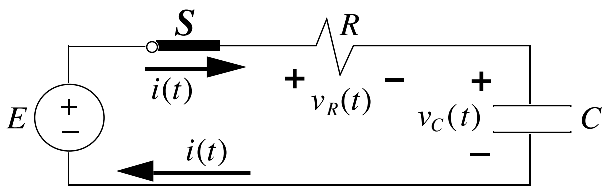
Karga-prozesua:

Demagun S etengailua $t = 0$ gisa izendatuko dugun unean itxi dugula. Agerikoa da, berriro ere, korrontea igarotzen hasiko dela, ondoko irudian erakusten den legez.



Korronte hori dela eta, kondentsadorea kargatzen hasiko da, egoera iragankor batean baitago, zirkuituan aldaketa bat gertatu ondorengo egoera iragankorrean hain zuzen ere.

Zirkuitu horren analisia egiteko, lehendabizi bere portaera islatzen duten ekuazioak idatzi behar ditugu. Alde batetik, elementuen portaera-ekuazioak hartu behar ditugu kontuan, eta beste aldetik, zirkuituarena. Kasu honetan, Kirchhoff-en tentsioen legearekin nahikoa izango da, maila bakarreko zirkuitua baita. Ondoko irudian ageri dira ekuazio horiek idaztean aintzat hartuko ditugun aldagaiak: $v_R(t)$, $v_C(t)$ eta $i(t)$ (etengailua ideala dela suposatuko dugu; ondorioz, itxita dagoenean, bere muturren arteko tentsioa zero da beti).



Erresistentziaren portaera-ekuazioa (Ohm): $v_R(t) = Ri(t)$

Kondentsadorearen portaera-ekuazioa: $i(t) = C\dfrac{dv_C(t)}{dt}$

KTL: $E = v_R(t) + v_C(t)$

Lehenengo bi ekuazioetatik honako hau ondorioztatzen da: $v_R(t) = RC\dfrac{dv_C(t)}{dt}$

Azken hau hirugarren ekuazioan ordezkatuz: $E = RC\dfrac{dv_C(t)}{dt} + v_C(t)$

Azken ekuazio hau beste modu batean idatziz, zirkuituaren portaera denboran zehar islatzen duen ekuazioa lortuko dugu, non ezezagun bakarra $v_C(t)$ den; ekuazioan ezezagunarekin batera bere deribatua ere azaltzen denez gero, ekuazio diferentzial bat dela esaten da.

$$\boxed{\frac{dv_C(t)}{dt} + \frac{1}{RC}v_C(t) = \frac{E}{RC}}$$

Ekuazio honen soluzio orokorra honako itxura honetakoa da:

$$v_C(t) = K_1 e^{-\frac{t}{RC}} + K_2$$

non K_1 eta K_2 direlakoak, kondentsadorearen hasierako eta bukaerako egoeren menpekoak diren bi konstante baitira.

Orain, zirkuituari dagokion soluzio partikularra lortzeko, K_1 eta K_2 konstanteak kalkulatu behar dira, honako modu honetan:

1) Hasierako egoera egonkorra ($t = 0$ unean, alegia):

Badakigu (hori suposatu baitugu) hasieran kondentsadorea dekargatuta zegoela, hots: $v_C(0^{\pm}) = 0\ \text{V}$, non 0^{-} adierazpenak S etengailua itxi baino lehenago kondentsadoreak zuen tentsioa dela esan nahi duen.

Etengailua itxi ondorengo hasierako uneko tentsioa $v_C(0^+)$ eran adieraziko dugu, eta beraren balioa aurreko soluzio orokorrean $t = 0$ eginez lortutakoa da:

$$v_C(0^+) = K_1 + K_2$$

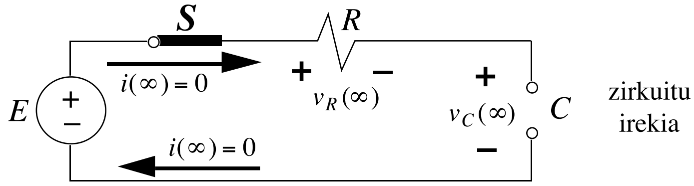
Orain, honako hau hartu behar dugu kontuan: kondentsadoretik igarotzen den korrontea tentsioaren denborarekiko deribatua denez gero, matematikoki definiturik egoteko, tentsioak honako baldintza hau bete behar du: matematikoki funtzio deribagarria behar du izan. Analisi matematikoko kontzeptuetan gehiegi sakondu gabe, eta zehaztasun handiegirik gabe, kondentsadore baten muturren arteko tentsioak jarraitua behar duela izan esan dezakegu, korrontea definitua izan dadin. Beste hitzetan esanda, edozein t unetan $v_C(t^-) = v_C(t^+)$ dela bete behar da.

Beraz, goiko bi balioak berdinduz, $v_C(0^-) = v_C(0^+)$ eginez alegia, K_1 eta K_2 konstanteek bete behar duten honako baldintza hau lortzen da:

$$K_1 + K_2 = 0$$

2) Bukaerako egoera egonkorra ($t = \infty$ unean, alegia):

Badakigu ezen, egoera egonkorrean eta korronte zuzeneko zirkuitu batean, kondentsadorea zirkuitu ireki batez ordezka dezakegula, zeren, tentsioa konstante denez, bere baitatik ez baita korronterik pasatzen. Hori dela eta, bukaerako egoera egonkorrari dagokion zirkuitu baliokidea honako hau da (bertan oso erraza da kondentsadorearen muturren arteko tentsioa kalkulatzea, KTL aplikatuz):



KTL: $E = v_R(\infty) + v_C(\infty) = Ri(\infty) + v_C(\infty) = v_C(\infty)$

Hau da, $v_C(\infty) = E$ volt.

Beste aldetik, balio horrek goiko formulan $t = \infty$ eginez lortutakoaren berdina izan behar du:

$$v_C(\infty) = K_1 e^{-\infty} + K_2 = K_1 \cdot 0 + K_2 = K_2$$

Biak berdinduz, K_2 konstanteak bete behar duen beste baldintza lortzen da:

$$K_2 = E$$

Bi baldintza horiek bi ezezaguneko ekuazio-sistema osatzen dute. Sistema ebatziz, kasu partikular honetan (hots, hasieran kondentsadorea deskargatuta eta bukaeran E tentsioa lortzen duenean) honako balio hauek lortzen dira:

$$K_2 = E \text{ eta } K_1 = -E$$

Balio horiek zirkuituaren portaera une oro islatzen duen ekuazio diferentzialaren soluzio oro-korrean ordezkatuz, zirkuitu partikular honi hasierako egoeraren arabera dagokion solu-zio partikularra lortuko dugu:

$$\boxed{v_C(t) = E \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right)}$$

Formula horretatik abiatuz, zirkuitutik igarotzen den korrontearen adierazpena lor daiteke:

$$i(t) = C\frac{dv_C(t)}{dt} \quad \rightarrow \quad \boxed{i(t) = \frac{E}{R} \cdot e^{-\frac{t}{RC}}}$$

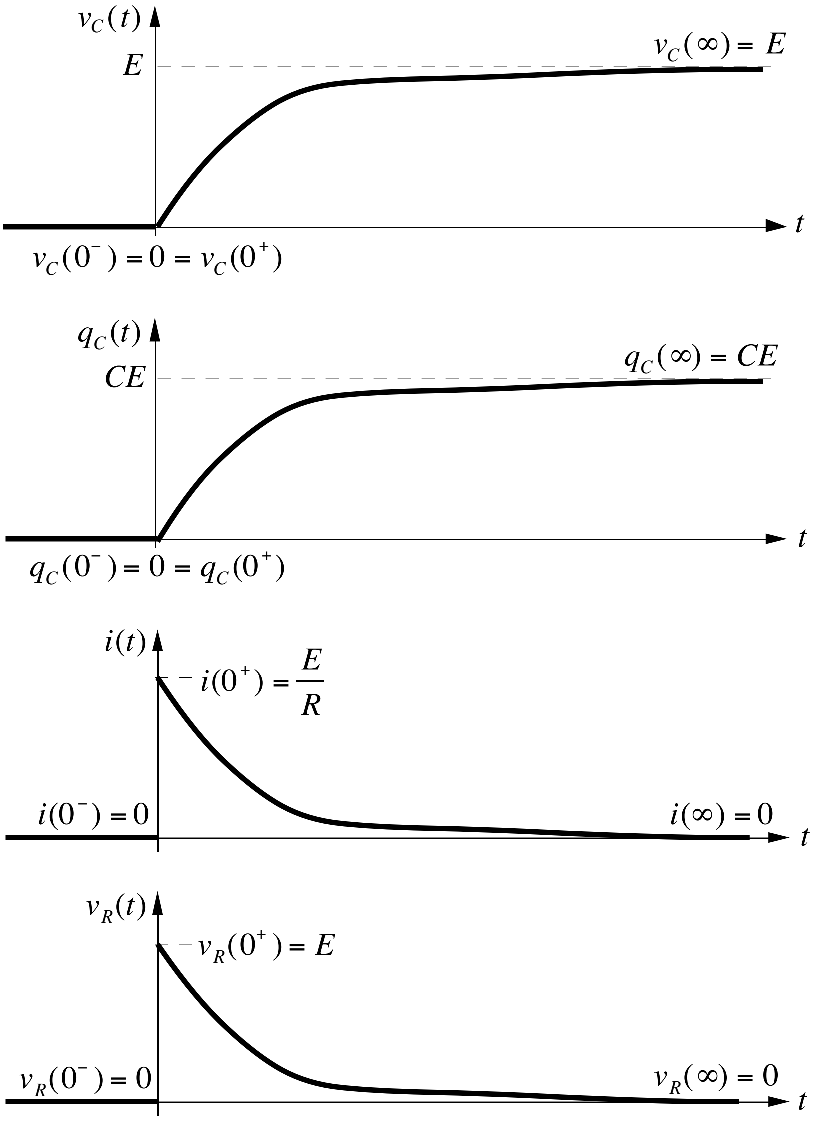
Eta hemendik, nahi izanez gero, erresistentziaren muturren arteko tentsioa ere lor daite-ke, Ohm-en legea aplikatuz:

$$\boxed{v_R(t) = E \cdot e^{-\frac{t}{RC}}}$$

Era berean, kondentsadorean metaturiko kargaren adierazpena ere lor daiteke, $q_C(t) = C \cdot v_C(t)$ dela gogoratuz.

$$q_C(t) = CE \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right)$$

Orain, adierazpen horiek grafikoki marraztuko ditugu, denboran zehar nola aldatzen diren ikusteko:



Hemen, kurba horien ezaugarri desberdinak azpimarratzea merezi duelakoan gaude. Alde batetik, kondentsadorearen muturren arteko tentsioa eta bere baitan metatzen den karga funtzio jarraituak dira; hots, $v_C(0^-) = v_C(0^+)$ eta $q_C(0^-) = q_C(0^+)$ betetzen da. Beste aldetik, zirkuitutik igarotzen den korrontea eta —Ohm-en legea dela eta— erresistentziaren muturren arteko tentsioa ez dira jarraituak $t = 0$ unean: aitzitik bat-batean aldatu dira, $i(0^-) \neq i(0^+)$ eta $v_R(0^-) \neq v_R(0^+)$ izanik.

Denbora-konstantea:

Azter ditzagun aurreko adierazpenak unitateen ikuspuntutik:

$$v_C(t) = E\cdot\left(1-e^{-\frac{t}{RC}}\right) \rightarrow \textbf{volt} = \textbf{volt}\cdot\left(\text{unitaterik gabekoa} - \text{esp}\left(\frac{\text{s}}{\Omega\cdot\text{F}}\right)\right)$$

$$i(t) = \frac{E}{R}\cdot e^{-\frac{t}{RC}} \rightarrow \textbf{anpere} = \left(\frac{\textbf{volt}}{\Omega}\right)\cdot\text{esp}\left(\frac{\text{s}}{\Omega\cdot\text{F}}\right)$$

$$v_R(t) = E\cdot e^{-\frac{t}{RC}} \rightarrow \textbf{volt} = \textbf{volt}\cdot\text{esp}\left(\frac{\text{s}}{\Omega\cdot\text{F}}\right)$$

$$q_C(t) = CE\cdot\left(1-e^{-\frac{t}{RC}}\right) \rightarrow \textbf{coulomb} = \textbf{(farad}\cdot\textbf{volt)}\cdot\left(\text{unit. gabekoa} - \text{esp}\left(\frac{\text{s}}{\Omega\cdot\text{F}}\right)\right)$$

Guztietan betetzen da ekuazioaren bi aldeetako unitateak berdinak direla (volt = volt, anpere = volt / Ω, coulomb = farad · volt) esponentziala kontuan hartu gabe. Horrek argi eta garbi esan nahi du esponentziala unitaterik gabekoa dela. Horren arabera, (t/RC) berretzailea unitaterik gabekoa da; edo, gauza bera dena, RC biderkadura denbora-unitateetan ematen da. (Irakurleak froga dezake hori ariketa gisa.)

$$\text{ohm}\cdot\text{farad} = \text{segundo}$$

RC biderkadura zirkuituaren ezaugarria da: C delakoa kargatzen ari den kondentsadorearen kapazitatea da; eta R delakoa, kondentsadoreak bere muturren artean dakusan erresistentzia.

Zirkuitua aldatu ezean, RC biderkadura konstante izango da, eta hortik datorkio izena: **denbora-konstantea**:

$$\boxed{\tau = RC}$$

Esan dugun bezala, τ zirkuituaren ezaugarria da. Orain balio hori ekuazioetan ordezkatzen badugu, hots, $t = \tau = RC$ egiten badugu, honako balio hauek lortuko ditugu:

$$v_C(t=\tau) = E\cdot\left(1-e^{-\frac{\tau}{RC}}\right) = E\cdot\left(1-e^{-1}\right) = 0{,}63E; \quad q_C(t=\tau) = 0{,}63CE$$

$$i(t=\tau) = \frac{E}{R}\cdot e^{-\frac{t}{RC}} = \frac{E}{R}\cdot e^{-1} = 0{,}37\cdot\frac{E}{R}; \quad v_R(t=\tau) = 0{,}37\cdot E$$

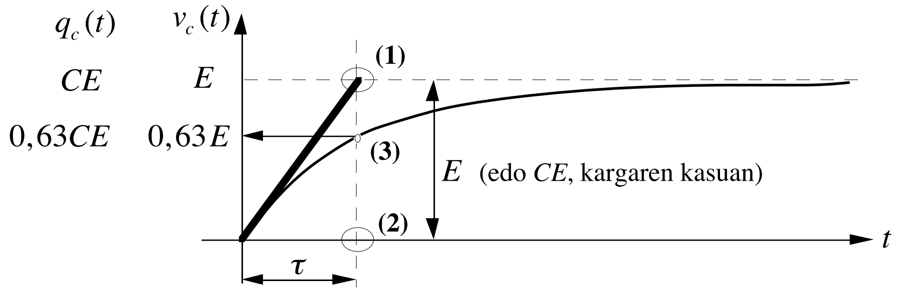
Agerikoa da zenbakizko biderkagaiak (0,63; 0,37) konstante direla beti, edozein izanda ere R eta C-ren balioak; hots, zirkuitu guztietarako berdinak direla. Hori kontuan harturik, honako modu honetan defini dezakegu karga-zirkuitu baten denbora-konstantea:

Definizioa: RC zirkuitu baten denbora-konstantea, hasierako unetik kondentsadoreak orekan izango duen tentsioaren (kargaren) % 63ko tentsioa (karga) lortu arte igarotzen den denbora-tartea da.

Beste alde batetik, $t = 0$ unean kondentsadorearen muturren arteko tentsio-kurbaren ukitzailearen malda kalkulatzen badugu, balio hau lortuko dugu:

$$\left[\frac{dv_C(t)}{dt}\right]_{t=0} = \left[\frac{d}{dt}\left[E\left(1-e^{-\frac{t}{RC}}\right)\right]\right]_{t=0} = \frac{E}{RC} = \frac{E}{\tau}$$

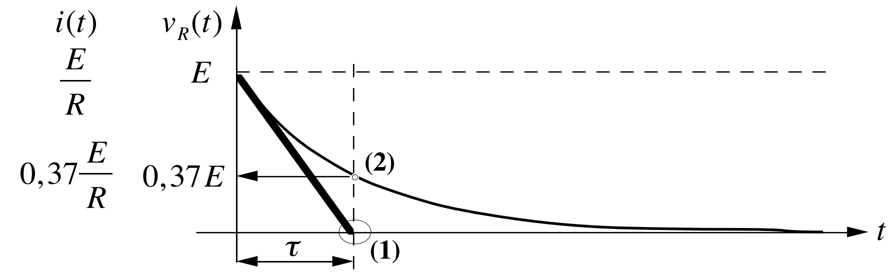
Grafikoki honelaxe ikus dezakegu: marraztu, tentsio-kurbaren gainean, $t = 0$ uneko lerro zuzen ukitzailea E balioraino (1 puntua); orduan, puntu horretatik beherantz, marraztu lerro zuzen bertikala ardatz horizontaleraino (2 puntua); hain zuzen ere, $t = 0$ puntutik puntu berri horretaraino dagoen denbora-tartea da τ denbora-konstantea, ondoko irudian erakusten den legez. Lerro zuzen bertikalaren eta kurbaren arteko ukitze-puntuaren balioa (3 puntua) $0{,}63E$ da, lehen kalkulatu dugun bezala. (Honek guztiak kargaren kurbarako ere balio du, E-ren ordez CE ipiniz.)



Beste horrenbeste egin dezakegu korrontearen edo erresistentziaren muturren arteko adierazpenekin:

$$\left[\frac{dv_R(t)}{dt}\right]_{t=0} = \left[\frac{d}{dt}\left(E\cdot e^{-\frac{t}{RC}}\right)\right]_{t=0} = -\frac{E}{RC} = -\frac{E}{\tau}$$

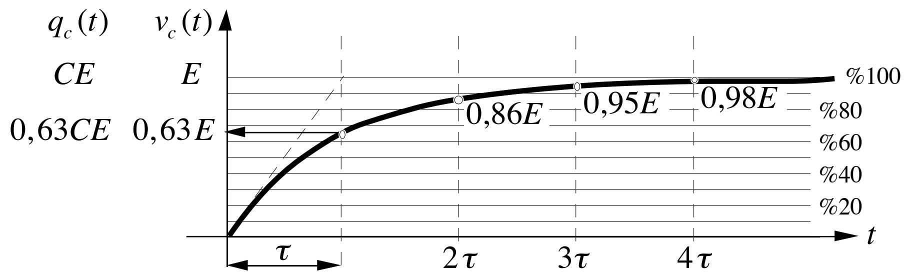
Oraingo honetan, grafikoki: marraztu, erresistentziaren tentsioaren irudiaren gainean, $t = 0$ unean, lerro zuzen ukitzailea, beherantz, E baliotik ardatz horizontaleraino (1 puntua); hain zuzen ere, $t = 0$ puntutik puntu berri horretaraino dagoen denbora-tartea da τ denbora-konstantea, ondoko irudian erakusten den legez. Lerro zuzen bertikalaren eta kurbaren arteko ukitze-puntuaren balioa (2 puntua) $0{,}37E$ da, lehen kalkulatu dugun bezala. Honek guztiak intentsitatearen kurbarako ere balio du, E-ren ordez (E/R) ipiniz.

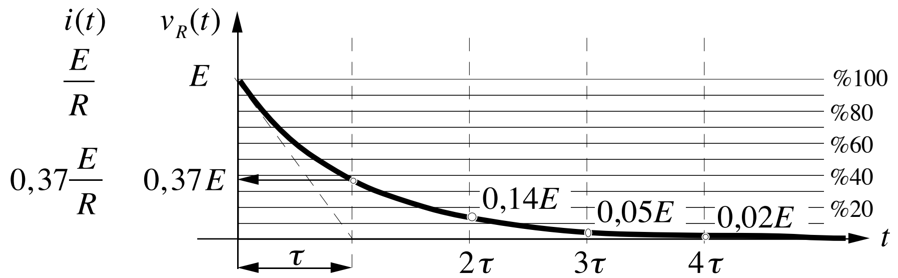


Orain une desberdinetan kurbek hartuko dituzten balio parametrizatuak kalkula ditzakegu; hau da, denbora-konstantea parametro gisa harturik, $t = \tau$, $t = 2\tau$, $t = 3\tau$, $t = 4\tau$, ... egingo dugu. Modu honetan lorturiko balioak orokorrak dira, aztertu dugun zirkuitua bezalakoak diren zirkuitu guztietarako, edozein izanda τ-ren balio zehatza.

$t = \tau$	$v_C(\tau) = 0{,}63E$	$q_C(\tau) = 0{,}63CE$	$i(\tau) = 0{,}37\frac{E}{R}$	$v_R(\tau) = 0{,}37E$
$t = 2\tau$	$v_C(2\tau) = 0{,}86E$	$q_C(2\tau) = 0{,}86CE$	$i(2\tau) = 0{,}14\frac{E}{R}$	$v_R(2\tau) = 0{,}14E$
$t = 3\tau$	$v_C(3\tau) = 0{,}95E$	$q_C(3\tau) = 0{,}95CE$	$i(3\tau) = 0{,}05\frac{E}{R}$	$v_R(3\tau) = 0{,}05E$
$t = 4\tau$	$v_C(4\tau) = 0{,}98E$	$q_C(4\tau) = 0{,}98CE$	$i(4\tau) = 0{,}02\frac{E}{R}$	$v_R(4\tau) = 0{,}02E$

Balio horiek grafikoki ikus ditzakegu:



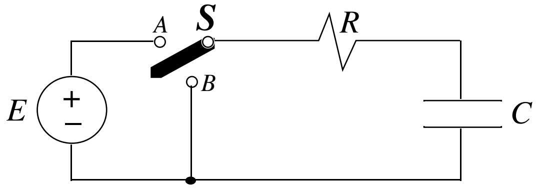


Aurreko grafikoetatik eta bertako balioetatik, honako hau ondoriozta daiteke: %2ko errorea ontzat ematen bada, zirkuituaren egoera iragankorrak $t = 0$ unetik $t = 4\tau$ unera arte irauten duela, azken une honetan balio egonkorraren %98an kargatu baita kondentsadorea. (Zehaztasun handiagoa behar izanez gero, $t = 5\tau$, edo are luzeagoa suposa daiteke egoera iragankorra.) Beraz, $t \geq 4\tau$ denean, zirkuituak egoera egonkor berria iritsi du, une horretatik aurrera kondentsadorea erabat kargatuta dagoela eta zirkuitutik igarotzen den korrontea zero dela suposatzen baita.

Deskarga-prozesua:

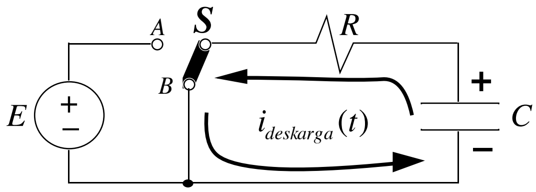
Karga-prozesurako analizatu dugun zirkuituan egoera egonkor berria iristen denean, gauzak ez dira aldatuko etengailuaren posizioa aldatu arren (hau da, etengailua irekitzen bada ere, kondentsadoreak bere karga eta tentsioa mantenduko ditu). Horrexegatik, kondentsadorearen deskarga-prozesua aztertzeko asmoz, zirkuituan zertxobait aldatu beharko dugu: irekita/itxita egon daitekeen etengailuaren ordez, konmutagailu bat jarriko dugu, *A* eta *B* posizioetan egon daitekeen gailua hain zuzen ere, bietan korrontea igarotzen uzteko gauza izanik.

Hori kontuan hartuz, deskarga-prozesurako aintzakotzat hartuko dugun zirkuitua ondoko irudikoa izango da.



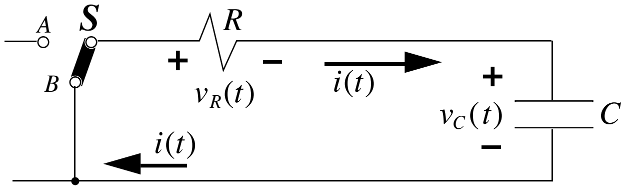
Konmutagailua *A* posizioan dagoenean, karga-prozesurako analizatu dugun zirkuituaren berdin-berdina da zirkuitu hori. Baina oraingo honetan, egoera egonkor berria iritsi ondoren konmutagailua *B* posiziora aldatzen bada, kondentsadorea deskargatzen hasiko da, korrontea igarotzeko bide itxi bat baitago, segituan ikusiko dugun legez.

Demagun konmutagailua denbora luzez ($t >> 4\tau$) egon dela *A* posizioan (hau da, kondentsadorea erabat kargatuta dago, bere tentsioa *E* izanik), eta $t = 0$ gisa izendatuko dugun unean, *S* konmutagailua *B* posiziora aldatu dugula. Agerikoa da, berriro ere, korrontea igarotzen hasiko dela, ondoko irudian erakusten den legez, kondentsadoreak elementu aktibo gisa jokatuko baitu, kargatuta dagoelako.



Korronte hori dela eta, kondentsadorea deskargatzen hasiko da, egoera iragankor berri batean baitago, lehen bezala zirkuituan aldaketa bat gertatu ondorengo egoera iragankorrean hain zuzen ere.

Zirkuitu berri horren analisia egiteko, lehen bezala, bere portaera islatzen duten ekuazioak idatzi behar ditugu. Alde batetik elementuen portaera-ekuazioak eta beste aldetik zirkuituarena, hots, Kirchhoff-en tentsioen legea. Ekuazioak idaztean aintzat hartuko ditugun aldagaiak, karga-prozesuan erabilitako berberak izango dira, emaitzak alderatu ahal izateko: $v_R(t)$, $v_C(t)$ eta $i(t)$, hain zuzen ere, ondoko irudian ageri den legez, korrontea benetan kontrako noranzkoan igaroko dela jakin arren (hau da, korronte negatiboa lortuko dugu geure soluzioetan). Lehen bezala, konmutagailua ideala dela suposatuko dugu, hau da, bere muturren arteko tentsioa zero dela beti.



Erresistentziaren portaera-ekuazioa (Ohm): $v_R(t) = Ri(t)$

Kondentsadorearen portaera-ekuazioa: $i(t) = C \cdot \dfrac{dv_C(t)}{dt}$

KTL: $0 = v_R(t) + v_C(t)$ HEMEN DAGO DESBERDINTASUNA!!!

Lehenengo bi ekuazioetatik honako hau ondorioztatzen da: $v_R(t) = RC \cdot \dfrac{dv_C(t)}{dt}$

Azken hau hirugarren ekuazioan ordezkatuz: $0 = RC\dfrac{dv_C(t)}{dt} + v_C(t)$

Azken ekuazio hau beste modu batean idatziz, zirkuituaren portaera deskarga-prozesuko denboran zehar islatzen duen ekuazioa lortuko dugu, non ezezagun bakarra $v_C(t)$ den. Hau ere ekuazio diferentziala da.

$$\boxed{\frac{dv_C(t)}{dt} + \frac{1}{RC} \cdot v_C(t) = 0}$$

Ekuazio honen soluzio orokorra, honako itxura honetakoa da:

$$v_C(t) = K_1 \cdot e^{-\frac{t}{RC}} + K_2$$

non K_1 eta K_2 direlakoak, kondentsadorearen hasierako eta bukaerako egoeren menpekoak diren bi konstante baitira.

Orain, zirkuituari dagokion soluzio partikularra lortzeko, K_1 eta K_2 konstanteak kalkulatu behar dira, honako modu honetan:

1) Hasierako egoera egonkorra ($t = 0$ unean, alegia):

Badakigu kondentsadorea kargatuta zegoela; beraz:

$$v_C(0^-) = E \text{ volt}$$

Konmutagailua aldatu ondorengo tentsioa hasierako unean, $v_C(0^+)$ delakoa, goiko formulan $t = 0$ eginez lortuko dugu:

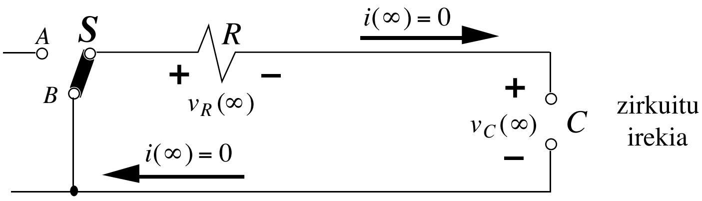
$$v_C(0^+) = K_1 + K_2$$

Biak berdinduz, $v_C(0^-) = v_C(0^+)$, K_1 eta K_2 konstanteek bete behar duten honako baldintza hau lortzen da:

$$K_1 + K_2 = E$$

2) Bukaerako egoera egonkorra ($t = \infty$ unean, alegia):

Kondentsadorea zirkuitu ireki batez ordezkatuz, bukaerako egoera egonkorrari dagokion zirkuitu baliokidea honako hau da, non oso erraza den kondentsadorearen muturren arteko tentsioa kalkulatzea, KTL besterik ez aplikatuz:



KTL: $0 = v_R(\infty) + v_C(\infty) = R \cdot i(\infty) + v_C(\infty) = v_C(\infty)$

Hau da, $v_C(\infty) = 0$ volt.

Beste aldetik, balio horrek goiko formulan $t = \infty$ eginez lortutakoaren berdina izan behar du:

$$v_C(\infty) = K_1 \cdot e^{-\infty} + K_2 = K_1 \cdot 0 + K_2 = K_2$$

Biak berdinduz, K_2 konstanteak bete behar duen beste baldintza lortzen da:

$$K_2 = 0$$

Bi baldintza horiek bi ezezaguneko ekuazio-sistema osatzen dute. Kasu partikular honetarako sistema ebatziz, honako balio hauek lortzen dira:

$$K_2 = 0 \text{ eta } K_1 = E$$

Balio horiek zirkuituaren portaera une oro islatzen duen ekuazio diferentzialaren soluzio orokorrean ordezkatuz, zirkuitu partikular honi hasierako egoeraren arabera dagokion soluzio partikularra lortuko dugu:

$$\boxed{v_C(t) = E \cdot e^{-\frac{t}{RC}}}$$

Formula horretatik abiatuz, zirkuitutik igarotzen den korrontearen soluzioa lor daiteke:

$$i(t) = C \cdot \frac{dv_C(t)}{dt} \qquad \rightarrow \qquad \boxed{i(t) = -\frac{E}{R} \cdot e^{-\frac{t}{RC}}}$$

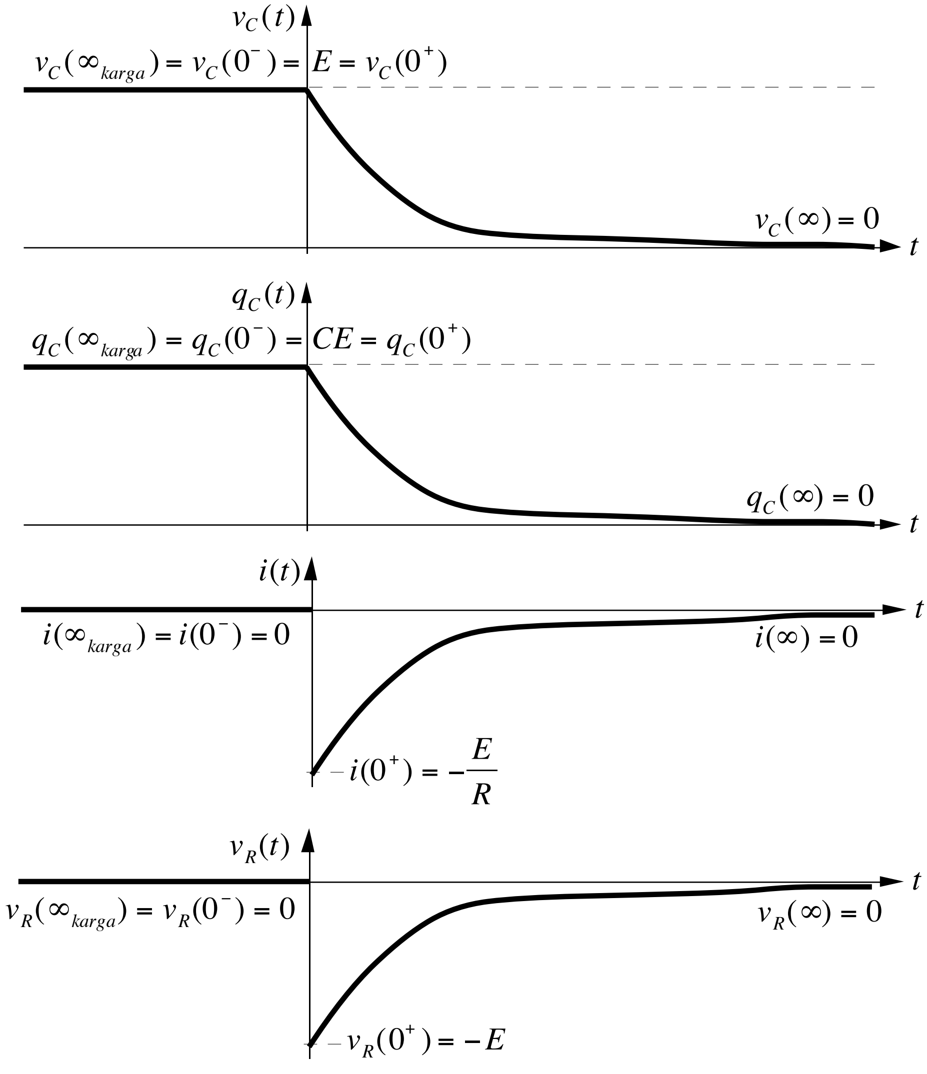
Eta hemendik, nahi izanez gero, erresistentziaren muturren arteko tentsioa lor daiteke, Ohm-en legea aplikatuz:

$$\boxed{v_R(t) = -E \cdot e^{-\frac{t}{RC}}}$$

Era berean, kondentsadorean metaturiko kargaren adierazpena ere lor daiteke, $q_C(t) = C \cdot v_C(t)$ dela gogoratuz:

$$q_C(t) = CE \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$$

Orain, adierazpen horiek grafikoki marraztuko ditugu, denboran zehar magnitudeak nola aldatzen diren ikusteko:



Karga-prozesuan bezala, azpimarratzekoa da, kondentsadorearen muturren arteko tentsioa eta kondentsadoreak metatu duen karga funtzio jarraituak direla; zirkuitutik igarotzen den korrontea eta erresistentziaren muturren arteko tentsioa, berriz, ez dira jarraituak $t = 0$ unean; aitzitik, bat-batean aldatu dira.

Denbora-konstantea:

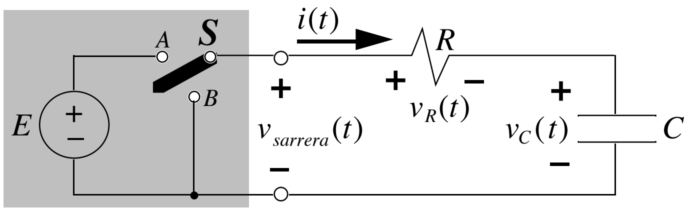
Kasu honetan karga-prozesuko denbora-konstantearen berdina da deskarga-prozesukoa, kondentsadorea erresistentzia beretik deskargatzen baita. Dena den, desberdinak izan daitezke, ariketetan ikusiko dugun bezalaxe, zeren:

$$\tau_{karga} = R_{karga} \cdot C \qquad \text{eta} \qquad \tau_{deskarga} = R_{deskarga} \cdot C$$

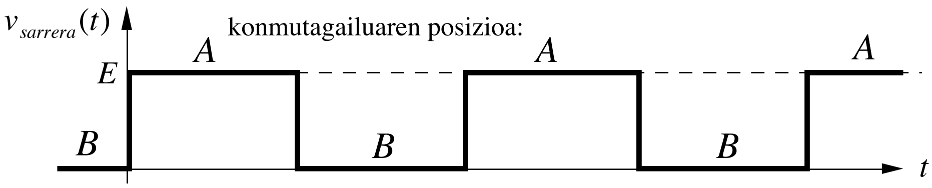
Dena den, deskarga-prozesuan ere, karga-prozesuan bezala, honako hau ikus daiteke: zirkuituaren egoera iragankorrak $t = 0$ unetik $t = 4\tau$ unera arte irauten du, azken une honetan balio egonkorraren %98an deskargatu baita kondentsadorea. Zirkuituak, beraz, $t \geq 4\tau$ denean iritsi du egoera egonkor berria, une horretatik aurrera kondentsadorea erabat deskargatuta dagoela eta zirkuitutik igarotzen den korrontea zero dela suposatzen baita.

RC zirkuituak seinale karratu bati ematen dion erantzuna:

Oraingo honetan, karga- eta deskarga-prozesuen segida aztertu nahi dugu. Horretarako, ondoko irudiko zirkuitua hartuko dugu aintzakotzat.



S konmutagailua *A* posiziotik *B* posiziora, eta alderantziz, *B* posiziotik berriro *A* posiziora, etengabe aldatzen ari dela suposatuko dugu. Tentsio-sorgailua eta konmutagailua aztertu nahi dugun zirkuituaren sarrera gisa definitzen baditugu, konmutagailuaren etengabeko posizio-aldaketa hori seinale karratu bihurtzen da $v_{sarrera}(t)$ sarrerako tentsioari dagokionez, ondoko irudian erakusten den legez.



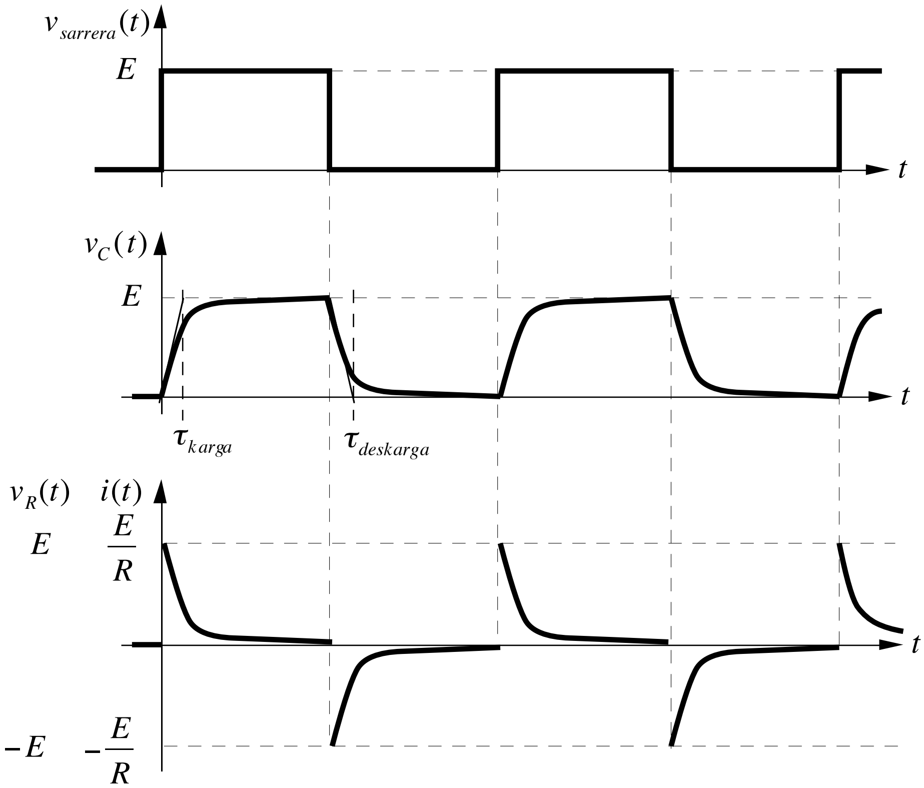
Halaber, *S* konmutagailuak *A* posizioan eta *B* posizioan denbora-tarte berdinak ematen dituela suposatuko dugu. Horrela, seinale karratuaren periodoa *T* baldin bada, *T*/2 denbora-tartean konmutagailua *A* posizioan egongo da eta, ondorioz, kondentsadorea kargatuz joango da. Beste periodo-erdian, konmutagailua *B* posizioan egongo da eta kondentsadorea deskargatuz joango da.

Orain, *RC* zirkuituak sarrerako seinale karratu horri emango dion erantzuna aztertu nahi dugu; hots, kondentsadorearen tentsioa eta korrontea nolakoak izango diren aztertuko dugu.

Irakurleak, dagoeneko, seinalearen periodoaren arabera erantzuna desberdina izango dela suposatuko du (edo, gauza bera dena, maiztasunaren arabera). Izan ere, aipatu dugu jadanik kondentsadorea osorik kargatzeko (berdin-berdin osorik deskargatzeko) denbora-tarte minimo bat behar duela; %2ko errorea ontzat emanez, $t \geq 4\tau$ izango da onartuko dugun denbora-tarterik laburrena. Hori horrela izanik, ikus dezagun nolakoa izango den zirkuituaren erantzuna kasu desberdinetan.

1. kasua: $(T/2) >> 4\tau$

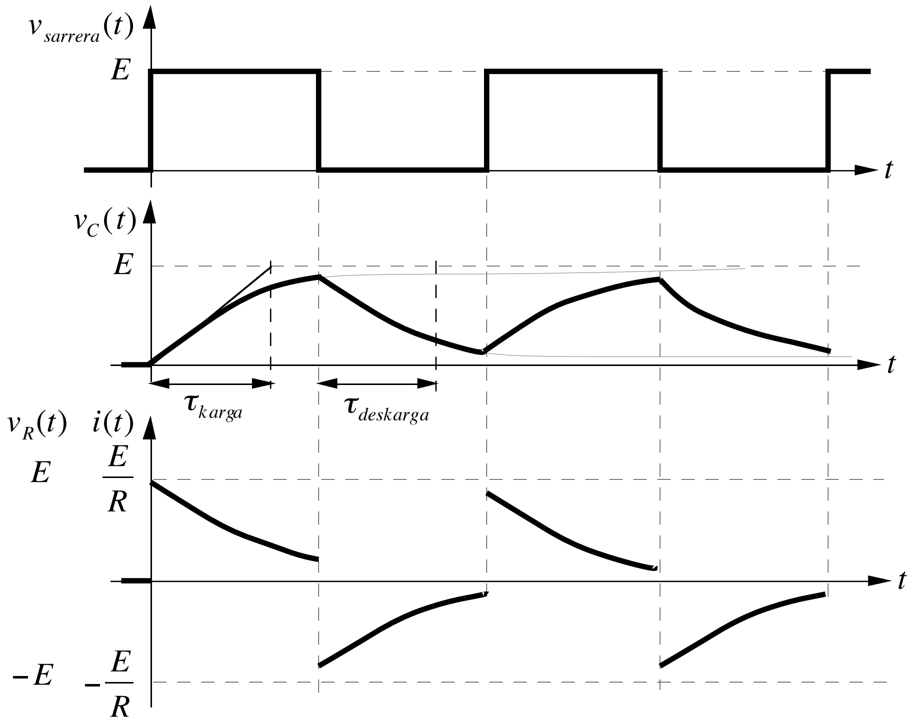
Kasu honetan, bai karga-prozesuan bai deskarga-prozesuan, kondentsadoreak nahiko astia izango du osorik kargatzeko edo deskargatzeko. Beraz, grafikoki, honelakoxeak izango dira irteerako seinaleak:



Sarrerako tentsioa eta kondentsadorearena alderatzen baditugu, agerikoa da, egoera iragankorreko zatian izan ezik, berdinak direla kondentsadoreak egoera egonkorra lortu eta gero; hau da, sarrerako tentsioa E denean, kondentsadorearena ere E izango da, eta sarrerakoa zero denean, kondentsadorearena ere zero izango da. Bien arteko desberdintasuna kondentsadoreak sartutako atzerapenean datza: kondentsadorearen muturren arteko tentsioa sarrerako tentsioaren berdina izango da, 4τ denbora-tartea igaro ondoren. Hori dela eta, kondentsadoreak zirkuituetan seinaleak atzeratu egiten dituela esaten da.

2. kasua: $(T/2) << 4\tau$

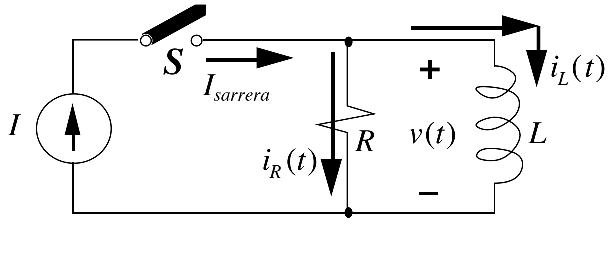
Kasu honetan, bai karga-prozesuan bai deskarga-prozesuan, kondentsadoreak ez du astirik izango osorik kargatzeko edo deskargatzeko. Grafikoki, honelakoxeak izango dira irteerako seinaleak:



Irudi honetan agerikoa da kondentsadorearen muturren arteko tentsioa desitxuratuta dagoela, sarrerako tentsioarekin alderatuta, kargatzeko eta deskargatzeko denbora faltagatik. Izan ere, kondentsadoreak ez du lortzen egoera egonkorrik, eta beti egoera iragankorretan ari da.

• *RL* zirkuitua

Zirkuitu honi dagokionez, *RC* zirkuituaren oso antzekoa denez gero, zirkuitu-eskema, dagozkion ekuazioak eta horien soluzioak baino ez ditugu aurkeztuko, laburbilduta gainera.



S etengailua itxita dagoenean, karga-prozesua gertatuko da; eta irekita dagoenean, berriz, deskarga-prozesua. Zirkuituaren analisia egiteko, honako hauek dira aintzat hartuko ditugun aldagaiak: $i_R(t)$, $i_L(t)$ eta $v(t)$ (hemen ere etengailua ideala dela suposatuko dugu, eta itxita dagoenean, bere muturren arteko tentsioa zero dela beti). Ekuazioak lortzeko, elementuen portaera-ekuazioez gain, Kirchhoff-en korronteen legea aplikatu beharko dugu.

Erresistentziaren portaera-ekuazioa (Ohm): $v(t) = Ri_R(t)$

Harilaren portaera-ekuazioa: $v(t) = L \cdot \dfrac{di_L(t)}{dt}$

KKL: $I_{sarrera} = i_R(t) + i_L(t)$

Lehenengo bi ekuazioetatik honako hau ondorioztatzen da: $i_R(t) = \dfrac{L}{R} \cdot \dfrac{di_L(t)}{dt}$

Azken hau hirugarren ekuazioan ordezkatuz: $I_{sarrera} = \dfrac{L}{R} \cdot \dfrac{di_L(t)}{dt} + i_L(t)$

Azken ekuazio hau orokorra da. Ikus dezagun nola geratzen den etengailuaren bi posizioetarako.

Karga-prozesua:	**Deskarga-prozesua:**
etengailua itxita: $I_{sarrera} = I$	etengailua irekita: $I_{sarrera} = 0$
ekuazioa: $\dfrac{di_L(t)}{dt} + \dfrac{R}{L} \cdot i_L(t) = \dfrac{R}{L} \cdot I$	ekuazioa: $\dfrac{di_L(t)}{dt} + \dfrac{R}{L} \cdot i_L(t) = 0$

soluzio orokorra: $i_L(t) = K_1 \cdot e^{-\frac{R}{L}t} + K_2$

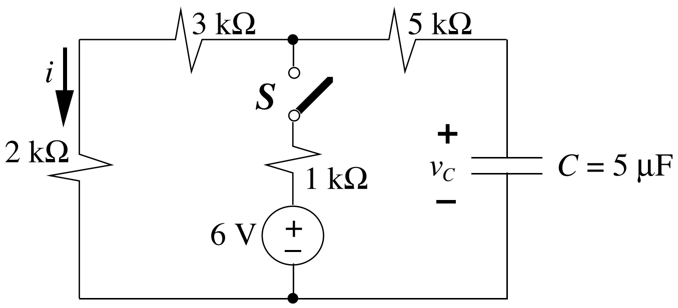
Denbora-konstantea: $\tau = \dfrac{L}{R}$

Hasierako egoera:	Hasierako egoera:
$0 = i_L(0^-) = i_L(0^+) = K_1 + K_2$	$I = i_L(0^-) = i_L(0^+) = K_1 + K_2$
Bukaerako egoera egonkorra:	Bukaerako egoera egonkorra:
$I = i_L(\infty) = K_2$	$0 = i_L(\infty) = K_2$
Konstanteen balioak:	Konstanteen balioak:
$K_2 = I$ eta $K_1 = -I$	$K_2 = 0$ eta $K_1 = I$
Soluzio partikularra:	Soluzio partikularra:
$\boxed{i_L(t) = I \cdot \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right)}$	$\boxed{i_L(t) = I \cdot e^{-\frac{R}{L}t}}$
$v(t) = RI \cdot e^{-\frac{R}{L}t}$	$v(t) = -RI \cdot e^{-\frac{R}{L}t}$
$i_R(t) = I \cdot e^{-\frac{R}{L}t}$	$i_R(t) = -I \cdot e^{-\frac{R}{L}t}$

B) Ariketa ebatziak

5.1. Kondentsadorea egoera iragankorrean

1. Irudiko zirkuituan, etengailua $t = 0$ unean ireki dugu, denbora luzez itxita egon ondoren.



a) Kalkula itzazu honako balio hauek: $v_C(0^-)$, $i(0^-)$, $v_C(0^+)$, $i(0^+)$, $v_C(\infty)$, $i(\infty)$.

b) Zenbat denbora beharko du kondentsadoreak bere muturren arteko tentsioa 2,5 V-ekoa izan dadin?

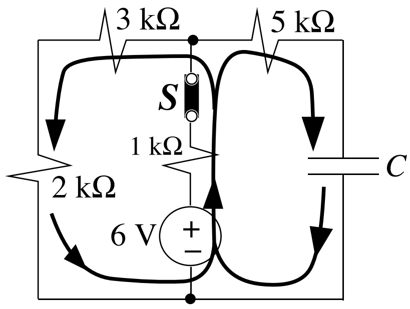
c) Etengailua denbora luzean irekita egon ondoren, berriro itxi dugu. Zenbat denbora beharko du kondentsadoreak oreka berrian lortuko duen tentsioaren erdia lortzeko?

Ebazpena:

Ariketa honetan, egoera iragankorra da analizatu nahi duguna, jakin baitakigu kondentsadoreak "inertzia" elektriko antzeko bat baduela zirkuituko aldaketei erantzuteko unean. Hemen aldaketa garrantzitsu bat gertatu da etengailuaren posizioa aldatzean, zirkuitua erabat aldatu baita:

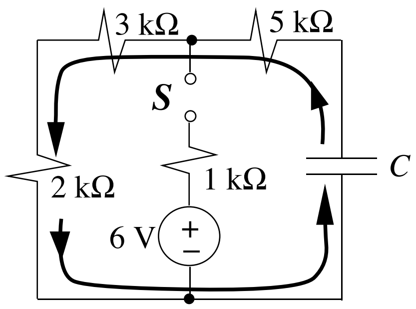
Etengailua itxita

kondentsadorearen karga-prozesua



Etengailua irekita

kondentsadorearen deskarga-prozesua

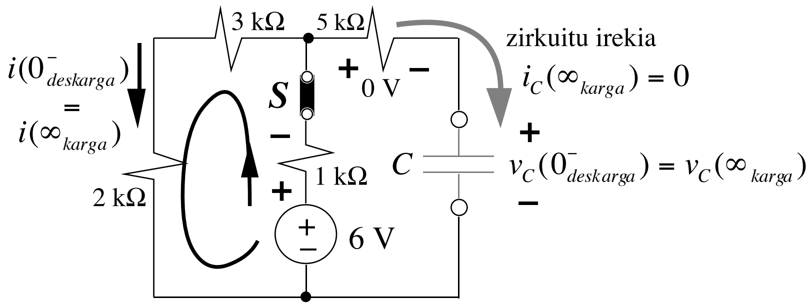


Ariketa honetan etengailua denbora luzean itxita egon dela suposatu behar dugu, hots, kondentsadorea erabat kargatu dela ezkerreko zirkuituan, 6 V-eko tentsio-sorgailuaren eraginez. Ondoren, arbitrarioki t = 0 izendatutako unean etengailua irekitzean, kondentsadorea deskargatzen hasi da, geratzen den zirkuituan (aurreko irudiko eskuinekoan) ez baitago elementu aktiborik; ondorioz, kondentsadorea izango da aktibo gisa jokatuko duena, aurreko egoeran lortu duen energia zirkuituari emanez.

Hori guztia argitu ondoren, azter dezagun zirkuitua:

a) Kalkulatu behar ditugun magnitudeak bi baino ez dira: kondentsadorearen muturren arteko tentsioa, v_C, eta ezker aldeko adarretik igarotzen den korrontea, i; hori bai, une desberdinetan: 1) $t = 0^-$ denean, hots, etengailua ireki baino pixka bat lehenago (beraz, etengailua itxita dago une horretan, eta gainera denbora luzean itxita egon denez gero, egoera egonkorrean dago zirkuitua, kondentsadoreak ez baitu susmatzen, gero etengailuaren posizioa aldatuko dugunik); 2) $t = 0^+$ denean, hots, etengailua itxi bezain laster; 3) $t = \infty$ denean, hots, zirkuitua berriro egoera egonkorrean dagoenean, baina oraingo honetan etengailua irekita dagoelarik.

1) $t = 0^-$ unean: $v_C(0^-)$ eta $i(0^-)$ kalkulatzeko, kontuan hartu behar dugu etengailua itxita dagoela eta gainera zirkuitua egoera egonkorrean dagoela (karga-prozesuan). Hori dela eta, kondentsadorea erabat kargatuta dago, eta bere barnetik ez da korronterik pasatzen (kondentsadorea nolabait "ase" dela esan dezakegu), zirkuitu ireki gisa jokatuz. Ondorioz, aztertu beharreko zirkuitua honako hau da:



Zirkuitua aztertuz gero, agerikoa da korrontea ezkerreko mailatik bakarrik igarotzen dela, 6 V-eko tentsio-sorgailuaren eraginez. Maila horretan KTL aplikatuz, $i(0^-)$ kalkulatuko dugu:

$$1i(0^-) + 3i(0^-) + 2i(0^-) = 6 \quad \rightarrow \quad i(0^-) = \frac{6\ \text{V}}{1\ \text{k}\Omega + 3\ \text{k}\Omega + 2\ \text{k}\Omega} \quad \rightarrow$$

$$\boxed{i(0^-) = 1\ \text{mA}}$$

Orain, $v_C(0^-)$ kalkulatzeko, KTL aplikatu behar dugu eskuineko mailan:

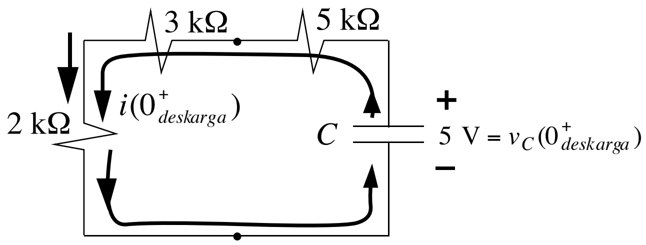
$$v_C(0^-) = -1i(0^-) + 6 = (-1 + 6)\ \text{V} \quad \rightarrow \quad \boxed{v_C(0^-) = 5\ \text{V}}$$

Azken emaitza hori azpimarratu behar delakoan gaude, agerikoa baita kondentsadorea ez dela kargatu tentsio-sorgailuaren tentsio berdinarekin (6 V), zirkuituaren arabera dagokionarekin baizik. Hortik dator, beraz, zirkuitua ebaztearen garrantzia, emaitza zein izango den aldez aurretik suposatu gabe.

2) $t = 0^+$ unean: $v_C(0^+)$ eta $i(0^+)$ kalkulatzeko, kontuan hartu behar dugu kondentsadorearen tentsioa ez dela bat-batean aldatzen, nahiz eta zirkuitua aldatu. Hots, azalpen teorikoetan ikusi dugun legez, beti betetzen da, aldaketa gertatu baino pixka bat lehenago eta pixka bat geroago kondentsadorearen muturren arteko tentsioa berbera dela; hots: $v_C(0^+) = v_C(0^-)$. Beraz, kasu honetan:

$$\boxed{v_C(0^+) = 5\ \text{V}}$$

Etengailua ireki ondoren, kondentsadorearen hasierako tentsio horretan oinarriturik, korrontea kalkula dezakegu, etengailua ireki ondoren zirkuituan dagoen elementu aktibo bakarra kondentsadorea dela kontuan hartuz; hori dela eta, aztertu beharreko zirkuitua honako hau da:



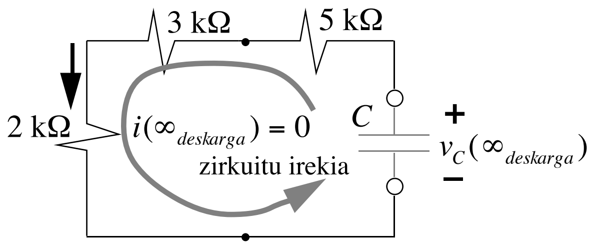
Beraz, zirkuitutik igarotzen den korrontea, kondentsadorearen deskarga-korrontea da. Maila horretan KTL aplikatuz, $i(0^+)$ kalkulatuko dugu:

$$5i(0^+) + 3i(0^+) + 2i(0^+) = v_C(0^+) = 5\ \text{V} \quad \rightarrow \qquad i(0^+) = \frac{5}{5+3+2}\ \text{mA}$$

$$\boxed{i(0^+) = 0{,}5\ \text{mA}}$$

Beraz, azpimarragarria da *i* korrontea bat-batean aldatu dela etengailuaren posizioa aldatzean, $v_C(0^+) = v_C(0^-)$ betetzen den arren; hots, kondentsadorearen muturren arteko tentsioa jarraitua izan arren, $i(0^+) \neq i(0^-)$ da.

3) $t = \infty$ unean: $v_C(\infty)$ eta $i(\infty)$ kalkulatzeko, kontuan hartu behar dugu etengailua irekita dagoela eta gainera zirkuitua egoera egonkorrean dagoela. Hori dela eta, kondentsadorea erabat deskargatuta dago; eta bere barnetik ez da korronterik pasatzen (hasieran zeukan energia guztia galdu egin baitu), zirkuitu ireki gisa jokatzen baitu. Ondorioz, aztertu beharreko zirkuitua honako hau da:



Zirkuitua aztertuz gero, kondentsadorearen zirkuitua irekia denez, agerikoa da ez dela korronterik igarotzen; hots:

$$\boxed{i(\infty) = 0 \text{ mA}}$$

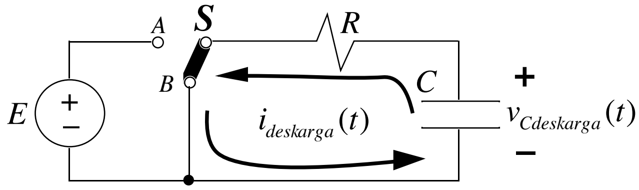
Berriro ere, $v_C(\infty)$ kalkulatzeko, KTL aplikatu behar dugu; erresistentzien muturren arteko tentsioak zero izango dira, ez baita korronterik pasatzen; ondorioz:

$$\boxed{v_C(\infty) = 0 \text{ V}}$$

Hots, etengailua irekita egonda denbora luzea igaro ondoren, kondentsadorea erabat deskargatu da.

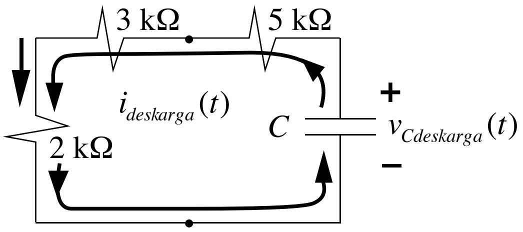
b) Ariketaren hasieran egoera iragankorra aztertu nahi dugula esan arren, aurreko atalean hasierako eta bukaerako egoera egonkorrak aztertu ditugu soilik, une jakin batzuetan besterik ez baitugu zirkuituaren portaera analizatu. Azter dezagun orain etengailua irekitzeagatik gertatzen den egoera iragankorra, hots, zer gertatzen den denbora igaro ahala. Horretarako, aintzakotzat hartuko dugu teorian ikusitakoa, ez baitugu hemen han azaldutakoa errepikatuko.

Kasu honetan, kondentsadorearen deskarga-prozesua aztertu behar dugu, horixe baita etengailua irekitzean gertatzen den prozesua, ikusi dugun legez. Gogora dezagun, bada, deskarga-prozesua islatzen duen ekuazioa zein den, baldin eta kondentsadorea oso-osorik deskargatzen bada ($v_C(\infty) = 0$ V baldin bada, alegia):



$$v_C(t) = E \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$$

non *E*, kondentsadorearen deskargaren hasierako tentsioaren balioa den; *R*, kondentsadoreak deskargan zehar bere muturren artean "dakusan" erresistentzia; eta *C*, kondentsadorearen kapazitatea. Zirkuitu honetan, beraz, zehatz-mehatz, honelaxe gertatzen dira gauzak:



$E = v_C(0^+) = \mathbf{5\ V}$

$R = 5\ \text{k}\Omega + 3\ \text{k}\Omega + 2\ \text{k}\Omega$ (seriean baitaude) $\rightarrow$ $\mathbf{R = 10\ k\Omega}$

$\mathbf{C = 5\ \mu F}$

Deskarga-prozesuko denbora-konstantea:

$$\tau_{deskarga} = R_{deskarga} \cdot C = 10\ \text{k}\Omega \cdot 5\ \mu\text{F} = 50\ \text{ms}$$

Denbora-konstantea milisegundotan ateratzen da µF bider kΩ delako (gogoratu F bider Ω = segundo dela). Hau da:

$$\tau_{deskarga} = 10\ \text{k}\Omega \cdot 5\ \mu\text{F} = 10 \cdot 10^3\ \Omega \cdot 5 \cdot 10^{-6}\ F = 50 \cdot 10^{-3}\ \text{s} = 50\ \text{ms}$$

Eta deskarga-prozesuko ekuazioa: $v_C(t) = 5 \cdot e^{-\frac{t}{50}}$ volt
non t denbora milisegundotan dagoen.

Ekuazio hori kontuan hartuz, kondentsadoreak bere muturren artean 2,5 V-eko tentsioa izan arte zenbat denbora behar duen kalkula dezakegu, hots, deskarga-prozesuaren hasieran zeukanaren erdia izan arteko denbora.

$$v_C(t_{0,5}) = 2,5\ \text{V} = 5e^{-\frac{t_{0,5}}{50}} \quad \rightarrow \quad e^{-\frac{t_{0,5}}{50}} = 0,5 \quad \rightarrow \quad -\frac{t_{0,5}}{50} = \ln(0,5) \quad \rightarrow$$

$$t_{0,5} = -50\ln(0,5)\ \text{ms} \quad \rightarrow \quad \boxed{t_{0,5} = 34,66\ \text{ms}}$$

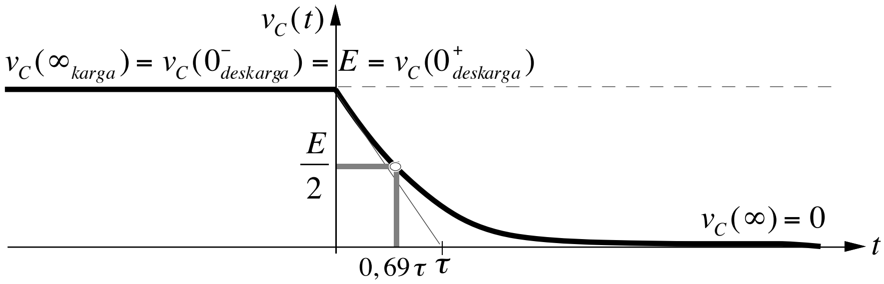
Prozesu hori guztia modu orokor batean egin dezakegu, zirkuitu jakin baterako partikularizatu gabe. Era horretan lorturiko soluzioa orokorra izango da, deskarga--prozesuan ari den edozein zirkuitutarako:

$$v_C(t_{0,5}) = \frac{E}{2} = Ee^{-\frac{t_{0,5}}{\tau}} \quad \rightarrow \quad e^{-\frac{t_{0,5}}{\tau}} = 0,5 \quad \rightarrow \quad t_{0,5} = -\tau\ln(0,5) \quad \rightarrow$$

$$\boxed{t_{0,5} = 0,69\tau}$$

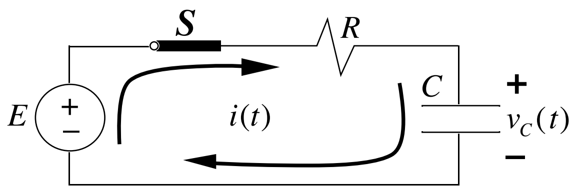
Hau da, hasierako tentsioaren erdia deskargatzeko, hau bezalako zirkuitu guztiek denbora berdina beharko dute, baldin eta denbora hori denbora-konstantetan neurtzen badugu; hots, zirkuitu guztiek 0,69 aldiz denbora-konstantea beharko dute hasierako tentsioaren erdia deskargatzeko.

Honekin bukatu baino lehen, honako hau azpimarratu behar dugu: hasierako tentsioaren erdia deskargatzeko behar den denbora ez da, inolaz ere ez, tentsio osoa deskargatzeko behar denaren erdia, prozesua ez baita lineala, esponentziala baizik (gogoratu teorian ikusitako kurbak, 288. orrialdean).



Hau hobeto argitzearren, gogora dezagun 4τ pasatu ondoren zirkuitua egoera egonkorrera iritsi dela onartzen dela, hots, hasierako tentsioa osorik deskargatzeko 4τ behar direla; beraz, garbi dago tentsio erdia deskargatzeko behar den $0{,}69\tau$ denbora hori ez dela 2τ. Edo, halaber, bi aldiz denbora hori pasatu ondoren kondentsadorearen tentsioa zenbatekoa izango den kalkula dezakegu, hots, $1{,}38\tau$ pasatu ondoren: $v_C(1,38\tau) = 0,25E$, hau da, hasierako tentsioaren laurden bat, gutxi gora behera, mantentzen du oraindik kondentsadoreak.

c) Orain ondokoa suposatu behar dugu: kondentsadorea erabat deskargatu denean (etengailua denbora luzean irekita egon delako), etengailua hasierako posiziora eraman dugula, hots, berriro itxi dugula. Hori dela eta, beste egoera iragankor bat gertatuko da, kondentsadorearen karga-prozesuan zehar. Gogora dezagun, bada, zein den karga-prozesua islatzen duen ekuazioa, baldin eta hasieran kondentsadorea deskargatuta badago ($v_C(0) = 0$ baldin bada, alegia):

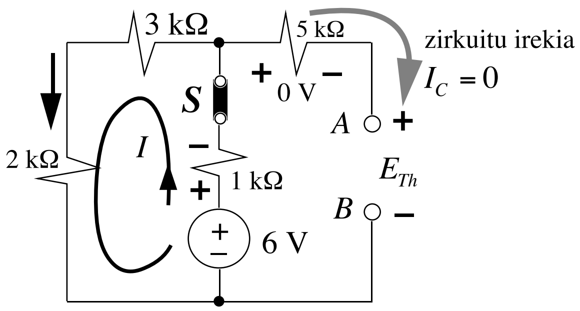


$$v_C(t) = E \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right)$$

non E, kondentsadoreak karga-prozesuaren bukaeran lortuko duen tentsioaren balioa den; R, kondentsadoreak kargan zehar bere muturren artean "dakusan" erresistentzia; eta C, kondentsadorearen kapazitatea.

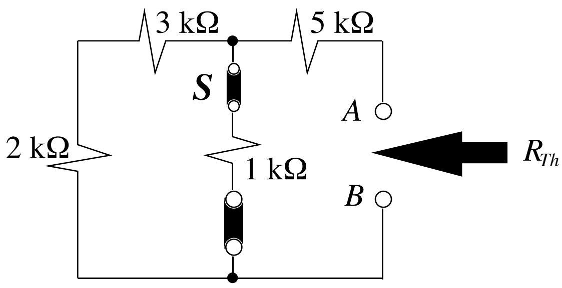
Teorian analizatutako zirkuitu hori eta orain eskuartean daukaguna alderatuz gero, agerikoa da ez direla berdinak, azken honetan paraleloan konektaturiko adarrak baitaude; beraz, nola aplikatu aurreko ekuazio hori? Aplikagarria al da? Erantzuna baiezkoa da: nahikoa dugu kondentsadorearen muturren arteko Thévenin-en zirkuitu baliokidea bilatzea, teorian analizatutakoaren berdina izateko. Lor dezagun, bada, analizatu behar dugun zirkuituaren Thévenin-en zirkuitu baliokidea kondentsadorearen muturren artean:

E_{Th} = kondentsadorearen muturren arteko tentsioa zirkuitua irekita dagoenean (oharra: alderatu hurrengo zirkuitua, $v_C(0^-)$ kalkulatzeko erabili dugunarekin):



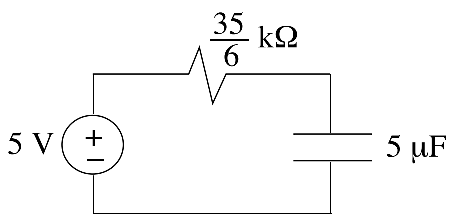
KTL: $6 = 1I + 3I + 2I \;\rightarrow\; I = 1\text{ mA} \;\rightarrow\; E_{Th} = -1I + 6 \;\rightarrow\; E_{Th} = 5\text{ V}$

R_{Th} = kondentsadorearen muturren arteko erresistentzia baliokidea:



$$R_{Th} = 5 + \frac{1\cdot(3+2)}{1+(3+2)} \;\rightarrow\; R_{Th} = \frac{35}{6}\text{ k}\Omega$$

Karga-prozesuko zirkuitu baliokidea:



$\mathbf{E = 5\ V}$

$\mathbf{R = \frac{35}{6}\ k\Omega}$

$\mathbf{C = 5\ \mu F}$

Karga-prozesuko denbora-konstantea: $\tau_{karga} = R_{karga} \cdot C = \frac{175}{6}\text{ ms} = 29{,}17\text{ ms}$

Eta karga-prozesuko ekuazioa: $v_C(t) = 5\cdot\left(1 - e^{-\frac{t}{29{,}17}}\right)$ volt

Ekuazio hori kontuan hartuz, kondentsadoreak bere muturren artean oreka berrian lortuko duen tentsioaren erdia (2,5 V-eko tentsioa, alegia) izan arte zenbat denbora behar duen kalkula dezakegu.

$$v_C(t_{0,5}) = 2,5\ \text{V} = 5 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{0,5}}{29,17}}\right)\ \text{V} \quad \rightarrow \quad e^{-\frac{t_{0,5}}{29,17}} = 0,5 \quad \rightarrow$$

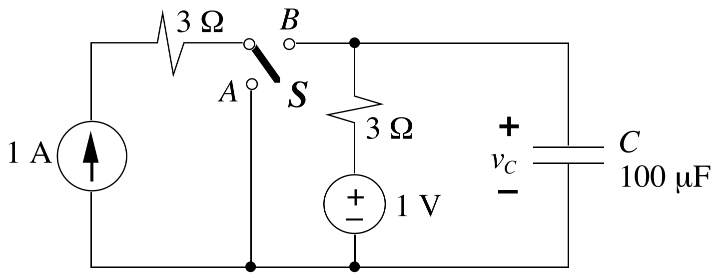
$$-\frac{t_{0,5}}{29,17} = \ln(0,5) \quad \rightarrow \quad t_{0,5} = -29,17 \ln(0,5)\ \text{ms} \quad \rightarrow \quad \boxed{t_{0,5} = 20,22\ \text{ms}}$$

Hemen ere, aurreko prozesu hori guztia modu orokor batean eginez gero, lehengo emaitza bera lortzen da:

$$\boxed{t_{0,5} = 0,69\tau}$$

Ondorioa hauxe da: tentsioaren erdia kargatzeko zein deskargatzeko, denbora--konstante kopuru berdina behar da; baina horrek ez du esan nahi denbora bera behar denik, ikusi dugun legez, kargarako eta deskargarako denbora-konstanteak desberdinak izan baitaitezke.

2. Irudiko zirkuituan:



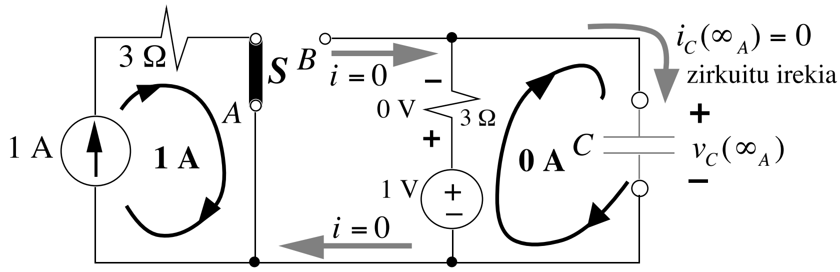
a) Kalkula ezazu zenbat balio duen kondentsadorearen borneen arteko potentzial-diferentziak etengailua denbora luzez *A* posizioan egon ondoren.

b) t = 0 unean etengailua *B* posiziora eramaten badugu, kalkula ezazu zenbat denbora beharko duen kondentsadoreak egoera egonkorrean edukiko zukeen kargaren %90 lortzeko.

c) Etengailua *B* posizioan denbora luzez egon ondoren, t' = 0 unean berriro *A* posiziora eramaten badugu, kalkula ezazu zenbatekoa izango den kondentsadorearen muturren arteko tentsioa 150 μs pasatu ondoren.

Ebazpena:

a) Lehen bezala, etengailua denbora luzez *A* posizioan aldatu gabe egon bada, horrek esan nahi du zirkuitua egoera egonkorrean dagoela eta baita kondentsadorea ere, zirkuitu ireki gisa jokatuz (erabat kargatuta edo deskargatuta dagoelako; orain ikusiko dugu nola dagoen egoera horretan). Azter dezagun, bada, egoera horri dagokion zirkuitu baliokidea:



Berriro ere, $v_C(\infty_A)$ kalkulatzeko, KTL aplikatu behar dugu eskuineko mailan:

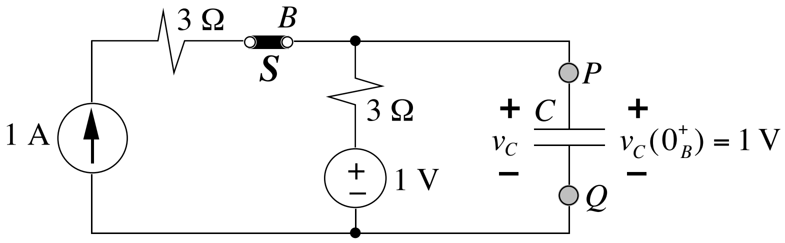
$$1\text{ V} = 3i_C(\infty_A) + v_C(\infty_A)$$

Eskuin aldeko mailako 3 Ω-eko erresistentziaren muturren arteko tentsioa zero da, ez baita korronterik pasatzen; ondorioz:

$$\boxed{v_C(\infty_A) = 1\text{ V}}$$

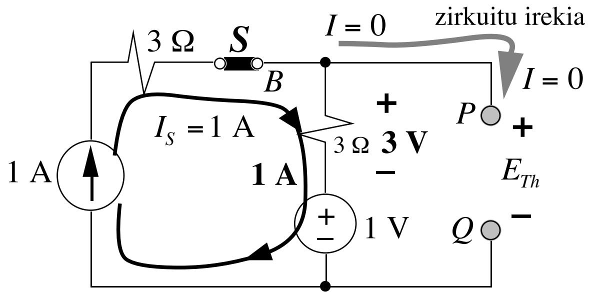
Hots, etengailua *A* posizioan denbora luzez egon ondoren, kondentsadorea erabat kargatu da, 1 V-eko tentsioarekin, horixe baita bere muturren artean duen tentsio--sorgailuaren balioa.

b) Orain, arbitrarioki $t = 0$ izendatuko dugun unean etengailua *B* posiziora eramatean, egoera iragankor berria hasiko da. Baina, kasu honetan, aldez aurretik ez dago jakiterik zer gertatuko zaion kondentsadoreari, hots, ea deskargatuko den zerora edo gehiago kargatuko den 1 V-etik gora, etengailua posizioz aldatzean geratzen den zirkuitua ez baita teorian aztertu ditugun horietakoa. Hona hemen zirkuitua:



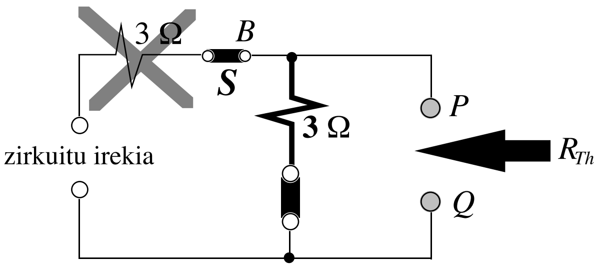
Beraz, teorian aztertutako zirkuituekin alderatu ahal izateko (batik bat aplikatu beharko dugun ekuazioa zein den jakiteko, kargarena edo deskargarena), zirkuitu horren Thévenin-en zirkuitu baliokidea bilatu beharko dugu kondentsadorearen muturren artean, *P* eta *Q* puntuen artean alegia, horixe baita kondentsadoreak dakusan zirkuitua.

E_{Th} = kondentsadorearen muturren arteko tentsioa zirkuitua irekita dagoenean:



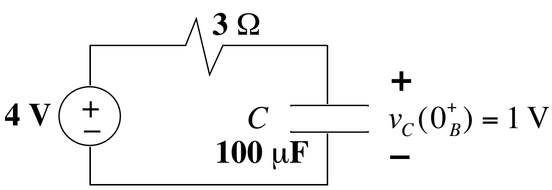
$$I_S = 1 \text{ A} \rightarrow E_{Th} = 3I_S + 1 \text{ V} \rightarrow E_{Th} = 4 \text{ V}$$

R_{Th} = kondentsadorearen muturren arteko erresistentzia baliokidea:



$R_{Th} = 3\ \Omega$

Beraz, etengailua *B* posizioan dagoenean, zirkuitu baliokidea honako hau da:



$E = \mathbf{4\ V}$

$R = \mathbf{3\ \Omega}$

$C = \mathbf{100\ \mu F}$

Horrela, karga-zirkuitua lortu dugu. Ondorioz, kondentsadorea kargatu egingo dela pentsa dezakegu, baina hori kondentsadorearen hasierako tentsioaren arabera izango da. Izan ere, kondentsadoreak zirkuitu horretan karga gehiago hartuko duen ala hasieran zeukana galduko duen jakin ahal izateko, bere hasierako tentsioa eta tentsio-sorgailuaren balioa alderatu beharko ditugu, honako bi kasu hauek gerta daitezkeelako: 1) kondentsadorearen hasierako tentsioa tentsio-sorgailuarena baino txikiagoa baldin bada, kondentsadorea kargatu egingo da tentsio-sorgailuaren tentsioa lortu arte; 2) kontrakoa baldin bada, ordea, aurreko zirkuituan KTL aplikatzean, agerikoa da kondentsadoreak elementu aktibo gisa jokatuko duela, eta tentsio-sorgailuak, berriz, pasibo gisa; eta kondentsadorea deskargatu egingo da, tentsio-sorgailuaren tentsioa lortu arte.

Eta, zein da gure kasua, lehenengoa ala bigarrena? Hots, zenbatekoa da kondentsadorearen hasierako tentsioa, etengailua *B* posiziora aldatu bezain laster?

Badakigu aurreko atalean kalkulatu dugun tentsioa izango duela, hots, etengailua denbora luzez *A* posizioan egonda kondentsadoreak lortu duen tentsioa:

$$v_C(0_B^+) = v_C(\infty_A) = 1\ \text{V}$$

Ondorioz, ikusitako lehenengo kasuan gaude, hots, kondentsadorea kargatu egingo da, eta hasierako 1 V-eko tentsio hori handituz joango da, 4 V-eko tentsioa lortu arte; une horretan, egoera egonkorra erdietsiko du zirkuituak.

Karga-prozesuko denbora-konstantea: $\tau_{karga} = R_{karga} \cdot C = 300\ \mu\text{s}$

Orain, kondentsadoreak orekako tentsioaren %90a lortzeko zenbat denbora behar duen jakiteko, karga-prozesuko ekuazioa idatzi behar dugu. Baina arazo bat daukagu, aurreko ariketan esan baitugu, bertan erabilitako ekuazio horrek soilik balio duela hasieran kondentsadorea deskargatuta baldin badago; eta hori ez da ariketa honetan gertatzen. Zer egin dezakegu? Berriro ere, gogoratu teorian azaldutakoa: analizatu behar dugun zirkuituaren portaera iragankorra islatzen duen ekuazio diferentzialaren soluzio orokorra honako hau da:

$$v_C(t) = K_1 \cdot e^{-\frac{t}{RC}} + K_2$$

non K_1 eta K_2 kondentsadorearen hasierako eta bukaerako egoeren menpekoak diren bi konstante diren.

Orain, zirkuituari dagokion soluzio partikularra lortzeko, K_1 eta K_2 konstanteak kalkulatu behar dira, honako modu honetan:

1) Hasierako egoera egonkorra ($t = 0$ unean, alegia):

Badakigu $v_C(0_B^-) = v_C(\infty_A) = 1\ \text{V}$ dela.

Soluzio orokorrean $t = 0$ eginez lortutakoaren arabera:

$$v_C(0_B^+) = K_1 + K_2$$

Beraz, goiko bi balioak berdinduz, $v_C(0^-) = v_C(0^+)$ eginez alegia, K_1 eta K_2 konstanteek bete behar duten honako baldintza hau lortzen da:

$$K_1 + K_2 = 1$$

2) Bukaerako egoera egonkorra ($t = \infty$ unean, alegia):

Badakigu, egoera egonkorrean zirkuituan dakusan tentsio-sorgailuaren (gogoratu, Thévenin-en tentsio baliokidea) balioarekin kargatuko dela kondentsadorea: $v_C(\infty_B) = 4\ \text{V}$.

Beste aldetik, balio horrek goiko formulan $t = \infty_B$ eginez lortutakoaren berdina izan behar du:

$$v_C(\infty_B) = K_1 \cdot e^{-\infty} + K_2 = K_1 \cdot 0 + K_2 = K_2$$

Biak berdinduz, K_2 konstanteak bete behar duen beste baldintza lortzen da:

$$K_2 = 4$$

Bi baldintza horiek bi ezezaguneko ekuazio-sistema osatzen dute. Sistema ebatziz, kasu partikular honetarako, honako balio hauek lortzen dira:

$$K_2 = 4 \text{ eta } K_1 = -3$$

Balio horiek zirkuituaren portaera une oro islatzen duen ekuazio diferentzialaren soluzio orokorrean ordezkatuz, zirkuitu partikular honi hasierako egoeraren arabera dagokion soluzio partikularra lortuko dugu:

$$\boxed{v_C(t) = 4 - 3e^{-\frac{t}{300}}}$$

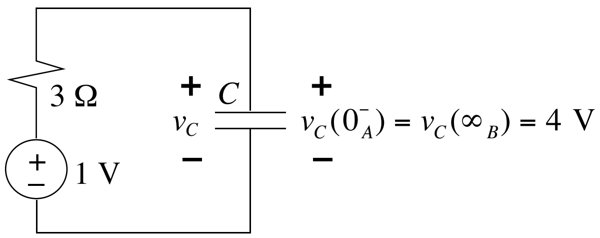
Orain bai, ekuazio hori kontuan hartuz, kondentsadoreak bere muturren artean oreka berrian lortuko duen tentsioaren %90 (hots, 0,9 · 4 volt) izan arte zenbat denbora behar duen kalkula dezakegu.

$$v_C(t_{0,9}) = 0,9 \cdot 4 = 4 - 3e^{-\frac{t_{0,9}}{300}} \rightarrow e^{-\frac{t_{0,9}}{300}} = \frac{0,4}{3} \rightarrow -\frac{t_{0,9}}{300} = \ln\left(\frac{0,4}{3}\right) \rightarrow$$

$$t_{0,9} = -300 \ln\left(\frac{0,4}{3}\right) \text{ ms} \rightarrow \boxed{t_{0,9} = 604,5 \ \mu\text{s}}$$

c) Lehen bezala, etengailua *B* posizioan denbora luzez aldatu gabe egon bada, horrek esan nahi du zirkuitua egoera egonkorrean dagoela eta baita kondentsadorea ere, zirkuitu ireki gisa jokatuz (erabat kargatuta dagoelako, 4 V-eko tentsioarekin, ikusi berri dugun legez). Orain, berriro ere arbitrarioki $t' = 0$ izendatuko dugun unean, etengailua *A* posiziora eraman dugu. Zer gertatuko zaio kondentsadoreari egoera iragankor berri horretan?

Badakigu hasierako tentsioa $v_C(0_A^-) = v_C(\infty_B) = 4$ V dela, eta zirkuitu berrian kondentsadoreak dakusan tentsio-sorgailua 1 V-ekoa dela. Ondorioz, aurreko atalean aipatu dugun bigarren kasua gertatuko da, hots, kondentsadorea deskargatu egingo da.



Zirkuituari dagokion portaera-ekuazio orokorra lehengoaren berdina denez gero, hasierako eta bukaerako balioekin partikularizatu beharko dugu, lehen bezala:

1) Hasierako egoera egonkorra: $v_C(0_A^-) = 4\ \text{V} = K_1 + K_2$

2) Bukaerako egoera egonkorra: $v_C(\infty_A) = 1\ \text{V} = K_2$

$$K_2 = 1 \text{ eta } K_1 = 3$$

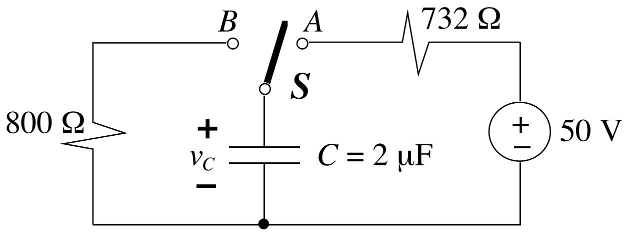
Balio horiek zirkuituaren portaera une oro islatzen duen ekuazio diferentzialaren soluzio orokorrean ordezkatuz, zirkuitu partikular honi hasierako egoeraren arabera dagokion soluzio partikularra lortuko dugu (ez dugu aipatu ere egin, baina irakurleak argi antzemango du zein den zirkuitu berri honi dagokion denbora-konstantea, 300 μs-koa hau ere):

$$v_c(t) = 1 + 3e^{-\frac{t}{300}}$$

Orain bai, ekuazio hori kontuan hartuz, kondentsadoreak bere muturren artean, etengailuaren posizioa aldatu eta 150 μs geroago zer tentsio izango duen kalkula dezakegu.

$$v_c(150) = 1 + 3e^{-\frac{150}{300}} \quad \rightarrow \quad \boxed{v_c(150) = 2{,}82\ \text{V}}$$

3. Irudiko zirkuituan, $t = 0$ unean etengailua B posiziotik A posiziora eraman dugu, B posizioan denbora luzez egon ondoren. Zenbat denbora igaroko da kondentsadoreak orekan izango duen energiaren erdia izan arte?



Ebazpena:

Etengailua B posizioan denbora luzez egon bada, horrek esan nahi du oso osorik deskargatu dela. Ondorioz, etengailua A posiziora eramaten dugunean, badakigu hasierako tentsioa zero izango dela: $v_C(0) = 0$ V.

Beste aldetik, etengailua A posizioan dagoenean geratzen den zirkuitua oso sinplea da: kondentsadorea seriean dago konektatuta 732 Ω-eko erresistentzia batekin eta 50 V-eko tentsio-sorgailu batekin. Datu horiek kontuan hartuz, egoera iragankorrari dagokion ekuazioa idatz dezakegu, aurreko ariketetan bezala:

$$v_C(t) = 50 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{1,464}}\right)$$

non t milisegundotan dagoen, denbora-konstantea ere milisegundotan jarri baitugu (τ = 732 Ω · 2 μF = 1464 μs = 1,464 ms).

Orain daukagun arazoa honako hau da: aurreko ariketetan ez bezala, hemen ez dugu kalkulatu behar zenbat denbora behar den kondentsadorearen tentsioak balio jakin bat har dezan, edota zenbateko tentsioa izango duen denbora-tarte jakin bat pasa ondoren. Ariketa honetan, ordea, honako hau jakin nahi dugu: kondentsadoreak egoera egonkorrean izango duen energiaren erdia izan arte zenbat denbora behar den. Beraz, energiaren ekuazioa beharko dugu erabili, ez tentsioarena. Horretarako, kondentsadore batek metatzen duen energia nola kalkulatzen den gogoratu beharko dugu (ikus 2. gaia, 28. orrialdea, zirkuituetako osagaiak analizatu genituenean); oro har, une jakin batean kondentsadore batek bere eremu elektrikoan metatu duen energia, honako ekuazio honek emanda dator, tentsioaren menpe:

$$W_C(t) = \frac{1}{2} \cdot C \cdot \left[v_C(t)\right]^2 - \frac{1}{2} \cdot C \cdot \left[v_C(0)\right]^2$$

Beraz, kasu honetan, $v_C(0) = 0$ V dela kontuan hartuz, energiaren ekuazioa honako hau izango da zirkuituko parametroen funtzioan:

$$W_C(t) = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot \left[50 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{1,464}}\right)\right]^2$$

Eta kondentsadoreak orekan izango duen energia (hots, $t = \infty$ eginez):

$$W_C(\infty) = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot \left[50\right]^2 \ \mu\text{J} = 2500 \ \mu\text{J}$$

Orain, kondentsadoreak orekako energia horren erdia noiz erdietsiko duen jakiteko, balio hori energiaren ekuazio orokorrean ordezkatu besterik ez dugu egin behar:

$$W_C(t_{0,5W}) = \frac{1}{2} \cdot W_C(\infty) \quad \rightarrow$$

$$W_C(t_{0,5W}) = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot (50)^2 \cdot \left[1 - e^{-\frac{t_{0,5W}}{1,464}}\right]^2 = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot 2 \cdot (50)^2\right] \quad \rightarrow$$

$$\cancel{\frac{1}{2}} \cdot \cancel{2} \cdot \cancel{(50)^2} \cdot \left[\left(1 - e^{-\frac{t_{0,5W}}{1,464}}\right)\right]^2 = \frac{1}{2} \cdot \left[\cancel{\frac{1}{2}} \cdot \cancel{2} \cdot \cancel{(50)^2}\right] \quad \rightarrow$$

$$\left[1-e^{-\frac{t_{0,5W}}{1,464}}\right]^2=\frac{1}{2} \quad \rightarrow \quad \left(1-e^{-\frac{t_{0,5W}}{1,464}}\right)=\frac{1}{\sqrt{2}} \quad \rightarrow$$

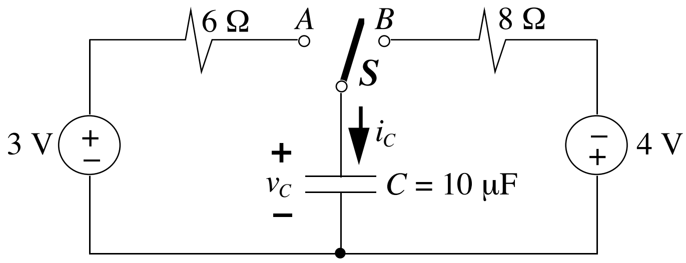
$$e^{-\frac{t_{0,5W}}{1,464}}=1-\frac{1}{\sqrt{2}} \quad \rightarrow \quad t_{0,5W}=-1,464\cdot\ln\left(1-\frac{1}{\sqrt{2}}\right) \quad \rightarrow \quad \boxed{t_{0,5W}=1,8\ \text{ms}}$$

Aurreko emaitza modu orokorrean lor daiteke, zirkuitu jakin batentzat partikularizatu gabe:

$$t_{0,5W}=-\tau\ln\left(1-\frac{1}{\sqrt{2}}\right)=1,23\tau$$

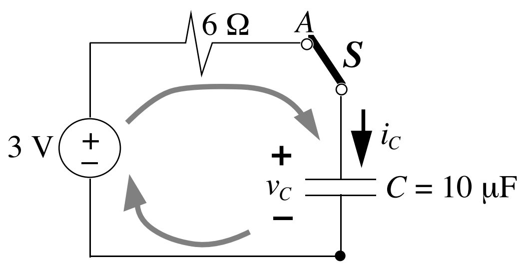
4. Irudiko zirkuituan, idatz itzazu gerta daitezkeen bi egoera iragankorrak islatzen dituzten ekuazioak, hots, etengailua *B* posiziotik *A* posiziora pasatzen denean, eta, alderantziz, *A* posiziotik *B* posiziora, horretarako posizio bakoitzean denbora luzea igaroko dela suposatuz. Bi kasu horietan, adieraz itzazu argi eta garbi honako balio hauek:

$$v_C(0^-),\ i_C(0^-),\ v_C(0^+),\ i_C(0^+),\ v_C(\infty)\ \text{eta}\ i_C(\infty)$$



Ebazpena:

Abiapuntu gisa, demagun etengailua *A* posizioan egon dela denbora luzez:

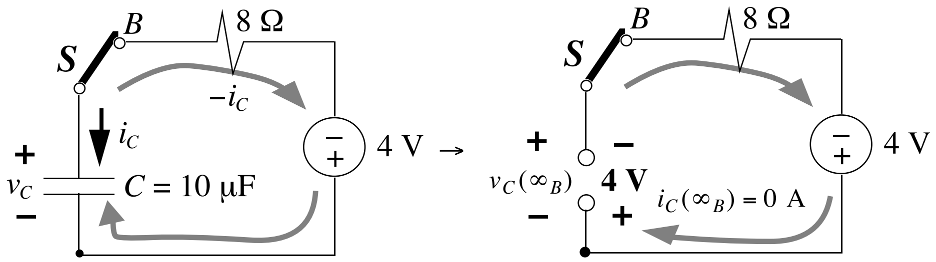


Agerikoa da karga-zirkuitua dela; ondorioz, egoera egonkorrean kondentsadorea erabat kargatuta dago, 3 V-eko tentsioarekin: $v_C(\infty_A)=3\ \text{V}$ eta $i_C(\infty_A)=0\ \text{A}$.

Demagun, orain, arbitrarioki t = 0 izendatuko dugun unean, etengailua A posiziotik B posiziora eraman dugula. Honako hau betetzen da:

$$v_C(0_B^+) = v_C(0_B^-) = v_C(\infty_A) = 3 \text{ V} \;\text{ eta }\; i_C(0_B^-) = i_C(\infty_A) = 0 \text{ A}$$

Etengailua B posizioan dagoenean aztertu beharreko zirkuitua:



Beraz, hori ere karga-zirkuitua da, hots, etengailua posizio horretan denbora luzez egon ondoren, kondentsadorea 4 V-eko tentsioarekin kargatuko da, baina hemen dago ariketa honetan azpimarratu nahi duguna: tentsio-sorgailuaren arabera, kasu honetan kondentsadoreak hartuko duen tentsioaren positiboa beheko aldean egongo da! Ondorioz, guk aintzat hartu dugun tentsioa negatiboa izango da!:

$$v_C(\infty_B) = -4 \text{ V}$$

Izan ere, ezkerreko irudian agerikoa da, 4 V-eko tentsio-sorgailuaren eraginez kondentsadoretik igaroko den korrontea behetik gora igaroko dela, hots, guk hartu dugun noranzkoaren kontra; horrek kondentsadorea deskargatzen ari dela besterik ez du esan nahi, 3 V-eko hasierako tentsiotik –4 V-eko tentsioraino, edo, hobeto esanda, hasieran deskargatu egin dela 3 V-etik 0 V-era, berehala kargatzen hasteko kontrako tentsio batekin, –4 V-eraino.

Ez dago esan beharrik egoera egonkor horretan ere korrontea zero izango dela, hots:

$$i_C(\infty_B) = 0 \text{ A}$$

Beraz, dagoeneko, B posizioari dagokionez, honako balio hauek kalkulatu ditugu:

$$v_C(0_B^+) = v_C(0_B^-) = 3 \text{ V},\; i_C(0_B^-) = 0 \text{ A},\; v_C(\infty_B) = -4 \text{ V eta } i_C(\infty_B) = 0 \text{ A}$$

hots, etengailua B posizioan kokatu ondorengo korrontea kalkulatzea besterik ez da falta. Horretarako, nahikoa dugu zirkuituko maila bakarrean KTL aplikatzea, une jakin horretan (gogoratu Kirchhoff-en legeak une oro betetzen direla):

KTL B posizioan, oro har: $\quad 8i_C(t) + v_C(t) + 4 = 0 \;\rightarrow$

$t = 0^+$ unean: $\quad 8i_C(0_B^+) + v_C(0_B^+) + 4 = 0 \;\rightarrow\; 8i_C(0_B^+) + 3 + 4 = 0 \;\rightarrow\; i_C(0_B^+) = -\dfrac{7}{8}$ A

(Agerikoa da, baita ere, KTLko ekuazio horretatik $v_C(\infty_B)$ ere kalkulatzen dela, $i_C(\infty_B) = 0$ A dela kontuan hartuz: $v_C(\infty_B) + 4 = 0 \;\rightarrow\; v_C(\infty_B) = -4$ V.)

Etengailua A posiziotik B posiziora pasatzean gertatu den egoera iragankorra islatuko duen ekuazioa bilatzeko, lehendabizi soluzio orokorraren K_1 eta K_2 konstanteak kalkulatu beharko ditugu:

1) Hasierako egoera egonkorra: $v_C(0_B^-) = 3 \text{ V} = K_1 + K_2$

2) Bukaerako egoera egonkorra: $v_C(\infty_B) = -4 \text{ V} = K_2$

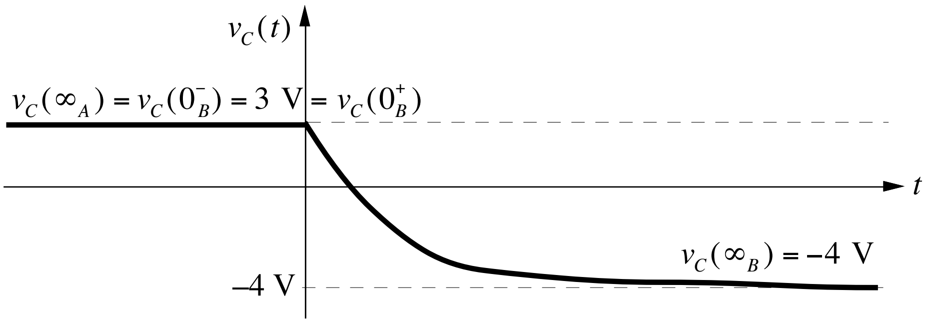
$$K_1 = 7 \text{ eta } K_2 = -4$$

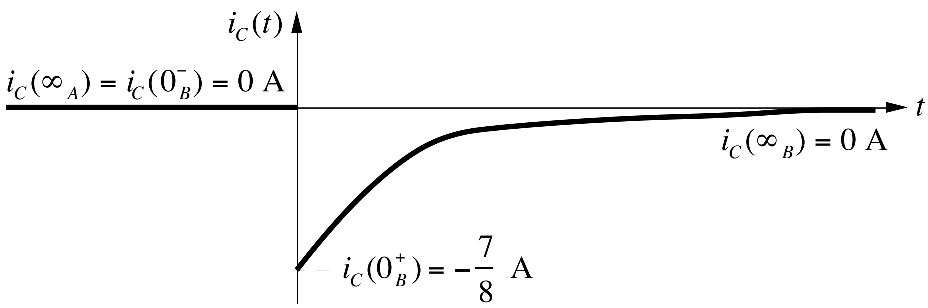
Denbora-konstantea: $\tau_B = R_B \cdot C = 80\ \mu\text{s}$.

Ekuazioak etengailuaren B posizioan: $\boxed{v_C(t) = 7e^{-\frac{t}{80}} - 4}$

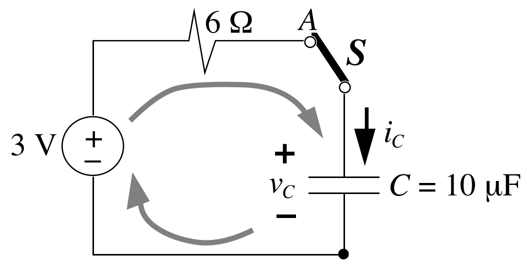
$$i_C(t) = C \cdot \frac{dv_C(t)}{dt} = 10 \cdot \frac{dv_C(t)}{dt} \quad \rightarrow \quad \boxed{i_C(t) = -\frac{7}{8}e^{-\frac{t}{80}}}$$

Ekuazio horiek denboran zehar duten eboluzioa grafikoki adieraziz:





Demagun, orain, berriro arbitrarioki $t' = 0$ izendatuko dugun unean, etengailua B posiziotik A posiziora eraman dugula.



Honako hau betetzen da:

$$v_C(0_A^+) = v_C(0_A^-) = v_C(\infty_B) = -4 \text{ V} \text{ eta } i_C(0_A^-) = i_C(\infty_B) = 0 \text{ A}$$

A posizioko egoera egonkorrean kondentsadoreak lortuko duen tentsioa, lehen kalkulatu dugu: $v_C(\infty_A) = 3$ V; eta baita bere barnetik igaroko den korrontea ere: $i_C(\infty_A) = 0$ A.

Beraz, dagoeneko $i_C(0_A^+)$ besterik ez zaigu falta. Hau kalkulatzeko, nahikoa dugu zirkuituko maila bakarrean KTL aplikatzea, $t' = 0^+$ une jakin horretan (gogoratu Kirchhoff-en legeak une oro betetzen direla):

KTL *A* posizioan, oro har: $3 = 6i_C(t') + v_C(t') \rightarrow$

$t' = 0^+$ unean: $6i_C(0_A^+) + v_C(0_A^+) = 3 \rightarrow 6i_C(0_A^+) - 4 = 3 \rightarrow i_C(0_A^+) = \dfrac{7}{6}$ A

(Agerikoa da, baita ere, KTLko ekuazio horretatik $v_C(\infty_A)$ ere kalkulatzen dela, $i_C(\infty_A) = 0$ A dela kontuan hartuz: $v_C(\infty_A) = 3$ V.)

Etengailua *B* posiziotik *A* posiziora pasatzean gertatu den egoera iragankorra islatuko duen ekuazioa bilatzeko, lehendabizi soluzio orokorraren K_1 eta K_2 konstanteak kalkulatu beharko ditugu:

1) Hasierako egoera egonkorra: $v_C(0_A^-) = -4 \text{ V} = K_1 + K_2$

2) Bukaerako egoera egonkorra: $v_C(\infty_A) = 3 \text{ V} = K_2$

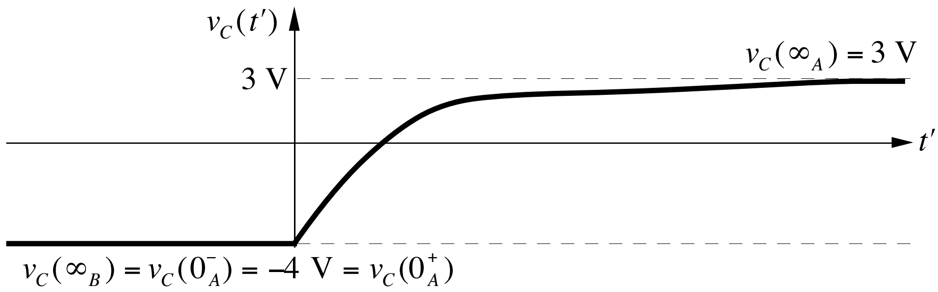
$$K_1 = -7 \quad \text{eta} \quad K_2 = 3$$

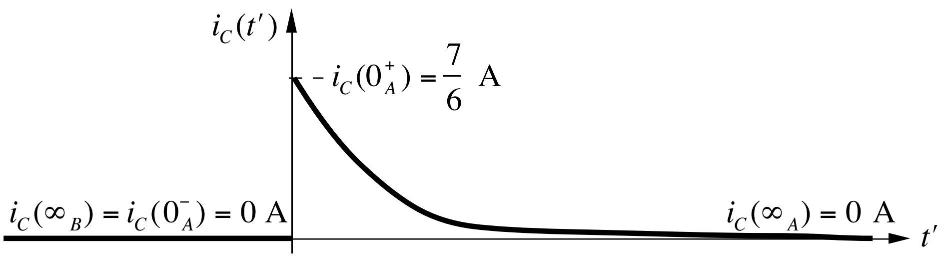
Denbora-konstantea: $\tau_A = R_A \cdot C = 60$ μs

Ekuazioa *A* posizioan: $\boxed{v_C(t') = 3 - 7e^{-\frac{t'}{60}}}$

$$i_C(t') = C \cdot \frac{dv_C(t')}{dt'} = 10 \cdot \frac{dv_C(t')}{dt'} \quad \rightarrow \quad \boxed{i_C(t') = \frac{7}{6}e^{-\frac{t'}{60}}}$$

Ekuazio horiek denboran zehar duten eboluzioa grafikoki adieraziz:

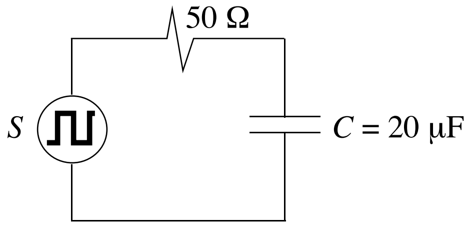


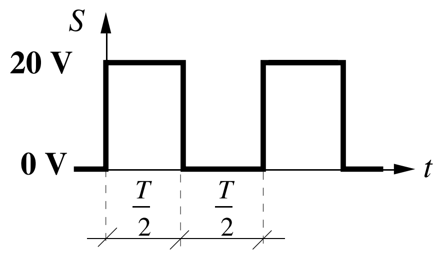


5. Irudiko zirkuituan, kalkula ezazu zenbatekoa izan daitekeen sarrerako seinale karratuaren maiztasun maximoa honako bi kasuetan:

a) gutxienez lau denbora-konstanteko tartea eman nahi badiogu kondentsadoreari kargatzeko zein deskargatzeko (%98an, alegia);

b) kondentsadorea gutxienez %95ean karga zein deskarga dadin.





Ebazpena:

Sarrerako seinalearen arabera, badakigu periodo-erdian kondentsadorea kargatu egingo dela eta beste periodo-erdian, deskargatu. Hori dela eta, kondentsadoreari kargatzeko zein deskargatzeko nahikoa denbora eman nahi badiogu, seinalearen periodo-erdia izango da finkatu beharko duguna, lortu nahi den karga-portzentaiaren arabera. Hona hemen aztertu beharreko bi kasuak:

a) Kondentsadoreari eman behar diogun denbora-tartea 4τ-koa da, hots, lau aldiz zirkuituaren denbora-konstantea; denbora-tarte horretan orekako kargaren %98 irabazi ala galduko du kondentsadorea. Beraz, bete beharreko baldintza honako hau da:

$$\frac{T}{2} \geq 4\tau \quad \rightarrow \quad T \geq 8\tau \quad \rightarrow \quad f = \frac{1}{T} \leq \frac{1}{8\tau} \quad \rightarrow \quad \boxed{f_{\max} = \frac{1}{8\tau}}$$

Denbora-konstantea: $\tau = RC = 50\ \Omega \cdot 20\ \mu\text{F} = 1000\ \mu\text{s} = 1\ \text{ms} \rightarrow$

$$\boxed{f_{\max} = 125\ \text{Hz}}$$

b) Kondentsadoreari eman behar diogun denbora-tartea, %95ean kargatzeko zein deskargatzeko behar adinakoa denez gero, lehendabizi denbora-tarte hori zenbatekoa den kalkulatu beharko dugu. Horretarako, zirkuituaren egoera iragankorra (kargarako zein deskargarako) islatzen duen ekuazioa aintzat hartu behar da, eta bertan orekako tentsioaren %95a ordezkatu:

Kargarako ekuazioa: $\quad v_C(t) = E\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$

Orekan, kargatu ondoren, kondentsadoreak E tentsioa lortuko duenez gero, tentsio horren %95a (hots, $0{,}95E$) $t_{0,95}$ unean lortuko du:

$$v_C(t_{0,95}) = 0{,}95E = E\left(1 - e^{-\frac{t_{0,95}}{\tau}}\right) \quad \rightarrow \quad e^{-\frac{t_{0,95}}{\tau}} = 0{,}05 \quad \rightarrow \quad \boxed{t_{0,95} = 3\tau}$$

Ikus dezagun orain emaitza bera lortzen dela deskargarako: $v_C(t) = Ee^{-\frac{t}{\tau}}$

Deskarga-prozesuan, kondentsadoreak hasieran zuen karga osoa (hots, E tentsioa) galduko du; guk honako hau kalkulatu behar dugu: zenbat denbora behar duen kondentsadoreak %95ean deskargatzeko, hau da, hasierako E tentsioaren %95 galtzeko; beraz, $0{,}95E$ tentsioa galtzen badu, $t_{0,95}$ unean $0{,}05E$ tentsioa izango du soilik:

$$v_C(t_{0,95}) = 0{,}05E = Ee^{-\frac{t_{0,95}}{\tau}} \quad \rightarrow \quad e^{-\frac{t_{0,95}}{\tau}} = 0{,}05 \quad \rightarrow \quad \boxed{t_{0,95} = 3\tau}$$

Orain, kondentsadoreak %95ean kargatzeko zein deskargatzeko zenbat denbora behar duen jakinik, hori bermatzeko sarrerako seinalearen maiztasun maximoa zenbatekoa izango den kalkula dezakegu:

$$\frac{T}{2} \geq 3\tau \quad \rightarrow \quad T \geq 6\tau \quad \rightarrow \quad f = \frac{1}{T} \leq \frac{1}{6\tau} \quad \rightarrow \quad f_{\max} = \frac{1}{6\tau}$$

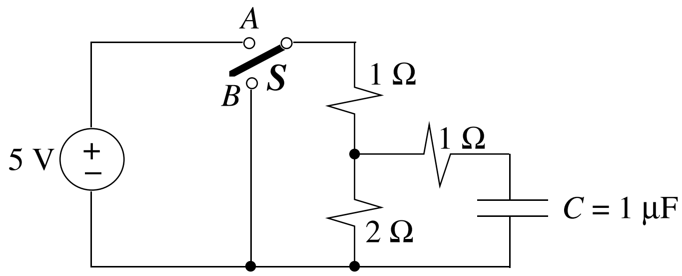
$$\boxed{f_{\max} = 166{,}67\ \text{Hz}}$$

C) Proposaturiko ariketak

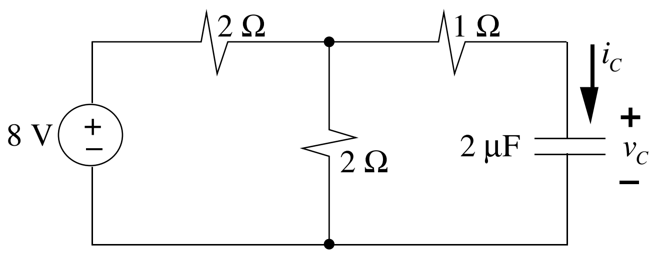
5.1. Kondentsadorea egoera iragankorrean

1. Froga ezazu denbora-konstantearen unitateak denborazkoak direla, $1\ \Omega \cdot 1\ \text{F} = 1\ \text{s}$, alegia.

2. Ondoko zirkuituan, kalkula itzazu karga- eta deskarga-prozesuetako denbora-konstanteak.



3. Kalkula ezazu v_C egoera egonkorrean. Zenbat balio du i_C magnitudeak egoera egonkorrean?



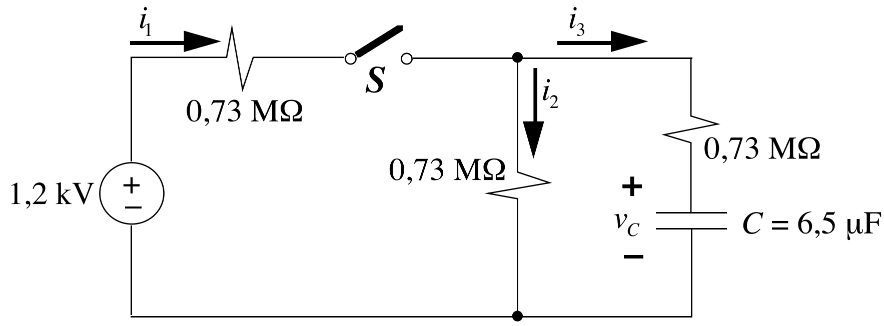
4. Irudiko zirkuituan, $t = 0$ denean eta C deskargatuta dagoelarik, S etengailua ixten bada,

a) kalkula itzazu elementu bakoitzeko tentsioa eta igarotzen den intentsitatea, $t = 0$ denean eta $t = \infty$ denean;

b) irudika itzazu kualitatiboki elementu bakoitzeko tentsioa eta igarotzen den intentsitatea, $t = 0$ denetik $t = \infty$ izan arte;

c) kalkula ezazu zirkuitu honen karga-prozesurako denbora-konstantea;

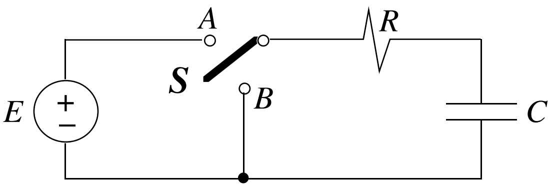
d) denbora luzean ($t >> \tau$) horrela egon eta gero, etengailua ireki egiten da. Errepika itzazu goiko galdera guztiak.



5. Irudiko zirkuituan,

a) zenbat denbora-konstante igaroko dira etengailua *A* posiziora pasatzen denetik kondentsadorearen karga orekakoaren %99 izan arte?

b) zenbat denbora-konstante, kondentsadorearen energia orekakoaren erdia izan arte?



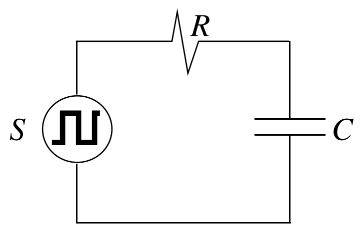
6. Aurreko ariketako *RC* zirkuituko kondentsadorearen hasierako karga 500 μC-ekoa da, beheko xafla positiboki kargatuta dagoelarik. $t = 0$ deneko unean, *S* etengailua *A* posiziora pasatzen bada, bila itzazu intentsitatearen eta kondentsadorean metaturiko kargaren adierazpen analitiko eta grafikoak. (Datuak: E = 50 V, R = 1 kΩ, C = 20 μF.)

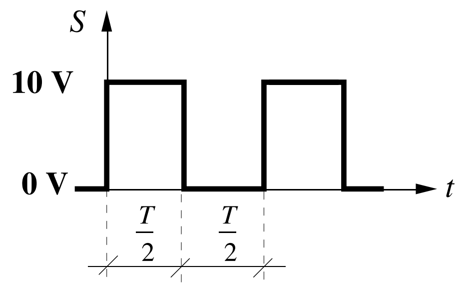
7. Kondentsadore batez eta berarekin seriez konektaturiko 10 kΩ-eko erresistentzia batez osatutako sistemari 10 V-eko tentsioa ezartzen zaio. 1,0 μs-ko denbora-tartea igaro ondoren kondentsadoreko tentsioa 0,5 V-ekoa baldin bada, zein da kondentsadorearen kapazitatea?

8. 2,0 μF-eko kondentsadore erreal baten tentsioa bere hasierako balioaren laurdenara jaisten da 2,0 s-ko denbora-tartean, bere xaflen arteko ihes-korrontea agertzen delako. Zenbatekoa da kondentsadorearen xaflen arteko erresistentzia baliokidea?

9. RC zirkuitu batean $R = 0{,}5\ \mathrm{k\Omega}$ eta $C = 1\ \mathrm{nF}$ dira. Lau denbora-konstanteko tartea eman nahi diogu kondentsadoreari kargatzeko. Zenbatekoa da (Hertz-etan) erabili behar dugun uhin errektangeluarraren maiztasuna?

10. Ondorengo RC zirkuituan, adierazi zein izango den S seinaleak (pultsu-segidak) eduki dezakeen maiztasun maximoa, kondentsadoreak karga-prozesuan orekan lortuko zukeen tentsioaren %90 lor dezan. (Oharra: suposatu hasieran kondentsadorea deskargatuta dagoela.)





6. Diodoak

A) Jakin beharreko kontzeptuak

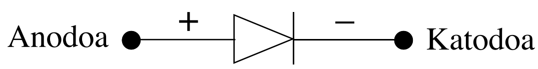
• Diodoa eta bere polarizazioa

Diodoa elementu biterminala da; hots, bi mutur ditu. Elementu elektronikoen artean sinpleena da; hemen elektronikaren oinarriak aztertuko ez ditugun arren (ikus 3. eranskina), esan behar da erdieroalezko diodoa PN juntura bat besterik ez dela eta hortik datozkio bere ezaugarriak. Hemendik aurrera, oro har, siliziozko diodoez arituko garen arren, esandako guztia aplikagarria da beste edozein motatako diodoetarako, parametro zehatzak aldatuz gero.

Zirkuituetan, diodoek beti pasibo gisa jokatzen dute, potentzia xurgatuz.

Orain arte aztertutako elementuetan bi muturrak trukakorrak izan dira, baina diodoaren kasua bestelakoa da: mutur bat positiboa edo anodoa da (PN junturaren P aldea) eta bestea negatiboa edo katodoa (PN junturaren N aldea), eta hori ikurrean ere islatzen da, mutur positibotik mutur negatibora zuzenduta dagoen gezi baten itxura baitauka:

Ikurra:



Muturren arteko ezberdintasun hori dela eta, diodoa zentzu batean ala bestean konektatu, bere portaera aldatu egiten da, ikusiko dugun legez. Portaera desberdin horiek direla eta, diodoaren polarizazioaz mintzatzen gara.

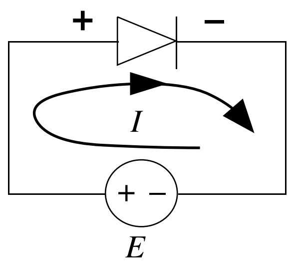
Zuzeneko polarizazioa:

Diodo bat zuzeneko polarizazioan edo zuzenki polarizatuta dago (hemendik aurrera, laburbiltzearren: Z.P. = zuzenki polarizatuta), diodoari ezarritako tentsioaren alde positiboa diodoaren mutur positiboarekin eta tentsioaren alde negatiboa diodoaren mutur negatiboarekin konektatuta daudenean, edo beste modu batera esanda, korrontea diodoaren mutur positibotik sartu eta diodoaren mutur negatibotik irteten denean (hots, diodoaren "gezia" eta korrontearena bat datozenean). Ikus ondoko irudia.

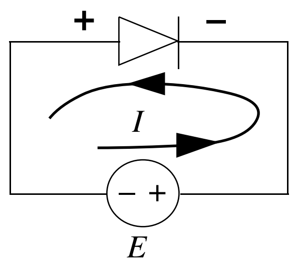
Alderantzizko polarizazioa:

Diodo bat alderantzizko polarizazioan edo alderantziz polarizatuta (A.P.) dago, diodoari ezarritako tentsioaren alde positiboa diodoaren mutur negatiboarekin eta alde negatiboa diodoaren mutur positiboarekin konektatuta daudenean, edo beste modu batera esanda, tentsioaren eraginez, korronteak diodoaren mutur negatibotik sartu eta diodoaren mutur positibotik irteteko joera duenean (hots, diodoaren "gezia" eta korrontearena kontrakoak direnean). (Oharra: "joera" esan dugu, zeren, ikusiko dugun legez korronte hori zero baita kasu askotan.) Ikus ondoko irudia.

diodoa Z.P.



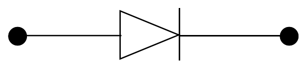
diodoa A.P.



• Zenbait diodo-mota

Diodo artezleak: diodorik erabilienak edo arruntenak dira hauek. Besterik gabe, zuzeneko polarizazioan eroaten dute korrontea, eta alderantzizko polarizazioan ez.

Ikurra:

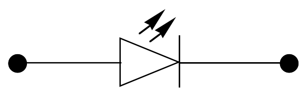


LED (Light Emitting Diode) diodoak: ingelesezko izenak dioen moduan, diodo argi--emaileak dira hauek. Zuzeneko polarizazioan korrontea eroaten dute, eta aldi berean argia ematen dute; alderantzizko polarizazioan, berriz, ez dute eroaten eta, ondorioz, ez dute argirik ematen.

(Gogoratu, elementu biterminaletan, bi muturren arteko potentzial-diferentziaren eraginez igarotzen dela korronte elektrikoa eta, horren ondorioz, potentziaren bidez islatzen dugun energia-aldaketa bat gertatzen dela elementu horietan. Diodo arruntetan, erresistentzien antzera, energia hori bero bihurtzen da; LED diodoetan, berriz, energia hori argi bihurtzen da.)

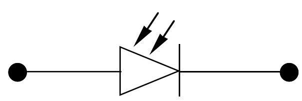
LED diodoei ematen zaizkien erabilerak ugariak dira. Ohikoak dira, adibidez, kalkulagailuetako edo polimetroetako digituetan. Zazpi LED diodo elkartuz, 7 segmentuzko digituak eratzen dira.

Ikurra:



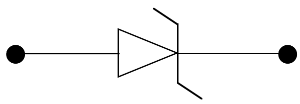
Fotodiodoak: LED diodoen kontrakoak dira. Argia eman beharrean**,** alderantzizko polarizazioan argia sumatzen dutenean argi hori xurgatu eta korrontea eroaten dute. Alderantzizko polarizazioan erabiltzen dira.

Ikurra:



Azken bi motetako diodoak, LED diodoak eta fotodiodoak, elkarlanean erabiltzen dira detektatzaile gisa. Adibidez, igogailu bateko atean: LED diodoari zirkuitu igorlean Z.P. funtzionarazten zaio eta etengabe igorriko du argia. Fotodiodoari, berriz, zirkuitu jasotzailean A.P. funtzionarazten zaio. Bata bestearen parez pare kokatzen dira atearen bi aldeetan, eta modu horretan LED-ak igorritako argia fotodiodoak jasotzen du bien artean ezer ez dagoenean. Baina atetik pertsona bat pasatzen ari denean, bien arteko argi-izpien bidea oztopatu egingo du, eta denbora-tarte batez LED-aren argia ez da fotodiodora iritsiko: hori alarma gisa erabil daiteke.

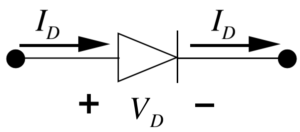
Zener diodoak: diodo hauek diodo arruntak dira zuzeneko polarizazioan; baina alderantzizko polarizazioan tentsio-maila jakin bat gainditzen bada (Zener tentsioa), korrontea eroan egiten dute, horretarako bereziki diseinatuta baitaude. Gehienetan alderantzizko polarizazioan erabiltzen dira erregulatzaile gisa, egoera horretan tentsioa konstante samar mantentzen baitute.

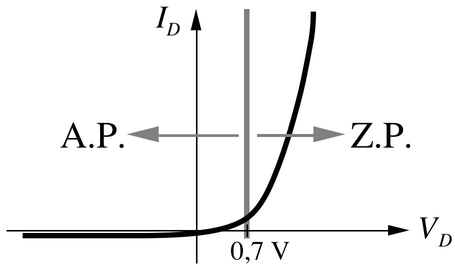
Ikurra: 

• Korronte/tentsio ezaugarri grafikoak

Diodo artezlea:

Diodoaren borneen arteko potentzial-diferentziaren eta diodotik pasatzen den korrontearen arteko erlazioa da diodoaren ezaugarri grafikoa.





Kurba hori esperimentalki lortzen da, eta agerikoa denez, diodoan korrontearen eta tentsioaren arteko erlazioa ez da lineala, esponentziala baizik.

Grafikoan ikus daitekeen moduan, alderantzizko polarizazioan diodoak ez du ia korronterik eroaten (benetan, negatiboa den oso korronte txikia igarotzen da, asetasun-korrontea deritzona; nA batzuetako korrontea besterik ez denez gero, kasu praktikoetarako mesprezagarria da). Zuzeneko polarizazioan, berriz, badirudi korrontea oztoporik gabe pasatzen dela, baina bi alde bereiz daitezke: 0,7 V inguruko tentsioa (siliziozko diodoetarako) gainditu arte, diodoak ez du eroaten; balio horretatik aurrera, ordea, ia oztoporik gabe eroaten du. Eroaten hasteko gainditu beharreko 0,7 V-eko tentsioari atari-tentsio esaten zaio, eta normalean hor jartzen da alderantzizko polarizazioaren eta zuzeneko polarizazioaren arteko muga, hurbilketetan ikusiko dugun legez.

Portaera-ekuazioa: erresistentzietan Ohm-en legea betetzen den moduan, badago diodoarentzat ere tentsioa eta korrontea erlazionatzen dituen adierazpen matematiko bat. Zer esanik ez, ez da erlazio lineal bat izango, kurba lineala ez dela argi geratu baita. Hona hemen diodoari dagokion ekuazio esponentziala:

$$I_D = I_S \cdot \left(e^{\left(\frac{qV_D}{KT}\right)} - 1 \right)$$

non I_S diodoaren asetasun-korrontea den; q, elektroiaren karga ($1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C); K, Boltzmann-en konstantea ($1{,}38 \cdot 10^{-23}$ J/K); eta T, tenperatura absolutua (gradu Kelvinetan, K).

Magnitude-mailak: Diodo batetik igarotzen den korrontea mA-tan izan ohi da. Tentsioaren balioa are finkoagoa da: zuzeneko polarizazioan 0,7 V ingurukoa izan ohi da, gehienez ere 2 V-eraino irits daitekeelarik.

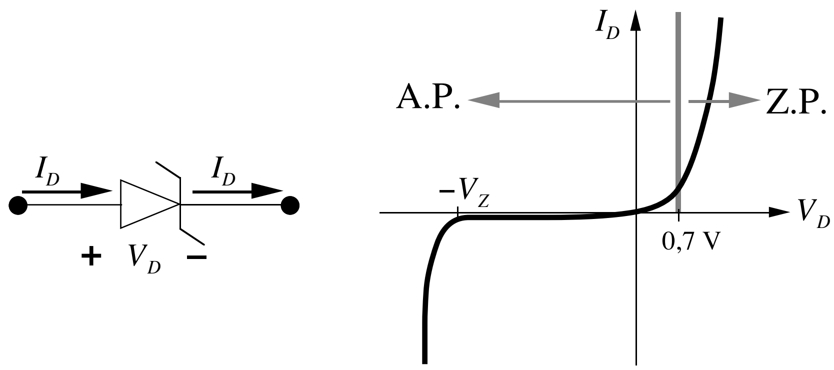
Diodoa alderantzizko polarizazioan: haustura. Erresistentziek badute jasan dezaketen muga bat potentzian, potentzia maximoa delakoa; potentzia hori gaindituz gero, erre egiten dira. Diodoek ere badituzte mugak jasan dezaketen potentzia maximoan, eta baita jasan dezaketen tentsio maximoan ere. Beste modu batean esanda, diodoak hondatu aurretik jasan dezakeen alderantzizko tentsio maximo bat badago; tentsio hori gaindituz gero, haustura izeneko fenomenoa gertatzen da (Zener diodoetan izan ezik).

LED diodoa:

LED diodoaren ezaugarri grafikoak diodo artezlearenaren itxura berdina du: aldatzen dena, atari-tentsioaren balioa da. LED diodoen kasuan 1,7 V - 2,2 V ingurukoa izan ohi da.

Zener diodoa:

Zener diodoaren ezaugarri grafikoa ez da diodo artezlearen eta LED diodoaren ezaugarrien berdina, kontuan eduki behar baita Zener diodoaren berezitasuna: alderantzizko polarizazioan, Zener tentsioa (V_Z) gainditzen bada, Zener haustura izeneko fenomenoa gertatzen da eta, hondatu beharrean, diodo hauek alderantzizko korrontea eroaten dute, horretarako bereziki diseinatuak izan baitira.



Kurba hau ere ez da lineala, esponentziala baizik. Dena den, kurba honi dagokion ekuazioa ez dugu emango, ondoko atalean azaltzen baita nola erabili diodoen ekuazioak.

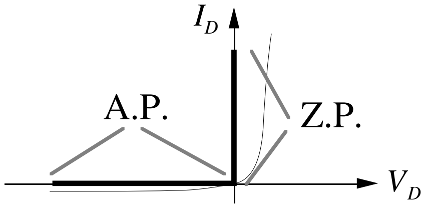
• Diodoen portaeraren hurbilketa linealak

Diodoei dagozkien ekuazioak ez dira linealak eta, ondorioz, hurbilketarik erabiliko ez bagenu, diododun zirkuituak ebazteko zailtasun matematikoak edukiko genituzke (ekuazio esponentzialak). Hau dela eta, aurreko grafikoen zenbait hurbilketa lineal erabiltzen dira. Gogoratu behar dugu 0. kapituluan aipatutakoa, hots, kurbari egindako hurbilketaren arabera, diodoaren zirkuitu-eredu bat lortzen dela, eta eredu horren konplexutasun-mailak finkatzen duela kalkuluetako zehaztasuna.

Diodo artezlea:

Lehenengo hurbilketa (**diodo ideala**ren hurbilketa)**:** Zuzeneko polarizazioan diodoak zirkuitulaburra balitz bezala eroaten du korrontea eta alderantzizko polarizazioan, berriz, ez du eroaten.

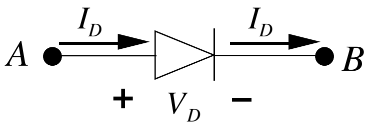
Grafikoki:



Hau jatorrizko kurbatik aldenduen dagoen hurbilketa denez gero, zehaztasunik txikiena lortuko dugu hurbilketa honi dagokion eredua erabiltzean. Dena den, ariketetan ikusiko den bezala, askotan zehaztasun hori nahikoa izan ohi da.

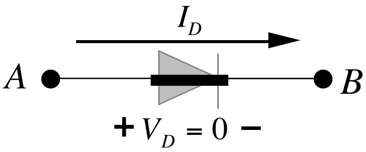
Diododun zirkuitu bat ebazteko hurbilketa hau erabiliz, honako eredu, ekuazio eta baldintzak erabili behar dira:

ORDEZKATU:



Modeloa zirkuituan **Ekuazioa** **Baldintza**

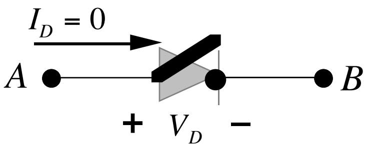
Z. P. :



Ekuazioa	Baldintza
$V_D = 0$	$I_D \geq 0$

(zirkuitulaburra)

A. P. :



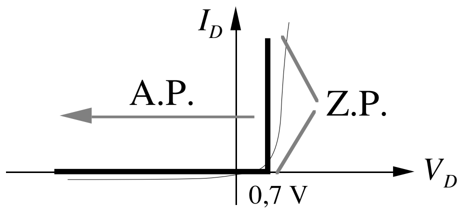
Ekuazioa	Baldintza
$I_D = 0$	$V_D \leq 0$

(zirkuitu irekia)

Hurrengo atalean, diododun zirkuituen ebazpidea azaltzean, gauza bera aipatuko dugun arren, liburuaren egileoi iruditzen zaigu hemen ere, aurrera jarraitu baino lehen, guztiz beharrezkoa dela azpimarratzea honako hau: diodoak bi portaera desberdin dituenez gero, aldez aurretik finkatu behar da, edo aurreikusi behinik behin, nola dagoen polarizatuta diodoa, modelo bata edo bestea erabiltzeko: hots, diodoaren polarizazioari buruzko hipotesi bat egin behar da. Ondoren, zirkuitu osoaren soluzioa bilatu behar da aukeratutako modeloa erabiliz: hots, elementu guztien tentsioak eta korronteak kalkulatu, diodoa barne. Azkenik, erabilitako modeloari edo hipotesiari dagokion baldintza egiaztatu behar da, hipotesia zuzena edo okerra den jakiteko. Zuzena bada, kalkulatutakoa zirkuituaren soluzioa da; zuzena ez bada, berriz, diodoaren beste modeloa erabili behar da. Hortik dator, hain zuzen, portaera-ekuazioarekin batera eman dugun baldintzaren garrantzia.

Bigarren hurbilketa (erabiliena)**:** Diodoak zuzeneko polarizazioan oztoporik gabe eroaten du, baina soilik 0,7 V-eko tentsioa gainditzen denean; alderantzizko polarizazioan, berriz, ez du eroaten. Zehaztasunari begira, hurbilketa hau lehenengoa baino zehatzagoa da, diodoaren atari-tentsioa kontuan hartzen baita.

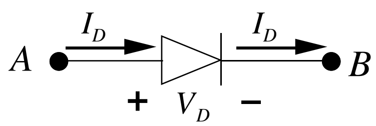
Grafikoki:



Ereduari dagokionez, bere muturren arteko tentsioa 0,7 V baino txikiagoa denean diodoa alderantzizko polarizazioan dagoela suposatzen da; bestela, zuzeneko polarizazioan dago, eta tentsio hori konstante mantentzen du bere muturren artean. Eredu hau, aurrekoa baino pixka bat konplexuagoa izango da, zirkuitulaburraren ordez tentsio-sorgailu bat erabili behar baita zuzeneko polarizazioan, ondoko irudian ageri den bezala.

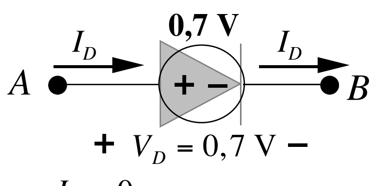
Diododun zirkuitu bat ebazteko hurbilketa hau erabiliz, honako eredu, ekuazio eta baldintzak erabili behar dira:

ORDEZKATU:



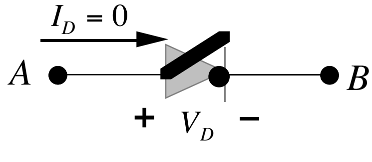
Modeloa zirkuituan **Ekuazioa** **Baldintza**

Z. P. :



Ekuazioa	Baldintza
$V_D = 0{,}7$ V	$I_D \geq 0$

A. P. :



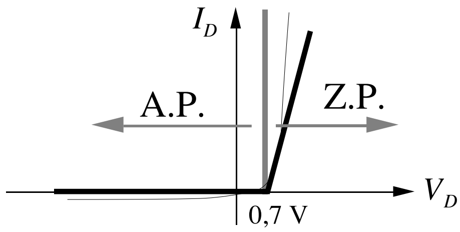
Ekuazioa	Baldintza
$I_D = 0$	$V_D \leq 0{,}7$ V

(zirkuitu irekia)

Diodoa Z.P. dagoenean tentsio-sorgailu batez ordezkatzen dugun arren, gogoratu behar dugu elementu pasiboa dela beti, potentzia xurgatzen duela. Izan ere, zuzeneko polarizazioan diodotik igarotzen den I_D korrontea sorgailura sartzen da, eta baldintzaren arabera positiboa behar du izan, hots, beti noranzko horretan, tentsio-sorgailuari potentzia xurgarazten diola. Ez dago esan beharrik hori hurbilketa guztietan eta diodo-mota guztietarako betetzen dela, diodo guztiak beti pasiboak baitira.

Hirugarren hurbilketa (kalkulu gehien eskatzen duena)**:** Diodoa zuzeneko polarizazioan 0,7 V-eko tentsioa gainditzen denean hasten da korrontea eroaten, baina korrontea handitzen doan heinean, tentsioa ere handiagotzen da. Alderantzizko polarizazioan, berriz, ez du eroaten.

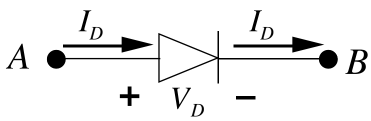
Grafikoki:



Zehaztasunari begira, hurbilketa hau aurreko biak baino zehatzagoa da, diodoaren atari--tentsioa eta barne-erresistentzia kontuan hartzen baitira. Diodoaren ordez erabiltzen den ereduari begira, beraz, aurrekoa baino pixka bat konplexuagoa izango da (barne-erresistentzia dela kausa).

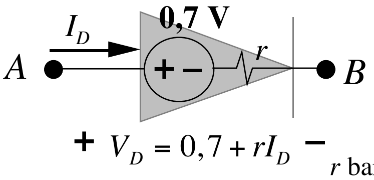
Diododun zirkuitu bat ebazteko hurbilketa hau erabiliz, honako eredu, ekuazio eta baldintzak erabili behar dira:

ORDEZKATU:



Modeloa zirkuituan	Ekuazioa	Baldintza

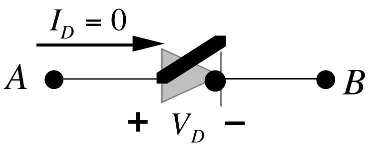
Z. P. :



$V_D = 0,7 + rI_D$ | $I_D \geq 0$

($r \approx 0,5\ \Omega$ - 1 Ω)
r barne-erresistentzia, parametro ezaguna

A. P. :



$I_D = 0$ | $V_D \leq 0,7$ V

(zirkuitu irekia)

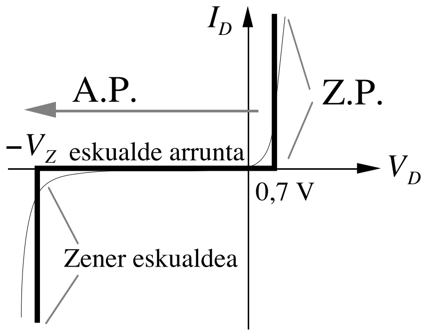
LED diodoaren kasuan, hurbilketa berak erabil daitezke, aldatzen den gauza bakarra atari-tentsioaren balioa izanik.

Zener diodoa:

Zener diodoak dituzten zirkuituak ebazteko, beste diodoekin egiten den moduan, hurbilketak erabiltzen dira. Lehengo hiru hurbilketak egin daitezkeen arren, ariketak egitean bakarra erabiliko dugu, diodo artezlearen 2. hurbilketaren parekoa dena, hain zuzen ere. Hona hemen:

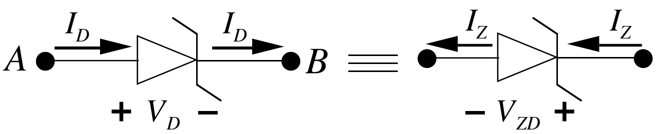
Zener diodoak zuzeneko polarizazioan oztoporik gabe eroaten du 0,7 V-eko tentsioa gainditzen denean; eta alderantzizko polarizazioan, berriz, Zener tentsioa gainditzen ez bada, ez du eroaten, eta tentsio hori gaindituz gero, alderantzizko korrontea sortzen da. Azken kasu honetan esaten da Zener diodoa alderantziz polarizatuta dagoela Zener eskualdean; bestela, alderantziz polarizatuta eskualde arruntean.

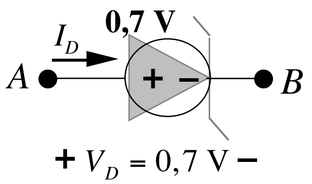
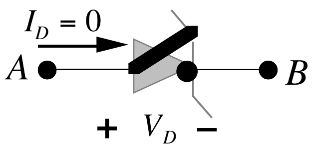
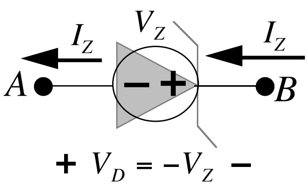
Grafikoki:



Beraz, Zener diododun zirkuitu bat ebazteko eredurik erabiliena honako hau da:

ORDEZKATU:



	Modeloa zirkuituan	**Ekuazioa**	**Baldintza**
Z. P. :		$V_D = 0{,}7\ \text{V}$	$I_D \geq 0 \equiv I_Z \leq 0$
A. P. : **zona arruntean:**		$I_D = 0$	$-V_Z \leq V_D \leq 0{,}7\ \text{V}$
Zener eskualdean:		$V_D = -V_Z$	$I_Z \geq 0 \equiv I_D \leq 0$

V_Z parametro ezaguna

Diodo artezleen modura, zehaztasun handiagoa lortu nahi izanez gero, Zener diodoa Z.P. zein A.P. Zener eskualdean dagoenean, Zener diodoaren barne-erresistentziaren eragina kontuan har daiteke, modeloetan tentsio-sorgailuekin batera barne-erresistentzia seriean ipiniz.

• Diododun zirkuituen ebazpidea

Zenbakizko ebazpidea:

Ebazpide honen funtsa, zirkuituan dauden diodoak beren modeloez ordezkatzea da. Baina, ikusi berri dugun legez, ereduak polarizazioaren menpekoak dira; hots, diodoa zuzeneko polarizazioan baldin badago, eredu bat erabili behar da, baina alderantziz polarizatuta baldin badago, beste eredu bat, zeharo desberdina. Hori dela kausa, zenbakizko ebazpideak badu berezitasun bat: hasteko, diodoen polarizazioari buruzko hipotesiak egin behar dira; ondoren, aukeratutako hipotesiari dagokion eredua erabiliz, zirkuitua analizatu behar da; prozesuari amaiera emateko, guztiz beharrezkoa da abiapuntuko hipotesia egiaztatzea, faltsua izatea gerta baitaiteke. Hots, hipotesi batetik abiatuta, pauso guztiak eman ondoren, baliteke lortzen den emaitza zuzena ez izatea, eta, ondorioz, beste hipotesi batetik abiatuz prozesua errepikatu behar izatea. Agerikoa da hipotesiren bat egiazkoa izango dela. Dena den, hipotesi guztiak bat izan ezik faltsutzat eman ondoren, geratzen den azkena frogatzen denean ere egiaztatu behar da horren egokitasuna, analisian egindako balizko akatsak detektatzeko laguntza ederra izan baitaiteke.

Hona hemen jarraitu beharreko pausoak, metodologia sistematiko gisa:

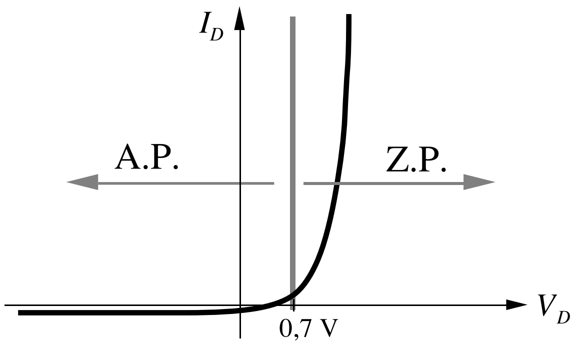
1. Aukeratu diodoentzat erabiliko den hurbilketa (gehienetan ariketaren enuntziatuan adierazten da).
2. Sorgailuen arabera, aurreikusi adarretako korronteen noranzkoa edo finkatu arbitrarioki.
3. Korronte horien arabera, egin diodoen polarizazioari buruzko hipotesi bat.
4. Egindako hipotesiaren eta aukeratutako hurbilketaren arabera, ordezkatu diodoak dagozkien elementuekin.
5. Ebatzi zirkuitua.
6. Egiaztatu hipotesiaren zuzentasuna, hots, aztertu hipotesiei dagozkien baldintzak betetzen ote diren.
7. Baldintzak betetzen badira, egindako hipotesia zuzena da; amaitu da prozesua eta zirkuitua ebatzita dago.

   Baldintzak betetzen ez badira, berriz, okerreko hipotesia egin dugu. Beraz, kalkulatutako soluzioak ez du balio eta hipotesi berri bat egin behar dugu, 3. pausotik aurrerako atal guztiak errepikatuz. Noiz arte? Harik eta hipotesi guztiei dagozkien baldintzak betetzen diren arte.

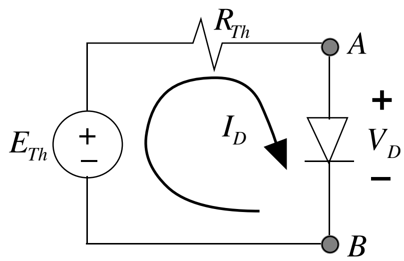
Ebazpide grafikoa:

Badago diodo batetik pasatzen den korrontea eta borneen arteko potentzial-diferentzia ezagutzeko beste modu bat. Zenbait kasutan, diodoaren ezaugarri grafikoa ezagutuz, diodoaren aldiuneko korrontearen eta tentsioaren soluzio zehatza bilatu beharko dugu.

Gogoratu diodoaren ezaugarri grafikoa diodoari dagokion ekuazioaren irudia dela, eta, beraz, beti beteko dela diodoan. Hau da, diodoaren tentsioaren eta korrontearen arteko erlazioa kurba horretako puntuetako batek emango digu. Horrela, diodoaren ezaugarri grafikotik abiatuz, diodoaren operazio-puntua deritzona kalkula dezakegu.



Bestalde, diodoa zirkuitu batean egongo da, eta zirkuitu horri dagozkion ekuazioak ere beteko dira. Adibidez:



Zirkuituari dagokion ekuazioa: KTL: $E_{Th} = R_{Th} I_D + V_D$

$$I_D = \frac{E_{Th}}{R_{Th}} - \frac{1}{R_{Th}} \cdot V_D$$

Azken ekuazio honi, karga-lerrozuzena esaten zaio, zirkuituko "karga"ren aldaketa adierazten duelako denboran zehar eta, bestalde, lerro zuzen baten ekuazioa delako.

Beraz, momentu honetan, baditugu diodoaren magnitudeen artean betetzen diren bi ekuazio:

1. Diodoaren ezaugarri grafikoak ematen diguna.
2. Karga-lerrozuzenarena.

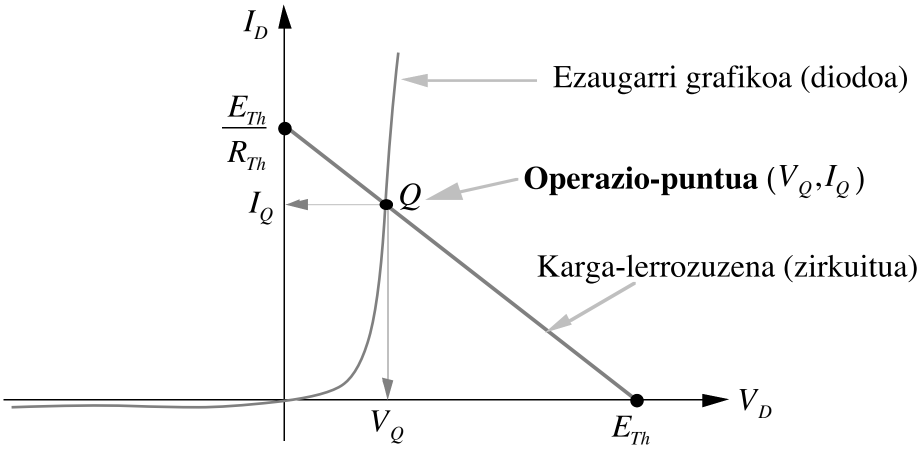
Hauek biak aldi berean betetzen dira diodoan. Beraz, diodoaren operazio-puntua (diodoari dagozkion tentsioaz eta korronteaz osatua) kalkulatu ahal izango dugu, bi kurben arteko ebakidura-puntua bilatuz. Honetarako, karga-lerrozuzena marraztuko dugu beste grafikoaren gainean.

Karga-lerrozuzena marrazteko, zuzen baten ekuazioa denez, nahikoa dugu bi puntu aurkitzearekin, ardatzekiko ebakidura-puntuak, hain zuzen:

$$V_D = 0 \quad \rightarrow \quad I_{D0} = \frac{E_{Th}}{R_{Th}}$$

$$I_D = 0 \quad \rightarrow \quad V_{D0} = E_{Th}$$

Hona hemen aipaturiko bi ekuazioen soluzio grafikoa:

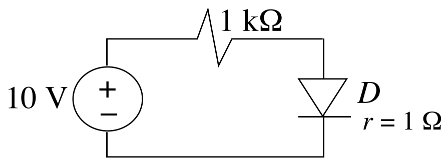


Normalean, diodo baten ezaugarri grafikoa ezagutzen dugunean, ardatzetako eskalak ezagunak dira; modu horretan, kalkulatutako operazio-puntuaren balioak ezagunak izango dira.

Begi-bistakoa da aukeratu dugun zirkuitua sinpleena dela, baina begi-bistakoa da, halaber, edozein zirkuituren Thévenin-en baliokidea dela; ondorioz, ebazpide grafikoa diodo bat duen edozein zirkuitutarako erabil daiteke.

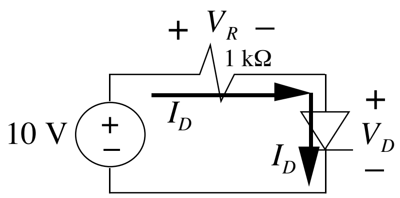
B) Ariketa ebatziak

1. Analiza ezazu irudiko zirkuitua, hots, kalkula itzazu elementu guztietako tentsioak eta korronteak, eta aldera itzazu soluzioak diodoaren hiru hurbilketak erabiliz:



Ebazpena:

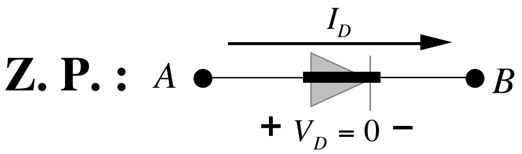
Hasteko, irudika ditzagun zirkuituaren gainean kalkulatu beharreko magnitudeak, hots, korronteak eta tentsioak. Zirkuitua oso sinplea denez gero, maila bakarrekoa hain zuzen, elementu guztietatik korronte bera igaroko da, I_D.



Zirkuituan sorgailu bakarra dagoenez gero, berak finkatuko du mailatik igaroko den korronte hori. Korronte horren noranzkoa dela eta, agerikoa da diodoa zuzenki polarizatuta egongo dela; ondorioz, hori izango da gure hipotesia. Ondoren, zirkuitua ebazteari ekin diezaiokegu, hurbilketaren arabera diodoa ordezkatzeko kasuan kasuko eredua erabiliz.

a) 1. hurbilketa. Diodo idealaren eredua zuzeneko polarizazioan:

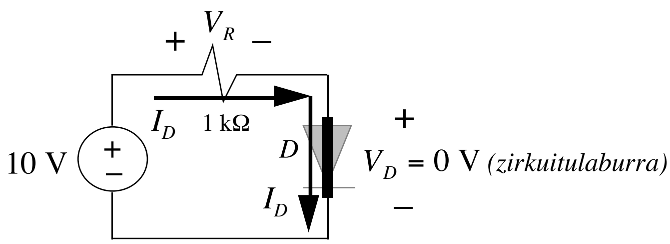
Modeloa zirkuituan



Ekuazioa	Baldintza
$V_D = 0$	$I_D \geq 0$

(zirkuitulaburra)

Ondorioz, zirkuitu baliokidea honako hau da:



Kirchhoff-en tentsioen legea erabiliz, zirkuitutik igarotzen den korrontea kalkula dezakegu (erresistentziaren balioa kΩ-etan erabili dugunez gero, korrontea mA-tan etorriko da):

$$10\ \text{V} = 1 I_D + V_D, \qquad V_D = 0\ \text{V} \ \rightarrow \ \boxed{I_{D(1.h)} = 10\ \text{mA}}$$

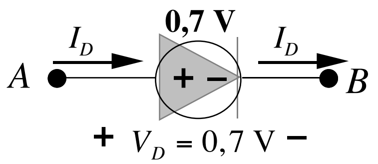
Orain, aurrera jarraitu baino lehen, hipotesia egiaztatzeko unea da. Diodotik igarotzen den korrontearen balioa aztertzean, agerikoa da diodoa zuzenki polarizatuta egoteko baldintza betetzen dela: I_D = 10 mA > 0; beraz, hipotesia zuzena da, eta aurrera jarrai dezakegu zirkuituko beste magnitudeak kalkulatzeko.

Soluzioa (1. hurbilketa: diodo ideala): I_D = 10 mA, V_D = 0 V, V_R = 10 V

b) 2. hurbilketa. Diodoaren eredua zuzeneko polarizazioan:

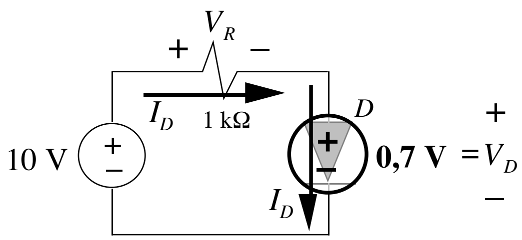
Modeloa zirkuituan

Z. P. :



Ekuazioa	Baldintza
V_D = 0,7 V	$I_D \geq 0$

Ondorioz, zirkuitu baliokidea honako hau da:



Kirchhoff-en tentsioen legea erabiliz, zirkuitutik igarotzen den korrontea kalkula dezakegu:

$$10\ \text{V} = 1 I_D + V_D, \qquad V_D = 0{,}7\ \text{V} \ \rightarrow \ \boxed{I_{D(2.h)} = 9{,}3\ \text{mA}}$$

Hipotesiaren egiaztapena: I_D = 9,3 mA > 0; beraz, hipotesia zuzena da.

Soluzioa (2. hurbilketa): I_D = 9,3 mA, V_D = 0,7 V, V_R = 9,3 V

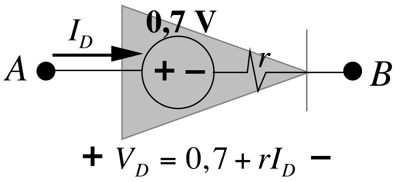
Esan bezala, soluzio hau aurrekoa baino zehatzagoa da, hots, errealitatetik hurbilago daude balio hauek aurreko atalekoak baino. Horrek esan nahi duena honako hau da: zirkuitu hori laborategian muntatuko bagenu, zirkuituko magnitudeak neurtuz gero, azken balioetatik hurbilagokoak izango ziren neurriak.

Bi soluzioen arteko diferentzia %7 ingurukoa da, eta lehenengo hurbilketa erabiliz egindako kalkuluak errazagoak diren arren, ez dago esaterik bigarren hurbilketa erabiliz egin beharreko kalkuluak zailak direnik, inolaz ere.

c) 3. hurbilketa. Diodoaren eredua zuzeneko polarizazioan:

Modeloa zirkuituan **Ekuazioa** **Baldintza**

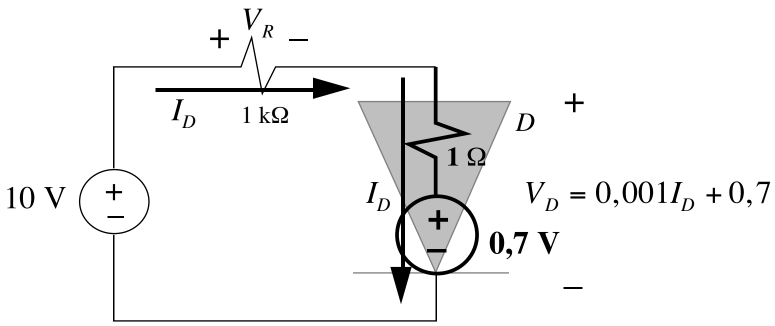
Z. P. :



$V_D = 0{,}7 + rI_D$	$I_D \geq 0$

$r = 1\ \Omega$

Ondorioz, zirkuitu baliokidea honako hau da (diodoaren muturren arteko tentsioaren adierazpena idaztean, kontuan hartu dugu zirkuituko erresistentzia kΩ-etan erabiltzen ari garela eta, ondorioz, diodoaren barne-erresistentzia ere kΩ-etan jarri behar dugu, r = 1 Ω = 0,001 kΩ, zenbakizko emaitza zuzena izango bada):



Kirchhoff-en tentsioen legea erabiliz, zirkuitutik igarotzen den korrontea kalkula dezakegu:

$$10\ \text{V} = 1 I_D + V_D, \qquad V_D = 0{,}001 I_D + 0{,}7 \;\rightarrow\; I_{D(3.h)} = \frac{10 - 0{,}7}{1 + 0{,}001}\ \text{mA}$$

$$\rightarrow \quad \boxed{I_{D(3.h)} = 9{,}29\ \text{mA}}$$

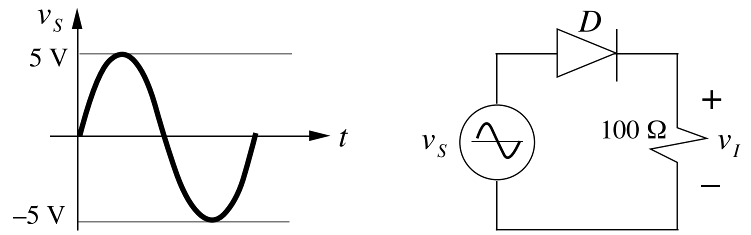
Hipotesiaren egiaztapena: I_D = 9,29 mA > 0; beraz, hipotesia zuzena da.

Soluzioa (3. hurbilketa): I_D = 9,29 mA, V_D = 0,71 V, V_R = 9,29 V

Esan bezala, soluzio hau aurrekoak baino zehatzagoa da. Dena den, agerikoa da bigarren hurbilketa erabiliz lortutako soluzioa eta azken hau oso antzekoak direla (diferentzia %0,1 ingurukoa da), baina hirugarren hurbilketa erabiltzean kalkuluak pixka bat konplexuagoak izan dira.

Ebatzi dugun zirkuitua oso sinplea denez gero, une honetan irakurleak pentsa dezake hirugarren hurbilketa dela onena, soluziorik zehatzena lortzen baita eta, azken batean, kalkuluak ez dira hain zailak izan. Baina zirkuituan maila batzuk daudenean kalkuluak gehiegi konplikatzen dira; horrexegatik, gehienetan bigarren hurbilketa erabiltzen da.

2. Irudiko zirkuiturako:



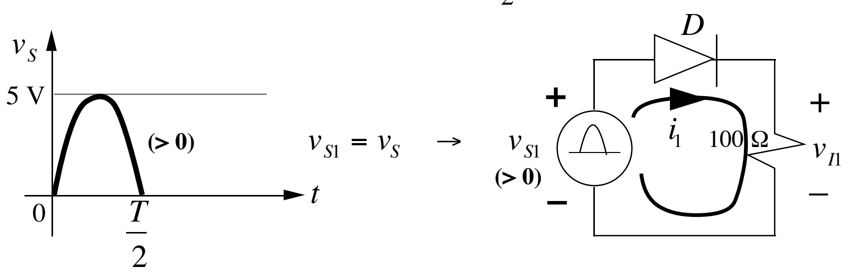
kalkula ezazu diodotik igarotzen den korronte maximoa eta marraz ezazu irteera-tentsioa diodoaren hiru hurbilketetarako. (Suposa ezazu diodoaren barne-erresistentzia 0,2 Ω-ekoa dela.)

Ebazpena:

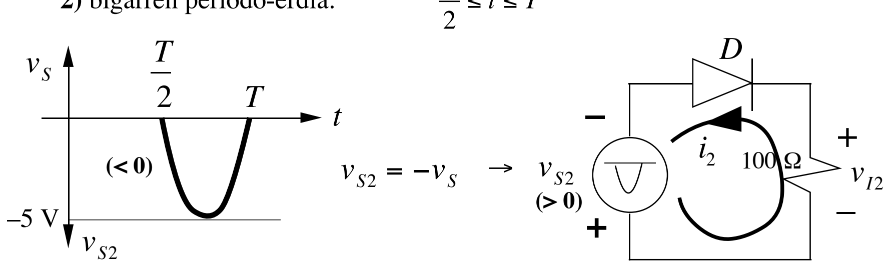
Aurreko ariketarekin alderatuta, desberdintasun bakarra ageri da: tentsio-sorgailua korronte zuzenekoa izan ordez, korronte alterno sinusoidalekoa da. Eta horrek eragin galanta dauka zirkuituaren portaeran. Horrexegatik, hurbilketak erabiliz kalkuluak egiteari ekin baino lehen, azter dezagun (gainetik bada ere) zirkuituaren portaera korronte alternoaren eraginez. (Pixka bat gehiago sakondu nahi izanez gero, jo 4. eranskinera, non zirkuitu artezgailuetan diodoek duten erabilpena azaltzen baita.)

Korronte alternoaren ezaugarria, periodikoa izanik, periodo-erdi batean positiboa eta hurrengo periodo-erdian negatiboa izatea da. Hori dela eta, zirkuituaren analisia independenteki egin dezakegu periodo-erdi bakoitzean, bi zirkuitu balira bezala. Hona hemen:

1) lehenengo periodo-erdia: $0 \le t \le \dfrac{T}{2}$



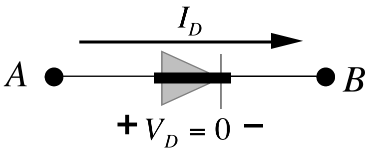
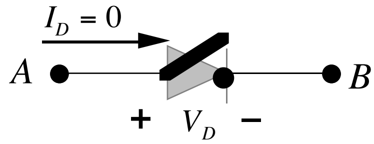
2) bigarren periodo-erdia: $\dfrac{T}{2} \le t \le T$



Zirkuitu bakoitzean, tentsio-sorgailuaren balioa aldakorra izan arren (sinu moduan aldatzen da), tentsioaren zeinua konstante mantentzen denez gero, korrontearen noranzkoa ere konstante mantenduko da, aurreko irudian margotu dugun bezala. Hori dela eta, periodo-erdi bakoitzean jakin daiteke nola egongo den polarizatuta diodoa: lehenengo periodo-erdian, v_{S1} tentsioa positiboa denez, korrontearen noranzkoa diodoaren geziarekin bat dator eta diodoa Z.P. egongo da, korrontea pasatzen utziz; bigarren periodo-erdian, ordea, v_S tentsioa negatiboa da eta, ondorioz, v_{S2} tentsioa positiboa; hori dela eta, korrontearen noranzkoa diodoaren geziaren kontrakoa izango da, beraz, diodoa A.P. egongo da, korrontearen bidea oztopatuz.

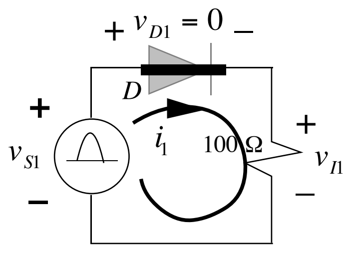
Hori guztia kontuan hartuz, analiza ditzagun bi zirkuituak diodoaren hiru hurbilketak erabiliz.

a) 1. hurbilketa. Diodo idealaren eredua:

	Modeloa zirkuituan	**Ekuazioa**	**Baldintza**
Z. P. :		$V_D = 0$	$I_D \geq 0$
		(zirkuitulaburra)	
A. P. :		$I_D = 0$	$V_D \leq 0$
		(zirkuitu irekia)	

Ondorioz, bi zirkuitu baliokideak honako hauek izango dira:

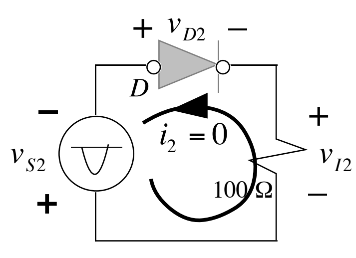
1) $0 \leq t \leq \dfrac{T}{2}$, diodoa Z.P.



KTL: $v_{S1} = v_{D1} + v_{I1} \rightarrow$

$$\boxed{v_{I1} = v_{S1}}$$

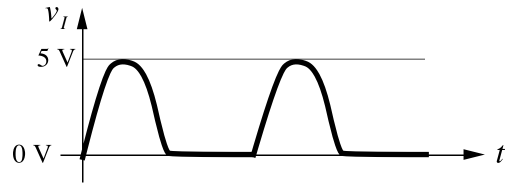
2) $\dfrac{T}{2} \leq t \leq T$, diodoa A.P.



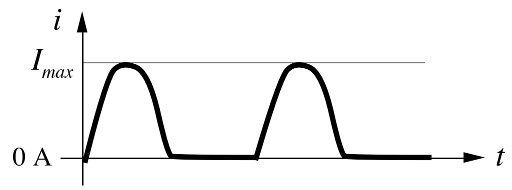
Ohm: $v_{I2} = -100 i_2 \rightarrow$

$$\boxed{v_{I2} = 0 \text{ V}}$$

Hau da, irteerako tentsioa lehenengo periodo-erdian sarrerakoaren berdina da (sinusoidala, alegia); eta bigarren periodo-erdian, berriz, nulua da:



Irteerako tentsio hori erresistentzia lineal baten muturren arteko tentsioa denez gero, Ohm-en legea betetzen da (izan ere, dagoeneko aplikatu dugu bigarren periodo--erdian) eta, ondorioz, korrontearen uhin-itxura tentsioarenaren berdina izango da:



Korronte aldakorraren balio maximoa kalkulatu nahi badugu, kontuan hartu behar dugu irteerako zein sarrerako tentsio maximoari dagokiola:

Ohm: $5\ \text{V} = 100 I_{max} \quad \rightarrow \quad \boxed{I_{max(1.h)} = 50\ \text{mA}}$

Orain, hipotesia egiaztatzeko unea da:

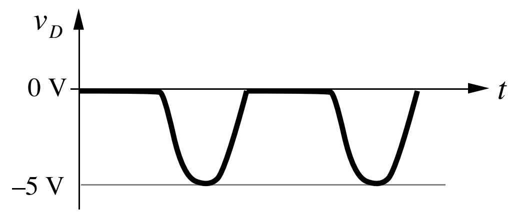
Lehenengo periodo-erdian, goiko irudian agerikoa da zirkuitutik igarotzen den korrontea, aldakorra izan arren, beti positiboa dela; beraz, diodoa Z.P. egoteko baldintza betetzen da: $i_{D1} = i_1 \geq 0$.

Bigarren periodo-erdian, diodoaren muturren arteko tentsioa kalkulatu behar dugu, mailan KTL aplikatuz:

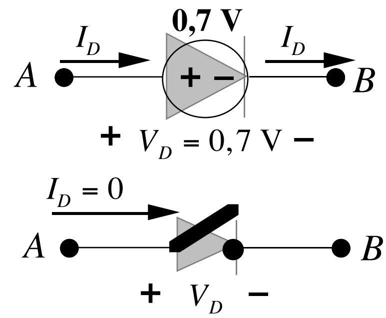
KTL: $-v_{S2} = v_{D2} + v_{I2}, \qquad v_{I2} = 0\ \text{V} \quad \rightarrow \quad v_{D2} = -v_{S2}$

Agerikoa da, beraz, bigarren periodo-erdian diodoa A.P. egoteko baldintza betetzen dela, $v_{D2} \leq 0$ da eta.

Bukatzeko, nahi izanez gero, diodoaren muturren arteko tentsioaren uhin-itxura marraz dezakegu, irteerako tentsioaren osagarria dela kontuan hartuz, bien arteko batura beti baita sarrerako tentsioa, KTL beti betetzen delako.



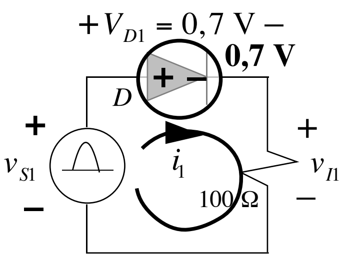
b) 2. hurbilketa. Diodoaren eredua:

Modeloa zirkuituan	Ekuazioa	Baldintza
Z. P. : 	$V_D = 0{,}7$ V	$I_D \geq 0$
A. P. :	$I_D = 0$	$V_D \leq 0{,}7$ V

(zirkuitu irekia)

Ondorioz, bi zirkuitu baliokideak honako hauek dira:

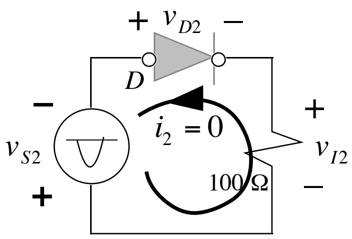
1) $0 \leq t \leq \frac{T}{2}$, diodoa Z.P.



KTL: $v_{S1} = v_{D1} + v_{I1}$ →

$\boxed{v_{I1} = v_{S1} - 0{,}7}$

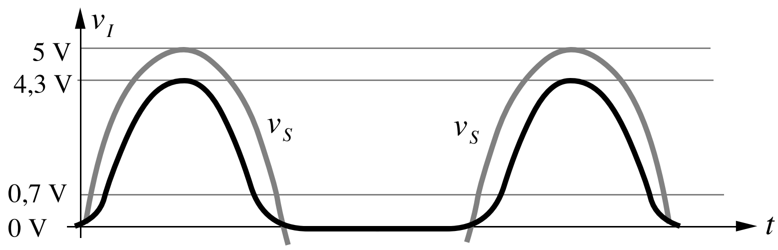
2) $\frac{T}{2} \leq t \leq T$, diodoa A.P.



Ohm: $v_{I2} = -100 i_2$ →

$\boxed{v_{I2} = 0 \text{ V}}$

Hau da, irteerako tentsioa bigarren periodo-erdian nulua da, lehen bezala, diodoaren modeloa alderantzizko polarizazioan ez baita aldatu lehenengo hurbilketatik bigarrenera, ez eta hirugarren hurbilketan ere. Lehenengo periodo-erdian, berriz, irteerako tentsioa ez da izango sarrerakoaren berdina, 0,7 V txikiagoa baizik. Diferentzia horren eraginez, diodoaren zuzeneko polarizazioak ez du iraungo lehenengo periodo-erdi osoan, baizik eta sarrerako tentsioak 0,7 volteko balioa gainditzen duenean soilik:



Lehen bezala, korrontearen uhin-itxura tentsioarenaren berdina izango da eta bere balio maximoa kalkulatu nahi badugu, kontuan hartu behar dugu irteerako tentsio maximoari dagokiola, hots:

Ohm: $4{,}3\ \text{V} = 100 I_{max}$ $\rightarrow$ $\boxed{I_{max(2.h)} = 43\ \text{mA}}$

Orain, hipotesia egiaztatzeko unea da. Horretarako, diodotik igarotzen den korrontearen adierazpen orokorra kalkulatuko dugu, eta diodoa Z.P. egoteko baldintza betearaziko diogu. Zirkuituko maila bakarrean KTL aplikatuz:

$$v_S = v_D + 100 i_D \quad \rightarrow \quad i_D = \frac{v_S - v_D}{100}$$

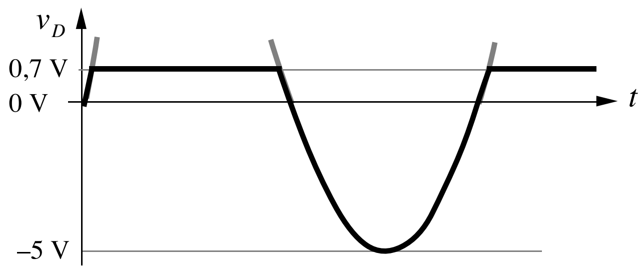
Diodoa Z.P. baldin badago: $v_D = 0{,}7\ \text{V} \quad \rightarrow \quad i_D = \dfrac{v_S - 0{,}7}{100}$

Z.P. egoteko baldintza betearaziz: $i_D = \dfrac{v_S - 0{,}7}{100} \geq 0 \quad \rightarrow \quad v_S \geq 0{,}7\ \text{V}$

Hau da, $v_S \geq 0{,}7\ \text{V}$ denean (lehenengo periodoaren tarte batean, hasieran eta bukaeran izan ezik), diodoa Z.P. egongo da. $v_S \leq 0{,}7\ \text{V}$ denean (bigarren periodo--erdi osoan eta lehenengoaren hasieran eta bukaeran), berriz, diodoa A.P. egongo da, eta bere muturren arteko tentsioa kalkula dezakegu:

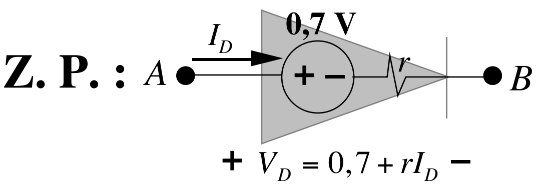
$v_{D(A.P.)} = v_S \leq 0{,}7\ \text{V}$ (diodoa A. P. dagoenean $v_I = 0$ V delako)

Hori guztia kontuan hartuz, diodoaren muturren arteko tentsioaren uhin-itxura honako hau izango da:



c) 3. hurbilketa. Diodoaren eredua zuzeneko polarizazioan:

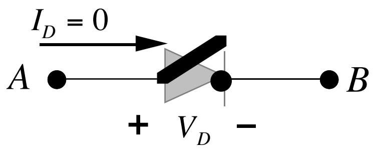
Modeloa zirkuituan **Ekuazioa** **Baldintza**



Ekuazioa	Baldintza
$V_D = 0{,}7 + rI_D$	$I_D \geq 0$

$r = 0{,}2\ \Omega$

A. P. :

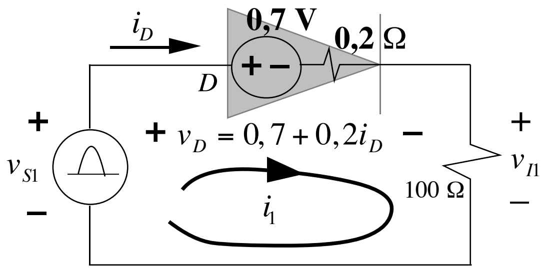


$\boxed{I_D = 0 \quad V_D \le 0,7 \text{ V}}$

(zirkuitu irekia)

Ondorioz, zuzeneko polarizazioari dagokion zirkuitu baliokidea honako hau da (gogoan izan alderantzizko polarizazioaren eredua ez dela aldatuko aurrekoekin alderatuta; beraz, lehengo zirkuitu baliokide berbera izango da):

Diodoa Z.P.:



Orain, diodotik igarotzen den korrontearen adierazpena kalkulatuko dugu, diodoa Z.P. dagoela suposatuz; eta ondoren, Z.P. egoteko baldintza betearaziko diogu.

KTL: $v_{S1} = v_D + v_{I1} \rightarrow v_{S1} = 0,7 + 0,2 i_D + 100 i_D \rightarrow v_{S1} = 0,7 + 100,2 i_D \rightarrow$

$$i_D = \frac{v_{S1} - 0,7}{100,2}$$

Z.P. egoteko baldintza betearaziz: $i_D = \dfrac{v_{S1} - 0,7}{100,2} \ge 0 \rightarrow v_{S1} \ge 0,7 \text{ V}$

Beraz, lehen bezala, $v_S \ge 0,7$ V denean, diodoa Z.P. egongo da; eta $v_S \le 0,7$ V denean, berriz, diodoa A.P. egongo da.

Baina, lehen ez bezala, irteerako tentsioaren itxura ez da sarrerako tentsioarenaren berdina, ez eta 0,7 volt txikiagoa ere, zeren oraingo honetan korrontearen eragina nabarmena baita irteerako tentsioaren gainean; hots, korrontea handitu ahala, sarrerako eta irteerako tentsioen arteko diferentzia handiagoa da:

KTL: $v_{S1} = v_D + v_{I1} \rightarrow v_{I1} = v_{S1} - v_D \rightarrow v_{I1} = v_{S1} - 0,7 - 0,2 i_D$

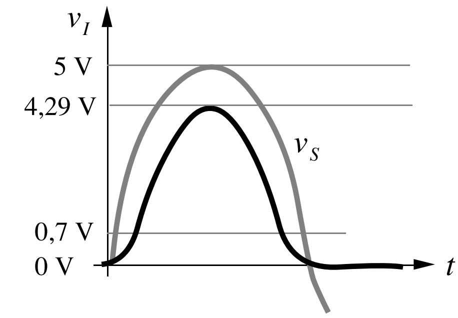
Horrexegatik, irteerako tentsioaren balio maximoa kakulatzeko, lehendabizi korrontearena kalkulatu beharko dugu, sarrerako tentsio maximoari dagokiola kontuan hartuz:

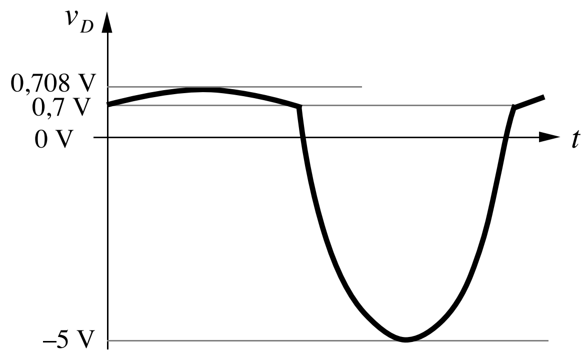
$$i_D = \frac{v_{S1} - 0,7}{100,2} \rightarrow I_{max(3.h)} = \frac{5 - 0,7}{100,2} \rightarrow \boxed{I_{max(3.h)} = 42,91 \text{ mA}}$$

Horrela, irteerako tentsioaren balio maximoa:

$$V_{Imax(3.h)} = 5 - 0,7 - 0,2 I_{max(3.h)} = 100 I_{max(3.h)} \rightarrow V_{Imax(3.h)} = 4,29 \text{ V}$$

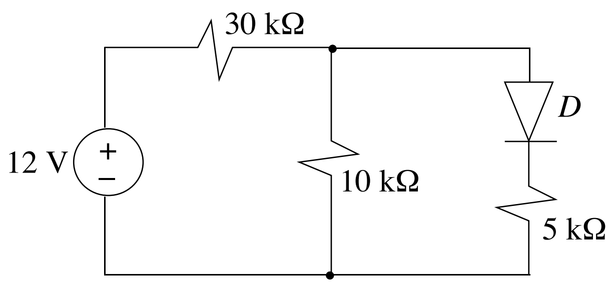
Hori guztia kontuan hartuz, irteerako tentsioaren eta diodoaren muturren arteko tentsioaren uhin-itxurak honako hauek izango dira:





Ondorio gisa, aurreko ariketan bezala, honako hau esan dezakegu: hirugarren hurbilketa erabiltzean zehaztasun handiagoa lortzen den arren, lortutako diferentzia ez da horrenbestekoa; kalkuluak, ordea, konplexuagoak dira. Horrexegatik, ariketa gehienetan bigarren hurbilketa hobesten da, nahikoa zehatza izanik ere oso konplexua ez delako.

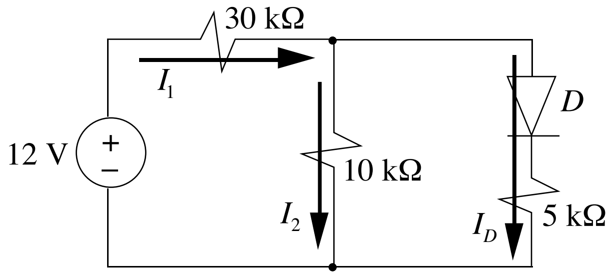
3. Ebatz ezazu irudiko zirkuitua, diodoarentzat bigarren hurbilketa erabiliz.



Ebazpena:

Ebazpena, ebazpidean aipatutako pausoei jarraituz egingo dugu. Lehenengo pausoa, diodoarentzako hurbilketa aukeratzearena hain zuzen, enuntziatuan bertan argitzen denez (diodoaren bigarren hurbilketa erabili behar dugu), bigarren urratsetik hasiko gara.

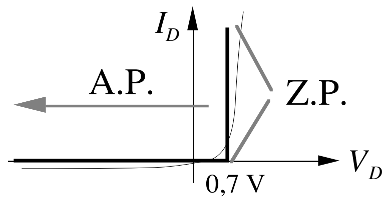
2. Sorgailuen arabera, korronteen noranzkoak aukeratu behar dira. Kasu honetan, sorgailu bakarra dagoenez, korronteen noranzkoak sorgailuak finkatuko ditu, eta ez da zalantza handirik egongo: sorgailua dagoen adarretik, sorgailuak emandako I_1 korrontea igaroko da; korronte hori goiko korapilora iristean, bitan banatuko da, I_2 eta I_D korronteak sortzeko, eta biak goitik behera igaroko dira.

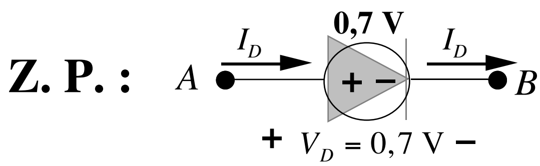


(Dena den, korronteen noranzkoak arbitrarioki finkatuta ere, hots, sorgailuaren eragina kontuan hartu gabe, emaitza bera lortzen da; hori bai, ondoren ikusiko dugun legez, lehenengo hipotesia zuzena izateko probabilitatea handiagoa da, baldin eta korronteen noranzkoak zirkuituaren ezaugarriak kontuan hartuz ipintzen baditugu, orain egin dugun bezalaxe.)

3. **Hipotesia**: aurreko pausoan suposatu ditugun korronteen noranzkoen arabera, goiko irudian diodotik igarotzen den korrontea, I_D, diodoaren alde positibotik sartu eta negatibotik irteten da. Hori dela eta, diodoaren polarizazioari buruz egingo dugun lehenengo hipotesia, diodoa zuzeneko polarizazioan dagoela suposatzea izango da. Hori kontuan hartuz, gogoratu egin behar dugu zein diren zuzeneko polarizazioan bigarren hurbilketari dagozkion eredua, ekuazioa eta baldintza, azken hau gero egiaztatu beharko baitugu. Hona hemen:

Diodoaren bigarren hurbilketa:

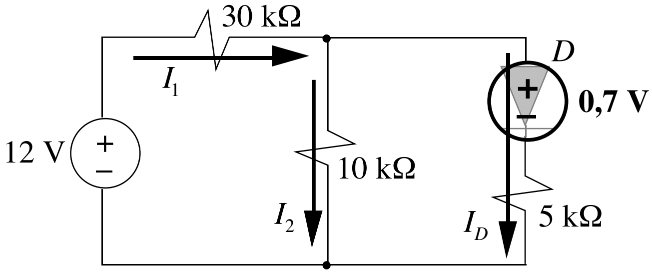




Ekuazioa	Baldintza
$V_D = 0{,}7$ V	$I_D \geq 0$

4. Ordezka dezagun diodoa bere ereduaz, hau da, 2. hurbilketan zuzeneko polarizazioari dagokion elementuaz, 0,7 V-eko tentsio-sorgailua hain zuzen ere.

(Oharra: diodoaren "geziaren" noranzkoaren eta tentsio-sorgailuaren zeinuen arteko erlazioa biziki garrantzitsua dela azpimarratu behar dugu; hots, zuzeneko polarizazioan, tentsio-sorgailuaren positiboa diodoaren "triangeluaren" aldean eta tentsio-sorgailuaren negatiboa diodoaren "marraren" aldean ipini behar dira, eta ez alderantziz. Horrexegatik, beti komeni da eredua diodoaren gainean ipintzea, polarizazioa agerian uzteko asmoz.)



5. Zirkuitua ebaztea izango da hurrengo pausoa. Horretarako, Kirchhoff-en legeak erabiliz, hiru ekuazio eta hiru ezezaguneko sistema bat lortuko dugu.

❶ $I_1 = I_2 + I_D$ (KKL)

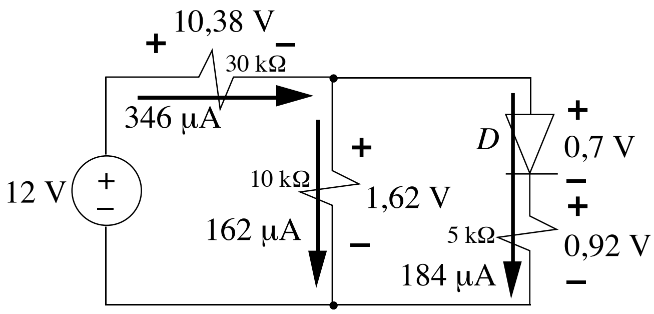
❷ $12 = 30 I_1 + 10 I_2$ (KTL ezkerreko mailan)

❸ $0,7 = 10 I_2 - 5 I_D$ (KTL eskuineko mailan)

Soluzioa: $I_1 = 0{,}346$ mA, $I_2 = 0{,}162$ mA, $I_D = 0{,}184$ mA

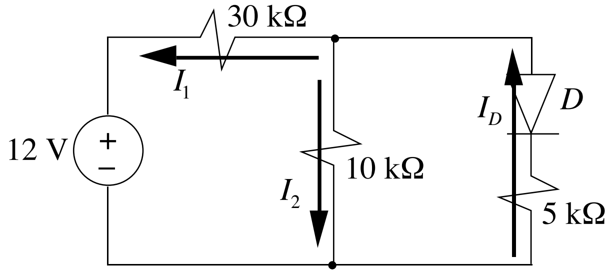
6. Egiazta dezagun baldintza ($I_D \geq 0$) betetzen ote den.

Kalkulatu dugunaren arabera, $I_D = 0{,}184$ mA > 0 da; beraz, baldintza bete egiten da, eta egindako hipotesia zuzena da. Hau da, orain arte lortutako emaitza zirkuituari dagokiona da, eta aurrera jarrai dezakegu falta zaizkigun balioak kalkulatzeko.



Une honetan irakurleak hauxe pentsa dezake: liburuaren egileek hipotesia aldez aurretik asmatu dute, zer atera behar zuen bazekitelako; baina nola asmatuko dut nik? Hori da orain azpimarratu nahi duguna: lehenengo hipotesia okerra baldin bada, beste hipotesi bat egitea besterik ez da falta. Horixe da, hain zuzen ere, orain egin nahi duguna, hots, hipotesi faltsua edo okerra egitea. Horretarako, demagun orain 2. pausoan honako korronte-noranzko hauek finkatu ditugula arbitrarioki:

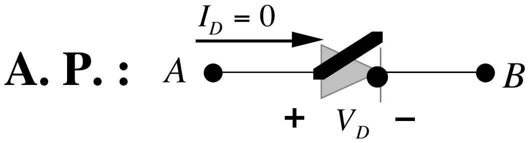
2'. Korronteen noranzkoak:



3'. **Hipotesia**: aurreko pausoan suposatu ditugun korronteen noranzkoen arabera, goiko irudian diodotik igarotzen den korrontea, I_D, diodoaren alde negatibotik sartu eta positibotik irteten da. Hori dela eta, diodoaren polarizazioari buruz egingo dugun hipotesia, diodoa alderantzizko polarizazioan dagoela suposatzea izango da.

Hori kontuan hartuz, gogoratu egin behar dugu zein diren alderantzizko polarizazioan bigarren hurbilketari dagozkion eredua, ekuazioa eta baldintza, azken hau gero egiaztatu beharko baitugu. Hona hemen:

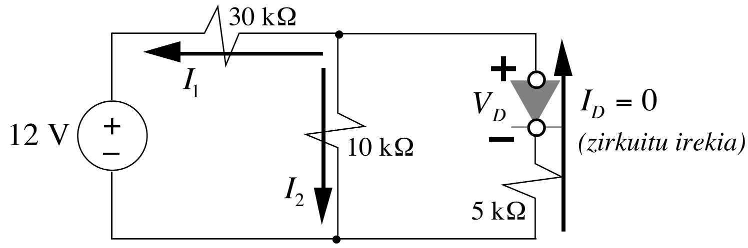
Modeloa zirkuituan



Ekuazioa	Baldintza
$I_D = 0$	$V_D \leq 0$

(zirkuitu irekia)

4'. Ordezka dezagun diodoa bere ereduaz, hau da, 2. hurbilketan alderantzizko polarizazioari dagokion zirkuitu irekiaz hain zuzen ere (Oharra: hemen ere, diodoaren muturren arteko tentsioaren zeinua mantendu behar da, hots, positiboa triangeluan eta negatiboa marran, gero baldintzaren egiaztapena zuzena izango bada.)



5'. Zirkuitua ebaztea da hurrengo pausoa. Oraingo honetan, diodoaren eredua dela eta, badakigu $I_D = 0$ izango dela eta diodoaren muturren arteko tentsioa ezezaguna. Ondorioz,

❶ $0 = I_1 + I_2$ (KKL)

❷ $12 = -30I_1 + 10I_2$ (KTL ezkerreko mailan)

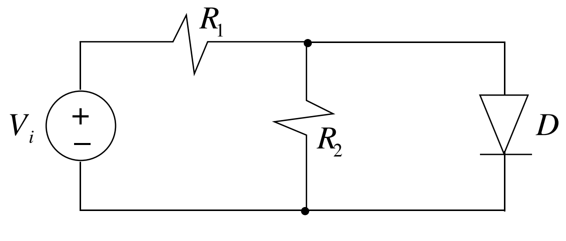
❸ $V_D = 10I_2 + 5I_D = 10I_2$ (KTL eskuineko mailan)

Soluzioa: $I_1 = -300\ \mu A$, $I_2 = 300\ \mu A$, $V_D = 3\ V$

6'. Egiazta dezagun baldintza ($V_D \le 0,7\ V$) betetzen ote den.

Kalkulatu dugunaren arabera, $V_D = 3\ V > 0,7\ V$ da; beraz, baldintza ez da betetzen**,** eta egindako hipotesia ez da zuzena; hots, diodoak zuzenki polarizatuta beharko luke, suposatu dugunaren kontra. Hori dela eta, egindako hipotesiaren kontrakoa egin beharko genuke, hots, diodoa zuzenki polarizatuta dagoela suposatu beharko genuke; eta hori da lehenago egin duguna.

4. Irudiko zirkuiturako, esan zenbatekoa den V_i tentsioaren balio minimoa diodoak korrontea eroan dezan (erabili diodoaren bigarren hurbilketa). R_1 eta R_2 erresistentzien balioak ezagunak dira.

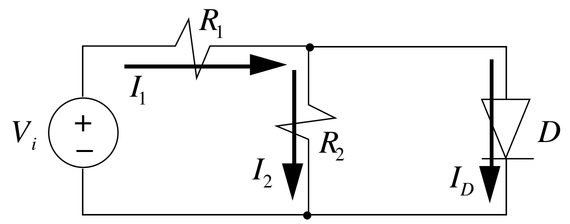


Ebazpena:

Kasu honetan, diodoaren polarizazioa geuk nahi duguna izango da; hots, diodoak korrontea eroatea nahi dugu, edo, gauza bera dena, zuzenki polarizatuta egotea. Horretarako, zuzeneko polarizazioari dagokion baldintza egiaztatu beharrean, zirkuituari betearaziko diogu, diodoa egoera horretan egotea nahi baitugu.

Jarrai dezagun, bada, ebazpidea aldaketa soil horrekin. Kasu honetan ere, gehienetan bezala, ebazpideko lehenengo pausoaz ez dugu arduratu behar, enuntziatuan bertan argitzen baita: diodoaren bigarren hurbilketa erabili behar dugu.

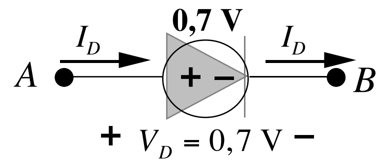
2. Sorgailuen arabera korronteen noranzkoak finkatu behar dira. Aurreko ariketan bezalaxe, korronteen noranzkoak, sarrerako tentsio-sorgailuak finkatuko ditu, horixe baita zirkuituan dagoen sorgailu bakarra.



3. **Hipotesia**: suposatu dugun korrontea diodoaren "geziaren" noranzko berekoa denez gero, diodoa zuzenki polarizatuta dagoela suposatuko dugu. Beraz, lehen bezala, bigarren hurbilketan zuzeneko polarizazioari dagozkion eredua, ekuazioa eta baldintza erabili beharko ditugu:

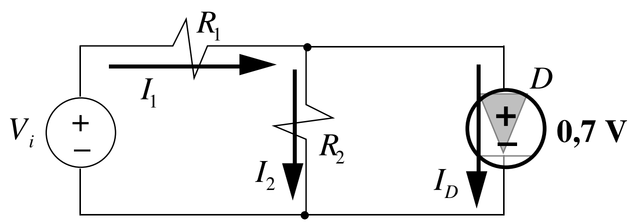
Modeloa zirkuituan

Z. P. :



Ekuazioa	Baldintza
$V_D = 0{,}7$ V	$I_D \geq 0$

4. Ordezka dezagun diodoa bere baliokideaz, hots, 0,7 V-eko tentsio-sorgailuaz:



5. Zirkuituaren ebazpena:

❶ $I_1 = I_2 + I_D$ (KKL)

❷ $V_i = R_1 I_1 + R_2 I_2$ (KTL ezkerreko mailan)

❸ $R_2 I_2 = 0{,}7$ (KTL eskuineko mailan)

Soluzioa: $I_1 = \dfrac{V_i - 0{,}7}{R_1}$, $I_2 = \dfrac{0{,}7}{R_2}$, $I_D = \dfrac{R_2 \cdot (V_i - 0{,}7) - R_1 \cdot 0{,}7}{R_1 \cdot R_2}$

Agerikoa da soluzioa R_1, R_2 eta V_i-ren menpe lortu dugula. Enuntziatuan esan bezala, R_1 eta R_2 erresistentziak ezagunak direla eta ezezagun bakarra V_i dela suposatzen da.

6. Betearaz diezaiogun orain baldintza soluzioari:

$$I_D = \frac{R_2 \cdot (V_i - 0,7) - R_1 \cdot 0,7}{R_1 \cdot R_2} \geq 0 \quad \rightarrow \quad R_2 \cdot (V_i - 0,7) - R_1 \cdot 0,7 \geq 0 \quad \rightarrow$$

$$\boxed{V_i \geq \frac{R_1 + R_2}{R_2} \cdot 0,7 \text{ V}}$$

Soluzioa aztertuz gero, agerikoa da ezen, diodoa zuzenki polarizatuta egoteko, sarrerako tentsioak diodoaren tentsioa (0,7 volt) gainditu behar duela, erresistentzien menpeko biderkatzailea bat baino handiagoa baita:

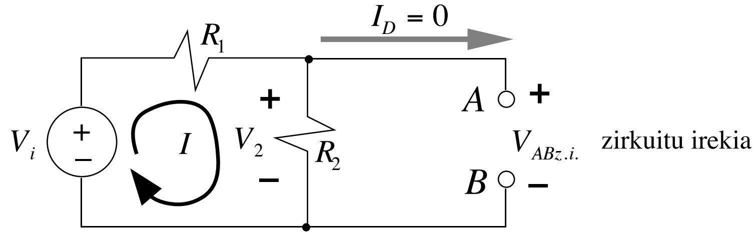
$$\frac{R_1 + R_2}{R_2} > 1$$

Ariketa bukatutzat eman dezakegun arren, ikus dezagun beste bide bat soluzioa bilatzeko, zirkuitu handiekin lana errazten baita ekuazioak idatzi baino lehen diodoaren muturren arteko Thévenin-en zirkuitu baliokidea bilatzen badugu. Ikus dezagun, bada.

Ezer baino lehen, beraz, zirkuitu osoaren Thévenin-en baliokidea bilatuko dugu diodoaren muturren artean; gogoratu Thévenin-en zirkuitu baliokidea kalkulatzeko, alde batetik, Thévenin-en tentsio baliokidea, E_{Th}, kalkulatu behar dugula, eta bestetik Thévenin--en erresistentzia baliokidea, R_{Th}.

a) **Thévenin-en tentsio baliokidea**ren balioa ezagutzeko, jatorrizko zirkuituan diodoaren muturren (A eta B puntuen) arteko potentzial-diferentzia zirkuitu irekian ($V_{ABz.i.}$) kalkulatu behar dugu, hots, diodoa kenduta.

A eta B puntuen artean zirkuitu irekia dagoenez, bertatik ez da korronterik pasatuko ($I_D = 0$):



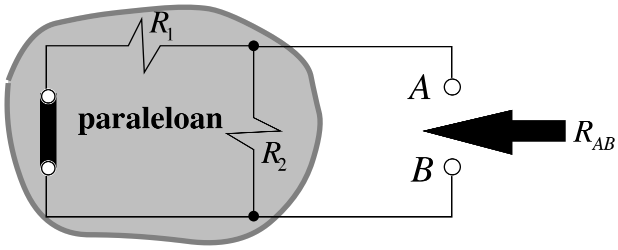
Orduan, ezker aldeko mailan KTL aplikatuz:

$$R_1 I + R_2 I = V_i \quad \rightarrow \quad I = \frac{V_i}{R_1 + R_2}$$

Orain, tentsioak kalkulatu behar ditugu; eskuin aldeko mailan KTL aplikatuz:

$$V_{ABz.i.} = V_2 = R_2 I \quad \rightarrow \quad E_{Th} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_i$$

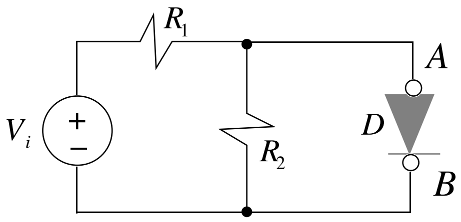
b) **Thévenin-en erresistentzia baliokidea**ren balioa kalkulatzeko, jatorrizko zirkuituan dauden sorgailu guztiak anulatu eta diodoaren muturren (*A* eta *B* puntuen) artean ikusten den erresistentzia baliokidea kalkulatu beharko dugu. Beraz, zirkuituan dagoen tentsio-sorgailua zirkuitulaburraz ordezkatu behar dugu.



Agerikoa da bi erresistentziak paraleloan daudela; beraz:

$$R_{Th} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Hortaz, dagoeneko lortu ditugu *A* eta *B* puntuen arteko erresistentzia baliokidea eta tentsio baliokidea, hau da, lortu dugu Thévenin-en zirkuitu baliokidea:

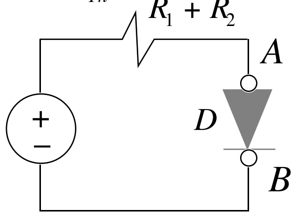


jatorrizko zirkuitua

$$\equiv$$

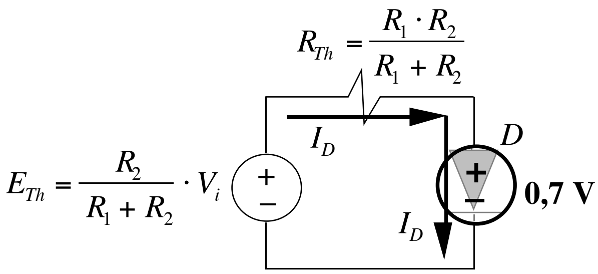
$$R_{Th} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

$$E_{Th} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_i$$



Thévenin-en zirkuitu baliokidea

Orain, v_i-ren balio minimoa kalkulatzeko, Thévenin-en zirkuitu baliokideari betearaziko diogu zuzeneko polarizazioaren baldintza:



KTL: $E_{Th} = R_{Th} I_D + 0,7 \quad \rightarrow \quad I_D = \dfrac{E_{Th} - 0,7}{R_{Th}}$

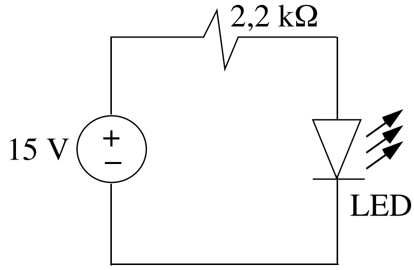
Zuzeneko polarizazioaren baldintza betearaziz: $\boxed{E_{Th} \geq 0,7 \text{ V}}$

Hau da, Thévenin-en baliokidea bezalako zirkuitu sinpleetan nahikoa da tentsio-sorgailuaren balioa diodoaren atari-tentsioa (kasu honetan, diodo artezlea denez, 0,7 volt) baino handiagoa izatea, diodoa zuzenki polarizatuta egon dadin. Beraz, azken emaitza hau guztiz orokorra da, eta erabilgarria edozein zirkuitutan. Orain, emaitza orokor hori analizatzen ari garen zirkuiturako partikularizatzen badugu:

$$E_{Th} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_i \geq 0,7 \quad \rightarrow \quad \boxed{V_i \geq \frac{R_1 + R_2}{R_2} \cdot 0,7 \text{ V}}$$

Hau da, lehen lortu dugun soluzio bera lortzen da Thévenin-en zirkuitu baliokidea erabiliz. Une honetan, irakurleak pentsa dezake Thévenin-en zirkuitu baliokidea erabiliz ez dugula emaitza azkarrago lortu; agian kasu honetan hori horrela da, jatorrizko zirkuitua ere oso konplexua ez zelako; baina irakurleak berak froga dezake hori, zirkuitu konplexu samar bat hartuz eta bi moduetan ebatziz.

5. Irudiko zirkuitu sinplean, LED diodoa piztuko al da?

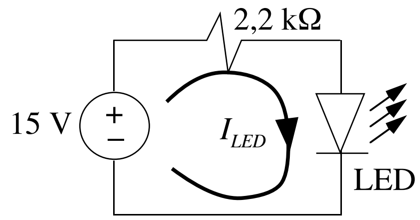


Ebazpena:

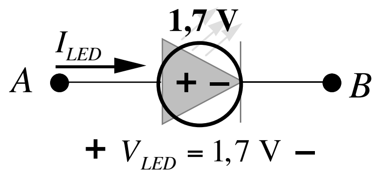
LED diodoa piztuko ote den jakiteko, zuzeneko polarizazioan ala alderantzizkoan ote dagoen aztertu behar da; azken batean, aurreko ariketetan egindakoaren parekoa da egin beharrekoa.

1. Lehenik eta behin, enuntziatuan erabili beharreko hurbilketari buruzko aipamenik egiten ez denez, erabiliko dugun hurbilketa aukeratu beharko dugu. Horrelakoetan gehien erabiltzen den hurbilketa aukeratu ohi da: LED diodoaren 2. hurbilketa hain zuzen ere.

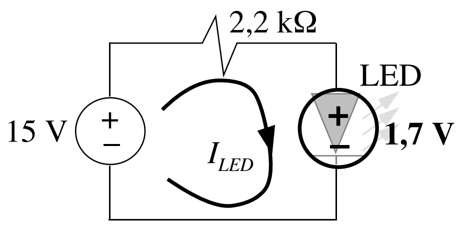
2. Sorgailuen arabera korronteen noranzkoak finkatu behar dira. Oinarrizko zirkuitu honetan sorgailu bakarra eta korronte bakarra ageri dira, eta, ondorioz, ez dago noranzkoaren zalantzarik.



3. **Hipotesia**: korrontea LED diodoaren alde positibotik sartu eta alde negatibotik irteten da; beraz, gure hipotesia diodoa Zuzeneko Polarizazioan dagoela suposatzea da. Horrez gain, besterik esaten ez digutenez, LED diodoaren atari-tentsioa 1,7 V-ekoa dela suposatuko dugu.

	Modeloa zirkuituan	**Ekuazioa**	**Baldintza**
Z. P. :		V_{LED} = 1,7 V	$I_{LED} \geq 0$

4. Ordezka dezagun diodoa, dagokion baliokideaz.



5. Zirkuitua ebaztea izango da hurrengo pausoa. Horretarako, Kirchhoff-en tentsioen legea erabiliz:

$$15 = 2{,}2 I_{LED} + 1{,}7 \qquad \text{(KTL)}$$

Soluzioa: I_{LED} = 605 μA

6. Egiazta dezagun orain baldintza betetzen ote den. I_{LED} = 605 μA > 0 da; beraz, baldintza bete egiten da, hau da, egindako hipotesia zuzena da.

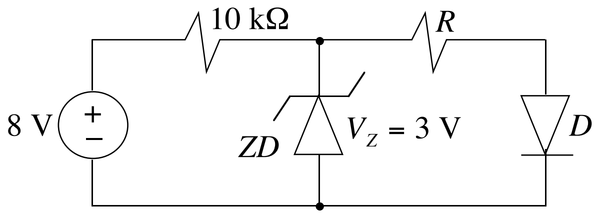
Dagoeneko egiaztatu dugu LED diodoa zuzeneko polarizazioan dagoela; beraz, zirkuituko LED diodoa piztu egingo da.

Hori guztia, ebazpide orokorrari jarraituz egin beharrean, 2. ariketako emaitza gogoratu besterik ez genuen egin behar. Bertan esan dugu Thévenin-en motako zirkuitu sinpleetan nahikoa dela sarrerako tentsio-sorgailuaren balioa diodoaren atari-tentsioa baino handiagoa izatea, diodoa zuzenki polarizatuta egoteko; ondorioz, kasu honetan

$$V_i = 15 \text{ volt} > 1{,}7 \text{ volt} = V_{LED}$$

betetzen denez gero, agerikoa da LED diodoa zuzenki polarizatuta egongo dela, eta, ondorioz, piztu egingo dela.

6. Irudiko zirkuituan, kalkula ezazu zenbatekoa den *R* erresistentziaren balio minimoa Zener diodoa Zener eskualdean alderantziz polarizatuta eta diodo artezlea zuzenki polarizatuta egon daitezen (erabili bigarren hurbilketa bi diodoetarako).

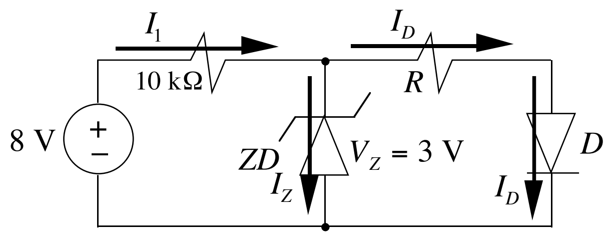


Ebazpena:

Kasu honetan ere, gehienetan bezala, ebazpideko lehenengo pausoaz ez dugu arduratu behar enuntziatuan bertan argitzen baita.

Beste aldetik, hipotesia ere ez dugu egin behar, aldez aurretik baitakigu nola egon behar duten bi diodoek; beraz, hipotesiari dagozkion baldintzak egiaztatu beharrean, betearazi egin beharko dizkiogu zirkuituari. Dena den, metodoari lotuko gatzaizkio nahi dugun "hipotesia" eginez.

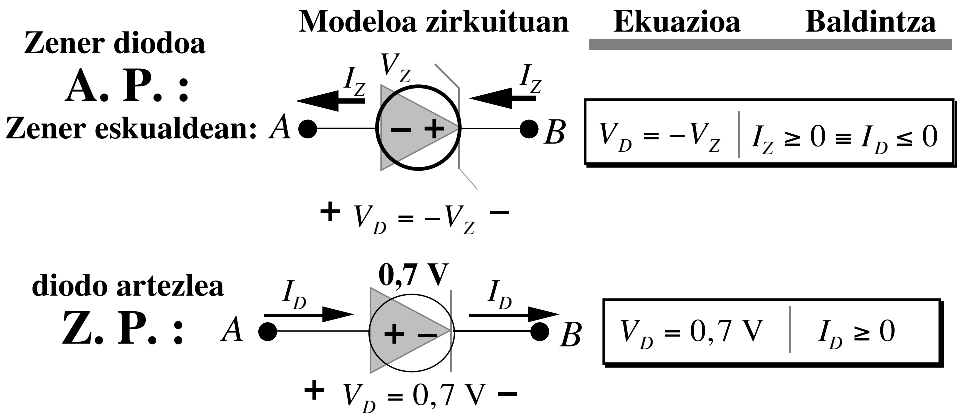
2. Sorgailuen arabera korronteen noranzkoak finkatu behar dira. Korronteen noranzkoak, 8 V-eko tentsio-sorgailuak finkatuko ditu, hori baita zirkuituan dagoen sorgailu bakarra.



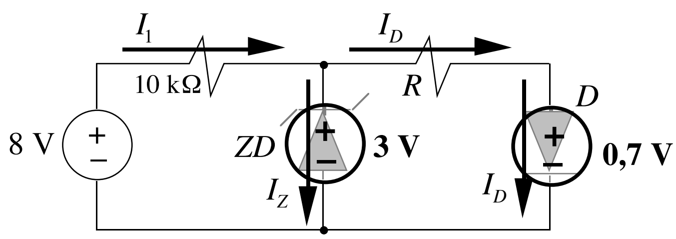
3. **Hipotesia**: eskuineko adarreko korrontearen noranzkoa diodo artezlearen "geziarekin" bat datorrenez gero, diodo artezlea zuzenki polarizatuta egongo da. Beste aldetik, erdiko adarreko korrontea Zener diodoaren alde negatibotik sartu eta positibotik irteten da; beraz, Zener diodoa alderantzizko polarizazioan egongo da. Baina Zener diodoarekin ari garenez, bi aukera ditugu, diodoa Zener eskualdean edo eskualde arruntean egon baitaiteke.

Kasu honetan, lehenago esan dugun bezala, Zener diodoa Zener eskualdean egotea nahi dugu, eta diodo artezlea zuzenki polarizatuta; bi egoera hauek bat datoz suposatutako korronteen noranzkoekin.

Hona hemen erabili beharreko ereduak, ekuazioak eta baldintzak:



4. Ordezka ditzagun diodoak beren baliokideez, hots, 3 V-eko eta 0,7 V-eko tentsio--sorgailuez, hurrenez hurren. (Oharra: Zener diodoekin kontu handiz ibili behar da tentsio-sorgailu baliokidearen zeinuak ipintzean, Zener eskualdean alderantziz ipini behar baitira, alderantziz polarizatuta dagoelako.)



5. Zirkuitua ebaztea izango da hurrengo pausoa. Horretarako, Kirchhoff-en legeak erabiliz, hiru ekuazio eta hiru ezezaguneko sistema bat lortuko dugu.

❶ $I_1 = I_Z + I_D$ (KKL)

❷ $8 = 10 I_1 + 3$ (KTL ezkerraldeko mailan)

❸ $3 = R I_D + 0{,}7$ (KTL eskuinaldeko mailan)

Soluzioa: ❷ $\rightarrow$ $I_1 = \dfrac{8-3}{10} = 0,5 \text{ mA}$

❸ $\rightarrow$ $I_D = \dfrac{3-0,7}{R} = \dfrac{2,3}{R\ (\text{k}\Omega)} \text{ mA}$

❶ $\rightarrow$ $I_Z = I_1 - I_D = \left(0,5 - \dfrac{2,3}{R}\right) \text{ mA}$

Hau da, lehenengo balioa ez beste biak R erresistentziaren menpekoak dira, R izanik kalkulatu beharreko balioa, baldintzak betearaziz.

6. Betearaz diezaizkiogun orain baldintzak zirkuituari.

Zener diodoarena: $I_Z = \left(0,5 - \dfrac{2,3}{R}\right) \geq 0 \rightarrow 0,5 \geq \dfrac{2,3}{R} \rightarrow R \geq \dfrac{2,3}{0,5} \text{ k}\Omega \rightarrow$

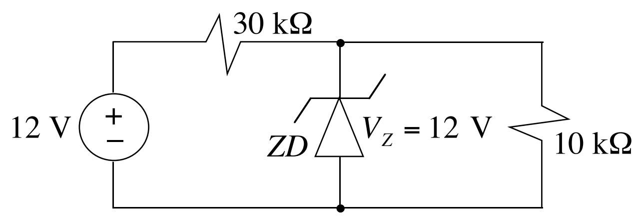
$R \geq 4,6 \text{ k}\Omega$

Diodo artezlearena: $I_D = \dfrac{2,3}{R} \geq 0 \rightarrow R \geq 0$

Emaitzak bete beharreko bi baldintzak alderatuz, agerikoa da Zener diodoarena dela R erresistentziaren balioa baldintzatzen duena, besteak erresistentzia hori positibo izatea besterik ez baitakar, eta badakigu hori beti gertatuko dela, hots, geuk erabiltzen ditugun erresistentzia ohmikoak beti positiboak direla, bigarren gaian esan genuen legez. Hori dela eta, Zener diodoa Zener eskualdean alderantziz polarizatuta eta diodo artezlea zuzenki polarizatuta egoteko, R erresistentziaren balio minimoa honako hau da:

$$\boxed{R_{minimoa} = 4,6 \text{ k}\Omega}$$

7. Ebatz ezazu irudiko zirkuitua Zener diodoaren bigarren hurbilketa erabiliz.



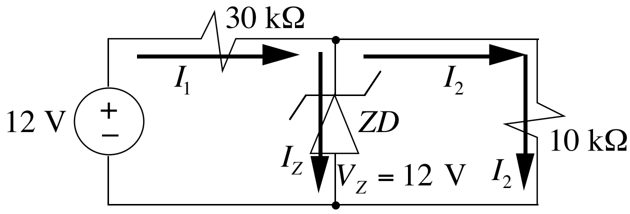
Ebazpena:

Ariketa hau bi modutan egingo dugu: alde batetik, teorian azaldutako ebazpide edo metodo orokorrari lotuko gatzaizkio, urratsez urrats, horrek beti balio duela frogatzeko. Ondoren, modu horretan lortutako emaitza analizatuz, bigarren aukera aurkeztuko dugu; izan ere, ariketa hau azkarrago ebazten da Zener diodoa Zener eskualdean alderantzizko polarizazioan egoteko behar den sarrerako tentsio-sorgailuaren balio minimoa kalkulatuz, metodo orokorrari jarraituz baino, ikusiko dugun legez.

Esan bezala, has gaitezen metodo orokorra aplikatzen, aldez aurretik zirkuituaren ezaugarriei gehiegi erreparatu gabe.

Kasu honetan ere, gehienetan bezala, ebazpideko lehenengo pausoaz ez dugu arduratu behar, enuntziatuan bertan argitzen baita: izan ere, Zener diodoaren bigarren hurbilketa erabili behar dugu.

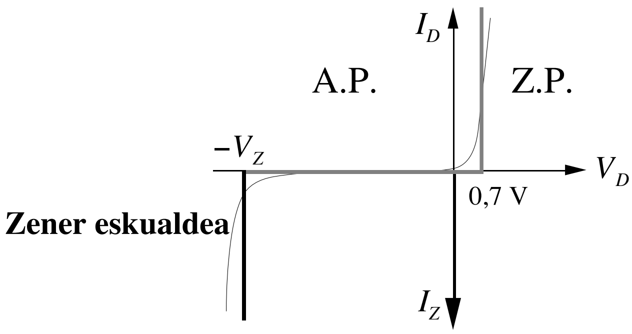
2. Sorgailuen arabera korronteen noranzkoak finkatu behar dira. Korronteen noranzkoak, 12 V-eko tentsio-sorgailuak finkatuko ditu, hori baita zirkuituan dagoen sorgailu bakarra.

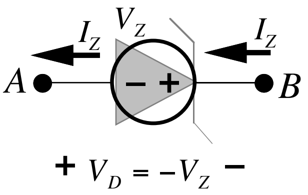


3. **Hipotesia**: korrontea Zener diodoaren alde negatibotik sartu eta positibotik irteten da. Beraz, diodoa alderantzizko polarizazioan egongo da; baina Zener diodoarekin ari garenez, bi aukera ditugu:

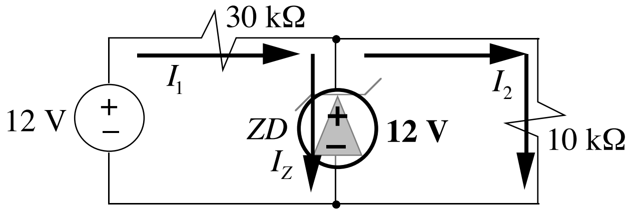
- Diodoa A.P. dago, Zener eskualdean.
- Diodoa A.P. dago, eskualde arruntean; beraz, ez dago Zener eskualdean.

Demagun lehenengo aukera betetzen dela. Hau da, diodoa A.P. dagoela Zener eskualdean.



Modeloa zirkuituan	Ekuazioa	Baldintza
A. P. : **Zener eskualdean:** 	$V_D = -V_Z$	$I_Z \geq 0 \equiv I_D \leq 0$

4. Ordezka dezagun diodoa bere baliokideaz, hots, 12 V-eko tentsio-sorgailuaz.



5. Zirkuitua ebaztea izango da hurrengo pausoa. Horretarako, Kirchhoff-en legeak erabiliz, hiru ekuazio eta hiru ezezaguneko sistema bat lortuko dugu.

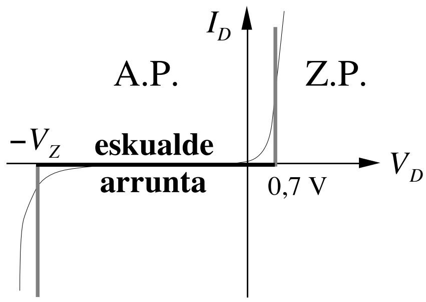
❶ $I_1 = I_2 + I_Z$	(KKL)
❷ $12 = 30I_1 + 12$	(KTL ezkerreko mailan)
❸ $12 = 10I_2$	(KTL eskuineko mailan)

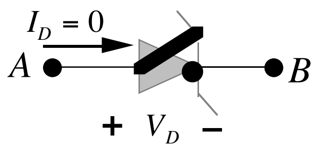
Soluzioa: $I_1 = 0$ mA, $I_2 = 1{,}2$ mA, $I_Z = -1{,}2$ mA

6. Egiazta dezagun orain baldintza betetzen ote den.

$I_Z = -1{,}2$ mA < 0 da; beraz, $I_Z \geq 0$ baldintza ez da betetzen, hau da, egindako hipotesia okerra da. Ondorioz, atzera bueltatu beharko dugu, hipotesi zuzena topatu arte.

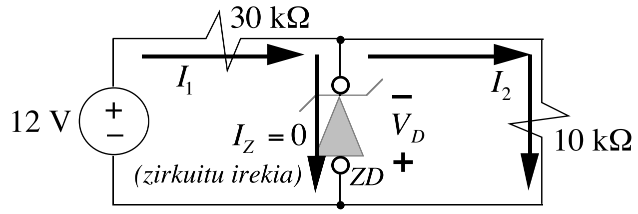
3'. **Bigarren hipotesia**: diodoa ez dago Zener eskualdean, eta, hortaz, logikoena den hurrengo hipotesia egin beharko dugu. Demagun goian aipatutako bigarren aukera betetzen dela. Hau da, diodoa A.P. dagoela eta ez dagoela Zener eskualdean; hots, eskualde arruntean dagoela.



	Modeloa zirkuituan	**Ekuazioa**	**Baldintza**
A. P. : **zona arruntean:**		$I_D = 0$	$-V_Z \leq V_D \leq 0{,}7$ V

V_Z parametro ezaguna

4'. Ordezka dezagun diodoa zirkuitu irekiaz, egindako hipotesia kontuan izanik.



5'. Zirkuitua ebaztea izango da hurrengo pausoa. Horretarako, Kirchhoff-en legeak erabiliz, oso sistema sinplea lortuko dugu.

❶ $I_1 = I_2$ (KKL)

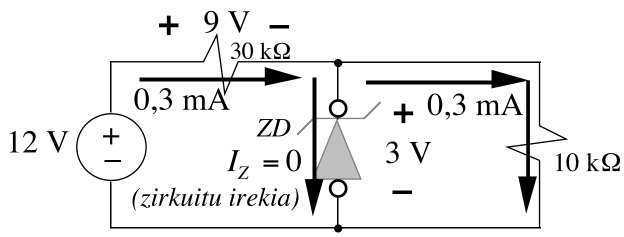
❷ $12 = 30I_1 + 10I_2$ (KTL perimetroko begiztan)

❸ $V_D = -12 + 30I_1 = -10I_2$ (KTL ezkerreko eta eskuineko mailetan)

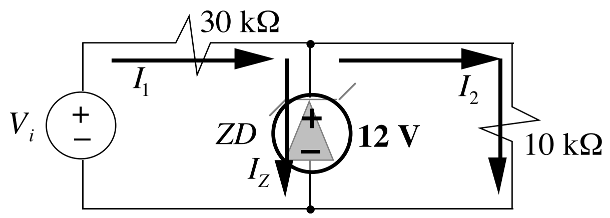
Soluzioa: $I_1 = I_2 = 0{,}3$ mA, $I_Z = 0$ mA, $V_D = -3$ V

6'. Azter dezagun orain baldintza betetzen ote den.

$-V_Z = -12$ V $< V_D = -3$ V $< 0{,}7$ V da; beraz, baldintza bete egiten da; hau da, egindako hipotesia zuzena da, eta amaitu dugu ariketa. Hona hemen soluzioa:



Ariketaren hasieran esan dugun bezala, orain beste modu batean ebatziko dugu zirkuitua. Horretarako, sarrerako tentsio-sorgailuaren balio minimoa kalkulatuko dugu, Zener diodoa Zener eskualdean alderantziz polarizatuta egon dadin. Beraz, hipotesia hori izango da: Zener diodoa Zener eskualdean alderantziz polarizatuta egongo da. Hori bai, baldintza egiaztatu beharrean, betearazi egin beharko diogu zirkuituari, sarrerako tentsio-sorgailuaren balioa ezezaguna izango baita bigarren kasu honetan. Hori guztia kontuan hartuz, honako zirkuitu baliokide hau analizatu behar dugu, Zener diodoa bere ereduaz ordezkatu ondoren:



5''. Zirkuitua ebaztea izango da hurrengo pausoa. Horretarako, Kirchhoff-en legeak erabiliz, oso sistema sinplea lortuko dugu.

❶ $I_1 = I_2 + I_Z$ (KKL)

❷ $V_i = 30 I_1 + 12$ (KTL ezkerreko mailan)

❸ $12 = 10 I_2$ (KTL eskuineko mailan)

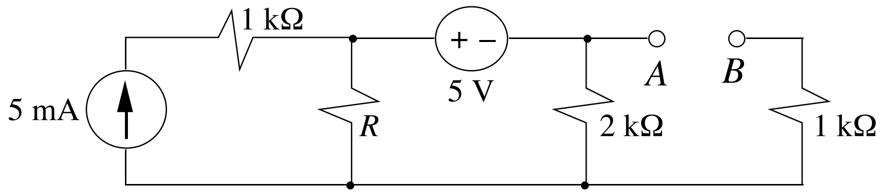
Soluzioa: $I_1 = \dfrac{V_i - 12}{30}$ mA, $I_2 = 1{,}2$ mA, $I_Z = \left(\dfrac{V_i - 12}{30} - 1{,}2\right)$ mA

6''. Betearaz diezaiogun orain baldintza:

$$I_Z = \frac{V_i - 12}{30} - 1{,}2 \geq 0 \quad \rightarrow \quad \frac{V_i - 12}{30} \geq 1{,}2 \quad \rightarrow \quad V_i - 12 \geq 36 \quad \rightarrow \quad V_i \geq 48 \text{ V}$$

Agerikoa da, beraz, benetako sarrera-tentsioa, 12 V-ekoa, ez dela behar bezain altua Zener diodoa alderantzizko polarizazioan Zener eskualdera eramateko, horretarako behar den balioa minimoa (48 V) baino txikiagoa baita. Dena den, irakurleak pentsa dezake: "ongi, horren bitartez frogatu dugu diodoa ez dagoela Zener eskualdean, baina orain beste bi aukera ditugu: eskualde arruntean alderantziz polarizatuta edo zuzenki polarizatuta, beraz, hasieran bezala gaude, berriro hipotesiak egin behar eta abar... ". Baina hori ez da horrela, honelako zirkuituetan, behin eta berriro aipatu dugun legez, sorgailu bakarra dagoenez gero, berak finkatzen baititu korronte guztien noranzkoak, eta horren arabera guztiz ezinezkoa da zirkuituko Zener diodoa zuzenki polarizatuta egotea, irakurleak erraz froga dezakeen moduan. Ondorioz, aukera bakarra lehen frogatu duguna da: zirkuitu honetan, Zener diodoa alderantziz polarizatuta dago eskualde arruntean.

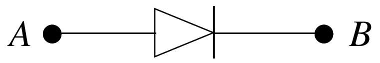
8. Irudiko zirkuituan:



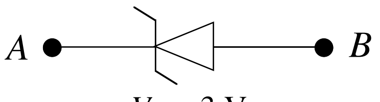
a) Kalkula itzazu *A* eta *B* puntuen arteko Thévenin-en zirkuitu baliokideak *R* erresistentziaren ondoko bi balioetarako eta irudika itzazu lortutako zirkuitu baliokideak:

$R = 2$ kΩ, $R = 500$ Ω

b) *A* eta *B* puntuen artean siliziozko diodo artezle bat konektatzen bada, ondoko irudian adierazten den bezala, kalkula itzazu diodotik igarotzen den korrontea eta bere borneen arteko tentsioa *R*-ren bi balioetarako. Erabil ezazu diodoaren bigarren hurbilketa.



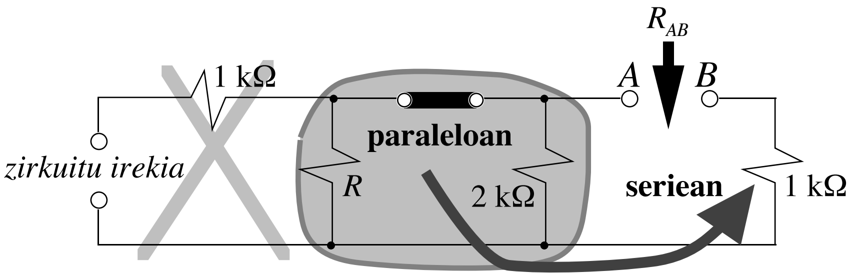
c) Errepika ezazu aurreko atalekoa, A eta B puntuen artean V_Z = 3 V duen Zener diodo bat konektatzen bada (irudian adierazten den bezala).



Ebazpena:

a) Lehenengo pausoa Thévenin-en zirkuitu baliokidea kalkulatzea da. Horretarako, bi pauso eman behar ditugu: Thévenin-en erresistentzia baliokidea kalkulatzea eta Thévenin-en sorgailu baliokidea kalkulatzea.

1) Thévenin-en erresistentzia baliokidea. Sorgailuak deuseztu ondoren:



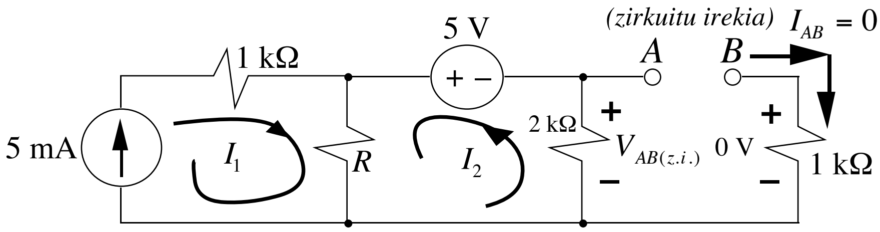
$$R_{Th} = \frac{2R}{2+R} + 1 \ (\mathrm{k\Omega})$$

Eta R erresistentziaren bi balio zehatzetarako:

$R = 2\ \mathrm{k\Omega} \ \rightarrow \ \boxed{R_{Th(2k\Omega)} = 2\ \mathrm{k\Omega}}$; $\quad R = 500\ \Omega \ \rightarrow \ \boxed{R_{Th(0,5k\Omega)} = \frac{7}{5}\ \mathrm{k\Omega}}$

2) Thévenin-en sorgailu baliokidea kalkulatzea da hurrengo pausoa.

Horretarako A eta B puntuen arteko potentzial-diferentzia kalkulatu beharko dugu, zirkuitua irekita dagoenean.



Mailetako ekuazioak:

ezkerreko mailakoa: $I_1 = 5 \text{ mA}$

erdiko mailakoa: $5 = R\left(I_1 + I_2\right) + 2I_2$

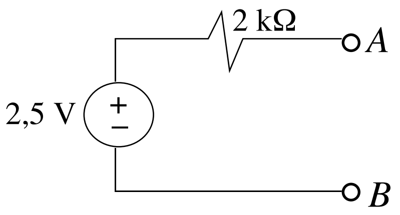
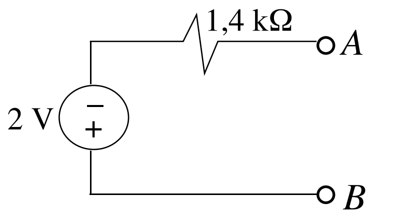
$$\rightarrow \qquad I_2 = \frac{5(1-R)}{R+2} \text{ mA}$$

$$\rightarrow \qquad E_{Th} = V_{AB(z.i.)} = -2I_2 \qquad \rightarrow \qquad E_{Th} = \frac{10(R-1)}{R+2} \text{ V}$$

Eta R erresistentziaren bi balio zehatzetarako:

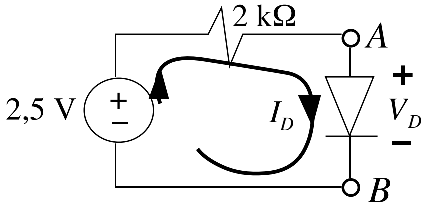
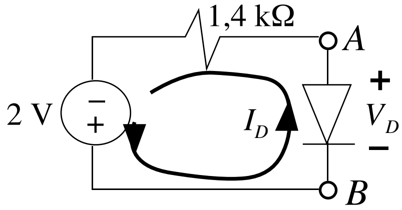
$R = 2 \text{ k}\Omega \rightarrow \boxed{E_{Th(2k\Omega)} = 2{,}5 \text{ V}}$; $\qquad R = 500 \ \Omega \rightarrow \boxed{E_{Th(0{,}5k\Omega)} = -2 \text{ V}}$

Hona hemen lortutako Thévenin-en zirkuitu baliokideak:

$R = 2 \text{ k}\Omega$	$R = 500 \ \Omega$
	

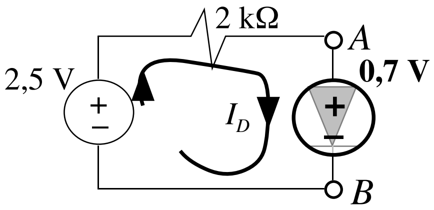
b) Itxuraz zirkuitu bakarra dugun arren, benetan bi zirkuitu desberdin dira, R erresistentziaren bi balioetarako zirkuitu bana lortzen baita. Hori dela eta, diodo artezle bat A eta B puntuen artean konektatzean, bi zirkuitu desberdin analizatu beharko ditugu.

Diodotik igarotzen den korrontea eta bere muturren arteko tentsioa baino ez ditugu kalkulatu behar kasu bakoitzean; hori dela eta, logikoena, jatorrizko bi zirkuituak analizatu beharrean, Thévenin-en zirkuitu baliokideetan A eta B puntuen artean siliziozko diodo bat ordezkatu eta bere funtzionamendua aztertzea izango da. Izan ere, Thévenin-en zirkuituak oso sinpleak direnez, lana izugarri arintzen da. Ondoko lerroetan, bi zirkuituak aldi berean analizatuko ditugu:

$R = 2 \text{ k}\Omega$	$R = 500 \ \Omega$
	

Hipotesia: diodoa Z.P. eran

Analizatu beharreko zirkuitua:



Mailan KTL aplikatuz:

$$2{,}5 = 2I_D + 0{,}7$$

$$I_D = 0{,}9 \text{ mA} > 0$$

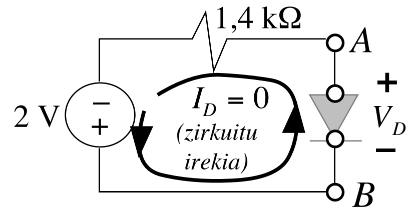
beraz, bete egiten da baldintza.

Soluzioa: $\boxed{I_D = 0{,}9 \text{ mA};\ V_D = 0{,}7 \text{ V}}$

diodo artezlea zuzenki polarizatuta

Hipotesia: diodoa A.P. eran

Analizatu beharreko zirkuitua:



Mailan KTL aplikatuz:

$$2 = -V_D + 1{,}4 I_D$$

$$V_D = -2 \text{ V} < 0{,}7 \text{ V}$$

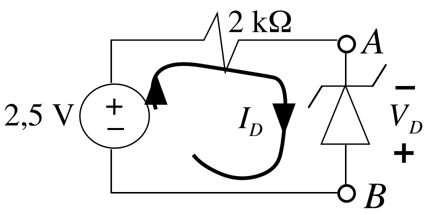
beraz, bete egiten da baldintza.

Soluzioa: $\boxed{I_D = 0 \text{ mA};\ V_D = -2 \text{ V}}$

diodo artezlea alderantziz polarizatuta

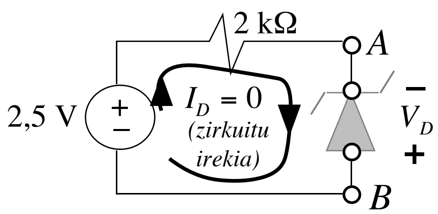
c) Oraingo honetan, bi zirkuituetan Zener diodo bat ordezkatu eta bere funtzionamendua aztertu beharko dugu. Beraz, lehen bezala, Thévenin-en zirkuituak analizatuko ditugu.

$R = 2$ kΩ

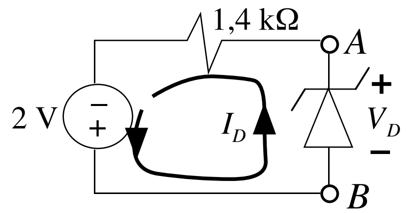


Hipotesia: diodoa A.P. baina ez Zener eskualdean, eskualde arruntean baizik, $V_i = 2{,}5$ V $< V_Z = 3$ V baita.

Analizatu beharreko zirkuitua:

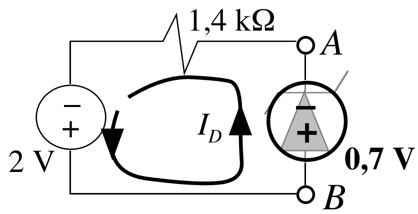


$R = 500$ Ω



Hipotesia: diodoa Z.P.

Analizatu beharreko zirkuitua:



Mailan KTL aplikatuz:

$$2{,}5 = 2I_D - V_D$$

$$\rightarrow \quad V_D = -2{,}5 \text{ V}$$

$$-V_Z = -3 \text{ mV} < -2{,}5 \text{ V} < 0{,}7 \text{ V}$$

beraz, bete egiten da baldintza.

Soluzioa: $\boxed{I_D = 0 \text{ mA};\ V_D = -2{,}5 \text{ V}}$

Zener diodoa alderantziz polarizatuta, eskualde arruntean

Mailan KTL aplikatuz:

$$2 = 0{,}7 + 1{,}4I_D$$

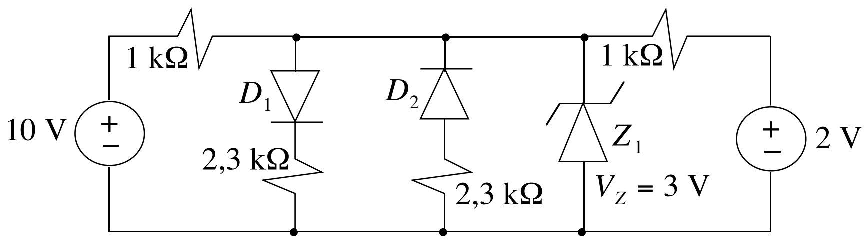
$$\rightarrow \quad I_D = 0{,}93 \text{ mA} > 0$$

beraz, bete egiten da baldintza.

Soluzioa: $\boxed{I_D = 0{,}93 \text{ mA};\ V_D = 0{,}7 \text{ V}}$

Zener diodoa zuzenki polarizatuta

9. Irudiko zirkuiturako:

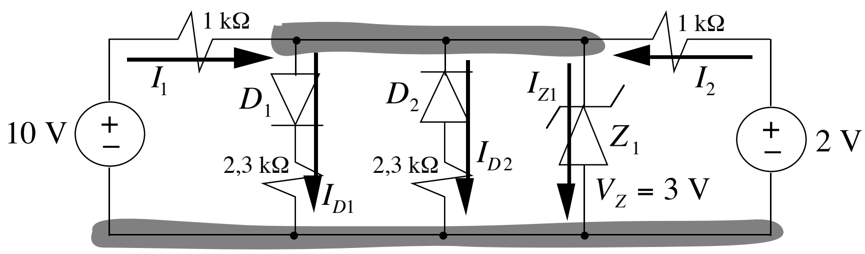


Kalkula itzazu adar guztietako korronteak eta elementu guztien muturren arteko tentsioak.

Ebazpena:

1. Ebazpideko lehenengo pausoa, erabiliko dugun hurbilketa aukeratzea da. Enuntziatuan ezer adierazten ez denez, guri dagokigu lan hori. Ohi bezala, 2. hurbilketara joko dugu, bai diodo artezlearen kasuan eta baita Zener diodoen kasuan ere.

2. Bigarren pausoa, sorgailuen arabera, korronteen noranzkoak finkatzea da. Kasu honetan, agertzen diren sorgailuekin, adar bertikaletako korronteak goitik behera joango direla ziurta dezakegu. Dena den, aurreko ariketetan esan bezala, hori asmatzeak hipotesia egitean laguntzen duen arren, ez da hil ala bizikoa, ondoren egiaztatu behar baita egindako hipotesia; eta okerra izanez gero, beste bat egin, zuzena den bat aurkitu arte.

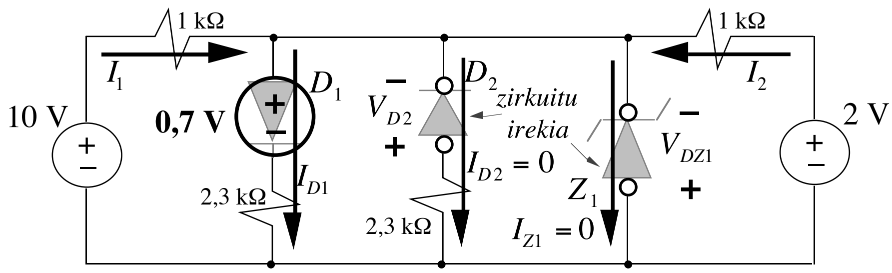


3. Finkatutako korronteen noranzkoetan oinarrituz, diodoen polarizazioari buruzko hipotesi bat egin beharko dugu orain. Agerikoa da hipotesi hori ez dela bakuna, hirukoitza baizik, hiru diodo baitaude zirkuitu honetan. Hona hemen hipotesia:

Hipotesia	D_1: Z.P.	D_2 : A.P.	Z_1: A.P. eskualde arruntean
Ekuazioa	V_{D1} = 0,7 V	I_{D2} = 0 mA	I_{Z1}= 0 mA
Baldintza	$I_{D1} \geq$ 0 mA	$V_{D2} \leq$ 0,7 V	$-V_Z \leq V_{DZ1} \leq$ 0,7 V

Zener diodoari dagokionez, egindako hipotesia azaldu behar delakoan gaude, korrontearen noranzkoaren arabera Zener diodoa alderantziz polarizatuta egongo dela besterik ez baitago esaterik; ez zein eskualdetan dagoen. Baina 2. ariketan lortutako emaitza gogoratzen badugu, pentsa dezakegu Zener diodo hori Zener eskualdean alderantziz polarizatuta egoteko, gutxienez 3 V-eko tentsio-sorgailua behar dugula (hots, V_Z-ren berdina). Kasu honetan bi sorgailu dauden arren, ez dakigu zeinek aginduko duen korronte horren gainean. Horregatik, hurbilena 2 V-ekoa denez gero, Zener diodotik igaroko den korrontea emango duena hori dela pentsatu dugu, eta V_Z baino txikiagoa denez gero, ez du behar adina indar izango Zener diodoa Zener eskualdera eramateko; horregatik, eskualde arruntean egongo dela suposatu dugu, alderantziz polarizatuta.

4. Diodoak dagozkien zirkuitu baliokideekin ordezkatzen baditugu:



5. Zirkuitua ebaztea izango da hurrengo pausoa. Horretarako, Kirchhoff-en legeak erabiliz:

(KKL) ❶ $I_1 + I_2 = I_{D1} + I_{D2} + I_{Z1}$, $\quad I_{D2} = 0,\ I_{Z1} = 0 \ \rightarrow\ I_1 + I_2 = I_{D1}$

(KTL) ❷ $10 = 1I_1 + 0,7 + 2,3I_{D1}$

(KTL) ❸ $0,7 + 2,3I_{D1} = -V_{D2} + 2,3I_{D2}$, $\quad I_{D2} = 0 \rightarrow 0,7 + 2,3I_{D1} = -V_{D2}$

(KTL) ❹ $-V_{D2} + 2,3I_{D2} = -V_{DZ1}$, $\quad I_{D2} = 0 \rightarrow \quad -V_{D2} = -V_{DZ1}$

(KTL) ❺ $V_{DZ1} = -2 + 1I_2$

Soluzioa: I_1 = 4,95 mA; I_2 = –3,05 mA; I_{D1} = 1,9 mA; $V_{D2} = V_{Z1}$ = – 5,05 V

6. Egiazta dezagun orain hiru baldintzak betetzen ote diren.

$I_{D1} = 1{,}9$ mA $> 0 \rightarrow$ bete egiten da baldintza $\rightarrow D_1$ Z.P. dago

$V_{D2} = -5{,}05$ V $< 0{,}7$ V $\rightarrow$ bete egiten da baldintza $\rightarrow D_2$ A.P. dago

-3 V $< V_{Z1} = -5{,}05$ V $< 0{,}7$ V $\rightarrow$ ez da baldintza betetzen $\rightarrow$

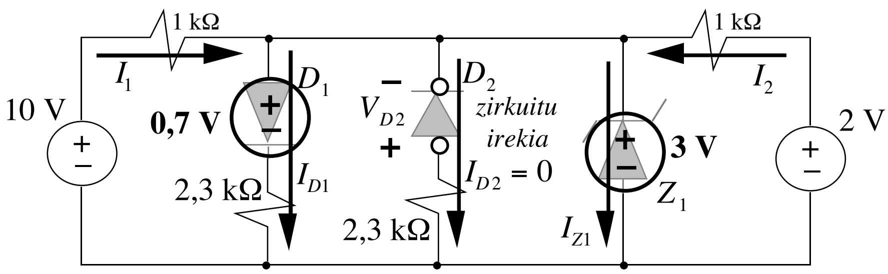
Z_1 ez dago A.P. eskualde arruntean

Hirugarren baldintza ez da betetzen. Hau da, Zener diodoari buruz esandakoa ez da betetzen. Ondorioz, egindako hipotesia okerra da, eta berriro ere hirugarren pausora itzuli beharko dugu, hipotesi berri bat egiteko. Betetzen ez dena Zener diodoaren baldintza denez gero, printzipioz honi buruzko hipotesia soilik aldatuko dugu.

3'. Korronteen noranzkoak aldatu gabe, diodoen polarizazioari buruzko beste hipotesi bat egin beharko dugu orain.

Hipotesia	D_1: Z.P.	D_2: A.P.	Z_1: A.P. Zener eskualdean
Ekuazioa	$V_{D1} = 0{,}7$ V	$I_{D2} = 0$ mA	$V_{DZ1} = -V_{Z1}$
Baldintza	$I_{D1} \geq 0$ mA	$V_{D2} \leq 0{,}7$ V	$I_{Z1} \geq 0$ mA

4'. Diodoak dagozkien zirkuitu baliokideekin ordezkatzen baditugu.



5'. Zirkuitua ebaztea izango da hurrengo pausoa. Horretarako, Kirchhoff-en legeak erabiliz:

(KKL) ❶ $I_1 + I_2 = I_{D1} + I_{D2} + I_{Z1}$, $\quad I_{D2} = 0 \rightarrow I_1 + I_2 = I_{D1} + I_{Z1}$

(KTL) ❷ $10 = 1I_1 + 0{,}7 + 2{,}3I_{D1}$

(KTL) ❸ $0{,}7 + 2{,}3I_{D1} = -V_{D2} + 2{,}3I_{D2}$, $\quad I_{D2} = 0 \rightarrow 0{,}7 + 2{,}3I_{D1} = -V_{D2}$

(KTL) ❹ $-V_{D2} + 2{,}3I_{D2} = 3$, $\quad I_{D2} = 0 \rightarrow \quad -V_{D2} = 3$ V

(KTL) ❺ $3 = -1I_2 + 2$

Soluzioa: $I_1 = 7$ mA; $I_2 = -1$ mA; $I_{D1} = 1$ mA; $I_{Z1} = 5$ mA; $V_{D2} = -3$ V

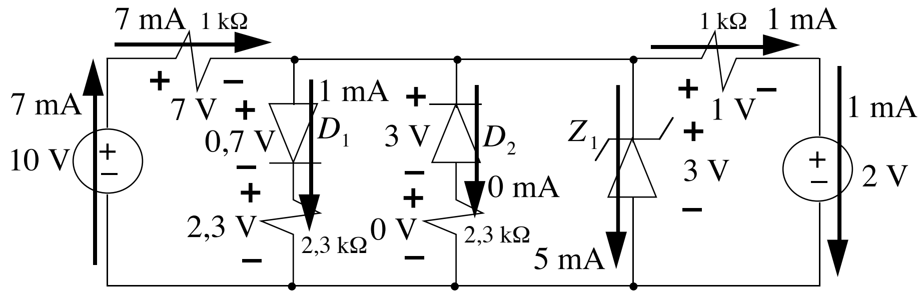
6'. Egiazta dezagun orain hiru baldintzak betetzen ote diren.

I_{D1} = 1 mA > 0 → bete egiten da baldintza → D_1 Z.P. dago

V_{D2} = –3 V < 0,7 V → bete egiten da baldintza → D_2 A.P. dago

I_{Z1} = 5 mA > 0 → bete egiten da baldintza → Z_1 A.P. dago, Zener eskualdean

Hiru baldintzak betetzen direnez gero, egindako hipotesiak zuzenak dira eta ondorioz, kalkulatua dugu zirkuituaren soluzioa.

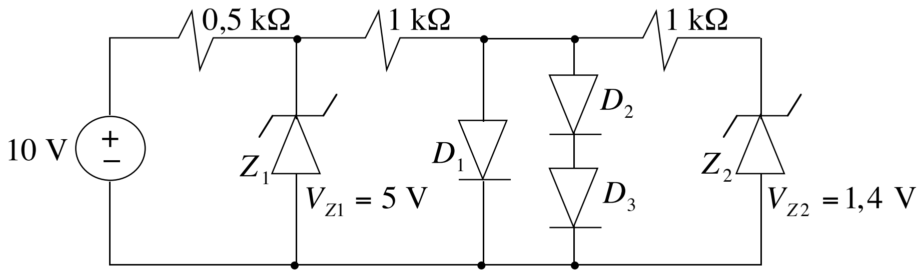


10. Irudiko zirkuiturako, diodo guztiak siliziozkoak direla suposatuz eta bigarren hurbilketa erabiliz:

a) bila ezazu nola dauden polarizatuta zirkuituko diodo guztiak;

b) kalkula itzazu zirkuituko elementu guztien tentsioak eta korronteak;

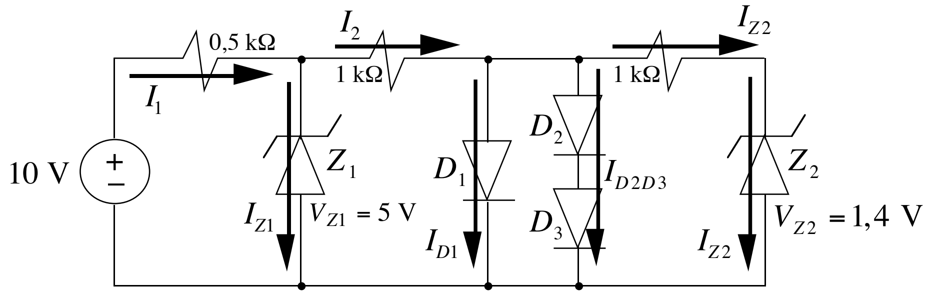
c) egin ezazu potentzien balantzea.



Ebazpena:

1. Ebazpideko lehenengo pausoa, erabiliko dugun hurbilketa aukeratzea da. Enuntziatuan adierazten denez, 2. hurbilketa erabiliko dugu.

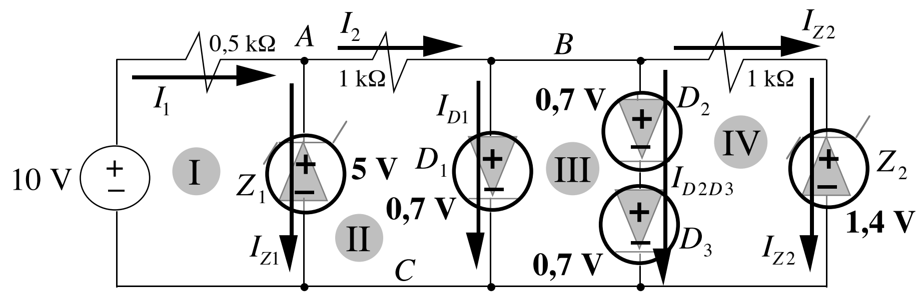
2. Bigarren pausoa, sorgailuen arabera, korronteen noranzkoak finkatzea da. Kasu honetan, tentsio-sorgailu bakarra dagoenez gero, berak hornituko ditu zirkuituko korronte guztiak. Hori dela eta, korronte guztiak ezkerretik eskuinera edo goitik behera joango dira:



3. Finkatutako korronteen noranzkoetan oinarrituz, diodoen polarizazioari buruzko hipotesi bat egin beharko dugu orain. Agerikoa da, aurreko ariketan bezalaxe, hipotesi hori ez dela bakuna, anizkoitza baizik, kasu honetan bost diodo baitaude zirkuituan. Hona hemen hipotesia, beraz:

Hipotesia	D_1, D_2, D_3 : Z.P.	Z_1, Z_2 : A.P. Zener eskualdean
Ekuazioak	$V_{D1} = V_{D2} = V_{D3} = 0{,}7$ V	$V_{DZ1} = -5$ V, $V_{DZ2} = -1{,}4$ V,
Baldintzak	$I_{D1}, I_{D2}, I_{D3} \geq 0$ mA	$I_{Z1}, I_{Z2} \geq 0$ mA

4. Diodoak dagozkien zirkuitu baliokideekin ordezkatzen baditugu:



5. Zirkuitua ebaztea izango da hurrengo pausoa. Horretarako, Kirchhoff-en legeak erabiliz:

❶ $I_1 = I_{Z1} + I_2$ (KKL *A* korapiloan)

❷ $I_2 = I_{D1} + I_{D2D3} + I_{Z2}$ (KKL *B* korapiloan)

❸ $10 = 0{,}5 I_1 + 5$ (KTL I mailan)

❹ $5 = 1 I_2 + 0{,}7$ (KTL II mailan)

❺ $\mathbf{0{,}7 = 0{,}7 + 0{,}7}$ **(KTL III mailan)**

❻ $0{,}7 + 0{,}7 = 1 I_{Z2} + 1{,}4$ (KTL IV mailan)

Zirkuituaren irudia egitean ohartu ez bagara, ekuazioak idaztean agerikoa da arazo bat dagoela egindako hipotesiarekin, D_1, D_2 eta D_3 diodoek osatutako mailan (III), hiruak zuzenki polarizatuta baldin badaude, ez baita betetzen Kirchhoff-en tentsioen legea, eta badakigu hori beti betetzen dela; ondorioz, hipotesi hori ezinezkoa da, eta ez da beharrezkoa hurrengo atalera joatea, hipotesi berri bat egitea baizik. Eta hemen arazo larri bat dago; hiru diodo direnez gero, bakoitzarekin bi aukera izanik, $2^3 = 8$ hipotesi posible daude:

hipotesia	1	2	3	4	5	6	7	8
D_1	Z.P.	Z.P.	Z.P.	Z.P.	A.P.	A.P.	A.P.	A.P.
D_2	Z.P.	Z.P.	A.P.	A.P.	Z.P.	Z.P.	A.P.	A.P.
D_3	Z.P.	A.P.	Z.P.	A.P.	Z.P.	A.P.	Z.P.	A.P.

Zer hipotesi egin lehenengoaren (1) ondoren? Beti bezala, eskarmentu pixka bat izanez gero, agerikoa da zortzi horietatik batzuk ezinezkoak direla, arrazoi batengatik edo besterengatik. Esate baterako, bosgarren zutabeko hipotesia (5), D_1: A.P., D_2: Z.P. eta D_3: Z.P., ezinezkoa da: baldintza D_1 A.P. egoteko: $V_{D1} \leq 0{,}7$ V, D_2 eta D_3: Z.P., ekuazioak: $V_{D2} = V_{D3} = 0{,}7$ V. Hiru diodoek osatutako mailan (III) KTL aplikatuz, $V_{D1} = V_{D2} + V_{D3} = 0{,}7 \text{ V} + 0{,}7 \text{ V} = 1{,}4 \text{ V} > 0{,}7$ V! Hots, D_1 diodoaren baldintza ez da betetzen. Beste horrenbeste gertatzen da beste zutabe batzuekin. Irakurleak egin ditzake hipotesi guztiak, eskarmentua lortzeko asmoz.

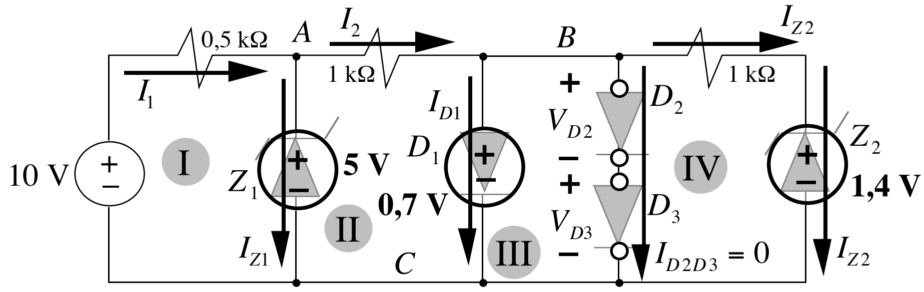
Gu logikoena egiten saiatuko gara, logikoena zergatik den arrazoituz. Hipotesi berria logikoena izan dadin, pentsa dezagun pixka bat zergatik aukeratu dugun lehenengo hipotesia (1), D_1: Z.P., D_2: Z.P. eta D_3: Z.P.. Izatez, zirkuituko sorgailu bakarrak sortutako korronteen noranzkoetan oinarritu gara hipotesi hori egiteko.

Baina lehenengo hipotesi hori ezinezkoa dela ikusi dugu, D_1 diodoa paraleloan dagoelako D_2 eta D_3 diodoen serie-elkarketarekin, eta horrela ez da KTL betetzen. Hori dela eta, badirudi hiru diodo horietatik baten bat A.P. egongo dela pentsatzea dela logikoena. Baina hor dago gakoa, ikusi dugun legez zazpi aukera baitaude. Ikusi dugu baita ere D_1 A.P. eta beste biak Z.P. egotea ezinezkoa dela. Orduan, zer da logikoena? Hiruak A.P.? Izan zitekeen, baina ez da kasua: sarrerako tentsioa 0,7 V baino handiagoa denez gero, diodo bat zuzenki polarizatzeko adinakoa bada. Beraz, hor dago erantzuna: diodo bat Z.P. eta beste biak ez. Zein? Bada, seriean daudenak A.P. egongo dira, guztira 1,4 V behar dutelako seriean egoteagatik, eta bestea, D_1 hain zuzen, Z.P., 0,7 V baino ez duelako behar. Ondorioz, gure bigarren hipotesia honako hau izango da (4 zutabekoa):

3'. Bigarren hipotesia:

Hipotesia	D_1 : Z.P.	D_2 , D_3 : A.P.	Z_1, Z_2 : A.P. Zener eskualdean
Ekuazioak	$V_{D1} = 0{,}7$ V	$I_{D2} = I_{D3} = 0$ mA	$V_{DZ1} = -5$ V, $V_{DZ2} = -1{,}4$ V,
Baldintzak	$I_{D1} \geq 0$ mA	$V_{D2}, V_{D3} \leq 0{,}7$ V	$I_{Z1}, I_{Z2} \geq 0$ mA

4'. Diodoak dagozkien zirkuitu baliokideekin ordezkatzen baditugu:



5. Ebazpena:

(KKL *A* korapiloan) ❶ $I_1 = I_{Z1} + I_2$

(KKL *B* korapiloan) ❷ $I_2 = I_{D1} + I_{D2D3} + I_{Z2}, \quad I_{D2D3} = 0 \;\rightarrow\; I_2 = I_{D1} + I_{Z2}$

(KTL I mailan) ❸ $10 = 0{,}5 I_1 + 5$

(KTL II mailan) ❹ $5 = 1 I_2 + 0{,}7$

(KTL III mailan) ❺ $0{,}7 = V_{D2} + V_{D3}$

(KTL IV mailan) ❻ $V_{D2} + V_{D3} = 1 I_{Z2} + 1{,}4$

Ekuazio-sistema aztertuz gero, agerikoa da zazpi ezezagun daudela (I_1, I_2, I_{Z1}, I_{D1}, I_{Z2}, V_{D2} eta V_{D3}) eta sei ekuazio besterik ez. Ondorioz, sistema ebaztea ezinezkoa dela pentsa dezakegu, beste ekuazio bat behar dugulako. Ikus dezagun nola konpontzen den arazo hori.

Azkeneko bi ekuazioak, ❺ eta ❻, elkartuz gero, ekuazio bakarra lortzen da:

$$0{,}7 = 1 I_{Z2} + 1{,}4$$

non bi ezezagun (V_{D2} eta V_{D3}) desagertu diren. Modu honetan bost ekuazio besterik ez dugu izango, baina bost ezezagunekin. Beraz, sistema ebazgarria izango da.

Soluzioa: $I_1 = 10$ mA, $I_2 = 4{,}3$ mA, $I_{Z1} = 5{,}7$ mA, $I_{D1} = 5$ mA, $I_{Z2} = 0{,}7$ mA,
$V_{D2} + V_{D3} = 0{,}7$ V (ez dago bakoitza bere aldetik kalkulatzerik)

6. Egiazta dezagun orain bost baldintzak betetzen ote diren.

$I_{Z1} = 5{,}7\text{ mA} > 0 \rightarrow$ bete egiten da baldintza $\rightarrow$ Z_1 A.P. dago, Zener eskualdean

$I_{D1} = 5\text{ mA} > 0 \rightarrow$ bete egiten da baldintza $\rightarrow$ D_1 Z.P. dago

$V_{D2} + V_{D3} = 0{,}7\text{ V} \rightarrow V_{D2} \le 0{,}7$ V eta $V_{D3} \le 0{,}7$ V ? $\rightarrow$

betetzen ote da baldintza? $\rightarrow$

D_2 eta D_3 diodoen egoerari buruz zerbait ondoriozta ote daiteke, bien tentsioen baturak 0,7 V-ekoa izan behar duela jakinik? Are gehiago, ondoriozta ote daiteke biak A.P. daudela? Erantzuna baiezkoa da, kasu jakin batzuk besterik ez baitira posible. Ikus ditzagun kasu horiek.

Hasteko, demagun frogatu behar ditugun baldintzetariko bat betetzen dela, esate baterako $V_{D2} \leq 0{,}7$ V, tentsio hori negatiboa delako, adibidez $V_{D2} = -0{,}7$ V; ondorioz, KTL beti betetzen denez gero, ❺ ekuaziotik $V_{D3} = 1{,}4$ V ateratzen da: hots, D_3 diodoa Z.P. egongo litzateke, tentsio positibo bat jasaten ari delako. Baina gure ereduaren arabera, 2. hurbilketan, diodo bat Z.P. dagoenean 0,7 V-eko tentsio konstantea mantentzen da bere muturren artean, inoiz ez handiagoa. Ondorioz, kasu hori guztiz ezinezkoa da: hots, ez da inoiz gertatuko tentsio horietako bat negatiboa izatea, bestea 0,7 V baino handiagoa izango bailitzateke, eta hori gure ereduaren kontra baitoa.

Zein dira, bada, kasu posibleak? Honako hauek: $V_{D2} = 0{,}7$ V eta $V_{D3} = 0$ V; edo $V_{D2} = 0$ V eta $V_{D3} = 0{,}7$ V; edo $0 < V_{D2} < 0{,}7$ V eta $0 < V_{D3} < 0{,}7$ V. Hots, D_2 Z.P. eta D_3 A.P.; edo D_2 A.P. eta D_3 Z.P.; edo D_2 A.P. eta D_3 A.P. Baina hiru kasuak berdinak dira zirkuituko soluzioari dagokionez, hiruretan gertatzen baita D_2 eta D_3 diodoek osatutako adarretik ez dela korronterik pasatzen, hots, $I_{D2D3} = 0$ mA dela, eta bien tentsioen batura 0,7 V-ekoa dela. Orduan, bi diodoetariko bat Z.P. dagoela suposatzen badugu, bestea A.P. egonik, benetan bi egoeren arteko mugan egongo da, bere muturren arteko tentsioa 0,7 V-ekoa izan arren, bere barnetik igaroko den korrontea nulua izango baita.

Beste alde batetik, bi diodoak berdinak baldin badira, pentsatzekoa da tentsio osoa bien artean banatuko dutela, hots, bakoitzak 0,35 V-eko tentsio ingurukoa hartuko duela; ondorioz, hipotesirik zentzuzkoena egin duguna izango da, hots:

$\rightarrow V_{D2} < 0{,}7$ V eta $V_{D3} < 0{,}7$ V $\rightarrow$ bete egiten da baldintza $\rightarrow$
D_2 eta D_3 A.P. daude

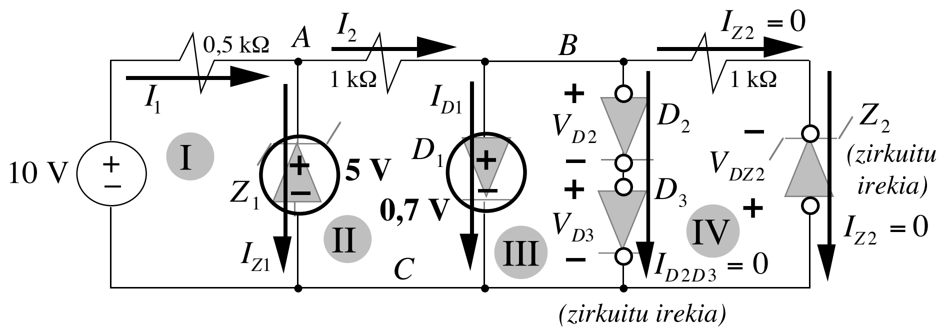
$I_{Z2} = -0{,}7$ mA $< 0 \rightarrow$ ez da baldintza betetzen $\rightarrow$
Z_2 ez dago A.P. Zener eskualdean

Beraz, beste hipotesi bat egin beharko dugu. Zein da orain logikoena? Bada, betetzen ez dena aldatzea, hots, Z_2 Zener diodoari buruzkoa. Eta zer suposatuko dugu orain? Zuzenki polarizatuta dagoela? Ez, horixe, zeren korronteen noranzkoak direla eta, A. P. egongo baita; beraz, Zener eskualdean ez dagoela ikusi berri dugunez, orduan A.P. eskualde arruntean dagoela suposatuko dugu.

3''. Hirugarren hipotesia:

Hipotesia	D_1 : Z.P.	D_2 , D_3 : A.P.	Z_1: A.P. Zener eskualdean	Z_2: A.P. eskualde arruntean
Ekuazioak	$V_{D1} = 0{,}7$ V	$I_{D2} = I_{D3} = 0$ mA	$V_{DZ1} = -5$ V	$I_{Z2} = 0$ mA
Baldintzak	$I_{D1} \geq 0$ mA	$V_{D2}, V_{D3} \leq 0{,}7$ V	$I_{Z1} \geq 0$ mA	$-1{,}4\ \text{V} \leq V_{DZ2} \leq 0{,}7$ V

4''. Diodoak dagozkien eredu baliokideez ordezkatzen baditugu.



5''. Ebazpena:

(KKL *A* korapiloan) ❶ $I_1 = I_{Z1} + I_2$

(KKL *B* korapiloan) ❷ $I_2 = I_{D1} + I_{D2D3} + I_{Z2}$, $I_{D2D3} = 0$, $I_{Z2} = 0 \rightarrow I_2 = I_{D1}$

(KTL I mailan) ❸ $10 = 0,5I_1 + 5$

(KTL II mailan) ❹ $5 = 1I_2 + 0,7$

(KTL III mailan) ❺ $0,7 = V_{D2} + V_{D3}$

(KTL IV mailan) ❻ $V_{D2} + V_{D3} = 1I_{Z2} - V_{DZ2}$, $I_{Z2} = 0 \rightarrow V_{D2} + V_{D3} = -V_{DZ2}$

Soluzioa: I_1 = 10 mA, I_2 = 4,3 mA, I_{Z1} = 5,7 mA, I_{D1} = 4,3 mA, V_{DZ2} = – 0,7 V,
$V_{D2} + V_{D3}$ = 0,7 V (ez dago bakoitza bere aldetik kalkulatzerik)

6''. Egiazta dezagun orain bost baldintzak betetzen ote diren.

I_{Z1} = 5,7 mA > 0 → bete egiten da baldintza → Z_1 A.P. dago, Zener eskualdean

I_{D1} = 4,3 mA > 0 → bete egiten da baldintza → D_1 Z.P. dago

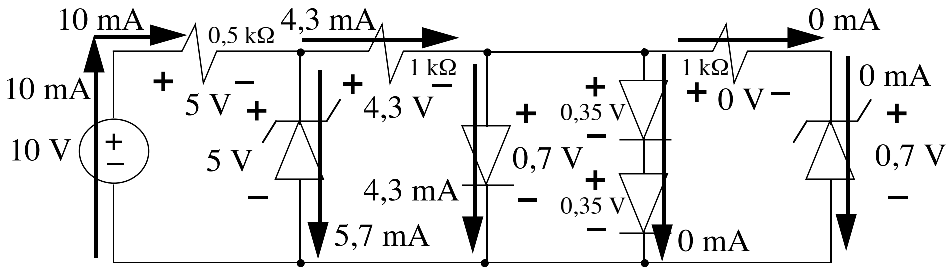
$V_{D2} + V_{D3}$ = 0,7 V → V_{D2} < 0,7 V eta V_{D3} < 0,7 V → bete egiten da baldintza →
D_2 eta D_3 A.P. daude

–1,4 V< V_{DZ2} = -–0,7 V < 0,7 V → bete egiten da baldintza →
Z_2 A.P. dago, eskualde arruntean

Bost baldintzak betetzen direnez gero, egindako hipotesiak zuzenak dira, eta, ondorioz, kalkulatua dugu zirkuituaren soluzioa:

a) Diodoen polarizazio-egoerak: D_1 : Z.P., D_2 eta D_3 : A.P., Z_1: A.P. Zener eskualdean eta Z_2: A.P. eskualde arruntean.

b) Elementu guztien tentsioak eta korronteak:



c) Potentzien balantzea:

Emandako potentzia: tentsio-sorgailuak, $P_{10\text{V}} = 10\ \text{V} \cdot 10\ \text{mA} = 100\ \text{mW}$

Xurgatutako potentziak:

0,5 kΩ-eko erresistentziak, $P_{0,5\text{k}\Omega} = 5\ \text{V} \cdot 10\ \text{mA} = 50\ \text{mW}$

Z_1 Zener diodoak, $P_{\text{Z}1} = 5\ \text{V} \cdot 5,7\ \text{mA} = 28,5\ \text{mW}$

1 kΩ-eko erdiko erresistentziak, $P_{1\text{k}\Omega\leftarrow} = 4,3\ \text{V} \cdot 4,3\ \text{mA} = 18,49\ \text{mW}$

D_1 diodoak, $P_{\text{D}1} = 0,7\ \text{V} \cdot 4,3\ \text{mA} = 3,01\ \text{mW}$

D_2 diodoak, $P_{\text{D}2} = 0,35\ \text{V} \cdot 0\ \text{mA} = 0\ \text{mW}$

D_3 diodoak, $P_{\text{D}3} = 0,35\ \text{V} \cdot 0\ \text{mA} = 0\ \text{mW}$

1 kΩ-eko eskuineko erresistentziak, $P_{1\text{k}\Omega\rightarrow} = 0\ \text{V} \cdot 0\ \text{mA} = 0\ \text{mW}$

Z_2 diodoak, $P_{\text{Z}2} = 0,7\ \text{V} \cdot 0\ \text{mA} = 0\ \text{mW}$

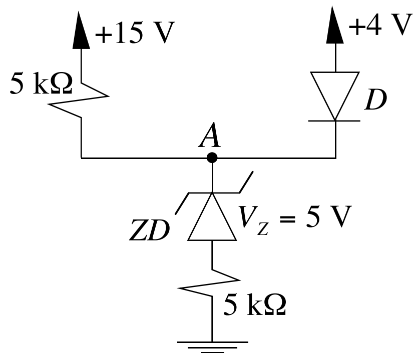
Xurgatutako potentzia osoa:

$$\Sigma P_{xurgatutakoa} = (50 + 28,5 + 18,49 + 3,01 + 0)\ \text{mW} = 100\ \text{mW}$$

Emandako potentzia osoa: $\Sigma P_{emandakoa} = 100\ \text{mW}$

Beraz, 10 V-eko tentsio-sorgailuak emandako potentzia osoa zirkuituko beste elementu guztiek xurgatzen dute.

11. Irudiko zirkuiturako:



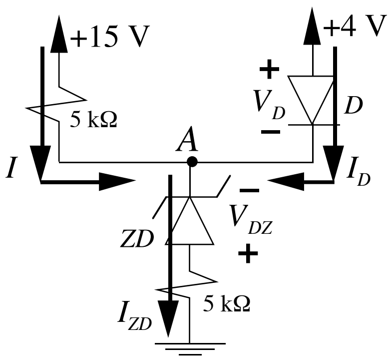
a) Kalkula ezazu zenbatekoa izan behar den *A* puntuko tentsio minimoa *ZD* Zener diodoa Zener eskualdean alderantziz polarizatuta egon dadin.

b) Kasu horretan, nola egongo da polarizatuta *D* diodoa?

c) Aurreko bi galderen erantzunetan oinarriturik, egin ezazu bi diodoen polarizazioari buruzko balizko hipotesi bat eta, kalkula itzazu osagai guztietako korronteak eta tentsioak, hipotesi horren arabera.

Ebazpena:

Lehenengo bi galderei erantzun baino lehen, marraz ditzagun tentsioak eta korronteak irudian eta idatz ditzagun zirkuituari dagozkion ekuazioak. Badakigu zirkuitu honetan bi tentsio-sorgailu daudela: bata 15 V-ekoa eta bestea 4 V-ekoa. Ondorioz, korronteen noranzkoei dagokienez, biek aktibo gisa jokatuko dutela pentsa dezakegu, korrontea emanez; horrexegatik, goiko bi adarretako korronteak goitik behera ipiniko ditugu, eta, ondorioz, baita beheko adarrekoa ere.



Ekuazioak:

KKL *A* korapiloan: ❶ $I + I_D = I_{ZD}$

KTL ezkerreko mailan:

❷ $15 = 5I - V_{DZ} + 5I_{ZD}$

KTL eskuineko mailan:

❸ $4 = V_D - V_{DZ} + 5I_{ZD}$

a) Azter dezagun, lehenengo, zein den V_A tentsioari dagokion adierazpena:

$$V_A = -V_{DZ} + 5I_{ZD}$$

Zener diodoa Zener eskualdean alderantziz polarizatuta egon dadin bete beharreko ekuazioa eta baldintza honako hauek dira:

Ekuazioa: $V_{DZ} = -V_Z = -5$ V   Baldintza: $I_{ZD} \geq 0$

Hori jakinik, aurreko ekuazioan I_{ZD} askatuz eta baldintza betearaziz, V_A tentsioaren balio minimoa kalkulatuko dugu:

$$I_{ZD} = \frac{V_A + V_{DZ}}{5} \geq 0 \;\Rightarrow\; V_A \geq -V_{DZ} = 5\text{ V} \;\Rightarrow\; \boxed{V_{Aminimoa} = 5\text{ V}}$$

b) Orain aurreko baldintza betetzen dela suposatu behar dugu, hots, Zener diodoa Zener eskualdean alderantziz polarizatuta dagoela, eta kasu horretan *D* diodoa zein egoeratan egongo den aztertu behar dugu .

Demagun *D* diodoa Z.P. dagoela: Ekuazioa: $V_D = 0{,}7$ V, Baldintza: $I_D \geq 0$

Ordezka dezagun ekuazioa lehen lortutako ekuazioetan:

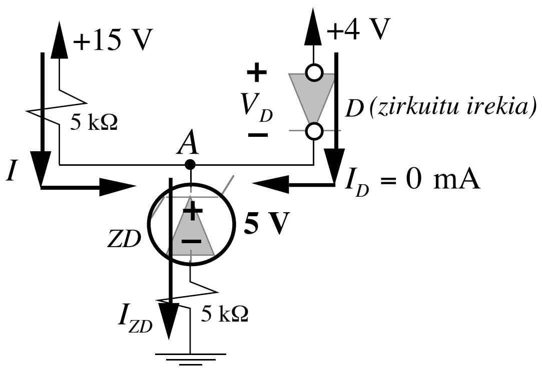
❸ $4 = 0{,}7 + 5 + 5I_{ZD}$ $\rightarrow$ $I_{ZD} = -0{,}34$ mA ≤ 0

Hau da, Zener diodoaren $I_{ZD} \geq 0$ baldintza ez da betetzen eta, ondorioz, hipotesia okerra izan da. Beraz, *D* diodoak A.P. egon behar du.

c) Aurreko emaitzetan oinarrituz, honako hipotesi hau egingo dugu:

Hipotesia	*D*: A.P.	*ZD*: A.P. eskualde arruntean
Ekuazioa	$I_D = 0$ mA	$V_{DZ} = -5$ V
Baldintza	$V_D \leq 0{,}7$ V	$I_{ZD} \geq 0$ mA

Ordezka ditzagun diodoak dagozkien elementuez:



Ekuazioak honelaxe geratuko lirateke:

❶ $I + 0 = I_{ZD}$ $\rightarrow$ $I = I_{ZD}$

❷ $15 = 5I + 5 + 5I_{ZD}$ $\rightarrow$ $I = I_{ZD} = 1$ mA

❸ $4 = V_D + 5 + 5I_{ZD}$ $\rightarrow$ $-1 = V_D + 5I$ $\rightarrow$ $V_D = -6$ V

Egiazta ditzagun hipotesiak.

$I_{ZD} = 1\text{mA} > 0 \rightarrow$ Zener diodoaren baldintza bete egiten da.

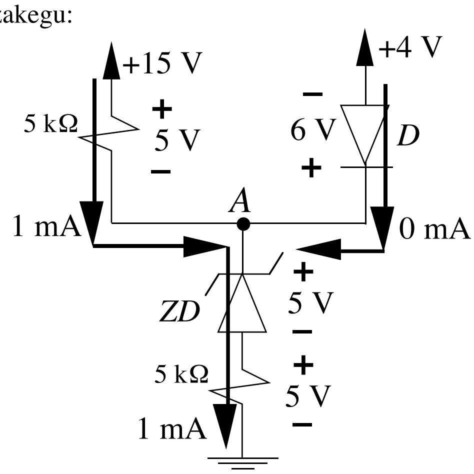
$V_D = --6\text{V} < 0{,}7$ V $\rightarrow$ *D* diodoaren baldintza ere betetzen da.

Beraz, hipotesia zuzena da.

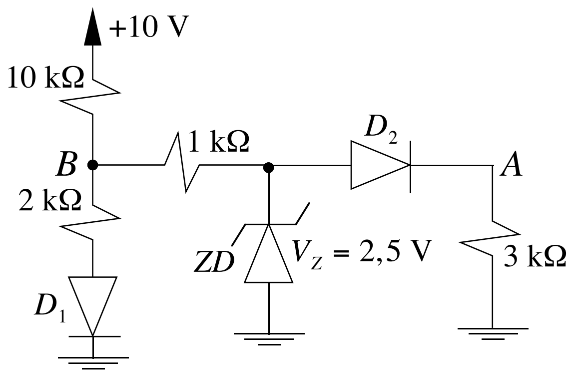
V_A tentsioaren balio zehatzari dagokionez:

$V_A = 5 + 5I_{ZD}$ $\rightarrow$ $V_A = 5 + 5$ $\rightarrow$ $V_A = 10$ V izango da kasu honetan.

Egindako kalkuluak erabiliz, zirkuituko elementu guztietako tentsioak eta korronteak kalkula ditzakegu:



12. Analiza ezazu irudiko zirkuitua, hots, kalkula itzazu elementu guztietako korronteak eta tentsioak, diodoak siliziozkoak direla kontuan izanik. Zenbat balio dute *A* eta *B* puntuetako tentsioek?

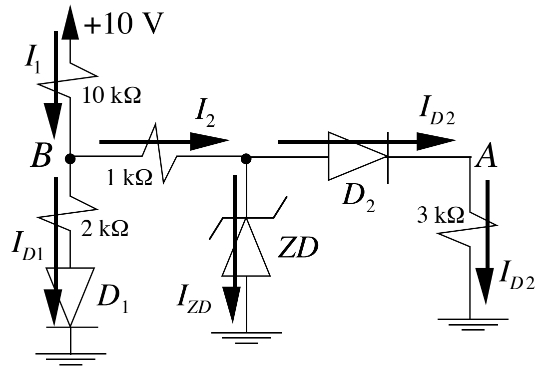


Ebazpena:

1. Enuntziatuan, erabili beharreko hurbilketari buruzko aipamen espliziturik egiten ez den arren, inplizituki dator adierazita, diodoak siliziozkoak direla esaten baita, hots, errealak, eta ez idealak. Ondorioz, ez dago lehenengo hurbilketa erabiltzerik.

Baina, beste bien artean, zein aukeratu? Hirugarren hurbilketa erabili nahi izango bagenu, diodoen barne-erresistentzia ezagutu beharko genuke, eta hori ez da kasua. Beraz, diodoen 2. hurbilketa erabiliko dugu.

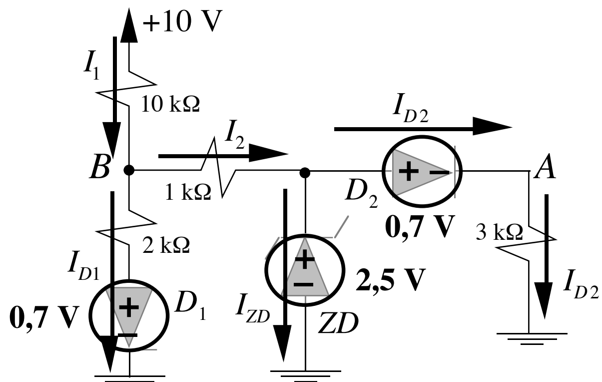
2. Sorgailuen arabera korronteen noranzkoak finkatu behar dira. Zirkuitu honetan sorgailu bakarra dago, 10 V-ekoa; ondorioz, berak finkatuko ditu korronte guztiak: goitik behera joango dira denak, hots, tentsio altuetatik tentsio baxuetara.



3. **Hipotesia**: korronteen noranzkoen arabera, honako hipotesi hau egingo dugu:

Hipotesia	D_1: Z.P.	D_2: Z.P.	ZD: A.P. Zener eskualdean
Ekuazioak	$V_{D1} = 0{,}7$ V	$V_{D2} = 0{,}7$ V	$V_{DZ} = -2{,}5$ V
Baldintzak	$I_{D1} \geq 0$ mA	$I_{D2} \geq 0$ mA	$I_{ZD} \geq 0$ mA

4. Ordezka ditzagun diodoak, dagozkien baliokideez.



5. Zirkuitua ebaztea izango da hurrengo pausoa. Horretarako, Kirchhoff-en legeak erabiliz:

(KKL) ❶ $I_1 = I_{D1} + I_2$

(KKL) ❷ $I_2 = I_{D2} + I_{ZD}$

(KTL) ❸ $10 = 10I_1 + 2I_{D1} + 0{,}7$

(KTL) ❹ $10 = 10I_1 + 1I_2 + 2{,}5$

(KTL) ❺ $2{,}5 = 0{,}7 + 3I_{D2}$

Soluzioa: I_1 = 0,76 mA, I_2 = –0,09 mA, I_{D1} = 0,85 mA, I_{D2} = 0,6 mA, I_{ZD} = –0,69 mA

6. Egiazta dezagun orain hiru baldintzak betetzen ote diren.

I_{D1} = 0,85 mA > 0 → bete egiten da baldintza → D_1 Z.P. dago

I_{D2} = 0,6 mA > 0 → bete egiten da baldintza → D_2 Z.P. dago

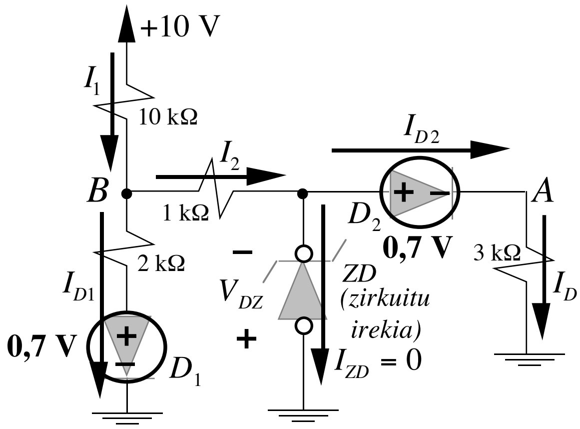
I_{ZD} = –0,69 mA < 0 → ez da baldintza betetzen →

ZD ez dago A.P. Zener eskualdean.

3'. **Bigarren hipotesia**: Badirudi logikoena dela betetzen diren hipotesiak mantentzea eta betetzen ez dena bakarrik aldatzea; beraz:

Hipotesia	D_1 : Z.P.	D_2: Z.P.	*ZD* : A.P. eskualde arruntean
Ekuazioak	V_{D1} = 0,7 V	V_{D2} = 0,7 V	I_{ZD} = 0 mA
Baldintzak	$I_{D1} \geq$ 0 mA	$I_{D2} \geq$ 0 mA	–2,5 V ≤ V_{DZ} ≤ 0,7 V

4'. Ordezka ditzagun diodoak, dagozkien baliokideez.



5'. Zirkuituaren ebazpena:

(KKL) ❶ $I_1 = I_{D1} + I_2$

(KKL) ❷ $I_2 = I_{D2} + I_{ZD}$, $I_{ZD} = 0$ → $I_2 = I_{D2}$

(KTL) ❸ $10 = 10I_1 + 2I_{D1} + 0,7$

(KTL) ❹ $10 = 10I_1 + 1I_2 + 0,7 + 3I_{D2}$

(KTL) ❺ $-V_{DZ} = 0,7 + 3I_{D2}$

Soluzioa: $I_1 = 0{,}821$ mA, $I_2 = 0{,}274$ mA, $I_{D1} = 0{,}547$ mA, $I_{D2} =$ 0,274 mA, $V_{DZ} = -1{,}52$ V

6. Egiazta dezagun orain hiru baldintzak betetzen ote diren.

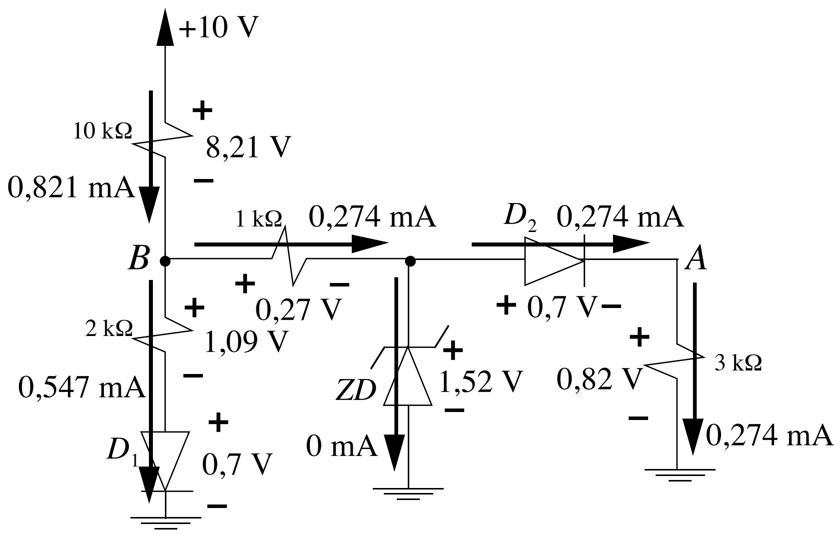
$I_{D1} = 0{,}547$ mA > 0 $\rightarrow$ bete egiten da baldintza $\rightarrow$ D_1 Z.P. dago

$I_{D2} = 0{,}274$ mA > 0 $\rightarrow$ bete egiten da baldintza $\rightarrow$ D_2 Z.P. dago

$-2{,}5$ V $< V_{DZ} = -1{,}52$ V $< 0{,}7$ V $\rightarrow$ bete egiten da baldintza $\rightarrow$

ZD A.P. eskualde arruntean dago.

Hona hemen, beraz, zirkuitu honen soluzioa:

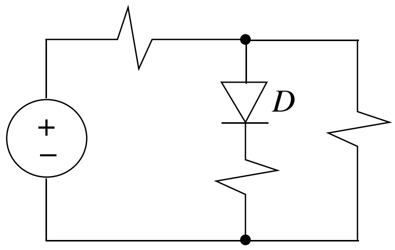


Bukatzeko, *A* eta *B* puntuetako tentsioak honako hauek izango dira:

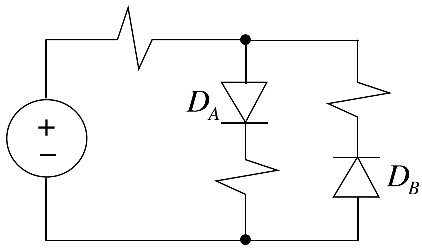
$$V_A = 3I_{D2} = 0{,}82 \text{ V} \quad \text{eta} \quad V_B = 2I_{D1} + 0{,}7 = 1{,}79 \text{ V}$$

C) Proposaturiko ariketak

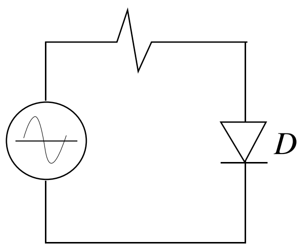
1. Irudiko zirkuituetan, esan ezazu diodoak zuzeneko polarizazioan edo alderantzizko polarizazioan dauden.



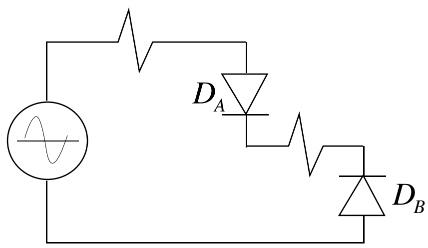
(a)



(b)

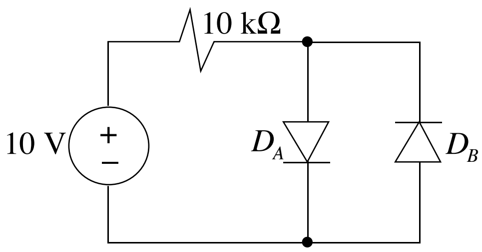


(c)

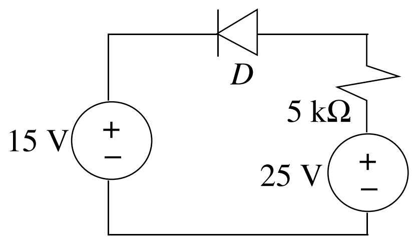


(d)

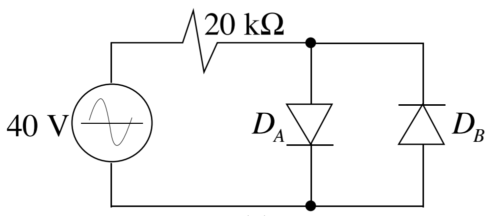
2. a) Errepika ezazu aurreko ariketan egindakoa, ondoko kasuetan:



(a)



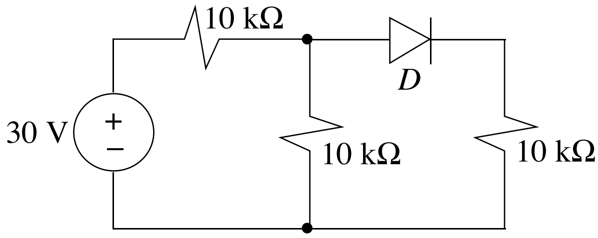
(b)



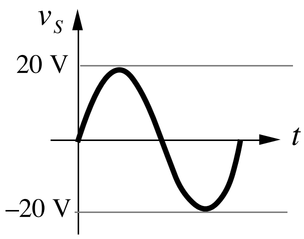
(c)

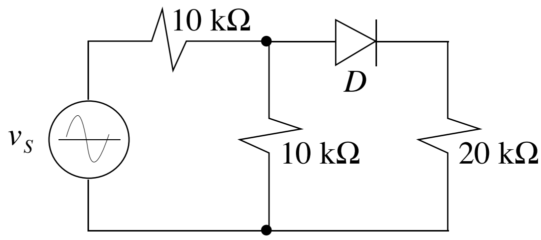
b) Diodoak idealak direla suposatuz, zenbat balio dute korronteek?

3. Irudiko zirkuiturako, kalkula ezazu diodotik igarotzen den korrontea, Thévenin-en zirkuitu baliokidea eta diodoaren lehenengo hurbilketa erabiliz.

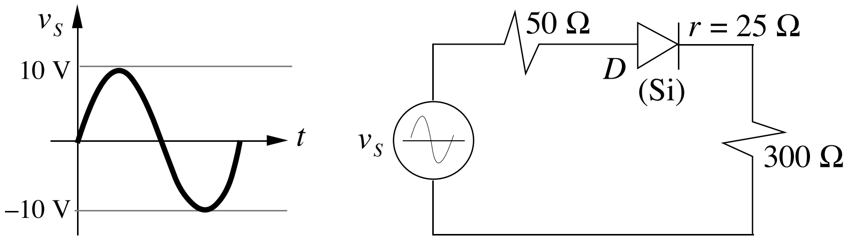


4. Irudiko zirkuiturako, kalkula ezazu diodotik igarotzen den korronte maximoa, Thévenin-en zirkuitu baliokidea eta diodoaren lehenengo hurbilketa erabiliz.

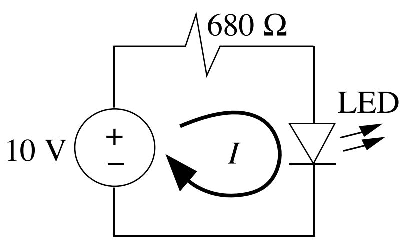




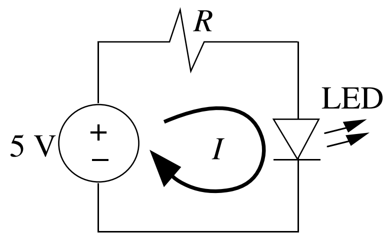
5. Kalkula ezazu diodotik igarotzen den korronte maximoa, hirugarren hurbilketa erabiliz. Zenbat balio du 300 Ω-eko erresistentzian dagoen tentsio maximoak?



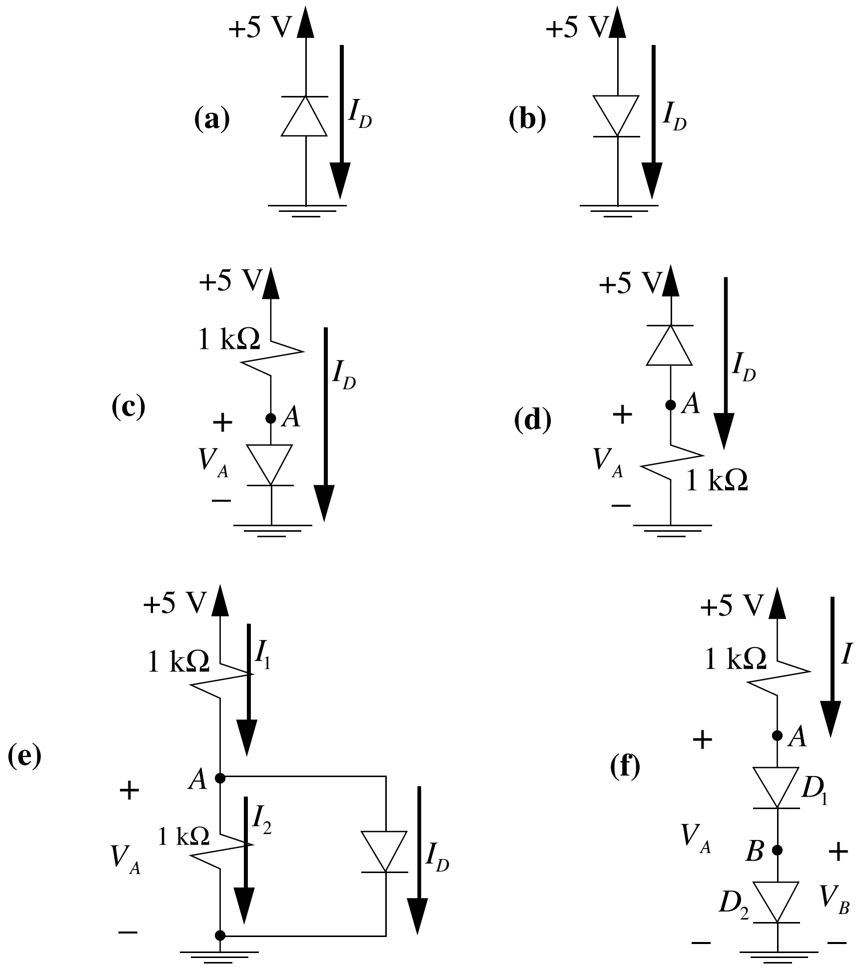
6. Irudiko zirkuituan, zenbat balio du I korronteak? (V_{LED} = 1,7 V)



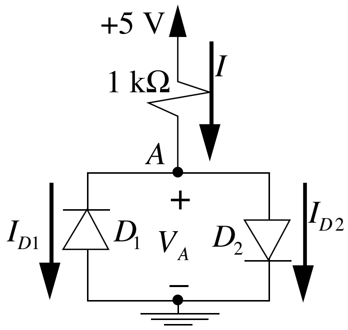
7. Irudiko zirkuituan $V_{LED} = 2{,}2$ V da. Zenbat balio behar du R erresistentziak, korrontea 40 mA-koa izan dadin?



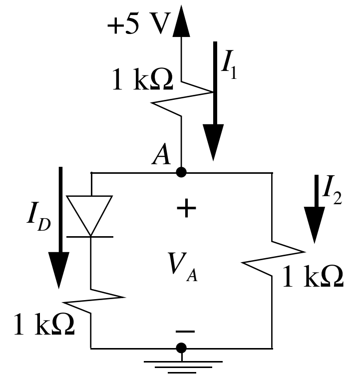
8. Analiza itzazu ondoko zirkuituak, diodoak siliziozkoak direla suposatuz.



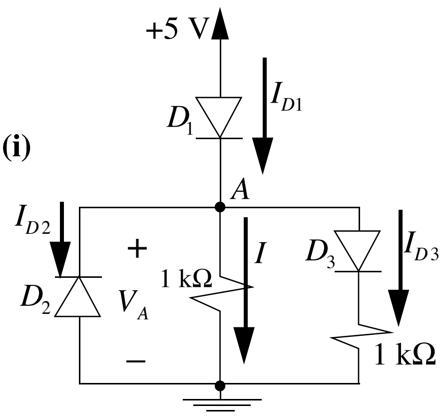
(g)



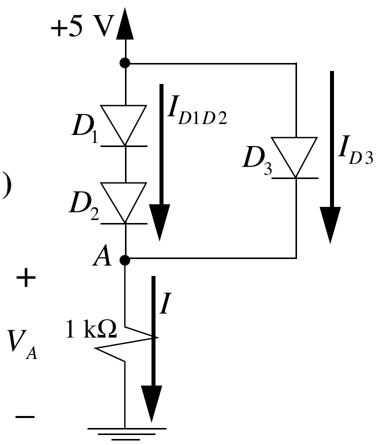
(h)



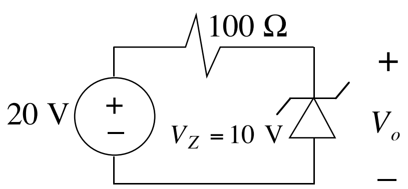
(i)



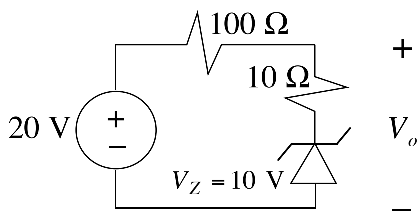
(j)



9. Irudiko Zener diodoaren V_Z-ren balioa 10 voltekoa da. Kalkula ezazu V_o ondoko bi kasuetan.



(a)

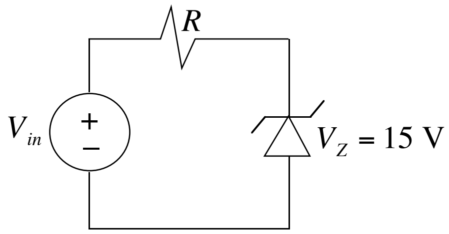


(b)

10. Zener diodo baten V_Z tentsioa 15 V-ekoa da korrontea 20 mA-koa denean. Zenbat balio du potentziak?

11. Zener diodo baten potentzia maximoa 5 W-ekoa da eta V_Z = 20 V. Zenbat balio du korronte maximoak (I_{ZM})?

12. Irudiko zirkuituan Zener diodoaren $V_Z = 15$ V eta $P_{ZMAX} = 0{,}5$ W dira. $V_{in} = 40$ V baldin bada, zein izango da R-ren balio minimoa diodoa honda ez dadin?

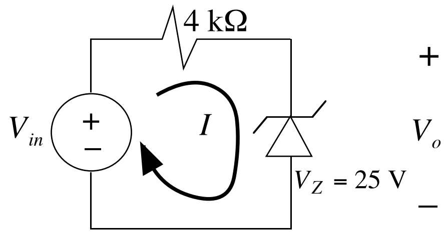


13. Aurreko zirkuituan, $R = 2$ kΩ izanik, zenbat balio du korronteak? Eta P_Z-k?

14. Irudiko zirkuituan, zein da V_{in} tentsioaren balio minimoa, korrontea nulua ez izateko? Eta $V_{in} = 50$ V baldin bada, zenbat balio du V_0 tentsioak, Zener diodoa A.P. Zener eskualdean egonik, Zener diodoaren bi hurbilketa hauek erabiliz

a) diodoak barne-erresistentziarik ez duela suposatzen badugu?;

b) barne-erresistentzia $r_Z = 10\ \Omega$ dela suposatuz?



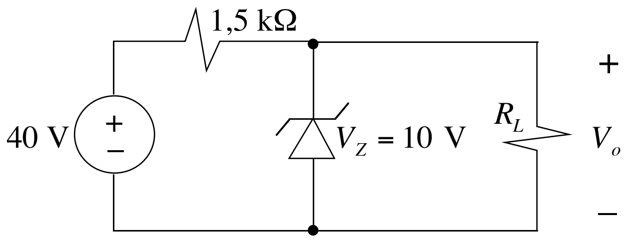
15. Irudiko zirkuiturako:

a) Zein da Zener diodotik igarotzen den korrontea, honako hiru kasu hauetan?

a) $R_L = 100$ kΩ.
b) $R_L = 10$ kΩ.
c) $R_L = 1$ kΩ.

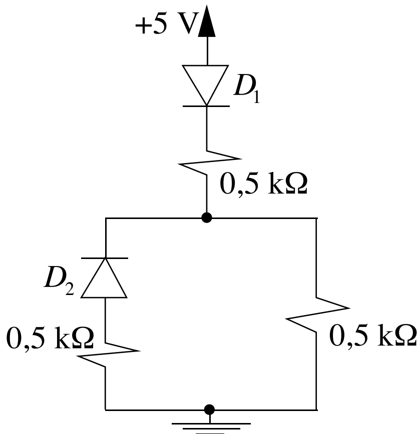
b) Zein da R_L erresistentziaren balio minimoa, Zener diodotik igarotzen den korrontea nulua izan ez dadin?

c) R_L erresistentziaren balioa infinitutik 1 kΩ-era alda daiteke. Zein dira V_o tentsioaren balio minimoa eta maximoa, diodoaren barne-erresistentzia $r_Z = 10\ \Omega$ baldin bada?

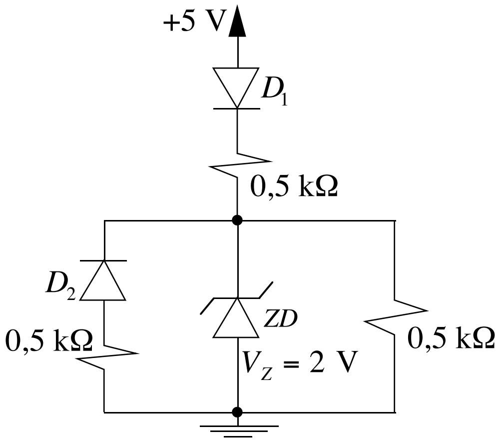


16. Ondoko irudiko zirkuiturako:

a) Kalkula itzazu elementu guztietako korronteak eta tentsioak (suposa ezazu diodoak siliziozkoak direla eta erabil ezazu diodo errealaren bigarren hurbilketa).



b) Nola aldatzen dira aurreko emaitzak, V_Z = 2 V duen Zener diodo bat sartzen bada, beheko irudian ageri den moduan?

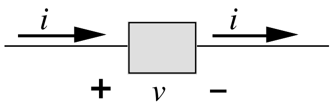


7. Transistoreak

A) Jakin beharreko kontzeptuak

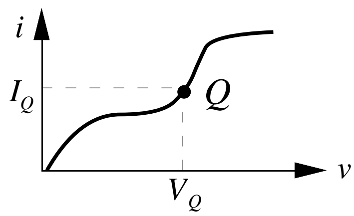
• Definizioa

Orain arte aztertutako elementuak (erresistentziak, kondentsadoreak, sorgailuak, diodoak) biterminalak dira; hots, bi mutur dituzte eta portaera kontrolaezina dute, beren borneen arteko potentzial-diferentziaren eta korrontearen arteko erlazioa beti finkoa baita; hau da, tentsioaren balio jakin baterako korrontearen balioa beti berdina izango da.

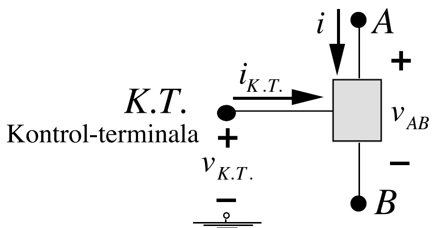


portaera-ekuazioa: $i = f(v)$

ezaugarri grafikoa:



Gaur egun erabiltzen ditugun gailu askoren funtzionamendurako ez da nahikoa mota horretako portaera kontrolaezina. Horri aurre egiteko, transistoreak erabiltzen dira. Transistorea elementu triterminala da; hau da, hiru mutur ditu. Muturretako batek kontrol-terminal gisa egiten du lan, beste bien portaera kontrolatuz. Kontrol-magnitudea tentsioa ala korrontea izan daiteke, transistore-motaren arabera, aurreraxeago ikusiko dugun legez.



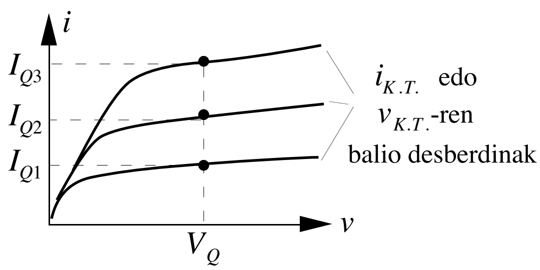
portaera-ekuazioa:

$$i = f(v_{AB}, v_{K.T.})$$

edo

$$i = f(v_{AB}, i_{K.T.})$$

ezaugarri grafikoa:



Aurreko irudian ikus daitekeen moduan, transistorearen kasuan, tentsioaren balio jakin baterako, korrontearen balio bat baino gehiago lor daiteke; hots, portaera desberdinak lor daitezke, hain zuzen ere, kontrol-terminalean ezarritako magnitudearen balioaren arabera.

Potentzia elektrikoari dagokionez, transistorea elementu pasiboa da, hots, potentzia elektrikoa xurgatu behar du funtzionatu ahal izateko. Beste elementuen antzera, transistoreek ere muga bat izango dute xurga dezaketen potentzia maximoan.

Beste aldetik, lehenago aipatu dugun kontrolagarritasunaren eraginez, transistoreak bereziak dira orain arte analizatutako elementuekin alderatuta, gauza baitira sarrerako seinale txikiak anplifikatzeko, irteeran seinale handiagoak emanez. Dena den, seinaleak anplifikatzeko gaitasuna transistorearen ezaugarri garrantzitsua izan arren, liburu honetan ez ditugu transistoreak ikuspuntu horretatik analizatuko, egoera egonkorrean bakarrik analizatu nahi baititugu. Arrazoia zirkuitu digitalen funtzionamenduan datza, 8. gaian azalduko dugun legez, eta Informatikaren alorrean transistoreak zirkuitu digitalen ikuspuntutik direlako interesgarriak, hots, gaur egungo konputagailu elektronikoen oinarri diren zirkuitu digitalen osagai gisa.

Transistoreen funtzionamenduaren berezitasunen funtsa 2 PN juntura izatea da. Juntura hauek era desberdinetan gauza daitezke eta horren arabera, mota desberdinetako transistoreak bereizten dira (ikus 3. eranskina). Hona hemen sailkapena:

• Transistoreen sailkapena

Transistore bipolarrak: BJT (Bipolar Junction Transistor).

Izen hori daramate, korrontea sortzeko elektroi askeak zein hutsuneak mugitzen direlako, hots, bi "polaritatetako" karga-eramaleak. Kontrol-magnitudea korrontea da. Bi motatako transistore bipolarrak daude: PNP eta NPN motakoak. Hurrengo atalean aztertuko ditugu.

Transistore unipolarrak:

Oro har, eremu-efektuzko transistoreak edo FET (Field Effect Transistor) izena ematen zaie, eremu elektrikoaren eragina funtsezkoa baita horien portaeran. Unipolarrak deritze, korrontea sortzeko mota bateko karga-eramaleak soilik mugitzen direlako, hots, elektroi askeak soilik edo hutsuneak soilik, transistorearen arabera, baina ez bi karga-eramaleak batera.

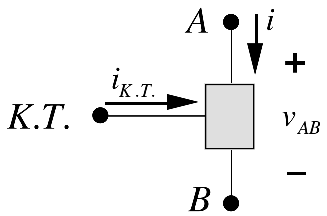
Kontrol-magnitudea potentzial-diferentzia da.

Hauen artean ere bi motatakoak bereiz ditzakegu: JFET (Junction Field Effect Transistor) eta FETMOS (Metal Oxide Semiconductor), erabiliena azken hau izanik. Bi mota horien barruan ere, korronte-sortzaileen arabera, bi azpimotatakoak bereiz daitezke: N kanalekoak, korrontea elektroiek sortzen dutenean, eta P kanalekoak, korrontea hutsuneek sortzen dutenean. (Transistore bipolarren ondoren aztertuko ditugu.)

Juntura bakarreko transistoreak: UJT (UniJunction Transistor). Transistore hauek ez datoz bat hasieran esandakoarekin, ez baitaude 2 PN junturaz osatuak. Oso bereziak direnez gero, hemen ez ditugu kontuan hartuko.

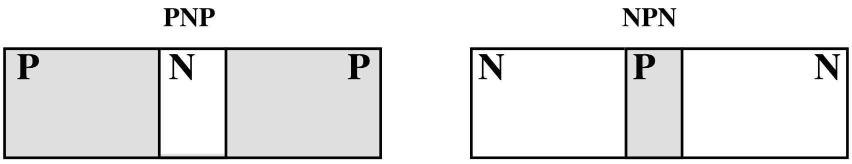
• Transistore bipolarrak

Transistore bipolarretan kontrol-magnitudea korrontea da eta, ondorioz, aurreko ataleko eskema honela geratzen da:



$$i = f(v_{AB}, i_{K.T.})$$

Transistore hauek 2 PN junturaz osatuta daudenez gero, bi aukera desberdin agertzen zaizkigu: bi P eskualderen artean txertatutako N motako eskualde bat (**PNP** motako transistorea), ala N motako bi eskualderen artean gauzatutako P motako eskualde bat (**NPN** transistorea):

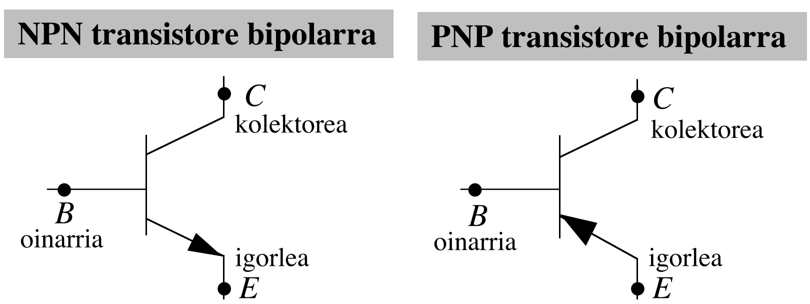


Kasu batean zein bestean, elektroi askeak eta hutsuneak mugitzen dira. Elektroi askeek eta hutsuneek bi PN junturak zeharkatzen dituzte, eta korrontea terminal guztietan zehar egongo da. (Ikus 3. eranskina.)

Goiko irudiko eskualde bakoitzari terminal bat dagokio. Kontrol-terminala, erdiko eskualdeari dagokiona da, eta kontrol-magnitudea, berriz, korrontea. Terminal honi oinarria, *B* (*base*), esaten zaio; ezkerraldekoari, igorlea, *E* (*emitter*), kargak igortzen dituelako beste eskualdeetarantz; eta eskuinaldekoari, berriz, kolektorea, *C* (*collector*), igorletik datozen kargak jasotzen dituelako. Izen horiek eta egitura kontuan hartuz, bi PN junturak honela adierazten dira: igorle-oinarri juntura, *EB* edo *BE*, eta kolektore-oinarri juntura, *CB* edo *BC*.

Egitura aurrekoa izan arren, ez da hori transistoreekin lan egiteko erabiltzen den ikurra, honako hauek baizik:

Ikurrak:



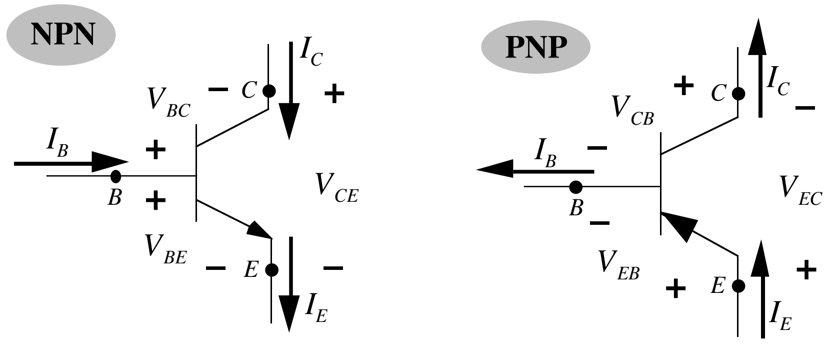
Ikurrak ia-ia berdinak izan arren, oso erraza da bien artean bereiztea: igorlearen gainean gezi bat ageri da bietan, baina kontrako noranzkoetan. Geziaren esanahia antzemateko, diodoarena gogoratu besterik ez dugu egin behar: diodoan gezia P aldetik N aldera doa. Transistoreetan beste horrenbeste egiten da: NPN transistorean oinarria P motakoa eta igorlea N motakoa direnez gero, gezia oinarritik atera eta igorlerantz dago zuzenduta; PNP transistorean, berriz, oinarria N eta igorlea P izanik, gezia igorletik oinarrirantz dago zuzenduta. Ez dago esan beharrik, geziak transistore-mota adierazteaz gain, kolektorearen eta igorlearen artean bereizteko ere balio duela, ikurra simetrikoa baita; modu horretan, gezia daramana igorlea da beti.

Transistore bipolarren portaera egonkorra: magnitudeak

Orain arte ikusitako elementu biterminalen portaera adierazteko, bi magnitude baino ez ditugu erabili: elementua zeharkatzen duen korrontea eta elementuaren bi muturren arteko potentzial-diferentzia edo tentsioa. Transistoreekin, oro har, magnitude gehiago behar dira, triterminalak direlako. Izan ere, transistore bipolarren portaera aztertzeko honako magnitude elektriko hauek erabiltzen dira: terminal bakoitzetik igarotzen den korrontea, hots, I_C, I_B eta I_E hiru korronteak, eta terminalen arteko potentzial-diferentziak binaka, hots, V_{BE}, V_{BC} eta V_{CE} hiru tentsioak.

Beraz, elementu biterminaletan bi ezezagunak (i eta v) lotzeko portaera-ekuazio bat behar baldin bagenuen, hemen sei dira erlazionatu beharreko magnitudeak, hiru korronte eta hiru tentsio. Hots, transistorearen operazio-puntua deritzona adierazteko, sei balio horiek kalkulatu behar dira une jakin batean: $Q(I_B, I_C, I_E, V_{BE}, V_{CE}, V_{BC})$; ondorioz, transistorearen kasuan portaera-ekuazio bat baino gehiago beharko dugu (zehazki, bi portaera-ekuazio behar dira), hurrengo atalean ikusiko dugun bezala.

Sei magnitude horiek arbitrarioki ipini beharrean, hitzarmen baten bidez finkatzen dira terminaletako korronteen noranzkoak eta terminalen arteko tentsioen zeinuak, eta beti berdin erabiltzen dira (gogoratu diodoarekin beste horrenbeste egin dugula, beti I_D eta V_D ipintzean). Hona hemen hitzarmen horiek:

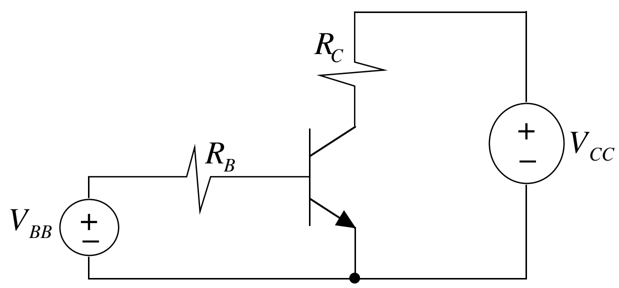


Irudiei erreparatuz gero, agerikoa da bi transistoreetan korronteen noranzkoak eta tentsioen zeinuak kontrakoak direla; hori dela eta, nahikoa da transistore-mota baten portaera aztertzea, bestearena berdina izango baita, zeinuak aldatuz. Horrexegatik, hemendik aurrera NPN transistoreaz soilik arduratuko gara, mota hori baita erabiliena.

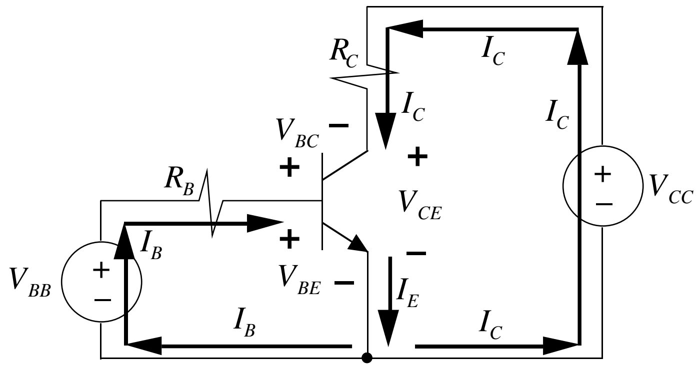
Transistore bipolarren portaera-ekuazioak: zenbat?

Badakigu zer den elementu biterminal baten portaera-ekuazioa: elementuaren portaera elektrikoan parte hartzen duten bi magnitude elektrikoen arteko ekuazio matematikoa; normalean, elementua zeharkatzen duen korrontea eta muturren arteko potentzial-diferentzia edo tentsioa erlazionatzen dira ekuazio horretan.

Transistoreen kasuan, lehenago aipatu dugun bezala, sei magnitude daudenez gero, ekuazio bat baino gehiago beharko dugu, eta hemen dago gakoa: zenbat ekuazio behar dira transistore baten portaera matematikoki finkatzeko? Horixe da atal honetan argitu nahi duguna. Horretarako, demagun ondoko irudiko zirkuitua analizatu behar dugula (bidenabar, esan dezagun hori dela transistoredun zirkuiturik sinpleenetarikoa: bi junturak polarizatu behar direnez gero, gutxienez bi maila agertuko dira beti; horrexegatik, polarizazio-zirkuitua deritzo):



Beti bezala, zirkuitua analizatzeari ekin baino lehen, magnitude elektrikoak irudikatu behar ditugu zirkuituan, ekuazioak idazteko orduan hankasartzeak saihesteko asmoz. Kasu honetan, transistore bat dagoenez gero, lehendabizi transistorearen sei magnitudeak ipiniko ditugu irudian; ondoren, behar izanez gero, zirkuituko beste magnitudeak ere ipiniko dira. Kasu honetan, oso sinplea denez gero, transistorearenak dira behar diren magnitude bakarrak (gogoratu erresistentzien muturren arteko tentsioak, Ohm-en legea dela eta, korronteen menpekoak direla; horrexegatik, hain zuzen, ez ditugu ezezaguntzat hartzen); ondorioz, sei ekuazio bilatu beharko ditugu.



Orain, ekuazioak idazteari ekin diezaiokegu:

Hasteko, Kirchhoff-en korronteen legea (**KKL**) aplikatuko dugu zirkuituko beheko korapiloan:

❶ $$\boxed{I_E = I_B + I_C}$$

Esan behar dugu ekuazio hori beti betetzen dela transistore bipolarretan, transistorea edozein zirkuitutan konektatuta dagoelarik. Arrazoia 3. gaian azaldu genuen, Kirchhoff-en korronteen legea azaltzean: kargak ez dira zirkuituetako korapiloetan metatzen, ez eta elementuetan ere; horrexegatik korapilo edo elementu batera iristen den korronte osoa aterako da beste bide batzuetatik. Transistorearen kasuan, I_C eta I_B korronteak sartzen dira transistorera eta I_E ateratzen da transistoretik; ondorioz, I_C eta I_B korronteen batura I_E-ren berdina da.

Beraz, goiko ekuazioa beti betetzen da transistoreetan, transistoretik kanpoko ikuspuntu batetik. Ondorioz, ekuazio horrek ez du islatzen transistorearen berezko barne-portaera, eta horrexegatik ez da transistorearen portaera-ekuazioetariko bat.

Orain, Kirchhoff-en tentsioen legea (KTL) aplikatuko dugu transistorearen bi muturren artean; esate baterako, B eta C puntuen artean. Kirchhoff-en tentsioen legeak honako hau dio: bi punturen arteko tentsioa berbera da puntu batetik bestera edozein bidetatik joatean.

Gure kasu honetan, B puntutik C puntura zuzenean joanez gero, V_{BC} tentsioa aurkituko dugu; baina zeharka joanez gero, transistorearen beste terminaletatik igaroz, lehenik B-tik E-ra joango gara, gero E-tik C-ra joateko; modu horretan, V_{BE} eta V_{EC} tentsioak aurkituko ditugu bata bestearen ondoren, eta bien batura egin beharko dugu: $V_{BC} = V_{BE} + V_{EC}$. Baina lehen aipatutako hitzarmenean ez da V_{EC} tentsioa agertzen, V_{CE} kontrakoa baizik. Ondorioz, honako hau da betetzen den bigarren ekuazioa:

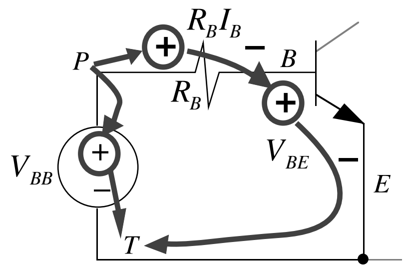
❷ $$\boxed{V_{BC} = V_{BE} - V_{CE}}$$

Orain ere esan behar dugu, bigarren ekuazio hau ere beti betetzen dela transistore bipolarretan, transistorea edozein zirkuitutan konektatuta dagoelarik, eta hau ere transistoretik kanpoko ikuspuntu batetik. Ondorioz, ekuazio horrek ere ez du islatzen transistorearen berezko barne-portaera, eta horrexegatik ez da transistorearen portaera-ekuazioetariko bat.

Hori guztia esan ondoren, goazen harira berriro, hots, zirkuituan betetzen diren ekuazioak idaztera.

Lehenago aipatu dugun bezala, analizatzen ari garen zirkuituan bi maila daude: ezkerreko mailari sarrerako maila deritzo, transistorearen kontrol-terminala, oinarria alegia, bertan dagoelako; eskuineko mailari, berriz, irteerako maila deritzo, bertan transistorearen kolektorea dagoelako, hots, igorleak igorritako kargak jasotzen dituen terminala. (Geroxeago ikusiko dugunez, transistorea zirkuitu honetan dagoen bezala konektatzean, hots, igorlea beste bi terminalen erreferentzia gisa erabiltzen denean, igorle komuneko egituran konektatuta dagoela esaten da.) Ondorioz, bi maila horietan KTL aplika dezakegu, zirkuituari dagozkion bi ekuazioak lortzeko. Hona hemen:

KTL sarrerako mailan:

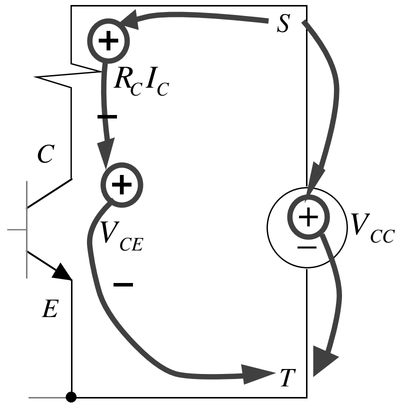


$V_{PT} = V_{PB} + V_{BE} + V_{ET}$

$T = E$ denez gero: $V_{ET} = 0$

❸ $\boxed{V_{BB} = R_B I_B + V_{BE}}$

KTL irteerako mailan:



$V_{ST} = V_{SC} + V_{CE} + V_{ET}$

$T = E$ denez gero: $V_{ET} = 0$

❹ $\boxed{V_{CC} = R_C I_C + V_{CE}}$

Azpimarratu behar dugu, ❸ eta ❹ ekuazioak zirkuituaren menpekoak direla, eta zirkuitua konplexuagoa den heinean, bi izan ordez, gehiago izango direla; zehazki, zirkuituan korapilo bat baino gehiago eta bi maila baino gehiago baldin badaude, transistorearen sei ezezagunak baino gehiago agertuko dira zirkuituan; ondorioz, hemen idatzitako bi ekuazio horiez gain, transistorea ez beste korapiloetan KKL aplikatu beharko dugu, eta transistorea barnean hartzen ez duten beste maileetan, KTL.

Beraz, dagoeneko lau ekuazio lortu ditugu, transistorean eta zirkuituan Kirchhoff-en legeak aplikatuz. Baina beste bi ekuazio behar dira. Nondik atera bi ekuazio gehiago? Zirkuitutik ez dago ekuazio berri gehiago ateratzerik, lor daitezkeen guztiak lortu baititugu: zirkuituan dagoen korapilo bakarrean KKL aplikatu dugu, eta ❶ ekuazioa lortu dugu; ondoren, transistorearen muturren artean eta zirkuituko bi mailetan KTL aplikatu dugu, eta ❷,❸ eta ❹ ekuazioak lortu ditugu.

Falta diren beste bi ekuazioak, beraz, transistorearen barne-funtzionamendua islatuko duten portaera-ekuazioak izango dira. (Garbi utzi behar dugu, berriro ere, lehenengo bi ekuazioak transistoreetan beti betetzen diren arren, ez dutela islatzen transistorearen barne-funtzionamendua, kanpoko munduarekiko erlazioa baizik, hots, Kirchhoff-en legeak; horrexegatik ez dira transistorearen portaera-ekuazioak.)

Transistorearen barne-funtzionamendua islatzen duten bi portaera-ekuazio horiek lortzeko, esperimentalki aztertu beharko dugu transistorearen portaera. Horretarako, hurrengo atalean azalduko ditugun transistorearen ezaugarri-kurbak erabiltzen dira. Dena den, ekuazio horiek honako itxura honetakoak direla esan dezakegu:

❺ $\boxed{I_C = f(V_{CE}, I_B)}$ ❻ $\boxed{I_B = g(V_{BE}, V_{CE})}$

Agerikoa da azken lau ekuazioetan lau ezezagun baino ez daudela: I_B, V_{BE}, I_C eta V_{CE}. Ondorioz, dagoeneko, lehenengo biak ez dira beharrezkoak zeren, azken lau ekuazio hauetan dauden lau ezezagunez gain, beste bi ezezagun agertzen baitira: I_E eta V_{BC}.

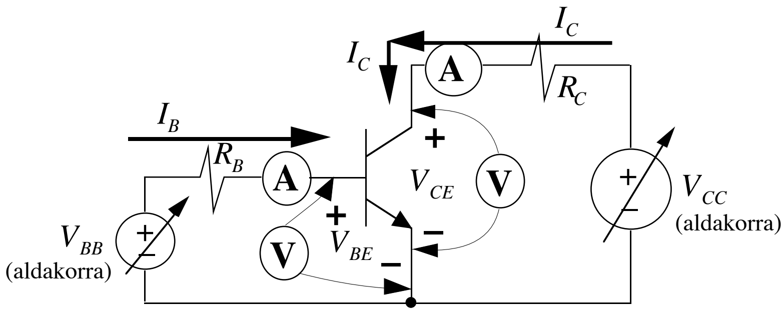
Laburbilduz, hasieran esan dugunez, transistore baten portaera egonkorra analizatzeko sei magnitude elektriko kalkulatu behar dira: operazio-puntua $Q(I_B, I_C, I_E, V_{BE}, V_{CE}, V_{BC})$. Baina ikusitako lehenengo bi ekuazioak, ❶ eta ❷, transistore bipolarretan beti betetzen direnez gero, ekuazio horietako ezker aldeko bi magnitudeak seien zerrendatik ken ditzakegu, beste lauak kalkulatu ondoren beti jakingo baitugu nola kalkulatu I_E eta V_{BC}. Horrexegatik, gauzak zertxobait sinplifikatu nahirik, hemendik aurrera, transistore baten portaera egonkorra bilatzeko lau magnitude baino ez direla behar esango dugu:

transistorearen operazio-puntua $Q(I_B, I_C, V_{BE}, V_{CE})$

Eta horrexegatik, hemendik aurrera lehenengo bi ekuazio horiek inplizituki erabiliko ditugu; hots, ez ditugu esplizituki idatziko beharrezkoa ez bada (ariketetan ikusiko dugu, batzuetan beharrezkoa dela korronteen arteko ekuazioa), eta bakar-bakarrik erabiliko ditugu transistorearen bi portaera-ekuazioak eta zirkuituari dagozkion ekuazioak (behar adina).

Transistore bipolarren ezaugarri-kurbak

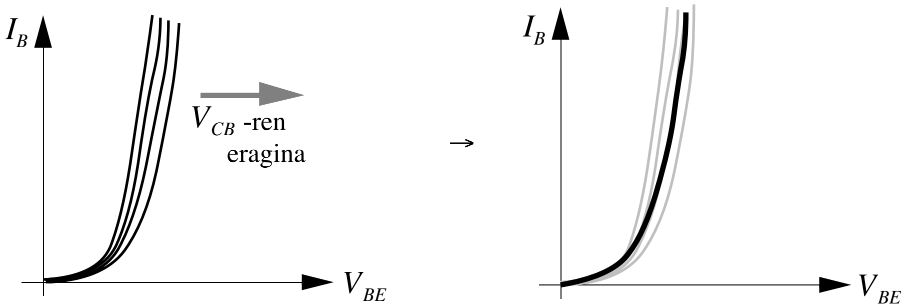
Transistoreak hiru terminal dituenez, beraren ezaugarriak adierazteko ez da nahikoa ekuazio edo kurba bakarrarekin, gorago ikusi dugun legez: bi beharko dira. Atal honetan, ondoko irudiko zirkuituan dagoen transistoreari dagozkion bi kurbak esperimentalki nola lortzen diren azalduko dugu, baita kurba horien ezaugarriak zein diren ere.



Esan bezala, bi kurba dira, bata sarrera-zirkuituko korrontearen eta tentsioaren arteko erlazioari dagokiona (lehengo ❻ ekuazioko g funtzioa) eta bestea, berriz, irteera-zirkuituko magnitudeen arteko erlazioari dagokiona (lehengo ❺ ekuazioko f funtzioa).

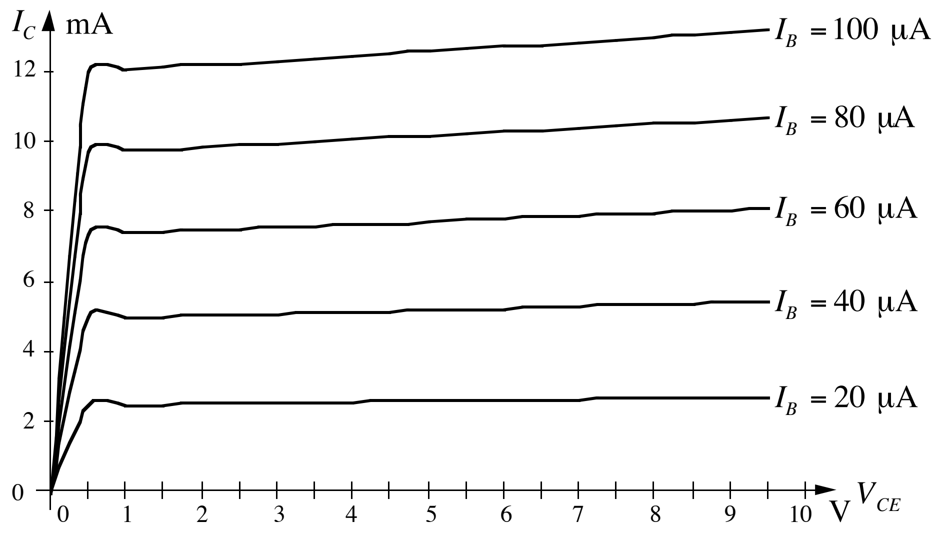
Horrexegatik, hain zuzen, bi anperemetro behar dira (bata sarrera-zirkuituan I_B korrontea neurtzeko, eta bestea irteera-zirkuituan I_C neurtzeko) eta bi voltmetro (bata sarrerako tentsioa, V_{BE}, neurtzeko eta bestea irteerako tentsioa, V_{CE}, neurtzeko). Zirkuituan dauden bi tentsio-sorgailuen balioak aldatuz joango gara, transistorearen kurbak puntuz puntu lortzeko.

Sarrera-zirkuituko magnitudeen arteko erlazioa aztertzen badugu, (I_B, V_{BE}) kurbaren gainean V_{CE}-k ere eragina baduela ikusiko dugu, baina hain da txikia eragin hori, ezen arbuiatu egiten den. Horrexegatik, ❻ ekuazioa, oro har $I_B = g(V_{BE}, V_{CE})$ dena, sinplifikatu egin daiteke: $I_B = g(V_{BE})$.



Modu horretan, sarrera-zirkuituko kurba diodo artezlearen grafikoarekin pareka daiteke, eta horrexegatik diodo artezlearen kasuan erabiltzen diren hiru hurbilketak erabil daitezke sarrera-zirkuituaren ezaugarri grafiko honentzat ere. Emaitza ez da harritzekoa, azken batean oinarri-igorle junturaren ezaugarri grafikoa lortzen ari baikara.

Irteera-seinaleei dagozkien kurbak ondoko irudikoak dira. Nabarmena da kurba hauek I_B-ren menpekoak direla, eta menpekotasun hori da, hain zuzen ere, I_C korrontearen kontrola ahalbidetzen duena, I_B-ren balio bakoitzerako (I_C, V_{CE}) kurba karakteristiko bat lortzen baita.



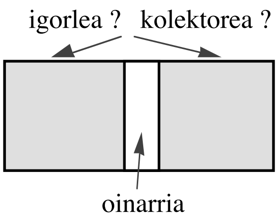
Begi-bistan da, bi grafiko hauei dagozkien ekuazioak linealak ez direla. Horrek izugarri konplikatuko du transistoredun zirkuitu baten ebazpena. Arazo hori ekiditearren, beste zirkuitu-elementuekin egiten den moduan, transistorearentzat ere hurbilketak erabiltzen dira.

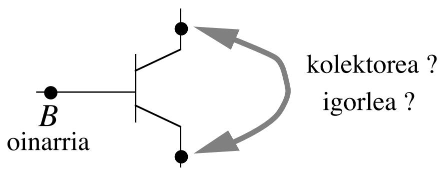
Diodoetan, hurbilketetako ekuazioak polarizazioaren menpekoak diren bezala, transistoreetan ere, bi PN junturen polarizazioen arabera, portaera aldatzen da, eta hori dela eta funtzionamendu-zona desberdinak bereizten dira, hurbilketetan ekuazio eta baldintza desberdinak sortuz.

Dakigun bezala, transistore batean bi PN juntura daude eta lau aukera daude bi junturak polarizatzeko:

BE juntura:	A.P.	A.P.	Z.P.	Z.P.
BC juntura:	A.P.	Z.P.	A.P.	Z.P.

Dena den, laurak posible izan arren, normalean ez dira laurak erabiltzen honako arrazoi honengatik: transistorearen egitura fisikoa dela eta, oinarria ez beste bi terminalen jokabidea trukakorra da, oso antzekoak baitira. Izan ere, transistore bipolarren ikurra aurkeztu dugunean kolektore eta igorleari dagokienez ikurra simetrikoa dela adierazi dugu, ez baitago bien artean bereizterik, gezia marraztu ezean.





Hori dela eta, bi junturen polarizazio-maila erlatiboak finkatzen du zein terminalek igorriko dituen kargak eta zeinek jasoko dituen, hots, zeinek jokatuko duen igorle gisa eta zeinek kolektore gisa.

Baina fisikoki bi terminalak oso antzekoak izan arren, ez dira guztiz berdinak, transistorearen fabrikatzaileak bata bereziki diseinatu duelako igorle gisa jokatzeko (eta horregatik *E* letra esleitu dio) eta bestea kolektore gisa (*C* letrarekin adieraziko du fabrikatzaileak). Horrexegatik, bi funtzionamendu-modu bereizten dira: zuzeneko funtzionamendua edo arrunta, *E* letradun terminalak igorle gisa jokatzen duenean, eta alderantzizko funtzionamendua, *C* letradun terminalak igorle gisa eta *E* letradunak kolektore gisa jokatzen dutenean.

Esan bezala, bi junturen arteko polarizazio erlatiboa da funtzionamendu-modua finkatzen duena: zuzeneko funtzionamendua gertatzen da *BE* junturaren polarizazio-maila *BC* junturarena baino handiagoa denean, hots, NPN transistore batean $V_{BE} > V_{BC}$ denean; alderantzizko funtzionamendua, berriz, *BE* junturaren polarizazioa *BC* junturarena baino txikiagoa denean gertatuko da, hots, NPN transistore batean $V_{BE} < V_{BC}$ denean. Zirkuitu arruntetan zuzeneko funtzionamendu-moduan polarizatzen dira transistoreak; horregatik, funtzionamendu arrunta ere esaten zaio. Alderantzizko funtzionamendu-modua, ordea, ikerketa-mailan soilik erabiltzen da.

Beraz, funtzionamendu arrunta goiko lau polarizazioetako hirurekin bakarrik lortzen da, *BE* juntura A.P. eta *BC* juntura Z.P. daudenean ez baita betetzen $V_{BE} > V_{BC}$ baldintza. Horregatik, hiru funtzionamendu-zona baino ez ditugu analizatu behar.

Transistore bipolarren funtzionamendu-zonak

Kortea: Funtzionamendu-zona hau bi junturak, bai igorle-oinarri (*BE*) juntura bai eta kolektore-oinarri (*BC*) juntura ere, alderantzizko polarizazioan daudenean gertatzen da. Transistorea funtzionamendu-zona honetan dagoela egiaztatzeko, beraz, nahikoa da $V_{BE} \leq 0{,}7$ V eta $V_{BC} \leq 0{,}7$ V direla konprobatzea (lehenengoa bakarrik egiaztatu ohi da). Ikusi genuen legez, alderantziz polarizatutako PN junturan zehar ez dago korronterik; hori dela eta, terminal guztietako korronteak zero izango dira: $I_C = 0$ (❺ ekuazioa), $I_B = 0$ (❻ ekuazioa) eta $I_E = 0$. Honako hauek dira transistorearen operazio-puntua bilatu ahal izateko falta zaizkigun ekuazioak (lehengo *f* eta *g* funtzio ez-linealen ordez).

ekuazioak: $I_C = 0$ (❺), $I_B = 0$ (❻); baldintza: $V_{BE} \leq 0{,}7$ V

Zona Aktibo Arrunta (ZAA): Funtzionamendu-zona hau igorle-oinarri (*BE*) juntura Z.P. eta kolektore-oinarri (*BC*) juntura A.P. daudenean gertatzen da; orduan, transistorea Zona Aktibo Arruntean dagoela esaten da. Kasu honetan, zuzenki polarizatuta juntura bat besterik egon ez arren, transistorearen egitura berezia dela eta, bi PN junturetan zehar kargen mugimendua —hau da, korrontea— egongo da, baina oinarriko korrontea kolektorekoa baino askoz txikiagoa izanik. (Azalpenetarako, ikus 3. eranskina.)

BE juntura zuzeneko polarizazioan dagoenez, $V_{BE} = 0{,}7$ V (❻ ekuazioa) izango da. Falta den ekuazioa lortzeko, irteerako kurbak aztertu behar dira. Hori eginez, esperimentalki ondorioztatzen da I_C eta I_B korronteen artean erlazio finko bat dagoela: $I_C/I_B = \beta$ (❺ ekuazioa). β transistorearen parametroa da; transistore-motaren arabera aldatzen da eta korronte-irabazia deritzo. Beraren balioa 50 ÷ 200 artean egon ohi da, baina gure ariketetan kalkuluak errazteko asmoz, normalean $\beta = 100$ hartuko dugu.

Transistorea funtzionamendu-zona honetan egon dadin, *BC* juntura alderantzizko polarizazioan dagoela ziurtatu beharko da, eta horretarako nahikoa da $V_{CE} \geq 0{,}2$ V dela konprobatzea; hots, $V_{BC} \leq 0{,}5$ V behar du izan, zeren, *BC* junturan zehar korrontea igarotzen ari denez, A.P. egon arren, tentsioa pixka bat handitzean korrontea izugarri handitzen baita, eta horregatik 0,7 voltekin ez baizik eta 0,5 voltekin sartzen da zuzeneko polarizazioan.

ekuazioak: $\dfrac{I_C}{I_B} = \beta$ (❺), $V_{BE} = 0{,}7$ V (❻); baldintza: $V_{CE} \geq 0{,}2$ V

Aurreko ekuazioak erabiliz, erlazio gehiago ere lor daitezke. Esate baterako, zona aktibo arruntean (Z.A.A.) kolektoreko korrontearen eta oinarriko korrontearen arteko erlazioa konstante denez gero (β hain zuzen ere), kolektoreko korrontearen eta igorleko korrontearen arteko erlazioa ere finkoa izango da; izan ere, transistorearen α parametroa da, eta bere balioa 0,95 ÷ 0,97 artean egon ohi da.

Ikus dezagun, bada, nola lortu α parametroa: Gogoratu KKL beti betetzen dela transistorean, hots, lehengo ❶ ekuazioa: $I_E = I_B + I_C$. Bertan, I_C eta I_B-ren arteko erlazioa ordezkatuz:

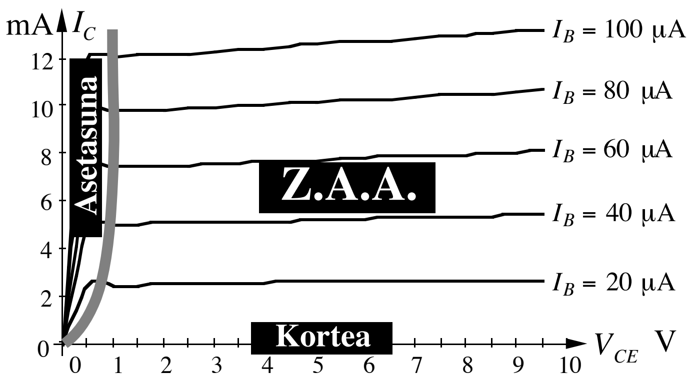
$$I_E = I_B + I_C = \frac{I_C}{\beta} + I_C = \frac{1+\beta}{\beta} \cdot I_C \qquad \rightarrow \qquad \alpha = \frac{I_C}{I_E} = \frac{\beta}{\beta + 1}$$

Transistorearen bi parametroen ohiko balioak kontuan hartuta, begi-bistakoa da I_C eta I_E korronteen balioak antzekoak direla; oinarriarena, aldiz, askoz txikiagoa.

Asetasuna: Bi junturak Z.P. dauden kasuan, transistorea asetasunean dagoela esaten da. Ondorioz, bi junturetan zehar korrontea igaroko da; baina, kasu honetan, I_B gehiago handituko da, eta ez da beteko I_C eta I_B korronteen arteko lehengo erlazio konstantea. Hori kontuan izanik, erraza da zona honetan egoteko baldintza zein den ondorioztatzea: $I_C/I_B \leq$ ß, hain zuzen ere. Ekuazioak, berriz, bi junturak Z.P. egotearen ondorio dira: V_{BE} = 0,7 V (❻ ekuazioa) eta V_{CE} = 0,2 V (❺ ekuazioa), hain zuzen ere, V_{BC} = 0,5 V (eta ez 0,7 V) denean, *BC* juntura Z.P. dagoela suposatzen baita.

ekuazioak: $V_{CE} = 0{,}2$ V (❺), $V_{BE} = 0{,}7$ V (❻); baldintza: $\dfrac{I_C}{I_B} \leq \beta$

Hiru funtzionamendu-zona horiek transistorearen irteerako ezaugarri-kurbetan ere bereiz daitezke:



Transistore bipolarren portaera-ekuazioak: hurbilketak

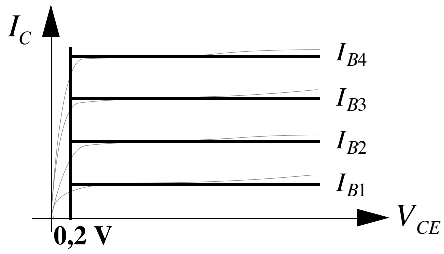
Laburpen gisa, hona hemen hiru funtzionamendu-zona horietan betetzen diren ekuazioak eta baldintzak:

Funtzionamendu-zona	**Kortea**	**Z.A.A.**	**Asetasuna**
Ekuazioak:	$I_B = 0$ $I_C = 0$ $(I_E = 0)$	$V_{BE} = 0{,}7$ V $\dfrac{I_C}{I_B} = \beta$	$V_{BE} = 0{,}7$ V $V_{CE} = 0{,}2$ V
Baldintzak:	$V_{BE} \leq 0{,}7$ V	$V_{CE} \geq 0{,}2$ V	$\dfrac{I_C}{I_B} \leq \beta$

Gogora dezagun, berriro ere, ekuazio horiek benetako *f* eta *g* ekuazio ez-linealen hurbilketa linealak besterik ez direla. Azpimarratu nahi dugu, baita ere, baldintzetako berdintzak ondoz ondoko bi funtzionamendu-zonen arteko mugan betetzen direla; eta baita bi aldeetako ekuazioak ere.

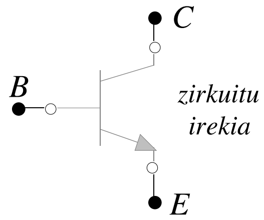
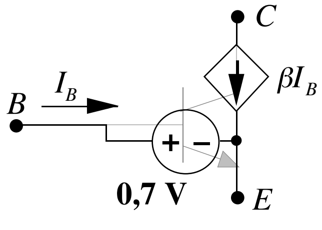
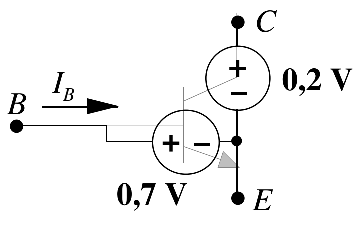
Hots, kortearen eta Z.A.A.-aren arteko mugan V_{BE} = 0,7 V da, eta I_B = 0 eta I_C = 0; Z.A.A.-aren eta asetasunaren arteko mugan, berriz, V_{CE} = 0,2 V eta $I_C/I_B = \beta$ dira, V_{BE} = 0,7 V izateaz gain.

Grafikoki, transistorearen irteerako kurbak honelaxe geratzen dira egindako hurbilketen arabera (sarrerako kurba diodoaren bigarren hurbilketaz ordezkatu dugu):

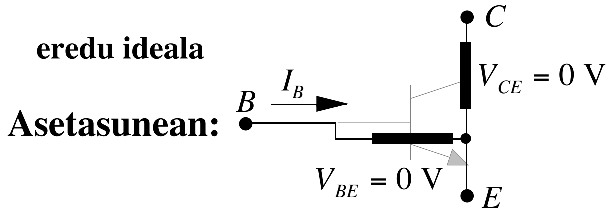


Transistore bipolarren zirkuitu-ereduak

Aurreko ataleko funtzionamendu-zonetako ekuazioei zirkuitu-eredu linealak esleitzen zaizkie, diodoekin egin genuen antzera. Hona hemen modeloak:

	Modeloa zirkuituan	Ekuazioak	Baldintza
Kortean:		$I_B = 0$ $I_C = 0$	$V_{BE} \leq 0{,}7$ V
Z.A.A.-ean:		$V_{BE} = 0{,}7$ V $I_C = \beta I_B$	$V_{CE} \geq 0{,}2$ V
Asetasunean:		$V_{BE} = 0{,}7$ V $V_{CE} = 0{,}2$ V	$\dfrac{I_C}{I_B} \leq \beta$

Gai honetan modelo hauek erabiliko ditugun arren, hurrengo gaiari begira, interesgarria da transistorearen modelo idealak ere erabiltzen direla aditzera ematea, bereziki ate logikoen portaera bilatu nahi denean. Izan ere, ate logikoetan transistoreak kortean zein asetasunean egiten du lan. Hori dela eta, kortearen eredu ideala goikoaren berdina da; baina asetasunari dagokiona honako hau da, non tentsio-sorgailuak zirkuitulaburrez ordezkatu ditugun, hain baitira txikiak beren balioak:

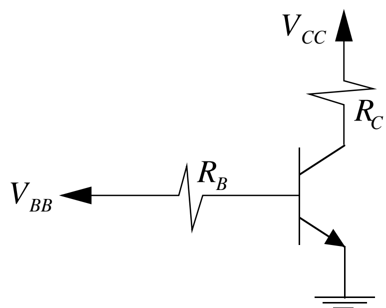


Ekuazioak

$V_{BE} = 0$ V
$V_{CE} = 0$ V

Transistoredun zirkuitu baten ebazpena

Transistore bipolar baten egoera operazio-puntuak emango digu, hots, polarizazio-zirkuituaren arabera transistoreari dagozkion tentsio eta korronte multzoak, hain zuzen ere. Demagun ondoko irudiko transistoredun zirkuitua analizatu behar dugula (suposatu nahi dugu, une honetan ez dagoela esan beharrik, ondoko zirkuitua 383. orrialdekoaren guztiz berdina dela):



Transistore horren operazio-puntua bilatu nahi badugu, honako pausoak jarraitu beharko ditugu:

1. Idatzi zirkuituari dagozkion ekuazioak: horrela, kasu honetan, bi ekuazio lortuko ditugu, sarrerako eta irteerako mailetan KTL aplikatuz. Baina ekuazio horietan lau ezezagun agertzen direnez gero, beste bi ekuazio behar ditugu.

2. Idatzi transistorearen portaera-ekuazioak: horrela, beste bi ekuazio lortuko ditugu. Beraz, horrela lortutako ekuazio-sistemak badu soluzioa, lau ezezaguneko lau ekuaziok osatuta baitago.

   Baina transistorea elementu ez-lineala denez, dagozkion ekuazioak ere ez dira linealak izango. Ondorioz, ekuazio-sistema ez-lineal baten aurrean aurkituko gara eta hau ebazteko bi metodo erabil ditzakegu:

   a. Transistorearentzat hurbilketak erabiliz (aurreko atalean azaldutakoak).

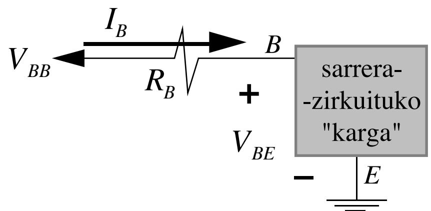
   b. Grafikoki.

Hurbilketa bidezko ebazpenean, transistorea dagokion hurbilketa linealaren modeloaz ordezkatu, eta ondoren zirkuitua ebatzi behar da. Hurbilketak aurreko atalean ikusitakoak dira eta transistorea aurkitzen deneko funtzionamendu-zonaren menpekoak dira. Besterik gabe transistore bat zein funtzionamendu-zonatan dagoen jakitea zaila gertatzen denez, transistorea zona jakin batean dagoela suposatu behar da, hots, hipotesia egin behar da; ondoren, dagokion hurbilketaz ordezkatu, eta zirkuitua ebatzi behar da. Zirkuitua ebatzi ondoren, egindako hipotesia zuzena ote den egiaztatu beharko dugu; hala ez balitz, beste hipotesi batekin probatu beharko da, prozesua soluzio zuzena topatu arte errepikatuz.

Ebazpen grafikoa: demagun soluzio zehatza nahi dugula eta sarrera-zirkuituaren (I_B, V_{BE}) eta irteera-zirkuituaren (I_C, V_{CE}) ezaugarri-kurbak ezagutzen ditugula. Sarrera-zirkuituko zein irteera-zirkuituko karga-lerrozuzena deritzona kalkulatu ahal izango dugu, eta horren bidez operazio-puntua topatu grafikoki.

Karga-lerrozuzena, zirkuituko bi punturen arteko tentsioa eta bertatik igarotzen den korrontea erlazionatzen dituen ekuazioa besterik ez da, edozer izanda bi puntu horien artean dagoena. Ekuazio lineala denez gero, plano batean marraztean, lerrozuzen bat ateratzen da; hortik dator izena.

Zirkuitutik lortutako ekuazioak erabiliz, sarrera-zirkuituari dagokion karga-lerrozuzena lortu ahal izango dugu.



KTL sarrerako mailan: $V_{BB} = R_B I_B + V_{BE}$

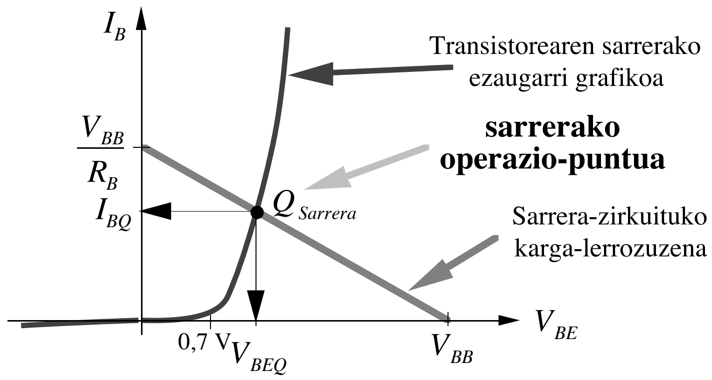
sarrera-zirkuituko karga-lerrozuzena: $\boxed{I_B = \dfrac{V_{BB}}{R_B} - \dfrac{1}{R_B} \cdot V_{BE}}$

Sarrerako karga-lerrozuzen hori (I_B, V_{BE}) planoan irudikatzeko, nahikoa dugu bi punturekin, ardatzekiko ebakidura-puntuekin, hain zuzen. Hona hemen:

$V_{BE} = 0$ denean, $\qquad I_{B0} = \dfrac{V_{BB}}{R_B}$

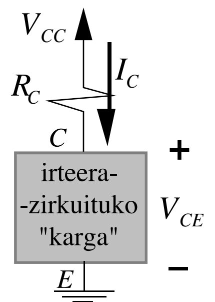
$I_B = 0$ denean, $\qquad V_{BE0} = V_{BB}$

Orain, sarrerako karga-lerrozuzen hori eta transistorearen sarrerako (I_B, V_{BE}) grafikoa erabiliz, analizatzen ari garen zirkuitu horretan transistoreak duen oinarriko korrontearen (I_{BQ}) eta oinarriaren eta igorlearen arteko potentzial-diferentziaren (V_{BEQ}) balioak kalkulatu ahal izango ditugu, sarrerako operazio-puntua, alegia:



Ez dago esan beharrik zein den baldintza transistorea kortean ez egoteko, hots, I_{BQ} nulua ez izateko edo *BE* juntura Z.P. egoteko: $V_{BB} \geq 0{,}7$ V balioa da, bestela ez baitago ebakidura-punturik karga-lerrozuzenaren eta transistorearen sarrerako kurbaren artean.

Era berean, zirkuituko ekuazioak erabiliz, irteera-zirkuituari dagokion karga-lerrozuzena lor dezakegu:



KTL irteerako mailan: $V_{CC} = R_C I_C + V_{CE}$

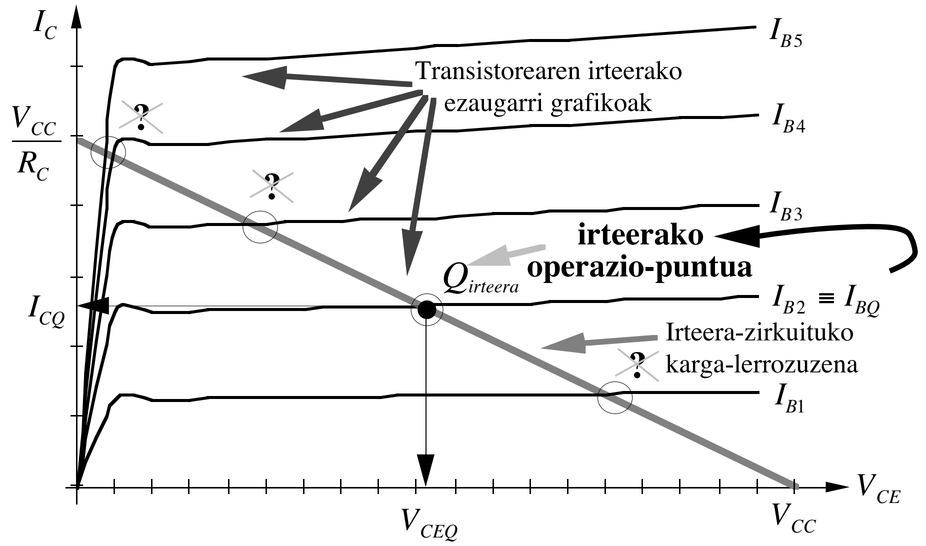
irteera-zirkuituko karga-lerrozuzena: $\boxed{I_C = \dfrac{V_{CC}}{R_C} - \dfrac{1}{R_C} \cdot V_{CE}}$

Lehen bezala, irteerako karga-lerrozuzen hori (I_C, V_{CE}) planoan irudikatzeko, nahikoa dugu bi punturekin, ardatzekiko ebakidura-puntuekin, hain zuzen. Hona hemen:

$V_{CE} = 0$ denean, $\quad I_{C0} = \dfrac{V_{CC}}{R_C}$

$I_C = 0$ denean, $\quad V_{CE0} = V_{CC}$

Orain, irteerako karga-lerrozuzen hori transistorearen irteerako (I_C, V_{CE}) ezaugarri-grafikoaren plano berean irudikatzen badugu, ebakidura-puntu mordoa lortuko dugu, bana oinarri-korrontearen kurba bakoitzeko. Beraz, nola jakin hauetatik zeinek ematen digun benetako operazio-puntua? Erantzuna berehalakoa da: aurreko pausoan kalkulatutako oinarri-korrontearen (I_{BQ}) balioari dagokion kurbaren eta karga-lerrozuzenaren arteko ebakidura-puntua izango da soluzioa, irteerako operazio-puntua, alegia:



Horrela, transistorearen operazio-puntua lortzeko falta zitzaigun I_{CQ} eta V_{CEQ} bikotea ere kalkulatu dugu.

Askotan gertatzen da, soluzio zehatza lortu nahi dugula baina ez dugula eskura transistorearen sarrerako kurba. Lehengo sarrerako soluzioari erreparatuz, agerikoa da V_{BEQ} tentsioaren balioa 0,7 V ingurukoa izango dela (agian 0,8 V, edo 0,75 V...), kurba nahiko bertikala baita 0,7 volteko tentsiotik aurrera.

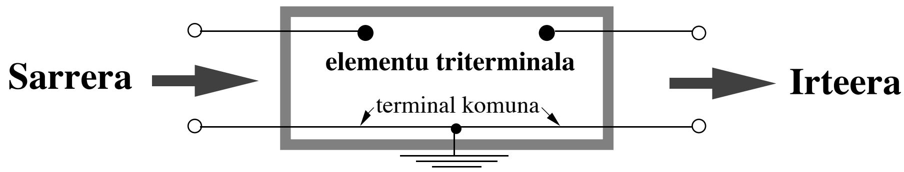
Hori dela eta, oinarri-korrontearen balioa karga-lerrozuzenaren menpekoa izango da; transistorearen sarrerako kurbarena baino gehiago behinik behin. Horregatik, sarrerako soluzioa ahal den zehatzena izan ez arren, eragin txikia izango du irteerako soluzioaren gainean.

Beraz, kasu horietan, azaldu ditugun bi ebazpideen arteko nahasketa bat egiten da: sarrerako zirkuituaren soluzioa hurbilketa eginez lortzen da, V_{BEQ} = 0,7 V dela suposatuz (transistorea kortean ez badago, noski); eta horrela lortutako I_{BQ} korrontearen balioa da, gero irteerako kurbetan soluzio zehatza bilatzeko erabiltzen dena.

Transistore bipolarra zirkuituetan konektatzeko hainbat modu

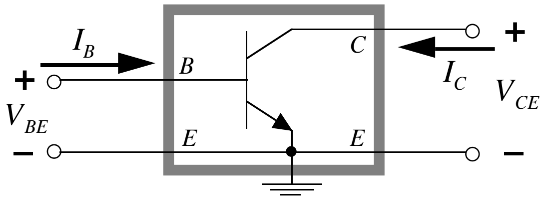
Orain arte, transistorearen portaera-ekuazioak eta ezaugarri-kurbak azaltzeko erabilitako bi zirkuituetan, transistorea modu berean konektatu dugu: igorlea erreferentzia-puntu gisa hartu dugu, eta beste bi terminalen bitartez sarrera- eta irteera-zirkuituak edo mailak osatu ditugu. Modu horretan, transistorearen portaera analizatzeko, V_{BE} eta V_{CE} tentsioak erabiltzen dira.

Baina konexio-modu hori arruntena izan arren, ez da bakarra, posible baita beste edozein terminal erreferentzia gisa hartzea, sarrera eta irteera osatzeko:

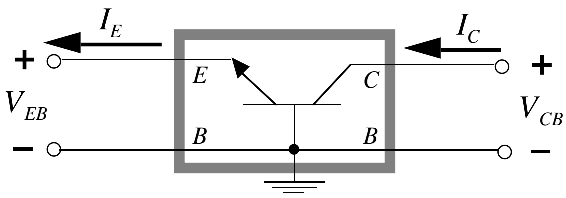


Hori dela eta, hiru konexio-modu edo zirkuitu-egitura daude:

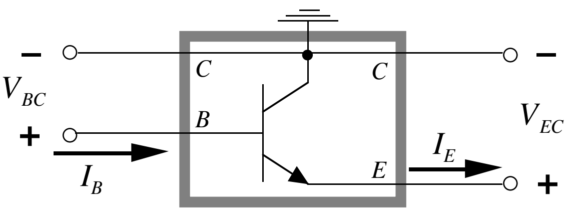
Igorle komuneko egitura:



Oinarri komuneko egitura:



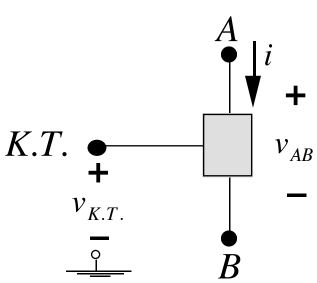
Kolektore komuneko egitura:



Guk, ariketetan igorle komuneko egiturari dagozkion magnitudeak erabiliko ditugu beti.

• Transistore unipolarrak edo eremu-efektuzkoak

Transistore unipolarretan, sailkapena azaltzean esan dugun bezala, kontrol-magnitudea tentsioa da, eta, ondorioz, eskema orokorra honela geratzen da:



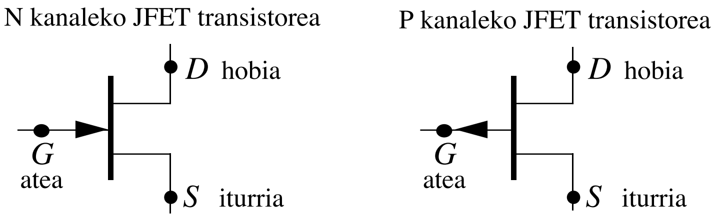
$$i = f(v_{AB}, v_{K.T.})$$

Lehen ere esan dugu, unipolarrak direla, korrontea sortzeko mota bateko karga-eramaleak soilik mugitzen direlako: elektroiak soilik N kanaleko transistoreetan, ala hutsuneak soilik P kanaleko transistoreetan. Sailkapenean esan dugun bezala, FET izena ere ematen zaie, eremu elektrikoaren eragina funtsezkoa baita beren funtzionamenduan.

Transistore hauen funtsa, transistore bipolarren antzera, bi PN juntura izatea bada ere, bi juntura horiek oso modu desberdinean gauzatzen dira, bai transistore bipolarrekin alderatuta, bai eta FET izena daramaten bi transistore-moten artean alderatuta ere. Bi FET mota horiek honako hauek dira: JFET, eremu efektuzko juntura transistoreak, eta FET-MOS, metal-oxido-erdieroale (***M****etal* - ***O****xide*- ***S****emiconductor*) eremu efektuzko transistoreak. Sinplifikatzearren, azken hauei besterik gabe MOS izena ematen zaie. (Ikus 3. eranskina.) Ondoko bi azpiataletan bi transistore-mota horien ezaugarriak (ikurrak, ezaugarri-kurbak, portaera-ekuazioak eta modeloak) azalduko ditugu, modu laburrean.

JFET eremu-efektuzko juntura transistoreak

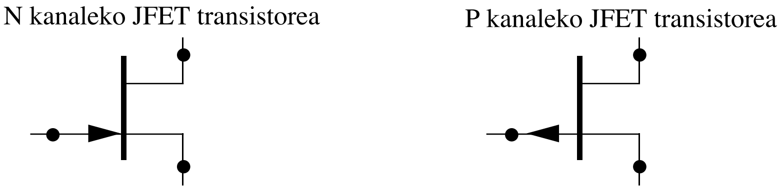
Ikurrak:



Terminalen izenak honako hauek dira: *G* atea (*gate*) izenekoa kontrol-terminala da; beraz, transistore bipolarretako oinarriaren parekoa da. *S* iturria (*source*) izenekoak karga--eramaleak sortzen edo igortzen ditu; beraz, transistore bipolarretako igorlearen parekoa da. *D* hobia (*drain*) izenekoak iturriak bidalitako karga-eramaleak jasotzen ditu; beraz, transistore bipolarretako kolektorearen parekoa da.

Transistore bipolarretan bezala, geziaren noranzkoak adierazten du zein motatako transistorea den, baina kasu honetan gezia atearen gainean jartzen da: gezia atetik barrurantz zuzenduta baldin badago, N kanaleko transistorea da; gezia atetik kanporantz zuzenduta baldin badago, berriz, P kanaleko transistorea da.

Transistore bipolarren antzera, ikurra simetrikoa da; hots, ez dago bereizterik iturriaren eta hobiaren artean, terminalei letrarik esleitzen ez badiegu. Baina transistore bipolarretan ez bezala, non transistore-mota adierazten duen gezia beti igorlean dagoen, hemen geziak ez du bat ere laguntzen *S* eta *D* terminalak bereizten, beti atean baitago. Horrexegatik, batzuetan, honako ikur hauek erabiltzen dira, non atea iturritik hurbilago irudikatzen den. Ikur hauek oso irudi txikiak egin behar direnean erabiltzen dira batik bat, terminalen letrak jartzeak irudiaren garbitasuna honda baitezake.

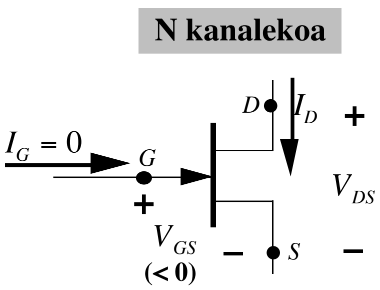


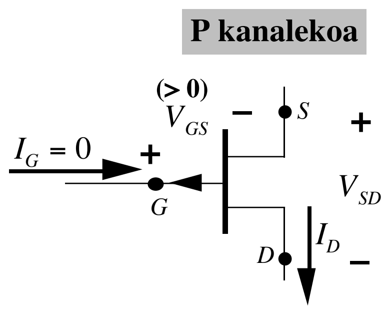
Transistore hauen portaera egonkorra analizatzeko, hiru magnitude baino ez dira erabiltzen: I_D, V_{DS} eta V_{GS} (kontrol-tentsioa).

Arrazoia funtzionamendu-moduan datza: transistore hauen portaera egokia lortzeko, bi PN junturak alderantziz polarizatu behar dira; hots, $V_{GS} < 0$ izan behar da N kanaleko transistoreetan eta $V_{GS} > 0$, aldiz, P kanaleko transistoreetan; modu horretan, iturriak bidalitako karga-eramaleak (elektroiak N kanaleko transistorean, eta hutsuneak P kanaleko transistorean), V_{DS} tentsioaren eraginez, zuzenean mugituko dira hobirantz, I_D korrontea sortzeko, eta hori izango da kanala zeharkatuko duen korronte bakarra, PN junturak A.P. baitaude.

Hori dela eta, ateko korrontea nulua da beti: $I_G = 0$. (Bestela, PN junturak zuzenki polarizatuz gero, beste funtzionamendu-modu bat izango genuke, non, transistore bipolarren antzera, bi motetako karga-eramaleak mugituko bailirateke, baina hori ez litzateke izango JFET transistorea.) Esandakoa kontuan hartuz, transistoreari Kirchhoff-en korronteen legea aplikatuz, honako hau ondorioztatzen da: $I_S = I_D$. Horrexegatik, hain zuzen, korronte bakar bat nahikoa da JFET transistorearen portaera islatzeko.

Beste aldetik, bi tentsio baino ez dira behar, zeren hirugarren tentsioa (V_{GD}, alegia) beste bien kendura baita, Kirchhoff-en tentsioen legea ere betetzen baita hiru terminalen artean, transistore bipolarrekin ikusi dugun legez.

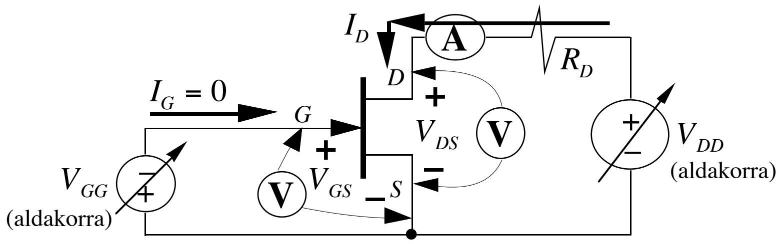




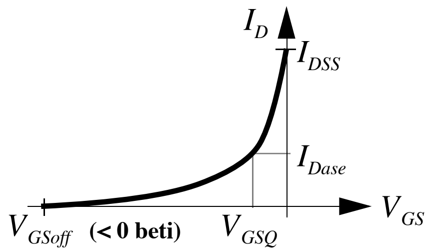
Transistore bipolarren antzera, N kanaleko eta P kanaleko transistoreen arteko desberdintasunak korronteen noranzkoak eta tentsioen zeinu kontrajarriak direnez gero, N kanalekoa soilik aztertuko dugu hemendik aurrera.

Beraz, transistore hauen operazio-puntua honako hau izango da: $Q(V_{GSQ}, I_{DQ}, V_{DSQ})$. Hiru magnitude horiek, espero genezakeen legez, erlazionatuta daude; zehatzagoak izateko, esan dezagun I_D korrontea bi tentsioen menpekoa dela: $I_D = f(V_{GS}, V_{DS})$.

Funtzio matematiko hori bilatzeko, ondoko irudiko zirkuitua erabiltzen da, N kanaleko transistorearen portaera analizatzeko, eta esperimentalki bi kurba lortzen dira. Alde batetik, I_D korrontearen gaineko kontrol-tentsioaren eragina aztertzen da, V_{DS} tentsioa konstante mantenduz transistorea asetasunean egon dadin; kurba horri transferentzia-kurba deritzo, irteerako magnitude baten gaineko sarrerako magnitude baten eragina adierazten baitu. Ondoren, I_D korrontearen gaineko beste tentsioaren eragina aztertzen da, kontrol-tentsioaren zenbait baliotarako; kurba hau da N kanaleko JFET transistorearen ezaugarri-kurba.



Transferentzia-kurba: $I_D = f(V_{GS})$, V_{DS} konstante izanik, transitorea asetasunean egoteko modukoa (hots, geroxeago ikusiko dugun legez, $V_{DS} > V_{DSase}$).



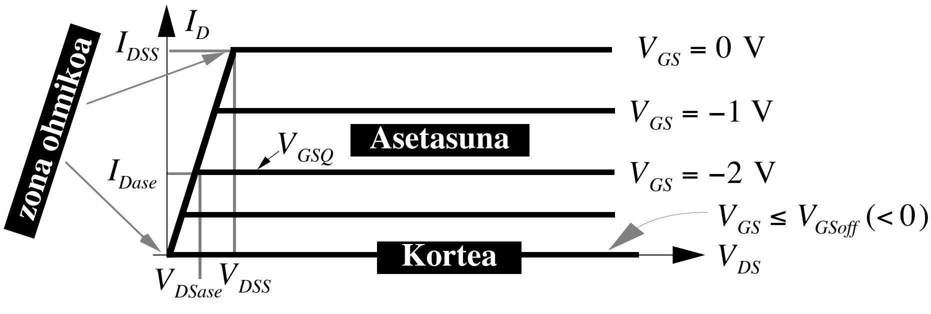
Fabrikatzaileak kurban adierazitako bi parametroen balioak eman ohi ditu: I_{DSS}, asetasun-korrontea da, hots, kanaletik igaro daitekeen korronterik handiena, $V_{GS} = 0$ denean, hau da, junturak ia-ia zuzenki polarizatuta daudenean. V_{GSoff}, berriz, itotze-tentsioa da; balio horrekin kanala desagertu egiten da, eta, ondorioz, ez dago korrontea pasatzeko biderik; orduan, ateak kanala ito egin duela esaten da (kontuan izan $V_{GSoff} < 0$ dela).

Transferentzia-kurba hori parabola bat dela kontuan hartuz, oso erraza da kurba horren ekuazioa honako hau dela matematikoki frogatzea, non V_{GS} eta V_{GSoff} negatiboak diren.

$$I_D = I_{DSS} \cdot \left[1 - \frac{V_{GS}}{V_{GSoff}}\right]^2$$

Ekuazio horren bitartez, V_{GSQ} tentsio jakin bati dagokion I_{Dase} asetasun-korrontea kalkulatzen da, eta balio hori oso baliagarria da JFET transistorearen funtzionamendu-zonak bereizteko, oraintxe bertan ikusiko dugun legez.

Ezaugarri grafikoa: $I_D = f(V_{DS}, V_{GS})$. Kurba idealak honako itxura honetakoak dira:



Agerikoa denez, kurbak transistore bipolarrenak bezalakoak dira. Ondorioz, JFET transistoreetarako ere hiru funtzionamendu-zona daude, irudian islatu ditugunak hain zuzen ere:

Kortea, kanala itota dagoenean, hots, $V_{GSQ} \leq V_{GSoff}$ (< 0) denean, orduan $I_{DQ} = 0$ baita.

Zona ohmikoa, $V_{GSoff} \leq V_{GSQ} \leq 0$ eta $V_{DSQ} \leq V_{DSase}$ den bitartean, orduan kanalak erresistentzien antzera jokatzen baitu.

Asetasuna, $V_{GSoff} \leq V_{GSQ} \leq 0$ eta $V_{DSQ} \geq V_{DSase}$ denean, orduan korrontea konstante mantentzen baita nahiz eta V_{DS} handitu, kanala hobiaren aldean estuegia delako korronte gehiago pasatzen uzteko.

(Hemen, transistore bipolarren funtzionamendu-zonen izenekin alderatuta dauden desberdintasunak azpimarratu behar ditugu. Izan ere, transistore bipolarretan asetasuna zena JFET transistorean zona ohmikoa da, eta bipolarretan zona aktibo arrunta zena JFET transistorean asetasuna da; beraz, adi egon eta ez nahastu izenak!)

Kurbetan ageri den beste parametroa, V_{DSS}, esperimentalki kalkulatzen da, eta kanala hobiaren aldetik itotzeko behar den tentsioa da: $V_{DSS} = |V_{GSoff}| > 0$. Beste aldetik, zona ohmikoaren eta asetasunaren artean bereizteko dagoen baldintzan agertzen den V_{DSase} parametroa linealki kalkulatzen da, I_{DSS} eta V_{DSS} balioak kontuan hartuz. Izan ere, lehenago aipatu dugun bezala, transferentzia-kurbaren ekuazioa kontuan hartuz, V_{GSQ} tentsio jakin bati dagokion I_{Dase} korrontea kalkulatzen da. Balio hori jakinda, V_{DSase} delakoa hiruko erregela bat eginez ateratzen da:

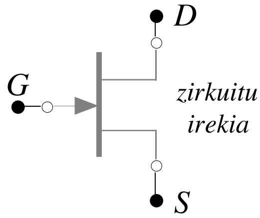
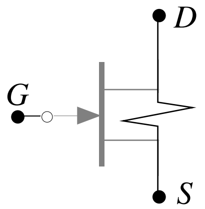
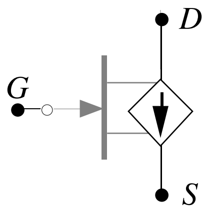
$$V_{DSase} = \frac{I_{Dase}}{I_{DSS}} \cdot V_{DSS} \qquad \rightarrow \qquad V_{DSase} = \left[1 - \frac{V_{GSQ}}{V_{GSoff}}\right]^2 \left|V_{GSoff}\right|$$

Beraz, JFET motako transistore baterako, zona ohmikoaren eta asetasunaren arteko muga, V_{DSase} alegia, ez da konstantea, atean ezartzen zaion uneko tentsioaren menpekoa baizik.

Laburpen gisa, hona hemen hiru funtzionamendu-zona horietan betetzen diren ekuazioak eta baldintzak:

Funtzionamendu-zona	**Kortea**	**Zona ohmikoa**	**Asetasuna**
Ekuazioak:	$I_D = 0$	$I_D = \frac{V_{DS}}{R_{DS}}$ non: $R_{DS} = \frac{V_{DSS}}{I_{DSS}}$	$I_D = KI_{DSS}$ non: $K = \left[1 - \frac{V_{GSQ}}{V_{GSoff}}\right]^2$
Baldintzak:	$V_{GSQ} \leq V_{GSoff}$ (< 0)	$V_{GSoff} \leq V_{GSQ} \leq 0$ eta $V_{DSQ} \leq V_{DSase}$	$V_{GSoff} \leq V_{GSQ} \leq 0$ eta $V_{DSQ} \geq V_{DSase}$

Hona hemen, orain, ekuazio horiei dagozkien modeloak:

	Modeloa zirkuituan	Ekuazioak	Baldintzak
Kortean:		$I_D = 0$, $I_G = 0$	$V_{GS} \le V_{GSoff} \le 0$
Zona ohmikoan:		$I_G = 0$, $I_D = \dfrac{V_{DS}}{R_{DS}}$	$V_{GSoff} \le V_{GS} \le 0$, $V_{DS} \le K\lvert V_{GSoff}\rvert$
Asetasunean:		$I_G = 0$, $I_D = K I_{DSS}$	$V_{GSoff} \le V_{GS} \le 0$, $V_{DS} \ge K\lvert V_{GSoff}\rvert$

$$R_{DS} = \frac{\lvert V_{GSoff}\rvert}{I_{DSS}} \qquad K = \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GSoff}}\right)^2$$

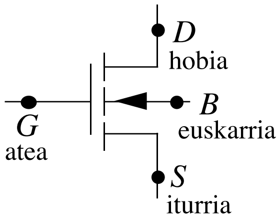
MOS transistoreak

3. eranskinean esan bezala, MOS transistoreen artean, egitura fisikoaren arabera, bi mota desberdin bereizten dira: zabaltze-motako MOS transistorea (arruntena) eta estuagotze-motako MOS transistorea.

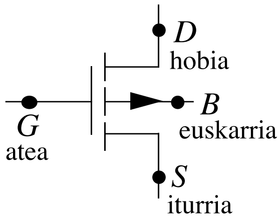
Mota horietako bakoitzean, lehen bezala, beste bi azpimota daude, kanalaren arabera: N kanaleko MOS transistorea, **NMOS** laburtzearren, eta P kanaleko MOS transistorea, **PMOS**.

Ikurrak:

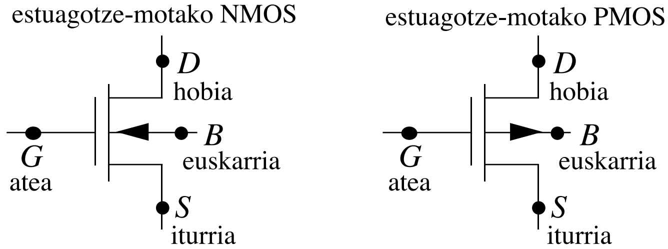
zabaltze-motako NMOS



zabaltze-motako PMOS



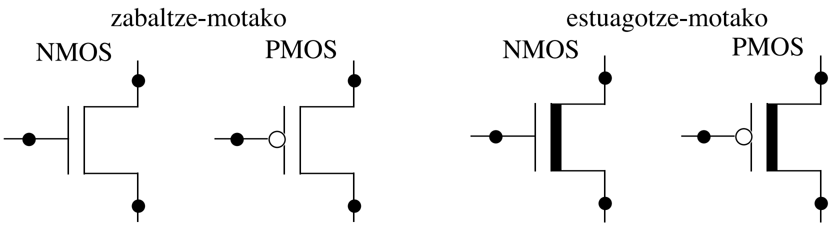
Ikurrak:



Agerikoa denez, ikurrak oso antzekoak dira; izan ere, zabaltze-motako eta estuagotze--motako transistoreen ikurren arteko desberdintasun bakarra (geziaren noranzkoaz aparte, horrek bakarrik bereizten baitu kanal-mota, PMOS edo NMOS, eta berdina da zabaltze-motako zein estuagotze-motako transistoreetarako) honako hau da: zabaltze-motako transistoreen ikurrean, kanala adierazteko hiru marra bereizirik agertzen diren bitartean, estuagotze-motakoen ikurrean marra luze bakarra agertzen da. Arrazoia egitura fisikoan datza: estuagotze-motako transistoreetan beti dago *D* eta *S* terminalak lotzen dituen kanal bat; zabaltze-motako transistoreetan, berriz, *D* eta *S* zonak bereizirik daude, independenteak dira, alegia; bien artean ez dago kanalik, euskarria baizik, eta korrontea pasatzeko moduko kanala ateari ezarritako kanpoko polarizazioaren arabera sortzen da (ikus 3. eranskina).

Terminalen izenei dagokienez, JFET transistorearenen berdinak dira: *G*, *S* eta *D*; baina *B* (euskarria, *bulk*) izenekoa berria da: ez da transistorearen portaeran parte hartzen duen terminal bat, MOS transistorea eraikitzeko erabilitako euskarria baizik. Hori dela eta, normalean beste terminaletariko batekin lotzen da (bereziki, erreferentzia-puntu gisa hartutako terminalarekin, normalean *S*).

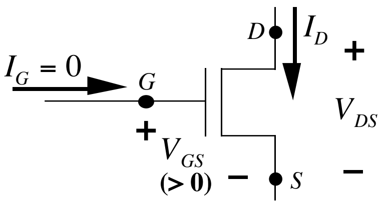
Zirkuitu baten eskema oso espazio txikian irudikatu behar denean, adierazitako ikurrak nahikoa konplexuak dira; horregatik, honako ikur sinplifikatu hauek erabiltzen dira:



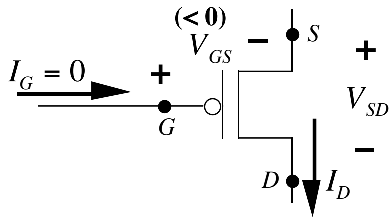
Transistore hauen portaera egonkorra analizatzeko, JFET transistoreekin bezala, hiru magnitude baino ez dira erabiltzen: I_D, V_{DS} eta V_{GS} (kontrol-tentsioa).

Arrazoia JFET transistoreen kasuan esandako bera da. Desberdintasun bakarra hauxe da: $I_G = 0$ da beti, atea elektrikoki isolatuta dagoelako erdieroaletik, MOS egiturako oxido geruza dela eta. (Horrexegatik, IGFET izena ere ematen zaie: *Isolated Gate* FET.) Kasu honetan, beraz, ez dago zertan kezkaturik junturen polarizazioaz, ez baita funtzionamendu txarra gertatuko. Dena den, junturen polarizazio egokia bermatu behar da *S* eta *D* terminalen arteko kanala sortzeko (zabaltze-motako transistoreetan) edo dagoena estuagotzeko (estuagotze-motako transistoreetan). Hori dela eta, *G* terminala tentsio egokiarekin konektatu behar da:

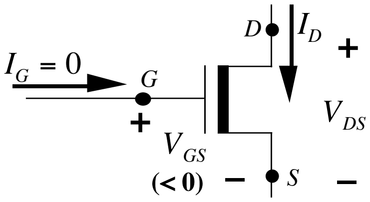
zabaltze-motako NMOS



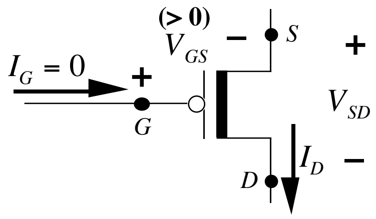
zabaltze-motako PMOS



estuagotze-motako NMOS



estuagotze-motako PMOS

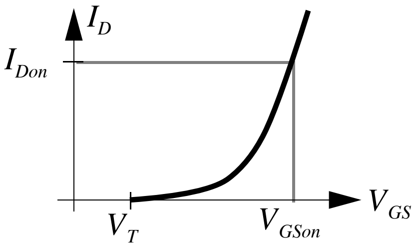


Lehen bezala, N kanaleko eta P kanaleko transistoreen arteko desberdintasunak korronteen noranzkoak eta tentsioen zeinu kontrajarriak direnez gero, N kanalekoa soilik aztertuko dugu hemendik aurrera.

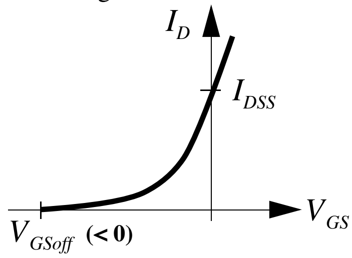
Transistore hauen operazio-puntua honako hau izango da: $Q(V_{GS}, I_D, V_{DS})$. JFET transistoreen antzera, $I_D = \mathrm{f}(V_{GS}, V_{DS})$ funtzioa esperimentalki bilatzen da, antzeko zirkuitu bat erabiliz, eta hemen ere, lehengo bi kurbak lortzen dira.

Transferentzia-kurba: $I_D = f(V_{GS})$, V_{DS} = konstantea (transistorea asetasunean).

zabaltze-motako NMOS

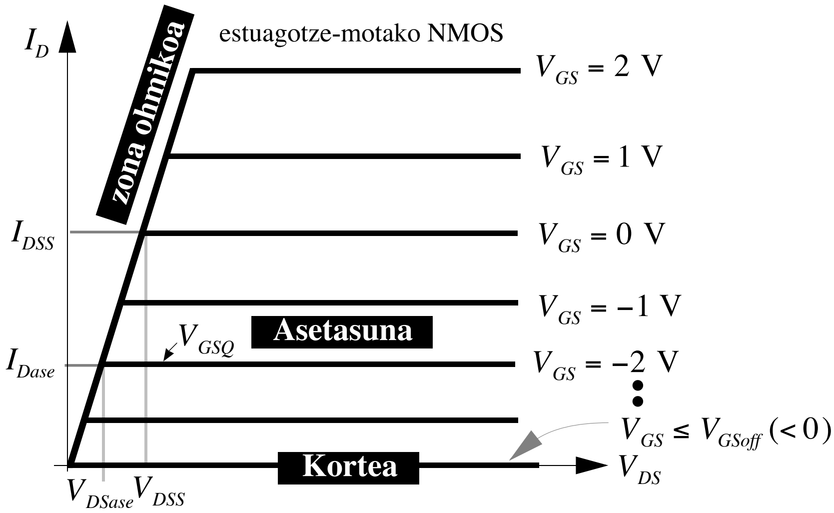


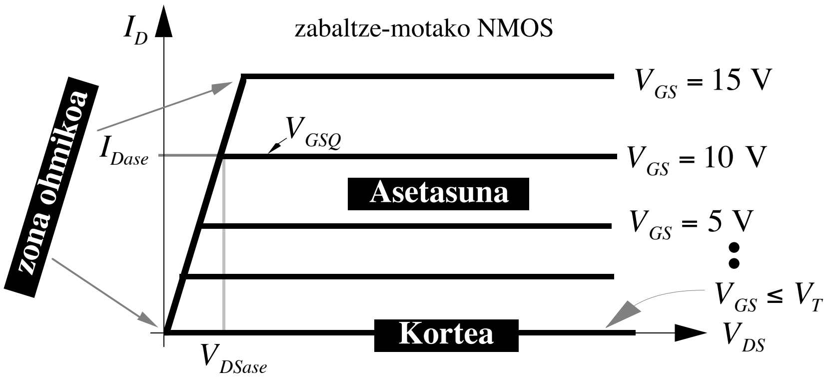
estuagotze-motako NMOS



Agerikoa denez, estuagotze-motako transistorearen kurba JFET transistorearenaren berdina da, baina MOS transistorean posible da V_{GS} tentsio positiboak ezartzea, horrek ez baitu funtzionamendu egokia oztopatzen, JFET transistoreetan ez bezala. Zabaltze-motako transistorearen kurba, berriz, desplazatuta dago beste bi horiekin alderatuta, kasu horretan lehendabizi kanala sortu behar baita, V_T tentsioa gaindituz, hortik aurrera korrontea eroan dezan. Fabrikatzaileak, JFET transistoreekin bezala, kurbetan adierazitako parametroen balioak eman ohi ditu: I_{DSS} asetasun-korrontea; V_{GSoff}, itotze-tentsioa (< 0); V_T, atari-tentsioa; I_{Don} eta V_{GSon}. Parametro horiez gain, fabrikatzaileak R_{DS} kanaleko erresistentziaren balioa ere eman ohi du zabaltze-motako transistoreen kasuan.

Ezaugarri grafikoa: $I_D = f(V_{DS}, V_{GS})$. Kurba idealak honako itxura honetakoak dira:





Ez dago esan beharrik, dagoeneko irudietan islatzen baita, JFET transistoreen hiru funtzionamendu-zona berdinak azaltzen direla: kortea, zona ohmikoa eta asetasuna.

Estuagotze-motako MOS transistoreen portaera-ekuazioak eta modeloak, JFET transistorearenak dira, guztiz berdinak, kurbetan parametro berak azaltzen baitira. Desberdintasun bakarra hauxe da: V_{GS} tentsioa positiboa ere izan daiteke. Hori dela eta, JFET transistorearen modeloekin alderatuta aldatzen den gauza bakarra, zona ohmikoan edo asetasunean (hots, kortean ez) egoteko baldintza da: JFET transistorean $V_{GSoff} \leq V_{GSQ} \leq 0$ jartzen duen tokian, estuagotze-motako transistorerako $V_{GSoff} \leq V_{GSQ}$ besterik ez dugu idatzi behar. Baina beste baldintza, zona ohmikoaren eta asetasunaren artean bereizteko balio duena, hain zuzen, berdin mantentzen da, hots, $V_{DSQ} \leq V_{DSase}$ edo $V_{DSQ} \geq V_{DSase}$. Horregatik, ekuazioak eta modeloak guztiz berdinak direnez gero, ez ditugu hemen berriro errepikatuko (ikusi 400 eta 401. orrialdeak).

Haatik, zabaltze-motako MOS transistorearen portaera-ekuazioak oso antzekoak izan arren, desberdintasun txikiak daude, oraintxe ikusiko dugun legez.

Lehendabiziko desberdintasuna, transferentzia-kurbari dagokion ekuazioa da, ardatz horizontalean eskuinerantz desplazatuta baitago besteekin alderatuta. Hona hemen, beraz, transistorea asetasunean dagoenean I_D korrontea kalkulatzeko erabili behar dugun ekuazioa:

$$I_D = I_{Don} \cdot \left(\frac{V_{GS} - V_T}{V_{GSon} - V_T} \right)^2$$

Ekuazio horren bitartez, lehen bezala, V_{GSQ} kontrol-tentsioaren balio jakin bati dagokion asetasun-korrontea, I_{Dase}, kalkulatzen da.

Beste aldetik, asetasunaren eta zona ohmikoaren arteko muga V_{DSase} tentsioaren bitartez adierazten da, eta dagokion balioa kalkulatzeko, I_{Dase} korronteaz gain, fabrikatzaileak emandako R_{DS} erresistentziaren balioa erabili behar da, honelaxe:

$$V_{DSase} = R_{DS} \cdot I_{Dase}$$

Laburpen gisa, hona hemen zabaltze-motako MOS transistorearen hiru funtzionamendu--zona horietan betetzen diren ekuazioak eta baldintzak:

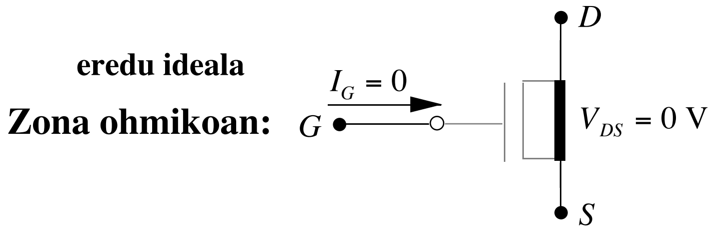
Funtzionamendu-zona	**Kortea**	**Zona ohmikoa**	**Asetasuna**
Ekuazioak:	$I_D = 0$	$I_D = \frac{V_{DS}}{R_{DS}}$	$I_D = KI_{Don}$ $K = \left(\frac{V_{GS} - V_T}{V_{GSon} - V_T} \right)^2$
Baldintzak:	$V_{GSQ} \leq V_T$	$V_{GSQ} \geq V_T$ eta $V_{DSQ} \leq V_{DSase}$	$V_{GSQ} \geq V_T$ eta $V_{DSQ} \geq V_{DSase}$

Zabaltze-motako MOS transistoreari dagozkion modeloak JFET transistorerako ikusitako berberak dira, non ekuazioak soilik aldatzen diren.

Bukatzeko, aurkez ditzagun zabaltze-motako MOS transistoreen modelo idealak, horiexek baitira seinale digitalak hartzen dituzten zirkuituen portaera aztertzeko erabiltzen direnak.

Transistore bipolarren kasuan, zirkuitu digitaletan kortean zein asetasunean funtzionatzen dutela esan dugu, seinale digitalen bi balioen arabera (ikus 8. gaia); bestalde, horien modelo idealak zirkuitu irekia eta zirkuitulaburra dira, hurrenez hurren.

MOS transistoreen kasuan antzeko zerbait gertatzen da, baina hauek kortean zein zona ohmikoan funtzionatzen dute seinale digitalen bi balioetarako. Kortearen modelo ideala zirkuitu irekia da, lehen bezala; zona ohmikoarena erresistentzia bat litzatekeen arren, oso erresistentzia txikia izango dela suposatzen da, eta horregatik, zirkuitulaburra erabiltzen da zona ohmikoaren eredu ideal gisa:



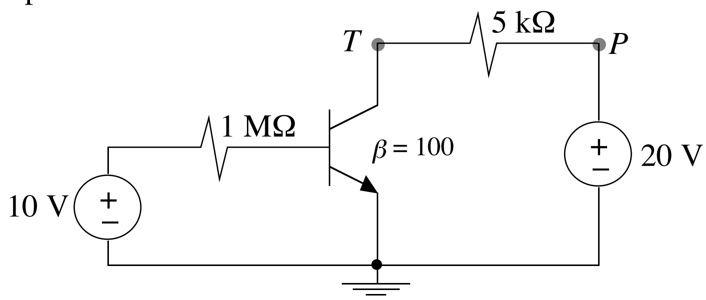
MOS transistorearen eredu gisa zirkuitulaburra erabiltzean, errorea nahiko handia izan daitekeen arren (R_{DS} erresistentzia kΩ batzuetakoa izan baitaiteke), portaera digitalari dagokionez ez du garrantzi handirik, bilatzen dena ez baita tentsioen balio zehatzak lortzea, gutxi gorabeherako balioak lortzea baizik; hots, zirkuitu digital batean, sarrerako tentsioaren balio jakin bati dagokion irteerako tentsioaren balioa altua ala baxua izango den jakin nahi da soilik.

Ariketetan ikusiko dugu nola erabaki zirkuitu jakin batean zein funtzionamendu-zonatan dagoen transistore bat (bipolarra zein FET), sarrerako tentsioaren arabera.

B) Ariketa ebatziak

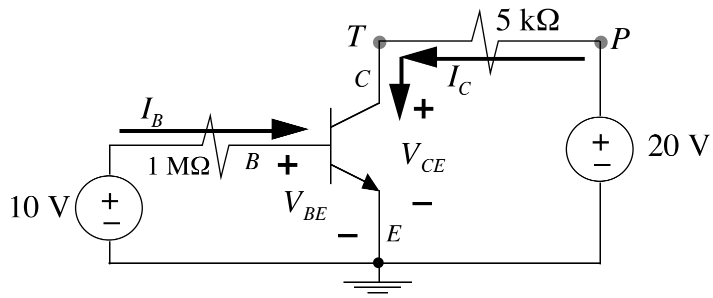
7.1. Transistore bipolarrak

1. Analiza ezazu irudiko zirkuitua, hots, kalkula ezazu transistorearen operazio-puntua: $Q(V_{BE}, I_B, V_{CE}, I_C)$. Zenbatekoa da P eta T puntuen arteko potentzial-diferentzia?



Ebazpena:

Agerikoa da irudiko zirkuitua teoria azaltzeko erabili dugun zirkuitu bera dela, hots, transistoredun zirkuiturik sinpleena, bi maila besterik ez duelako, transistorea elikatzeko behar den maila-kopururik txikiena, alegia. Hori dela eta, transistorearenak dira zirkuituaren analisia egiteko behar diren magnitude bakarrak. Hona hemen:



Beraz, lau dira kalkulatu beharreko magnitudeak: V_{BE}, I_B, V_{CE} eta I_C (gogoratu teorian V_{BC} eta I_E magnitudeei buruz ondorioztatu duguna). Ondorioz, lau ekuazio behar dira: bi transistorearen portaera-ekuazioak izango dira, funtzionamendu-zonaren menpekoak, eta beste biak zirkuitutik atera beharko ditugu. Azken hauek transistorearen funtzionamendu-zonaren independente izan daitezke baldin eta lau magnitudeak erabiltzen baditugu, hots, transistorea eredu partikular batez ordezkatzen ez badugu.

Hori dela eta, zirkuituari dagozkion ekuazioak idazten hasiko gara; horretarako, kasu honetan, nahikoa dugu sarrerako eta irteerako mailetan KTL aplikatzearekin. Hona hemen (zalantzarik izanez gero, ikusi 385. orrialdean nola lortu ekuazio horiek):

KTL sarrerako mailan: ❶ $10 = 1I_B + V_{BE}$ (erresistentzia MΩ-etan → I_B μA-tan)

KTL irteerako mailan: ❷ $20 = 5I_C + V_{CE}$ (erresistentzia kΩ-etan → I_C mA-tan)

Orain, beste bi ekuazioak lortzeko, transistorearen funtzionamendu-zonari buruzko hipotesia egin behar dugu.

Diododun zirkuituetan bezalaxe, hemen ere, hipotesia egiteko, zirkuitua aldez aurretik azter daiteke, ea funtzionamendu-zonari buruz pistaren bat ematen digun, lana errazteko asmoz; edo bestela, ezer begiratu gabe, edozein hipotesirekin has daiteke. Agerikoa da lehenengoa egiteko eskarmentua behar dela, hots, transistoredun zirkuitu asko analizatu behar direla, zirkuitua begiratze hutsarekin balizko funtzionamendu-zonari buruzko aztarnak antzemateko. Horregatik, une honetan transistorea nola dagoen jakiterik ez dagoela suposatuko dugu, eta zerotik abiatuko gara.

Transistorearen funtzionamendu-zonari buruzko hipotesia egiteko hiru aukera (kortea, zona aktibo arrunta eta asetasuna) daudenez gero, nondik hasi? Bada, pistarik ez daukagunean, bost axola nondik hasi. Horregatik, sistematikoki egin dezakegu: lehendabizi, transistorea kortean dagoela suposatuko dugu; kalkuluak egin ondoren, hipotesiari dagokion baldintza betetzen ez bada, orduan zona aktibo arruntean dagoela suposatuko dugu; berriro ere egiaztapena egitean baldintza betetzen ez bada, azkenik, transistorea asetasunean dagoela suposatuko dugu. Aurreko bi baldintzak betetzen ez direla ikusirik, logikoena da pentsatzea azkena beteko dela; eta horrela izango da bidean zehar hanka sartu ez badugu. Horregatik, hain zuzen, hirugarren hipotesiari dagokion baldintza ere egiaztatzea komeni da: betetzen ez bada, nonbait hanka sartu dugun seinale, transistorea hiru funtzionamendu-zonetariko batean egongo baita.

1. hipotesia. Transistorea **kortean**:

Ekuazioak: ❸ $I_B = 0$ ❹ $I_C = 0$

Baldintza: $V_{BE} \leq 0{,}7$ V

Ondorioz, honako hau da ebatzi beharreko ekuazio-sistema:

❶ $10 = 1I_B + V_{BE}$

❷ $20 = 5I_C + V_{CE}$

❸ $I_B = 0$

❹ $I_C = 0$

Soluzioa: $I_B = 0$ mA, $I_C = 0$ mA, $V_{BE} = 10$ V, $V_{CE} = 20$ V

Orain, hipotesia egiaztatzeko unea da. Agerikoa da: V_{BE} = 10 V > 0,7 volt atera denez gero, transistorea kortean egoteko baldintza ez da betetzen. Ondorioz, bigarren hipotesia egin beharko dugu.

Dena den, aurrera jarraitu aurretik, lehen aipatu ditugun aztarnak azpimarratu nahi ditugu. Horretarako, sarrerako mailan ezarritako tentsioaren balioa ezezaguna dela suposatuko dugu, v_i, alegia, eta sarrerako tentsio horren balio maximoak transistorea kortean egoteko zenbatekoa izan behar duen kalkulatuko dugu:

KTL sarrerako mailan: $v_i = 1I_B + V_{BE}$, kortean $I_B = 0 \rightarrow V_{BE} = v_i$

korteko baldintza betearaziz: $V_{BE} = v_i \leq 0{,}7$ V

Hots, sarrerako tentsioa 0,7 volt baino txikiagoa baldin bada, transistorea kortean egongo da; bestela, sarrerako tentsioa 0,7 volt baino handiagoa denean alegia, transistorea ez da kortean egongo, baina oraingoz ez dago esaterik Z.A.A.-ean edo asetasunean egongo den.

2. hipotesia. Transistorea **zona aktibo arruntean (Z.A.A.)**:

Ekuazioak: ❸ $V_{BE} = 0{,}7$ V ❹ $I_C = \beta I_B$

Baldintza: $V_{CE} \geq 0{,}2$ V

Ondorioz, honako hau da ebatzi beharreko ekuazio-sistema:

❶ $10 = 1I_B + V_{BE}$ (I_B μA-tan)

❷ $20 = 5I_C + V_{CE}$ (I_C mA-tan)

❸ $V_{BE} = 0{,}7$

❹ $I_C = 100I_B$ (**ADI**!: I_B μA-tan → I_C ere μA-tan)

Soluzioa: $I_B = 9{,}3$ μA, $I_C = 0{,}93$ mA, $V_{BE} = 0{,}7$ V, $V_{CE} = 15{,}35$ V

Hipotesiaren egiaztapena: $V_{CE} = 15{,}35 \text{ V} > 0{,}2$ V; beraz, 2. hipotesia zuzena da.

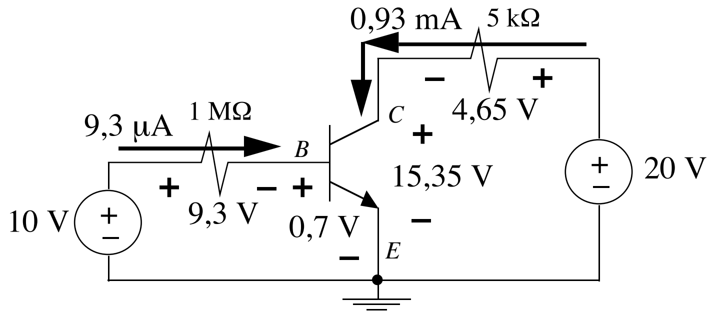
Ondorioz, bigarren hipotesiarekin lortutako soluzioa zuzena da, eta transistorea Z.A.A.-ean dagoela eta bere operazio-puntua honako hau dela esan dezakegu:

$$\boxed{Q(I_B = 9{,}3\ \mu\text{A};\ V_{BE} = 0{,}7\ \text{V};\ I_C = 0{,}93\ \text{mA};\ V_{CE} = 15{,}35\ \text{V})}$$

Ondoren, *P* eta *T* puntuen arteko potentzial-diferentzia kalkula dezakegu. Irudian, agerikoa da *P* eta *T* puntuak kolektoreko 5 kΩ-eko erresistentziaren muturrak direla. Hori dela eta, Ohm-en legea aplikatuz kalkulatuko dugu V_{PT}:

$$V_{PT} = 5I_C \quad \rightarrow \quad \boxed{V_{PT} = 4{,}65\ \text{V}}$$

Hona hemen, zirkuituaren soluzioa grafikoki:



Bukatzeko, potentzien balantzea egingo dugu, emaitza zuzena dela egiaztatzeko. Horretarako, zirkuituko elementuak banan-banan aztertuko ditugu mailaz maila:

Sarrerako mailan:

10 V-eko tentsio-sorgailuak, $P_{10\text{V}} = 10\ \text{V} \cdot 9{,}3\ \mu\text{A} = 93\ \mu\text{W}$ (emandakoa)

1 MΩ-eko erresistentziak, $P_{1\text{M}\Omega} = 9{,}3\ \text{V} \cdot 9{,}3\ \mu\text{A} = 86{,}49\ \mu\text{W}$ (xurgatutakoa)

Transistorearen *BE* junturak, $P_{TBE} = 0{,}7\ \text{V} \cdot 9{,}3\ \mu\text{A} = 6{,}51\ \mu\text{W}$ (xurgatutakoa)

Potentzien balantzea sarrerako mailan: $\Sigma P_e = 93\ \mu\text{W} = \Sigma P_x = 86{,}49\ \mu\text{W} + 6{,}51\ \mu\text{W}$

Irteerako mailan:

20 V-eko tentsio-sorgailuak, $P_{20\text{V}} = 20\ \text{V} \cdot 0{,}93\ \text{mA} = 18{,}6\ \text{mW}$ (emandakoa)

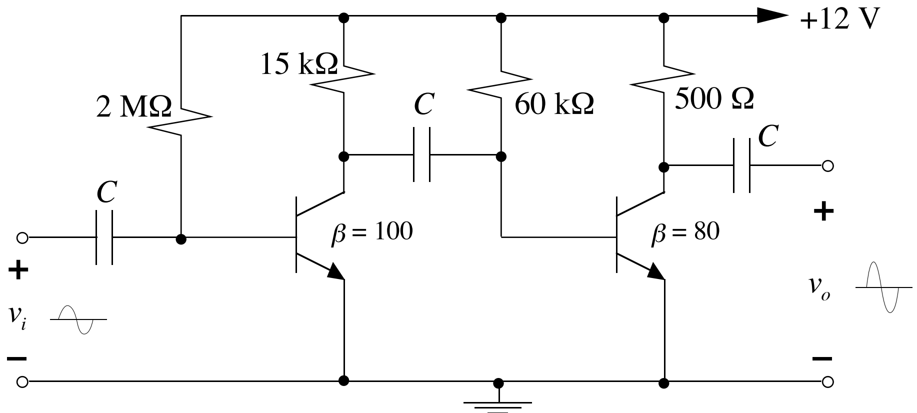
5 kΩ-eko erresistentziak, $P_{5\text{k}\Omega} = 4{,}65\ \text{V} \cdot 0{,}93\ \text{mA} = 4{,}32\ \text{mW}$ (xurgatutakoa)

Transistorearen *BC* junturak, $P_{TCE} = 15{,}35\ \text{V} \cdot 0{,}93\ \text{mA} = 14{,}28\ \text{mW}$ (xurgatutakoa)

Potentzien balantzea irteerako mailan: $\Sigma P_e = 18{,}6\ \text{mW} = \Sigma P_x = 4{,}32\ \text{mW} + 14{,}28\ \text{mW}$

Potentzien balantze horietatik gauza pare bat azpimarratu behar dugu. Hasteko, zirkuituko potentzien balantzea egitean, balantze bakarra egin daiteke, elementu guztiak batera kontuan hartuz, edo bestela, hemen egin dugun moduan, bi balantze egin daitezke, sarrerarako eta irteerarako bana, gauza bera baita. Bigarren, agerikoa da sarrerako mailan dagoen tentsio-sorgailuak emandako potentzia arbuiagarria dela irteerako mailako sorgailuak emandakoarekin alderatuta, hain zuzen ere berrehun aldiz txikiagoa baita! Hori dela eta, transistoreak sarreran eta irteeran potentzia xurgatzen duen arren, normalean sarrerako junturan xurgatutakoa mezprezatu egiten da, hain baita txikia. Ondorioz, transistoreak xurgatutako potentzia soilik kalkulatu nahi denean, $P_T = I_C \cdot V_{CE}$ dela esaten da.

2. Analiza ezazu irudiko zirkuitua egoera egonkorrean:

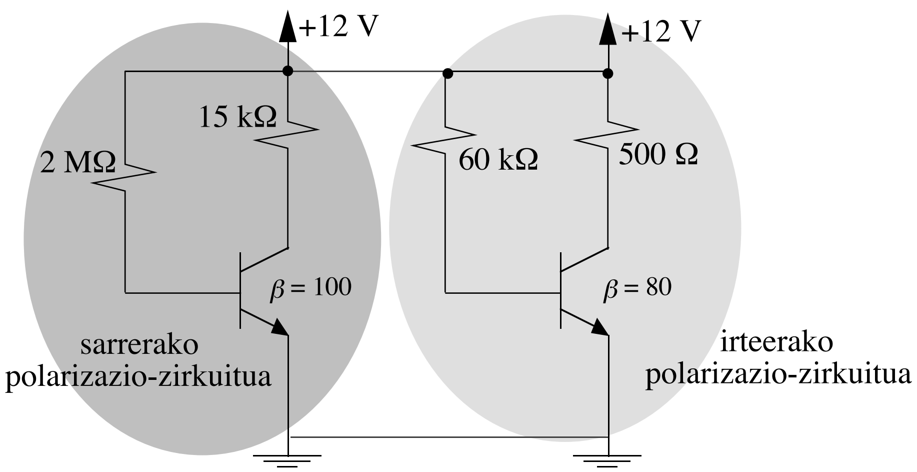


Ebazpena:

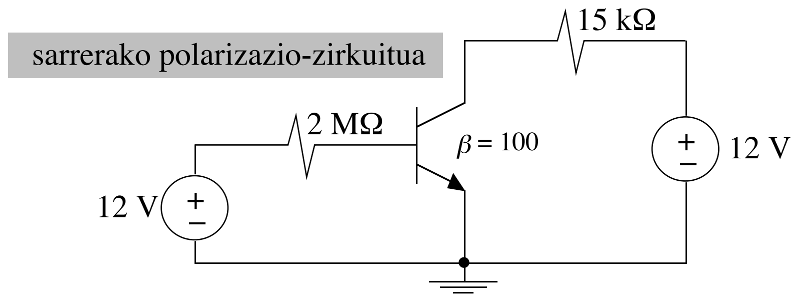
Lehenik eta behin, honako hau azpimarratu nahi dugu: irudiko zirkuitua oso arrunta da transistoredun anplifikagailuetan, non, nahi den anplifikazioa lortzeko, hainbat "etapa" konektatzen diren bata bestearen ondoren; goiko irudikoak, beraz, zirkuitu anplifikatzaile baten bi "etapa" dira. Irudian agerikoa da bi etapak kondentsadore baten bitartez konektatuta daudela; bestalde, anplifikatu nahi den seinalea (denboran zehar aldatzen den v_i) ezkerreko etapako oinarrian ezartzen da, beste kondentsadore baten bidez, eta seinale anplifikatua (v_o) eskuineko transistorearen kolektorean lortzen da, beste kondentsadore baten bidez. Hori dela eta, ezkerreko etapa sarrerako etapa da; eta eskuinekoa, berriz, irteerakoa.

Beraz, horrelako zirkuituak denboran zehar aldatzen diren seinale txikiak anplifikatzeko erabiltzen dira. Baina anplifikatzeko ezaugarri hori ez da konputagailuen oinarri diren zirkuitu digitaletan erabiltzen dena, non transistorea kortean edo asetasunean egon ohi den. Horregatik, liburu honetan, zirkuituak egoera egonkorrean soilik analizatuko ditugu, interesatzen zaiguna ez delako hainbeste zirkuitu jakin batek zer anplifikazio ahalmena duen jakitea, egoera egonkorrean transistorearen operazio-puntua zein den jakitea baizik, hots, transistorearen funtzionamendu-zona zein den jakitea. Edozein kasutan, informazio hori zirkuitu anplifikatzaileetan ere oso garrantzitsua da, zirkuituaren anplifikatzeko ahalmena operazio-puntuaren menpekoa baita. Laburbilduz, guk transistoredun zirkuitu guztiak egoera egonkorrean soilik analizatuko ditugu, kanpoko seinale aldakorrik gabe.

Badakigu, korronte zuzeneko zirkuituetan, egoera egonkorrean, kondentsadoreek zirkuitu ireki gisa jokatzen dutela. Hori dela eta, irudikoa bezalako zirkuituetan, etapak bata bestetik independenteak dira, beren arteko kondentsadorea dela kausa. Era berean, sarrerako kondentsadorea dela eta, egoera egonkorrean, sarrerako etapa isolatuta geratzen da sarrerako seinale aldakorretik. Hori guztia aintzat harturik, egoera egonkorrean bi polarizazio-zirkuitu independente analizatu behar ditugula ondorioztatzen da. Hona hemen:



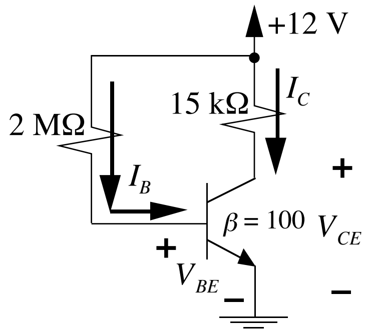
Orain, zirkuituak ebazteari ekin baino lehen, irudiko konexio-modua oso arrunta dela azpimarratu behar dugu, ondoko irudikoaren parekoa hain zuzen.



Hau da, tentsio-sorgailu bakarra erabiltzen da transistorearen bi junturak polarizatzeko.

Ekin diezaiogun, bada, zirkuituak analizatzeari, banan-banan.

Sarrerako polarizazio-zirkuitua: Lehenik, zirkuituko magnitudeak ipiniko ditugu.



Zirkuituari dagozkion ekuazioak (berriro ere, zalantzarik izanez gero, ikusi 385. orrialdean nola lortu ekuazio horiek):

KTL sarrerako mailan: ❶ $12 = 2I_B + V_{BE}$ (erresistentzia MΩ-etan →I_B μA-tan)

KTL irteerako mailan: ❷ $12 = 15I_C + V_{CE}$ (erresistentzia kΩ-etan → I_C mA-tan)

Transistorearen funtzionamendu-zonari buruzko hipotesia egiterakoan, aurreko ariketan egindakoa gogoratu besterik ez dugu egin behar aztarna bat izateko: sarrerako mailan ezarritako tentsioa (12 V) 0,7 V baino handiagoa denez gero, ziur egon gaitezke transistorea ez dela kortean egongo; hori dela eta, ondoko hipotesia egingo dugu:

1. hipotesia. Transistorea **Z.A.A.-ean**:

Ekuazioak: ❸ $V_{BE} = 0{,}7$ V ❹ $I_C = \beta I_B$ **Baldintza**: $V_{CE} \geq 0{,}2$ V

Ondorioz, honako hau da ebatzi beharreko ekuazio-sistema:

❶ $12 = 2I_B + V_{BE}$ (I_B μA-tan)

❷ $12 = 15I_C + V_{CE}$ (I_C mA-tan)

❸ $V_{BE} = 0{,}7$

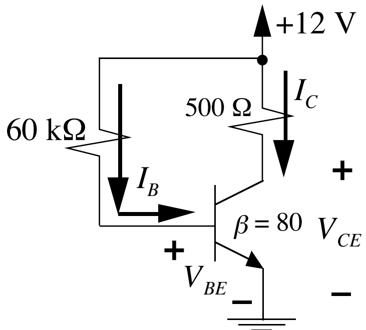
❹ $I_C = 100I_B$ (**ADI**! I_B μA-tan → I_C ere μA-tan)

Soluzioa: $I_B = 5{,}65\ \mu A$, $I_C = 0{,}565\ mA$, $V_{BE} = 0{,}7\ V$, $V_{CE} = 3{,}525\ V$

Hipotesiaren egiaztapena: $V_{CE} = 3{,}525\ V > 0{,}2\ V$; beraz, hipotesia zuzena da; hots, transistorea zona aktibo arruntean dago.

$\boxed{Q(I_B = 5{,}65\ \mu A;\ V_{BE} = 0{,}7\ V;\ I_C = 0{,}565\ mA;\ V_{CE} = 3{,}525\ V)}$

Irteerako polarizazio-zirkuitua: Lehen bezala, zirkuituko magnitudeak ipiniko ditugu.



Zirkuituari dagozkion ekuazioak:

KTL sarrerako mailan: ❶ $12 = 60I_B + V_{BE}$ (erresistentzia kΩ-etan → I_B mA-tan)

KTL irteerako mailan: ❷ $12 = 0{,}5I_C + V_{CE}$ (erresistentzia kΩ-etan → I_C mA-tan)

Lehen bezala, sarrerako mailan ezarritako tentsioa (12 V) 0,7 V baino handiagoa denez gero, ziur egon gaitezke transistorea ez dela kortean egongo; hori dela eta ondoko **hipotesia** egingo dugu:

1. hipotesia. Transistorea **Z.A.A.-ean**:

Ekuazioak: ❸ $V_{BE} = 0{,}7\ V$ ❹ $I_C = \beta I_B$ **Baldintza**: $V_{CE} \geq 0{,}2\ V$

Ondorioz, honako hau da ebatzi beharreko ekuazio-sistema:

❶ $12 = 60I_B + V_{BE}$ (I_B mA-tan)

❷ $12 = 0{,}5I_C + V_{CE}$ (I_C mA-tan)

❸ $V_{BE} = 0{,}7$

❹ $I_C = 80I_B$

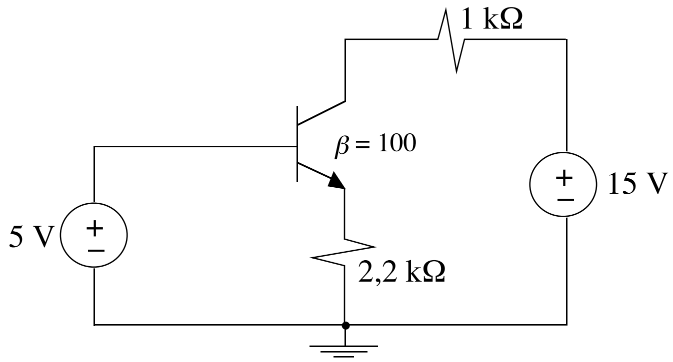
Soluzioa: $I_B = 0{,}19\ mA$, $I_C = 15{,}1\ mA$, $V_{BE} = 0{,}7\ V$, $V_{CE} = 4{,}5\ V$

Hipotesiaren egiaztapena: $V_{CE} = 4{,}5\ V > 0{,}2\ V$; beraz, hipotesia zuzena da; hots, transistorea zona aktibo arruntean dago.

$\boxed{Q(I_B = 0{,}19\ mA;\ V_{BE} = 0{,}7\ V;\ I_C = 15{,}1\ mA;\ V_{CE} = 4{,}5\ V)}$

Laburbilduz, bi transistoreak zona aktibo arruntean daude, zirkuitu anplifikatzaileen ezaugarria horixe izanik.

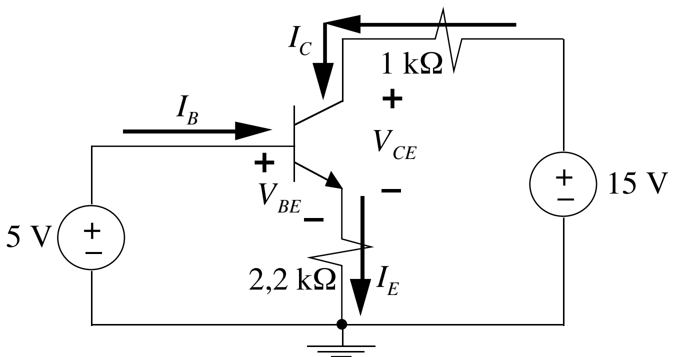
3. Ebatz ezazu irudiko zirkuitua.



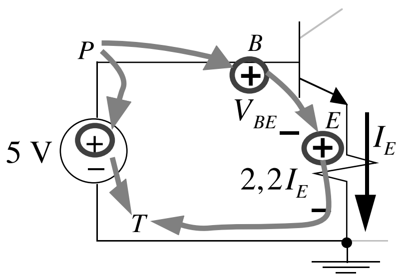
Ebazpena:

Zirkuitu hau lehenengo ariketakoaren ia-ia berdina da. Desberdintasunik nabarmena oinarrian erresistentziarik ez izatea da; bai, ordea, igorlean. Ikusiko dugun bezalaxe, kasu honetan transistorearen hiru korronteen arteko ekuazioa, KKL aplikatzean lorturikoa, $I_E = I_B + I_C$ alegia, erabili behar da, igorleko korrontea 2,2 kΩ-eko erresistentziatik igarotzen baita.

Beti bezala, lehendabizi, zirkuituko magnitudeak ipiniko ditugu.



Zirkuituari dagozkion ekuazioak:



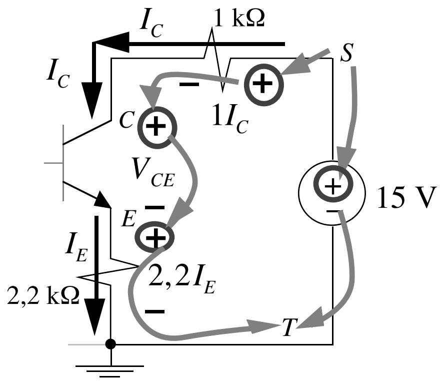
KTL sarrerako mailan:

$$V_{PT} = V_{PB} + V_{BE} + V_{ET}$$

$P = B$ denez gero: $V_{PB} = 0$

❶ $5 = V_{BE} + 2,2I_E$

(erresistentzia kΩ-etan → I_E mA-tan)



KTL irteerako mailan:

$$V_{ST} = V_{SC} + V_{CE} + V_{ET}$$

❷ $15 = 1I_C + V_{CE} + 2,2I_E$

(erresistentziak kΩ-etan → I_E eta I_C mA-tan)

Bi ekuazioak aztertuz, begi-bistakoa da igorleko korrontea bietan agertzen dela, igorleko erresistentzia (2,2 kΩ-ekoa) bi mailen arteko adar komunean baitago.

Lehen bezala, sarrerako mailan ezarritako tentsioa (5 V) 0,7 V baino handiagoa denez gero, ziur egon gaitezke transistorea ez dela kortean egongo; hori dela eta, ondoko hipotesia egingo dugu:

1. hipotesia. Transistorea **Z.A.A.-ean**:

Ekuazioak: ❸ $V_{BE} = 0,7$ V ❹ $I_C = \beta I_B$

Baldintza: $V_{CE} \geq 0,2$ V

Baina lau ekuazio horietan bost ezezagun daudenez gero (I_B, I_C, I_E, V_{BE} eta V_{CE}), bosgarren ekuazio bat behar dugu, igorleko korronteari dagokiona, hain zuzen:

❺ $I_E = I_B + I_C$

Ondorioz, honako hau da ebatzi beharreko ekuazio-sistema:

❶ $5 = V_{BE} + 2,2I_E$ (I_E mA-tan)

❷ $15 = 1I_C + V_{CE} + 2,2I_E$ (I_C eta I_E mA-tan)

❸ $V_{BE} = 0,7$

❹ $I_C = 100I_B$

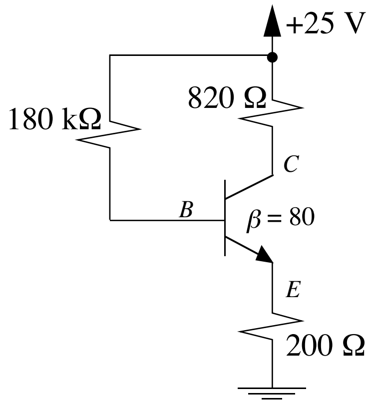
❺ $I_E = I_B + I_C$

Soluzioa: $I_E = 1,95$ mA, $I_B = 19$ μA, $I_C = 1,94$ mA, $V_{BE} = 0,7$ V, $V_{CE} = 8,76$ V

Hipotesiaren egiaztapena: $V_{CE} = 8,76$ V > 0,2 V; beraz, hipotesia zuzena da; hots, transistorea zona aktibo arruntean dago.

$$\boxed{Q(I_B = 19\ \mu A;\ V_{BE} = 0,7\ V;\ I_C = 1,94\ mA;\ V_{CE} = 8,76\ V)}$$

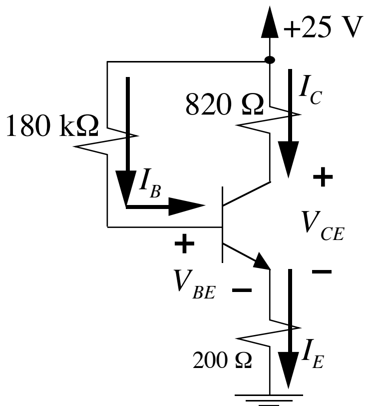
4. Irudiko zirkuiturako, kalkula itzazu V_C, V_B eta V_E tentsioak. Zein funtzionamendu-zonatan dago transistorea?



Ebazpena:

Agerikoa denez, zirkuitu hau aurreko bi ariketetakoen nahasketa bat da: alde batetik, oinarri-igorle juntura polarizatzeko, kolektorea polarizatzeko erabilitako tentsio-sorgailu bera erabiltzen da; beste aldetik, igorleko erresistentzia dela eta, transistoreari KKL aplikatzean lorturiko $I_E = I_B + I_C$ ekuazioa ere erabili behar da.

Beti bezala, lehendabizi, zirkuituko magnitudeak ipiniko ditugu.



Zirkuituari dagozkion ekuazioak:

(erresistentziak kΩ-etan →
korronteak mA-tan)

KTL sarrerako mailan:

❶ $25 = 180 I_B + V_{BE} + 0{,}2 I_E$

KTL irteerako mailan:

❷ $25 = 0{,}82 I_C + V_{CE} + 0{,}2 I_E$

Lehen bezala, sarrerako mailan ezarritako tentsioa (25 V) 0,7 V baino handiagoa denez gero, ziur egon gaitezke transistorea ez dela kortean egongo; hori dela eta ondoko **hipotesia** egingo dugu:

1. hipotesia. Transistorea **Z.A.A.-ean**:

Ekuazioak: ❸ $V_{BE} = 0{,}7$ V ❹ $I_C = \beta I_B$ Baldintza: $V_{CE} \geq 0{,}2$ V

Igorleko korronteari dagokion ekuazioa ere behar dugu: ❺ $I_E = I_B + I_C$

Ondorioz, honako hau da ebatzi beharreko ekuazio-sistema:

❶ $25 = 180 I_B + V_{BE} + 0,2 I_E$

❷ $25 = 0,82 I_C + V_{CE} + 0,2 I_E$

❸ $V_{BE} = 0,7$

❹ $I_C = 80 I_B$

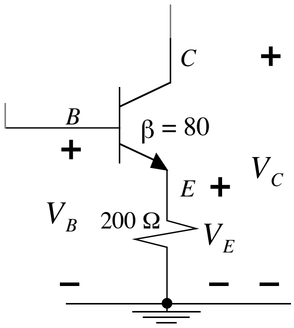
❺ $I_E = I_B + I_C$

Soluzioa: $I_B = 0,12$ mA, $I_E = 10$ mA, $I_C = 9,9$ mA, $V_{BE} = 0,7$ V, $V_{CE} = 14,87$ V

Hipotesiaren egiaztapena: $V_{CE} = 14,87$ V > 0,2 V; beraz, hipotesia zuzena da; hots, transistorea zona aktibo arruntean dago.

$$\boxed{Q(I_B = 0,12 \text{ mA};\ V_{BE} = 0,7 \text{ V};\ I_C = 9,9 \text{ mA};\ V_{CE} = 14,87 \text{ V})}$$

Orain, V_E, V_B eta V_C tentsioak kalkulatzeko, KTL aplikatuko dugu puntu horietatik erreferentziazko punturaino. Hona hemen:

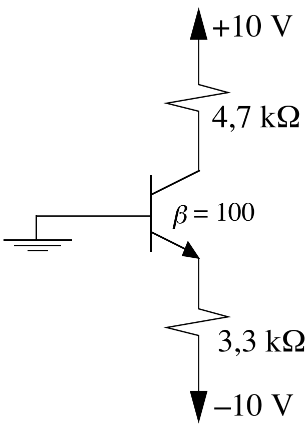


$V_E = 0,2 I_E \rightarrow \boxed{V_E = 2 \text{ V}}$

$V_B = V_{BE} + 0,2 I_E \rightarrow \boxed{V_B = 2,7 \text{ V}}$

$V_C = V_{CE} + 0,2 I_E \rightarrow \boxed{V_C = 16,87 \text{ V}}$

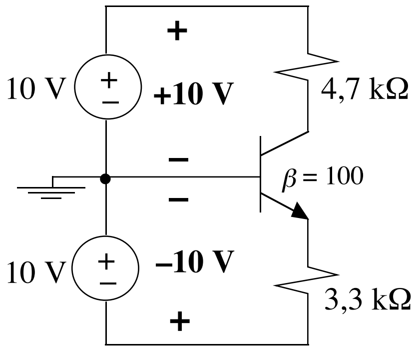
5. Analiza ezazu irudiko zirkuitua:



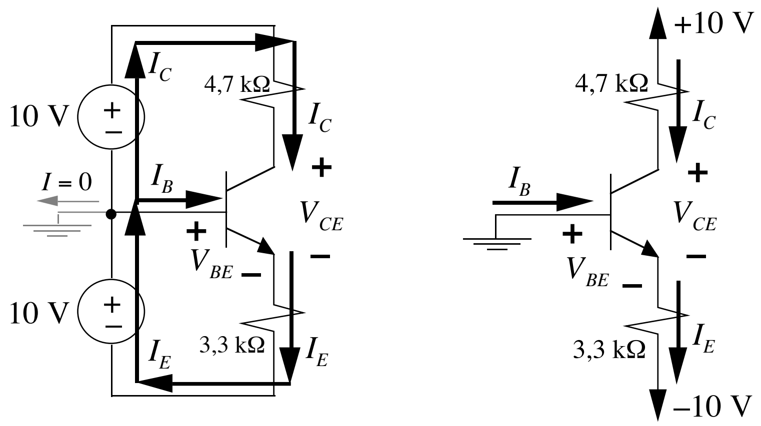
Ebazpena:

Zirkuitu honen ezaugarria, transistorea oinarri komuneko egituran konektatuta egotea da. Baina, teoria azaltzean esan bezala, guk igorle komuneko zirkuituak bezalaxe analizatuko dugu, magnitude berberak erabiliz.

Beste aldetik, goiko puntuaren tentsioa +10 V eta beheko puntuarena –10 V dira; hau da, bi tentsio-sorgailu daude, bata igorle-oinarri juntura polarizatzeko eta bestea kolektore-oinarri juntura polarizatzeko. Ondoko irudia da analizatu behar dugun zirkuituari dagokion eskema, tentsio-sorgailuak esplizituki irudikatuz.



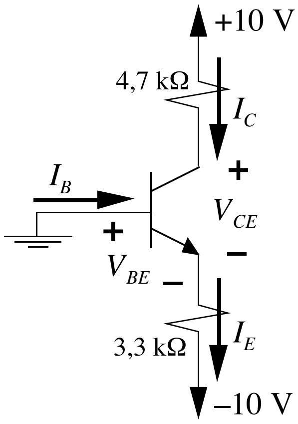
Beti bezala, lehendabizi, zirkuituko magnitudeak ipiniko ditugu. Horretan eskarmentu gutxi duen irakurlearentzat zaila izan daiteke zirkuitu honetako korronteak jatorrizko irudian zuzen-zuzenean ipintzea, oinarriko korronteak biderik ez duela baitirudi, hots, oinarria zirkuitu irekian dagoela ematen du. Baina hori, irudipen hutsa besterik ez da, oinarrian bi tentsio-sorgailuak baitaude konektatuta, goiko irudian ageri den legez. Hori dela eta, korronteen bideak nabarmentzeko asmoz, bi irudietan ipiniko ditugu, irakurleak aldera ditzan.



Ikus daitekeenez, agerikoa da goiko tentsio-sorgailuak kolektoreko korrontea hornitzen duela eta behekoak, berriz, igorlekoa, eta bi korronte horiek oinarrian elkartzen direla oinarriko korrontea sortzeko, jadanik ezagutzen dugun ekuazioa betez. Hau da, oinarriaren tentsioa 0 V-ekoa izan arren, korrontea igarotzen da transistorerantz, puntu horretan bi sorgailuak elkartzen direlako.

Baina, eskuineko irudian kontrakoa dirudien arren, irakurleak oso argi izan behar du oinarrian dagoen ikurrak 0 V-eko puntua edo erreferentziazko puntua adierazten duela soilik, eta ez dela elementu bat, hots, bertatik ez dela korronterik igarotzen; horregatik, ezkerreko irudian, bi tentsio-sorgailuek emandako korronteak puntu horretan elkartzen dira, eta horien batura transistorerantz sartzen da, oinarritik, eskuineko irudian ageri den korrontea horixe izanik.

Zirkuituaren analisirako beharrezkoak diren magnitudeak bilatu ondoren, ekuazioak idazteari ekin diezaiokegu. Hona hemen:



Zirkuituari dagozkion ekuazioak:

(erresistentziak kΩ-etan → korronteak mA-tan)

KTL beheko mailan:

❶ $0-(-10) = V_{BE} + 3{,}3I_E$

KTL kanpoko begiztan:

❷ $10-(-10) = 4{,}7I_C + V_{CE} + 3{,}3I_E$

Bi tentsio-sorgailuak esplizituki irudikatuak dituen irudian, agerikoa da kanpoko begiztan ezarritako tentsio osoa (hots, goiko eta beheko puntuen arteko potentzial-diferentzia) bi sorgailuen balioen batura dela, 20 V alegia, bigarren ekuazioan islatu den bezala: 10 – (–10). Bestalde, lehenengo ekuazioa idaztean, oinarriaren eta beheko puntuaren arteko potentzial-diferentzia hartu dugu kontuan, horixe baita beheko maila horretan ezarritako tentsioa.

Lehen bezala, oinarri-igorle mailan ezarritako tentsioa (10 V) 0,7 V baino handiagoa denez gero, ziur egon gaitezke transistorea ez dela kortean egongo; hori dela eta, ondoko **hipotesia** egingo dugu:

1. hipotesia. Transistorea **Z.A.A.-ean**:

Ekuazioak: ❸ $V_{BE} = 0{,}7$ V ❹ $I_C = \beta I_B$ **Baldintza**: $V_{CE} \geq 0{,}2$ V

Igorleko korronteari dagokion ekuazioa ere behar dugu: ❺ $I_E = I_B + I_C$

Ondorioz, honako hau da ebatzi beharreko ekuazio-sistema:

❶ $10 = V_{BE} + 3{,}3I_E$

❷ $20 = 4{,}7I_C + V_{CE} + 3{,}3I_E$

❸ $V_{BE} = 0{,}7$

❹ $I_C = 100I_B$

❺ $I_E = I_B + I_C$

Soluzioa: I_E = 2,82 mA, I_B = 27,9 μA, I_C = 2,79 mA, V_{BE} = 0,7 V, V_{CE} = – 2,41 V

Hipotesiaren egiaztapena: V_{CE} = –2,41 V < 0,2 V; beraz, hipotesia ez da zuzena.

Ondorioz, bigarren hipotesia egin beharko dugu:

2. hipotesia. Transistorea **asetasunean**:

Ekuazioak: ❸ $V_{BE} = 0{,}7$ V ❹ $V_{CE} = 0{,}2$ V **Baldintza**: $I_C \leq \beta I_B$

Honako hau da, beraz, ebatzi beharreko ekuazio-sistema:

❶ $10 = V_{BE} + 3{,}3 I_E$

❷ $20 = 4{,}7 I_C + V_{CE} + 3{,}3 I_E$

❸ $V_{BE} = 0{,}7$

❹ $V_{CE} = 0{,}2$

❺ $I_E = I_B + I_C$

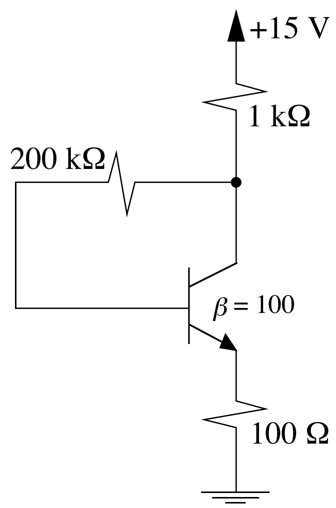
Soluzioa: I_E = 2,82 mA, I_C = 2,23 mA, I_B = 0,58 mA, V_{BE} = 0,7 V, V_{CE} = 0,2 V

Hipotesiaren egiaztapena: I_C = 2,23 mA < 58 mA (100I_B);

beraz, 2. hipotesia zuzena da; hots, transistorea asetasunean dago.

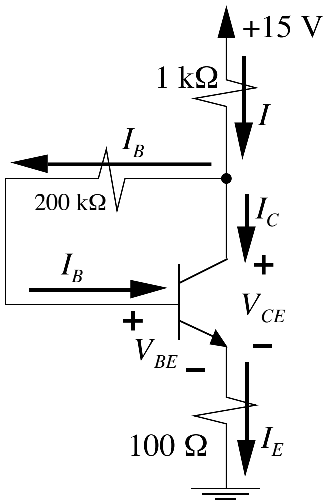
$\boxed{Q(I_B = 0{,}58 \text{ mA};\ V_{BE} = 0{,}7 \text{ V};\ I_C = 2{,}23 \text{ mA};\ V_{CE} = 0{,}2 \text{ V})}$

6. Analiza ezazu irudiko zirkuitua:



Ebazpena:

Beti bezala, lehendabizi, zirkuituko magnitudeak ipiniko ditugu. Baina, oraingo honetan, kontuz ibili behar dugu transistorearen kolektorean dagoen korapiloa dela eta, aurreko ariketetan ez bezala, 1 kΩ-eko erresistentziatik igarotzen den korrontea ez baita kolektoreko korrontea, beste bat baizik. Hori dela eta, ohiko ekuazioez gain, KKL aplikatu beharko dugu aipatutako korapilo horretan. Ikus ondoko irudia:



Zirkuituari dagozkion ekuazioak:

(erresistentziak kΩ-etan → korronteak mA-tan)

KKL kolektoreko korapiloan:

❶ $I = I_B + I_C$

KTL oinarri-igorle mailan:

❷ $15 = 1I + 200I_B + V_{BE} + 0{,}1I_E$

KTL kolektore-igorle mailan:

❸ $15 = 1I + V_{CE} + 0{,}1I_E$

Lehen bezala, oinarri-igorle mailan ezarritako tentsioa (15 V) dela eta, ziur egon gaitezke transistorea ez dela kortean egongo; ondorioz, **1. hipotesia** egingo dugu:

1. hipotesia. Transistorea **Z.A.A.-ean**:

Ekuazioak: ❹ $V_{BE} = 0{,}7$ V ❺ $I_C = \beta I_B$B **Baldintza**: $V_{CE} \geq 0{,}2$ V

Igorleko korronteari dagokion ekuazioa ere behar dugu: ❻ $I_E = I_B + I_C$

Ondorioz, honako hau da ebatzi beharreko ekuazio-sistema:

❶ $I = I_B + I_C$

❷ $15 = 1I + 200I_B + V_{BE} + 0{,}1I_E$

❸ $15 = 1I + V_{CE} + 0{,}1I_E$

❹ $V_{BE} = 0{,}7$

❺ $I_C = 100I_B$

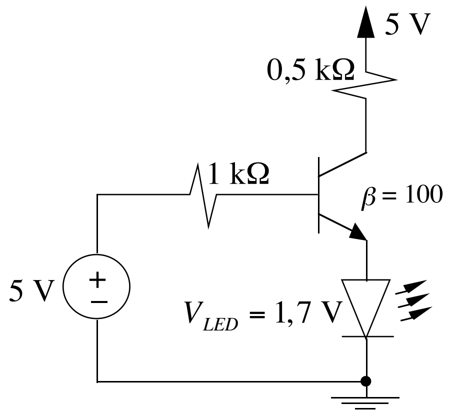
❻ $I_E = I_B + I_C$

Soluzioa: $I_B = 46$ μA, $I = I_E = 4{,}64$ mA, $I_C = 4{,}6$ mA, $V_{BE} = 0{,}7$ V, $V_{CE} = 9{,}89$ V

Hipotesiaren egiaztapena: $V_{CE} = 9{,}89$ V $> 0{,}2$ V; beraz, hipotesia zuzena da; hots, transistorea zona aktibo arruntean dago.

$\boxed{Q(I_B = 46\ \mu\text{A};\ V_{BE} = 0{,}7\ \text{V};\ I_C = 4{,}6\ \text{mA};\ V_{CE} = 9{,}89\ \text{V})}$

7. Irudiko zirkuituan:



a) Azter ezazu zein funtzionamendu-zonatan dagoen transistorea.

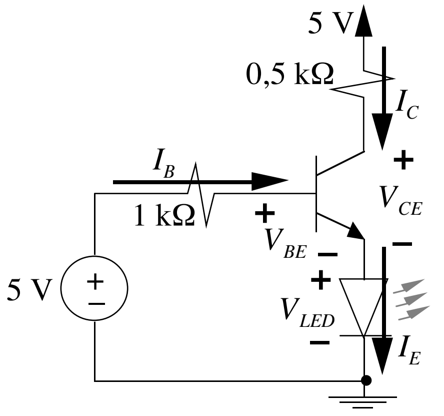
b) Zein egoeratan dago LED diodoa?

c) Zenbatekoa da LED diodoak xurgatutako potentzia?

d) LED diodoa R erresistentzia batez ordezkatuz gero, kalkula ezazu zenbatekoa izan behar duen R-ren balioak, transistorearen kolektoreko tentsioa 2,5 V-ekoa izan dadin.

Ebazpena:

Beti bezala, lehenengo gauza zirkuituko magnitudeak ipini eta zirkuituari dagozkion ekuazioak idaztea da. Kasu honetan, transistoreaz gain, LED diodo bat ere badago. Ondorioz:



Zirkuituari dagozkion ekuazioak:

KTL oinarri-igorle mailan:

❶ $5 = 1I_B + V_{BE} + V_{LED}$

KTL kolektore-igorle mailan:

❷ $5 = 0,5I_C + V_{CE} + V_{LED}$

Transistorearen funtzionamendu-zonari buruzko hipotesia egiterakoan, begi-bistakoa da ez dela kortean egongo, sarrerako tentsioa (5 V) nahiko handia baita. Hori dela eta, igorleko korrontea ez da zero izango; ondorioz, LED diodoa zuzenki polarizatuta egongo da. Horregatik, lehenengo bi galderei aldi berean erantzun behar diegu, transistorearen funtzionamendu-zona eta LED diodoaren egoera erlazionatuta baitaude.

Hortaz, zirkuitu honetan transistore bat eta diodo bat daudenez gero, hipotesia bikoitza da. Hona hemen:

1. hipotesia. Transistorea **Z.A.A.-ean**, LED **diodoa Z.P.**:

Ekuazioak: ❸ $V_{BE} = 0{,}7$ V ❹ $I_C = \beta I_B$ ❺ $V_{LED} = 1{,}7$ V

Baldintzak: $V_{CE} \geq 0{,}2$ V $I_E = I_{LED} \geq 0$

Igorleko korronteari dagokion ekuazioa ere behar dugu: ❻ $I_E = I_B + I_C$

Ondorioz, honako hau da ebatzi beharreko ekuazio-sistema:

❶ $5 = 1I_B + V_{BE} + V_{LED}$

❷ $5 = 0{,}5I_C + V_{CE} + V_{LED}$

❸ $V_{BE} = 0{,}7$

❹ $I_C = 100I_B$

❺ $V_{LED} = 1{,}7$

❻ $I_E = I_B + I_C$

Soluzioa: $I_B = 2{,}6$ mA, $I_C = 260$ mA, $I_E = 262{,}6$ mA,
$V_{BE} = 0{,}7$ V, $V_{CE} = -126{,}7$ V, $V_{LED} = 1{,}7$ V

Hipotesiaren egiaztapena: $I_E = 262{,}6$ mA > 0; $V_{CE} = -126{,}7$ V $< 0{,}2$ V;
beraz, hipotesia ez da zuzena.

Honela, bada, bigarren hipotesia egin beharko dugu:

2. hipotesia. Transistorea **asetasunean**, LED **diodoa Z.P.**:

Ekuazioak: ❸ $V_{BE} = 0{,}7$ V ❹ $V_{CE} = 0{,}2$ V ❺ $V_{LED} = 1{,}7$ V

Baldintzak: $I_C \leq \beta I_B$ $I_E = I_{LED} \geq 0$

Honako hau da, beraz, ebatzi beharreko ekuazio-sistema:

❶ $5 = 1I_B + V_{BE} + V_{LED}$

❷ $5 = 0{,}5I_C + V_{CE} + V_{LED}$

❸ $V_{BE} = 0{,}7$

❹ $V_{CE} = 0{,}2$

❺ $V_{LED} = 1{,}7$

❻ $I_E = I_B + I_C$

Soluzioa: $I_B = 2{,}6$ mA, $I_C = 6{,}2$ mA, $I_E = 8{,}8$ mA,
$V_{BE} = 0{,}7$ V, $V_{CE} = 0{,}2$ V, $V_{LED} = 1{,}7$ V

Hipotesiaren egiaztapena: $I_C = 6{,}2$ mA < 260 mA $(100I_B)$; $I_E = 8{,}8$ mA > 0;

beraz, 2. hipotesia zuzena da: transistorea asetasunean dago eta LED diodoa Z.P.

a) Transistorearen operazio-puntua (asetasunean):

$$\boxed{Q_T(I_B = 2{,}6 \text{ mA}; V_{BE} = 0{,}7 \text{ V}; I_C = 6{,}2 \text{ mA}; V_{CE} = 0{,}2 \text{ V})}$$

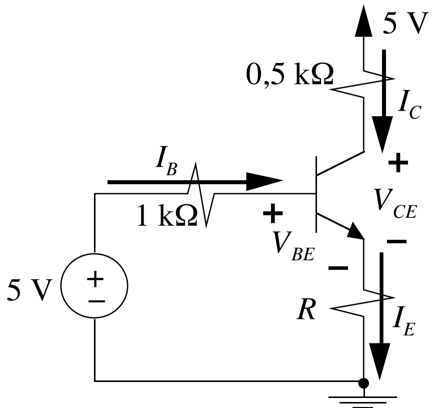
b) LED diodoaren operazio-puntua (zuzenki polarizatuta):

$$\boxed{Q_{LED}(I_{LED} = 8{,}8 \text{ mA};\ V_{LED} = 1{,}7 \text{ V})}$$

c) LED diodoak xurgatutako potentzia kalkulatzea berehalakoa da:

$$P_{LEDxurgatua} = V_{LED} \cdot I_{LED} = 1{,}7 \text{ V} \cdot 8{,}8 \text{ mA} = 14{,}96 \text{ mW}$$

d) LED diodoa erresistentzia batez ordezkatuz gero, analizatu beharreko zirkuitua aldatu egingo da, ondoko irudian ageri den legez, baita zirkuituari dagozkion ekuazioak ere:



Zirkuituari dagozkion ekuazioak:

KTL oinarri-igorle mailan:

❶ $5 = 1I_B + V_{BE} + RI_E$

KTL kolektore-igorle mailan:

❷ $5 = 0{,}5I_C + V_{CE} + RI_E$

Agerikoa da ohiko ezezagunez gain (I_B, V_{BE}, I_C, V_{CE}, I_E), beste ezezagun bat ere badagoela, R; horregatik, ohiko ekuazioez gain beste bat ere behar dugu. Zein?

Bada, kolektoreko tentsioaren adierazpen matematikoa, KTL kolektoretik erreferentziazko punturaino aplikatuz lorturikoa, zeren zehazki baitakigu zer kolektore-tentsio izan behar duen transistoreak, 2,5 voltekoa hain zuzen ere. Hona hemen, beraz, ekuazio berri hori:

❸ $V_C = 2{,}5 \text{ V} = V_{CE} + RI_E$

Orain, transistorearen funtzionamendu-zonari buruzko hipotesia egingo dugu:

1. hipotesia. Transistorea Z.A.A.-ean:

Ekuazioak: ❹ $V_{BE} = 0{,}7$ V ❺ $I_C = \beta I_B$ **Baldintza**: $V_{CE} \geq 0{,}2$ V

Igorleko korronteari dagokion ekuazioa ere behar dugu: ❻ $I_E = I_B + I_C$

Ondorioz, honako hau da ebatzi beharreko ekuazio-sistema:

❶ $5 = 1I_B + V_{BE} + RI_E$

❷ $5 = 0,5I_C + V_{CE} + RI_E$

❸ $2,5 = V_{CE} + RI_E$

❹ $V_{BE} = 0,7$

❺ $I_C = 100I_B$

❻ $I_E = I_B + I_C$

Soluzioa: $I_C = 5$ mA, $I_B = 50$ µA, $I_E = 5,05$ mA,
$V_{BE} = 0,7$ V, $V_{CE} = -1,75$ V, $R = 0,842$ kΩ

Hipotesiaren egiaztapena: $V_{CE} = -1,75$ V < 0,2 V; beraz, hipotesia ez da zuzena.

Ondorioz, bigarren hipotesia egin beharko dugu:

2. hipotesia. Transistorea asetasunean:

Ekuazioak: ❹ $V_{BE} = 0,7$ V ❺ $V_{CE} = 0,2$ V

Baldintza: $I_C \leq \beta I_B$

Honako hau da, beraz, ebatzi beharreko ekuazio-sistema:

❶ $5 = 1I_B + V_{BE} + RI_E$

❷ $5 = 0,5I_C + V_{CE} + RI_E$

❸ $2,5 = V_{CE} + RI_E$

❹ $V_{BE} = 0,7$

❺ $V_{CE} = 0,2$

❻ $I_E = I_B + I_C$

Soluzioa: $I_C = 5$ mA, $I_B = 2$ mA, $I_E = 7$ mA,
$V_{BE} = 0,7$ V, $V_{CE} = 0,2$ V, $R = 328,6$ Ω

Hipotesiaren egiaztapena: $I_C = 5$ mA < 200 mA ($100I_B$)
beraz, 2. hipotesia zuzena da: transistorea asetasunean dago.

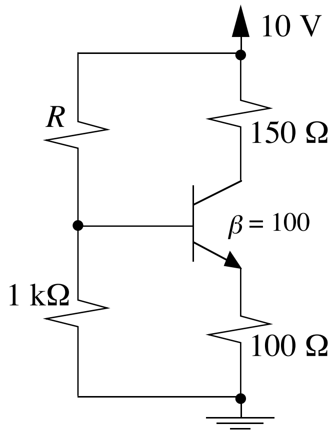
Transistorearen operazio-puntua:

$$\boxed{Q(I_B = 2 \text{ mA};\ V_{BE} = 0,7 \text{ V};\ I_C = 5 \text{ mA};\ V_{CE} = 0,2 \text{ V})}$$

Transistorearen kolektoreko tentsioa 2,5 V-ekoa izan dadin, ondokoa izan behar da R erresistentziaren balioa:

$$\boxed{R = 328,6\ \Omega}$$

8. Irudiko zirkuituan:



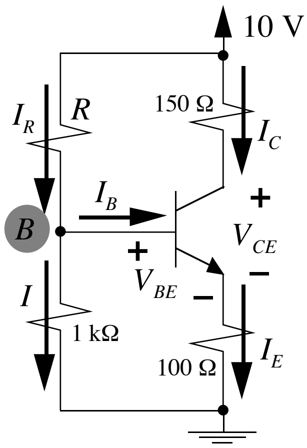
a) Kalkula ezazu R erresistentziaren balioa, transistorearen oinarriko tentsioa 1,71 V-ekoa izan dadin.

b) Esan ezazu zein funtzionamendu-zonatan egongo den transistorea R-ren balio horretarako, eta lor ezazu operazio-puntua.

c) Zenbatekoak dira, kasu horretan, kolektoreko tentsioa, V_C, eta igorlekoa, V_E?

Ebazpena:

a) Beti bezala, lehenengo gauza zirkuituko magnitudeak ipini eta zirkuituari dagozkion ekuazioak idaztea da. Horretarako, oraingo honetan, kontuan hartu behar dugu ezen transistorearen oinarria, B, korapiloa dela, bertan hiru elementu elkartzen direlako: R erresistentzia, 1 kΩ-eko erresistentzia eta transistorearen oinarria bera. Horregatik, hiru elementu horietatik igaroko diren korronteak desberdinak dira, ondoko irudian ageri den legez:



Zirkuituari dagozkion ekuazioak:

KTL oinarri-igorle mailan:

❶ $1I = V_{BE} + 0{,}1I_E$

KTL kolektore-igorle mailan:

❷ $10 = 0{,}15I_C + V_{CE} + 0{,}1I_E$

KTL ezkerreko kanpoko begiztan:

❸ $10 = RI_E + 1I$

KKL B korapiloan:

❹ $I_R = I_B + I$

Agerikoa da ohiko ezezagunez gain (I_B, V_{BE}, I_C, V_{CE}, I_E) eta lehenago aipatu ditugun bi korronteez gain (I_R, I), beste ezezagun bat ere badagoela, R; horregatik, ohiko ekuazioez gain beste bat ere behar dugu. Zein?

Bada, oinarriko tentsioaren adierazpen matematikoa, KTL oinarritik erreferentziazko punturaino aplikatuz lorturikoa, zeren zehazki baitakigu zer oinarri-tentsio izan behar duen transistoreak, 1,71 voltekoa hain zuzen ere. Hona hemen, beraz, ekuazio berri hori:

❺ $$V_B = 1{,}71\ \text{V} = V_{BE} + 0{,}1 I_E = 1I$$

Orain, transistorearen funtzionamendu-zonari buruzko hipotesia egingo dugu:

1. hipotesia. Transistorea **Z.A.A.-ean**:

Ekuazioak: ❻ $V_{BE} = 0{,}7$ V ❼ $I_C = \beta I_B$ **Baldintza**: $V_{CE} \geq 0{,}2$ V

Igorleko korronteari dagokion ekuazioa ere behar dugu: ❽ $I_E = I_B + I_C$

Ondorioz, honako hau da ebatzi beharreko ekuazio-sistema:

❶ $1I = V_{BE} + 0{,}1 I_E$

❷ $10 = 0{,}15 I_C + V_{CE} + 0{,}1 I_E$

❸ $10 = R I_E + 1I$

❹ $I_R = I_B + I$

❺ $1{,}71 = V_{BE} + 0{,}1 I_E = 1I$

❻ $V_{BE} = 0{,}7$

❼ $I_C = 100 I_B$

❽ $I_E = I_B + I_C$

Soluzioa: $I = 1{,}71$ mA, $I_E = 10{,}1$ mA, $I_B = 0{,}1$ mA, $I_C = 10$ mA, $I_R = 1{,}81$ mA, $V_{BE} = 0{,}7$ V, $V_{CE} = 7{,}49$ V, $R = 4{,}58$ kΩ

Hipotesiaren egiaztapena: $V_{CE} = 7{,}49\ \text{V} > 0{,}2$ V;

beraz, hipotesia zuzena da; hots, transistorea zona aktibo arruntean dago.

Transistorearen oinarriko tentsioa 1,71 V-ekoa izan dadin, hauxe izango da R erresistentziaren balioa:

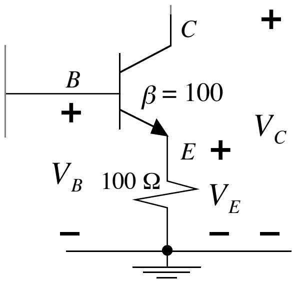
$$\boxed{R = 4{,}58\ \text{k}\Omega}$$

b) Transistorearen operazio-puntua:

$$\boxed{Q(I_B = 0{,}1\ \text{mA};\ V_{BE} = 0{,}7\ \text{V};\ I_C = 10\ \text{mA};\ V_{CE} = 7{,}49\ \text{V})}$$

c) Kolektoreko eta igorleko tentsioak:

V_E eta V_C tentsioak kalkulatzeko, KTL aplikatuko dugu puntu horietatik erreferentziazko punturaino. Hona hemen:

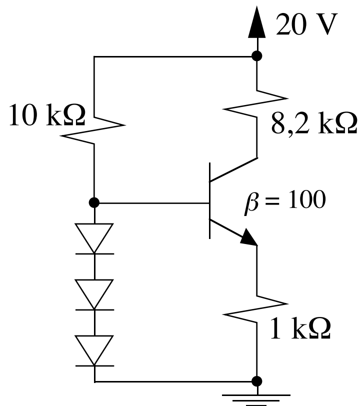


(V_B = 1,71 V)

$V_E = 0{,}1 I_E \quad \rightarrow \quad \boxed{V_E = 1{,}01\ \text{V}}$

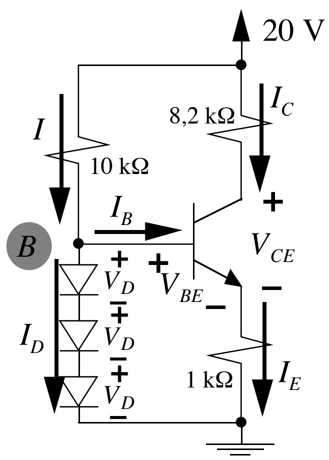
$V_C = V_{CE} + 0{,}1 I_E \quad \rightarrow \quad \boxed{V_C = 8{,}5\ \text{V}}$

9. Analiza ezazu irudiko zirkuitua:



Ebazpena:

Beti bezala, lehenengo gauza zirkuituko magnitudeak ipini eta zirkuituari dagozkion ekuazioak idaztea da. Kasu honetan, transistoreaz gain hiru diodo daude; ondorioz:



Zirkuituari dagozkion ekuazioak:

KTL oinarri-igorle mailan:

❶ $3V_D = V_{BE} + 1 I_E$

KTL kolektore-igorle mailan:

❷ $20 = 8{,}2 I_C + V_{CE} + 1 I_E$

KTL ezkerreko kanpoko begiztan:

❸ $20 = 10 I + 3V_D$

KKL B korapiloan:

❹ $I = I_B + I_D$

Zirkuitu honetan transistore bat eta hiru diodo daudenez gero, hipotesia bikoitza da. Hona hemen:

1. hipotesia. Transistorea **Z.A.A.-ean**, **diodoak Z.P.**:

Ekuazioak: ❺ $V_{BE} = 0{,}7$ volt ❻ $I_C = \beta I_B$ ❼ $V_D = 0{,}7$ V

Baldintzak: $V_{CE} \geq 0{,}2$ V $I_D \geq 0$

Igorleko korronteari dagokion ekuazioa ere behar dugu: ❽ $I_E = I_B + I_C$

Ondorioz, honako hau da ebatzi beharreko ekuazio-sistema:

❶ $3V_D = V_{BE} + 1I_E$

❷ $20 = 8{,}2I_C + V_{CE} + 1I_E$

❸ $20 = 10I + 3V_D$

❹ $I = I_B + I_D$

❺ $V_{BE} = 0{,}7$

❻ $I_C = 100I_B$

❼ $V_D = 0{,}7$

❽ $I_E = I_B + I_C$

Soluzioa: $I_E = 1{,}4$ mA, $I_B = 13{,}9$ µA, $I_C = 1{,}39$ mA, $I = 1{,}79$ mA, $I_D = 1{,}78$ mA
$V_{BE} = 0{,}7$ V, $V_{CE} = 7{,}2$ V, $V_D = 0{,}7$ V

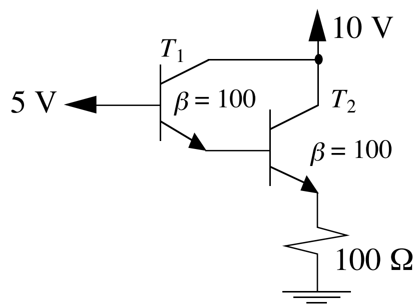
Hipotesiaren egiaztapena: $V_{CE} = 7{,}2$ V > 0,2 V; $I_D = 1{,}78$ mA > 0;

beraz, hipotesia zuzena da; hots, transistorea Z.A.A.-ean dago eta diodoak Z.P.

Transistorearen eta diodoen operazio-puntua:

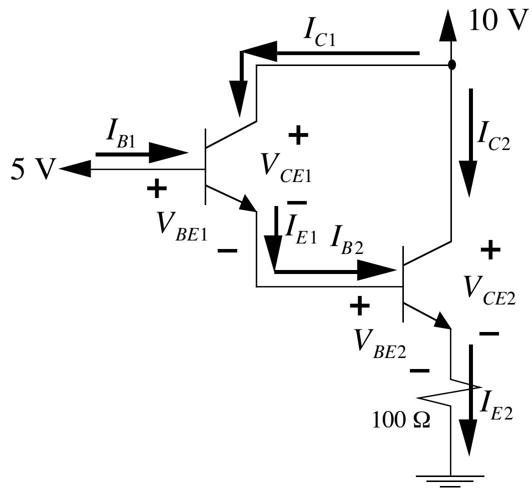
$\boxed{Q_T(I_B = 13{,}9\ \mu A; V_{BE} = 0{,}7\ V; I_C = 1{,}39\ mA; V_{CE} = 7{,}2\ V);\ Q_D(I_D = 1{,}78\ mA;\ V_D = 0{,}7\ V)}$

10. Analiza ezazu irudiko zirkuitua:



Ebazpena:

Bi transistore dauden arren, betiko moduan ekin behar diogu zirkuitua analizatzeari: lehendabizi, zirkuituko magnitudeak ipini eta, ondoren, zirkuituari dagozkion ekuazioak idatzi.



Irudian agerikoa denez, hamar ezezagun daude, transistore bakoitzeko bost:

$$Q_1(I_{B1}, I_{C1}, I_{E1}, V_{BE1}, V_{CE1}) \text{ eta } Q_2(I_{B2}, I_{C2}, I_{E2}, V_{BE2}, V_{CE2})$$

Ondorioz, hamar ekuazio beharko ditugu: lau ekuazio bi transistoreen portaera-ekuazioak izango dira; beste bi ekuazio transistoreen igorleko korronteei dagozkienak izango dira, bietan I_E agertzen baita; beraz, beste lau ekuazioak zirkuitutik atera beharko ditugu, Kirchhoff-en legeak aplikatuz: zirkuituan hiru maila daudenez gero, KTL hiru aldiz aplikatu beharko dugu hiru ekuazio lortzeko, eta KKL behin bakarrik aplikatuko dugu zirkuituan (adi, transistoreetan ere aplikatu behar da KKL, baina hori lehenago esan dugu), T_1 transistorearen igorlean edo T_2 transistorearen oinarrian, hain zuzen. Hona hemen ekuazio horiek:

Zirkuituari dagozkion ekuazioak:

KTL sarrerako mailan: ❶ $5 = V_{BE1} + V_{BE2} + 0{,}1I_{E2}$

KTL irteerako mailan: ❷ $10 = V_{CE2} + 0{,}1I_{E2}$

KTL erdiko begiztan: ❸ $10 = V_{CE1} + V_{BE2} + 0{,}1I_{E2}$

KKL E_1 igorlean edo B_2 oinarrian: ❹ $I_{E1} = I_{B2}$

Bi transistoreen igorleko korronteei dagozkien ekuazioak ere behar ditugu:

KKL T_1 transistorean: ❺ $I_{E1} = I_{B1} + I_{C1}$

KKL T_2 transistorean: ❻ $I_{E2} = I_{B2} + I_{C2}$

Zirkuituan bi transistore daudenez gero, hipotesia bikoitza da. Hona hemen:

1. hipotesia. T_1 transistorea **Z.A.A.-ean**, T_2 transistorea **Z.A.A.-ean**:

Ekuazioak: ❼ $V_{BE1} = 0{,}7$ volt ❽ $I_{C1} = \beta I_{B1}$

❾ $V_{BE2} = 0{,}7$ volt ❿ $I_{C2} = \beta I_{B2}$

Baldintzak: $V_{CE1} \geq 0{,}2$ V $V_{CE2} \geq 0{,}2$ V

Ondorioz, honako hau da ebatzi beharreko ekuazio-sistema:

❶ $5 = V_{BE1} + V_{BE2} + 0{,}1 I_{E2}$

❷ $10 = V_{CE2} + 0{,}1 I_{E2}$

❸ $10 = V_{CE1} + V_{BE2} + 0{,}1 I_{E2}$

❹ $I_{E1} = I_{B2}$

❺ $I_{E1} = I_{B1} + I_{C1}$

❻ $I_{E2} = I_{B2} + I_{C2}$

❼ $V_{BE1} = 0{,}7$

❽ $I_{C1} = 100 I_{B1}$

❾ $V_{BE2} = 0{,}7$

❿ $I_{C2} = 100 I_{B2}$

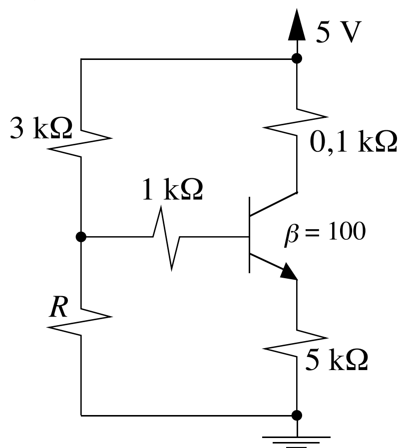
Soluzioa: $I_{E2} = 36$ mA, $I_{B2} = 356$ μA, $I_{C2} = 35{,}6$ mA, $V_{BE2} = 0{,}7$ V, $V_{CE2} = 6{,}4$ V,

$I_{E1} = 356$ μA, $I_{B1} = 3{,}53$ μA, $I_{C1} = 353$ μA, $V_{BE1} = 0{,}7$ V, $V_{CE1} = 5{,}7$ V

Hipotesiaren egiaztapena: $V_{CE1} = 5{,}7\text{ V} > 0{,}2$ V; $V_{CE2} = 6{,}4\text{ V} > 0{,}2$ V;

beraz, hipotesia zuzena da; hots, transistoreak Z.A.A.-ean daude.

11. Irudiko zirkuituan:

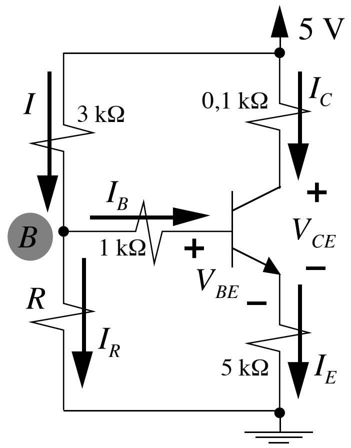


a) Zenbatekoa izan behar du R erresistentziaren balioak, transistorea eroaten has dadin, hots, kortetik atera eta zona aktibo arruntean sar dadin?

b) Zein funtzionamendu-zonatan dago transistorea, $R = 600\ \Omega$ baldin bada?

Ebazpena:

a) Beti bezala, lehenengo gauza zirkuituko magnitudeak ipini eta zirkuituari dagozkion ekuazioak idaztea da. Horretarako, oraingo honetan, 8. ariketan bezalaxe, kontuan hartu behar dugu transistorearen oinarria, B, korapiloa dela. Ondorioz:



Zirkuituari dagozkion ekuazioak:

KTL oinarri-igorle mailan:

❶ $RI_R = 1I_B + V_{BE} + 5I_E$

KTL kolektore-igorle mailan:

❷ $5 = 0{,}1I_C + V_{CE} + 5I_E$

KTL ezkerreko kanpoko begiztan:

❸ $5 = 3I + RI_R$

KKL B korapiloan:

❹ $I = I_B + I_R$

Igorleko korronteari dagokion ekuazioa ere behar dugu: ❺ $I_E = I_B + I_C$

Agerikoa da tentsio eta korronteez gain, beste ezezagun bat dagoela: R. Beraz, guztira zortzi ezezagun daude zirkuitu honetan. Dagoeneko, zirkuitutik aurreko bost ekuazioak atera ditugu; baina horiez gain, beste hiru ekuazio behar ditugu. Zein? Pentsa dezakegu beste bi transistorearen portaera-ekuazioak izango direla; baina oraindik ekuazio baten faltan egongo gara. Nola konpondu hori?

Bada, oraingo honetan, oker gaude, zeren transistorearen portaera-ekuazioak ez dira bi izango, hiru baizik, behar ditugunak hain zuzen ere. Nola izan daiteke hori? Bada, oraingo honetan ez dugulako transistorearen funtzionamendu-zonari buruzko hipotesirik egin behar, kortearen eta zona aktibo arruntaren arteako mugan egon behar duela baitakigu, une horretan bertan, hain zuzen, "hasiko" baita eroaten. Horregatik, bi zonetako ekuazioak beteko dira aldi berean.

Transistorea **Z.A.A.-ren eta kortearen arteko mugan** :

Ekuazioak: ❻ $I_B = 0$ ❼ $I_C = 0$ ❽ $V_{BE} = 0{,}7$ V

Bestalde, egiaztatu beharreko baldintza zona aktibo arruntarena izango da, hots:

Baldintza: $V_{CE} \geq 0{,}2$ V

Ondorioz, honako hau da ebatzi beharreko ekuazio-sistema:

❶ $RI_R = 1I_B + V_{BE} + 5I_E$

❷ $5 = 0{,}1I_C + V_{CE} + 5I_E$

❸ $5 = 3I + RI_R$

❹ $I = I_B + I_R$

❺ $I_E = I_B + I_C$

❻ $I_B = 0$

❼ $I_C = 0$

❽ $V_{BE} = 0{,}7$

Soluzioa: $I_B = I_C = I_E = 0$ mA, $I = I_R = 1{,}43$ mA, $V_{BE} = 0{,}7$ V, $V_{CE} = 5$ V, $R = 0{,}488$ kΩ

Baldintzaren egiaztapena: $V_{CE} = 5 \text{ V} > 0{,}2 \text{ V}$;

beraz, transistorea zona aktibo arruntean dago; hori bai, kortetik ateratzen oraindik.

Ondorioz, transistorea zona aktibo arruntaren eta kortearen arteko mugan egon dadin, hots, eroaten has dadin, honako hau da *R* erresistentziaren balioa:

$$\boxed{R = 488\ \Omega}$$

Eta transistorearen operazio-puntua kasu horretan hauxe da:

$$\boxed{Q(I_B = 0 \text{ mA};\ V_{BE} = 0{,}7 \text{ V};\ I_C = 0 \text{ mA};\ V_{CE} = 5 \text{ V})}$$

Gauza bera egin dezakegu zirkuitua beste ikuspuntu batetik analizatuz; hau da, funtzionamendu-zona jakin batean egoteko —esate baterako, kortean egoteko—, *R* erresistentziaren muga-balioa zein den kalkula dezakegu. Ikus dezagun ebazpide hori:

Transistorea **kortean**:

Ekuazioak: ❻ $I_B = 0$ ❼ $I_C = 0$

Baldintza: $V_{BE} \le 0{,}7$ V

Ondorioz, honako hau da ebatzi beharreko ekuazio-sistema:

❶ $RI_R = 1I_B + V_{BE} + 5I_E$

❷ $5 = 0{,}1I_C + V_{CE} + 5I_E$

❸ $5 = 3I + RI_R$

❹ $I = I_B + I_R$

❺ $I_E = I_B + I_C$

❻ $I_B = 0$

❼ $I_C = 0$

Baina modu honetan, zazpi ekuazio baino ez ditugu, zortzi ezezagun izan arren. Nola konpondu arazo hori? Bada, oso modu errazean: ekuazio-sistemaren soluzioa bilatuko dugu, R ezaguna dela suposatuz; hots, parametro gisa erabiliko dugu R, eta, horrela, beste ezezagun guztiak horren funtzioan kalkulatuko ditugu.

Soluzioa: $I_B = I_C = I_E = 0$ mA, $I = I_R = \dfrac{5}{3+R}$, $V_{BE} = \dfrac{5R}{3+R}$, $V_{CE} = 5$ V

Ondoren, kortean egoteko baldintza egiaztatu beharrean, betearazi egingo diogu baldintza hori zirkuituari, hori baita nahi duguna: hau da, transistorea kortean egotera behartu nahi dugu. Era horretan, baldintza bera da behar dugun 8. ekuazioa; hori bai, izatez, desberdintza bat da.

Baldintza betearaziz: $V_{BE} = \dfrac{5R}{3+R} \leq 0,7$

Agerikoa da, baldintza betearaztean, transistorea kortean egoteko R erresistentziak bete beharreko ekuazioa lortu dugula. Azken ekuazio horretatik, honako hau ateratzen da:

$$\boxed{R \leq 488\ \Omega}$$

Hau da, R erresistentziaren balioa 488 Ω baino txikiagoa den bitartean, transistorea kortean egongo da; juxtu R = 488 Ω denean, berriz, transistorea kortearen mugan egongo da, hots, zona aktibo arruntera sartzeko prest, lehen kalkulatu dugun balioa horixe izanik. Azkenik, R erresistentziaren balioa 488 Ω baino handiagoa denean, ziur egon gaitezke transistorea ez dela kortean egongo.

Bi ebazpideak alderatuz, honako hau ondorioztatzen da: lehenengo ebazpidean balio zehatz bat lortu dugu R erresistentziarentzat, transistorea ere puntu zehatz batean egotera behartu baitugu. Bigarren ebazpidean, ordea, R erresistentziarentzat balio-tarte bat kalkulatu dugu, transistorea behartu baitugu, ez puntu zehatz batean egotera, funtzionamendu-zona bateko edozein puntutan egotera baizik.

Hori dela eta, bigarren ebazpideak lehenengoak baino informazio gehiago ematen digu, horrela transistorea kortean egoteko R-ren muga-balio hori maximoa dela baitakigu; edo minimoa, transistorea zona aktibo arruntean egoteko.

b) Oraingo honetan R erresistentziaren balioa ezaguna da, 600 Ω hain zuzen ere. Ikusi berri dugun legez, transistorea ez da kortean egongo, 600 Ω > 488 Ω baita. Baina, hori jakin arren, ez dago jakiterik transistorea zona aktibo arruntean ala asetasunean egongo den. Horregatik, transistorearen funtzionamendu-zonari buruzko hipotesia egin beharko dugu. Hori bai, lehengo ekuazioak betetzen dira, aldaketa bakarra R-ren balioa izanik.

1. hipotesia. Transistorea **Z.A.A.-ean**:

Ekuazioak: ❻ $V_{BE} = 0,7$ V ❼ $I_C = \beta I_B$

Baldintza: $V_{CE} \geq 0,2$ V

Ondorioz, honako hau da ebatzi beharreko ekuazio-sistema:

❶ $0,6I_R = 1I_B + V_{BE} + 5I_E$

❷ $5 = 0,1I_C + V_{CE} + 5I_E$

❸ $5 = 3I + 0,6I_R$

❹ $I = I_B + I_R$

❺ $I_E = I_B + I_C$

❻ $V_{BE} = 0,7$

❼ $I_C = 100I_B$

Soluzioa: $I_B = 0,26\ \mu A$, $I_C = 26,32\ \mu A$, $I_E = 26,58\ \mu A$, $I = I_R = 1,39$ mA,

$V_{BE} = 0,7$ V, $V_{CE} = 4,86$ V

Baldintzaren egiaztapena: $V_{CE} = 4,86\ V > 0,2\ V$;

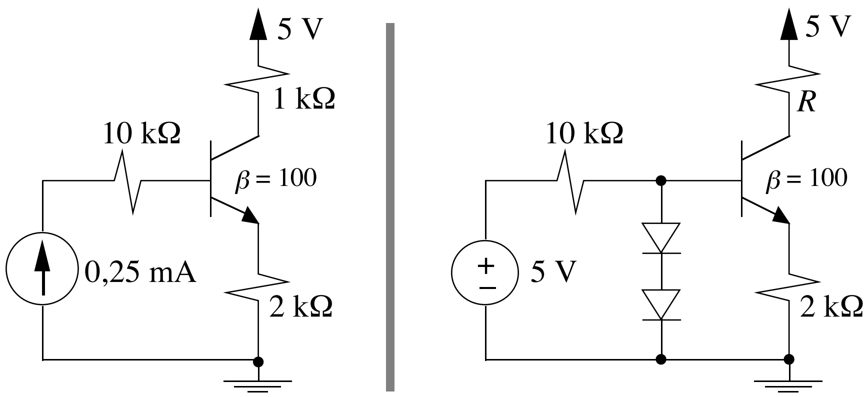
beraz, hipotesia zuzena da; hots, transistorea zona aktibo arruntean dago.

Kasu horretan transistorearen operazio-puntua ondokoa da:

$\boxed{Q(I_B = 0,26\ \mu A;\ V_{BE} = 0,7\ V;\ I_C = 26,32\ \mu A;\ V_{CE} = 4,86\ V)}$

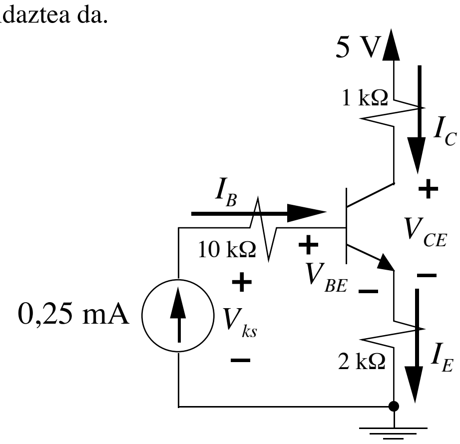
12. Ezkerreko irudiko zirkuiturako, aurki ezazu zein funtzionamendu-zonatan dagoen transistorea. Horrez gain, kalkula itzazu transistorearen korapilo guztietako tentsioak (V_B, V_C eta V_E) eta korronteak (I_B, I_C eta I_E).

Ondoren, korronte-sorgailua tentsio-sorgailu batez ordezkatu eta, eskuineko irudian ageri den legez, bi diodo sartzen badira, kalkula ezazu R erresistentziaren muga-balioa, transistorea zona aktibo arruntean egon dadin. Zer da balio hori, maximoa ala minimoa? Justifika ezazu erantzuna. (Suposatu diodoak siliziozkoak direla eta erabili 2. hurbilketa.)



Ebazpena:

a) Beti bezala, lehenengo gauza zirkuituko magnitudeak ipini eta zirkuituari dagozkion ekuazioak idaztea da.



Zirkuituari dagozkion ekuazioak:

Irudian agerikoa da transistorearen oinarri-korrontea korronte-sorgailuak emandakoa dela, hau da: ❶ I_B **= 0,25 mA**. Horregatik, zirkuituari dagozkion ekuazioak idaztean, ez dugu KTL oinarri-igorle mailan aplikatuz lorturikoa erabiliko, bertan korronte-sorgailuaren muturren arteko tentsioa ezezagun gisa agertzen delako, hots, ohiko ezezagunez gain beste bat:

KTL oinarri-igorle mailan: $V_{ks} = 10I_B + V_{BE} + 2I_E$

KTL kolektore-igorle mailan: ❷ $5 = 1I_C + V_{CE} + 2I_E$

Igorleko korronteari dagokion ekuazioa ere behar dugu: ❸ $I_E = I_B + I_C$

Transistorearen funtzionamendu-zonari buruzko hipotesia egitean, kontuan hartu behar dugu transistorea ez dela kortean egongo, I_B ez baita nulua. Ondorioz, honako hipotesi hau egingo dugu:

1. hipotesia. Transistorea Z.A.A.-ean:

Ekuazioak: ❹ $V_{BE} = 0{,}7$ V ❺ $I_C = \beta I_B$

Baldintza: $V_{CE} \geq 0{,}2$ V

Ondorioz, honako hau da ebatzi beharreko ekuazio-sistema:

❶ $I_B = 0{,}25$

❷ $5 = 1I_C + V_{CE} + 2I_E$

❸ $I_E = I_B + I_C$

❹ $V_{BE} = 0{,}7$

❺ $I_C = 100I_B$

Soluzioa: $I_B = 0{,}25$ mA, $I_C = 25$ mA, $I_E = 25{,}25$ mA, $V_{BE} = 0{,}7$ V, $V_{CE} = -70{,}5$ V

Hipotesiaren egiaztapena: $V_{CE} = -70{,}5 \text{ V} < 0{,}2$ V; beraz, hipotesia ez da zuzena.

Hortaz, bigarren hipotesia egin beharko dugu:

2. hipotesia. Transistorea **asetasunean**:

Ekuazioak: ❹ $V_{BE} = 0{,}7$ V ❺ $V_{CE} = 0{,}2$ V

Baldintza: $I_C \leq \beta I_B$

Honako hau da, beraz, ebatzi beharreko ekuazio-sistema:

❶ $I_B = 0{,}25$

❷ $5 = 1I_C + V_{CE} + 2I_E$

❸ $I_E = I_B + I_C$

❹ $V_{BE} = 0{,}7$

❺ $V_{CE} = 0{,}2$

Soluzioa: $I_B = 0{,}25$ mA, $I_C = 1{,}43$ mA, $I_E = 1{,}68$ mA, $V_{BE} = 0{,}7$ V, $V_{CE} = 0{,}2$ V

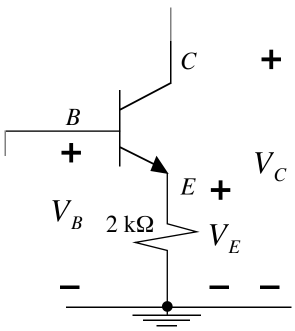
Hipotesiaren egiaztapena: $I_C = 1{,}43 \text{ mA} < 25 \text{ mA } (100 I_B)$;

beraz, 2. hipotesia zuzena da; hots, transistorea asetasunean dago.

Transistorearen operazio-puntua:

$$\boxed{Q(I_B = 0{,}25 \text{ mA}; V_{BE} = 0{,}7 \text{ V}; I_C = 1{,}43 \text{ mA}; V_{CE} = 0{,}2 \text{ V})}$$

Orain, V_E, V_B eta V_C tentsioak kalkulatzeko, KTL aplikatuko dugu puntu horietatik erreferentziazko punturaino. Hona hemen:

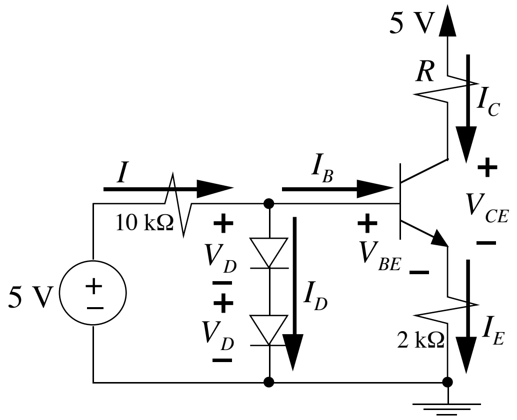


$V_E = 2I_E \rightarrow \boxed{V_E = 3{,}37 \text{ V}}$

$V_B = V_{BE} + 2I_E \rightarrow \boxed{V_B = 4{,}07 \text{ V}}$

$V_C = V_{CE} + 2I_E \rightarrow \boxed{V_C = 3{,}57 \text{ V}}$

b) Lehenik eta behin, zirkuitu berrian dauden magnitudeak ipiniko ditugu, gero ekuazioak idazteko asmoz.



Zirkuituari dagozkion ekuazioak:

KTL oinarri-igorle mailan: ❶ $2V_D = V_{BE} + 2I_E$

KTL kolektore-igorle mailan: ❷ $5 = RI_C + V_{CE} + 2I_E$

KTL ezkerreko mailan ❸ $5 = 10I + 2V_D$

KKL *B* korapiloan: ❹ $I = I_B + I_D$

Transistorearen funtzionamendu-zonari buruz, badakigu zona aktibo arruntean egon behar duela, hori baita nahi duguna. Baina, nola egongo dira bi diodoak? Biak zuzenki polarizatuta egonez gero, 1,4 V-eko tentsioa behar dute. Sarrerako tentsioa 5 V-ekoa denez gero, nahiko handia da bi diodoak zuzenki polarizatzeko, eta baita transistorea Z.A.A.-ean sartzeko ere. Ondorioz:

Transistorea Z.A.A.-ean, **diodoak Z.P.**:

Ekuazioak:	❺ $V_{BE} = 0{,}7$ V	❻ $I_C = \beta I_B$	❼ $V_D = 0{,}7$ V
Baldintzak:	$V_{CE} \geq 0{,}2$ V		$I_D \geq 0$

Igorleko korronteari dagokion ekuazioa ere behar dugu: ❽ $I_E = I_B + I_C$

Ondorioz, honako hau da ebatzi beharreko ekuazio-sistema:

❶ $2V_D = V_{BE} + 2I_E$

❷ $5 = RI_C + V_{CE} + 2I_E$

❸ $5 = 10I + 2V_D$

❹ $I = I_B + I_D$

❺ $V_{BE} = 0{,}7$

❻ $I_C = 100I_B$

❼ $V_D = 0{,}7$

❽ $I_E = I_B + I_C$

Lehen bezala, R ezaguna dela suposatuz bilatuko dugu soluzioa; hots, parametro gisa erabiliko dugu R, eta, horrela, beste ezezagun guztiak horren funtzioan kalkulatuko ditugu.

Soluzioa: I_B = 3,47 μA, I_C = 0,347 mA, I_E = 0,35 mA, I = 0,36 mA,

$$I_D = 0{,}357 \text{ mA}, \quad V_{BE} = 0{,}7 \text{ V}, \quad V_{CE} = 4{,}3 - 0{,}347R$$

Agerikoa da diodoak zuzenki polarizatuta egoteko baldintza betetzen dela, $I_D > 0$ baita.

Orain, transistorea zona aktibo arruntean egoteko baldintza betearaziko diogu zirkuituari:

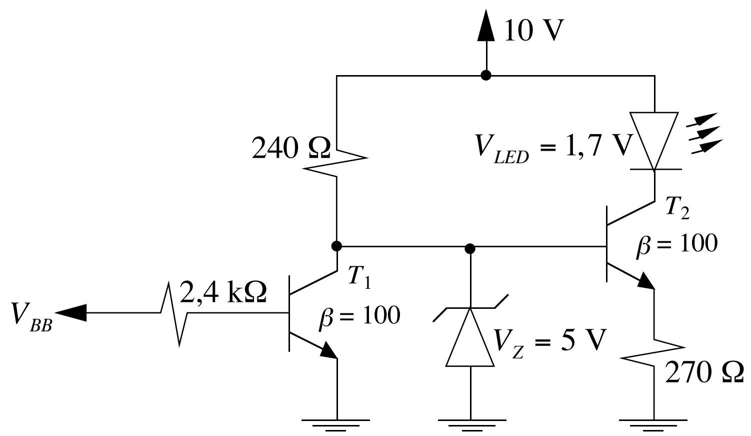
Baldintza betearaziz: $V_{CE} = 4{,}3 - 0{,}347R \geq 0{,}2$

Azken ekuazio honetatik, honako hau ateratzen da:

$$\boxed{R \leq 11{,}8 \text{ k}\Omega}$$

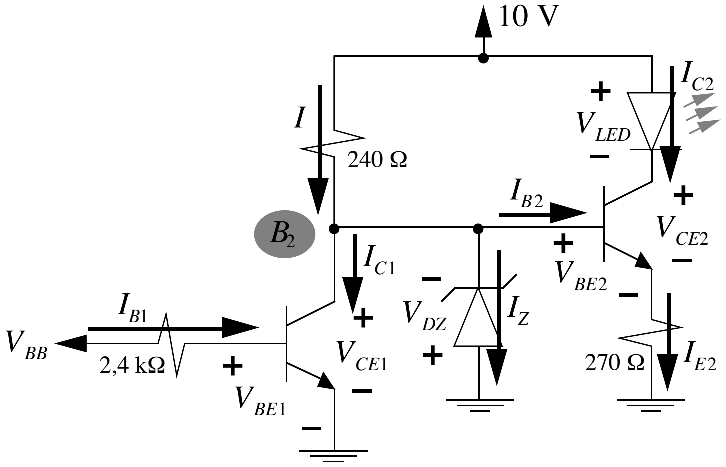
Hau da, R erresistentziaren balioa 11,8 kΩ baino txikiagoa den bitartean, transistorea zona aktibo arruntean egongo da; juxtu R = 11,8 kΩ denean, berriz, transistorea zona aktibo arruntaren mugan egongo da, hots, asetasunera sartzeko prest. Azkenik, R erresistentziaren balioa 11,8 kΩ baino handiagoa denean, transistorea asetasunean egongo da (irakurleak erraz egiazta dezakeen bezala, ezinezkoa baita transistorea kortean egotea, edozein R-rentzat). Hori dela eta, R-ren muga-balio hori transistorea zona aktibo arruntean egoteko maximoa dela esan dezakegu.

13. Analiza ezazu irudiko zirkuitua V_{BB} = 0 V denean eta 10 V denean. Zenbatekoak dira V_{BB} tentsioaren muga-balioak, T_1 transistorea zona aktibo arruntean egoteko?



Ebazpena:

Beti bezala zirkuituko magnitudeak ipiniz hasiko garen arren, gero intuitiboki ebatziko dugu zirkuitua, errazagoa baita; bestela, hipotesi zuzenarekin asmatzea ez da berehalakoa, bi transistore, Zener diodo bat eta LED diodo bat baitaude, hau da, teorikoki 54 aukera daude.



Irudian agerikoa denez, hamahiru ezezagun daude: T_1 transistorearen lau magnitude (I_{B1}, V_{BE1}, I_{C1}, V_{CE1}), Zener diodoaren bi magnitude (V_{DZ}, I_Z), T_2 transistorearen bost magnitude (I_{B2}, V_{BE2}, I_{C2}, V_{CE2}, I_{E2}), LED diodoaren magnitude bat (V_{LED}) —LED diodotik igarotzen den korrontea T_2 transistorearen I_{C2} korrontea da— eta B_2 korapilora iristen den korrontea, I.

Ondorioz, hamahiru ekuazio beharko ditugu: lau ekuazio bi transistoreen portaera-ekuazioak izango dira; beste bat T_2 transistorearen igorleko korronteari dagokion ekuazioa (KKL transistorean) izango da; beste bat, Zener diodoaren portaera-ekuazioa; beste bat, LED diodoaren portaera-ekuazioa; eta beste sei ekuazioak zirkuitutik atera beharko ditugu, Kirchhoff-en legeak aplikatuz: zirkuituan bost maila daudenez gero, KTL bost aldiz aplikatu beharko dugu bost ekuazio lortzeko, eta KKL behin bakarrik aplikatuko dugu zirkuituan (adi, T_2 transistorean ere aplikatu behar da KKL, baina hori lehenago esan dugu), T_1 transistorearen kolektorean edo T_2 transistorearen oinarrian hain zuzen, B_2 korapiloa baitago bertan. Hona hemen ekuazioak:

Zirkuituari dagozkion ekuazioak:

KTL T_1 transistorearen sarrerako mailan: ❶ $V_{BB} = 2,4 I_{B1} + V_{BE1}$

KTL T_1 transistorearen irteerako begiztan: ❷ $10 = 0,24 I + V_{CE1}$

KTL T_1 transistoreak eta Zener diodoak osatutako mailan: ❸ $V_{CE1} = -V_{DZ}$

KTL T_2 transistorearen sarrerako mailan: ❹ $-V_{DZ} = V_{BE2} + 0,27 I_{E2}$

KTL T_2 transistorearen irteerako mailan: ❺ $10 = V_{LED} + V_{CE2} + 0,27 I_{E2}$

KKL C_1 kolektorean edo B_2 oinarrian: ❻ $I = I_{C1} + I_Z + I_{B2}$

KKL T_2 transistorean: ❼ $I_{E2} = I_{B2} + I_{C2}$

Baina orain, hipotesiak egiteari ekin beharrean (gogoratu 54 aukera dagoela guztira), azter dezagun intuitiboki zer gertatzen den analizatu behar dugun kasu bakoitzean.

a) V_{BB} = 0 denean, T_1 transistorearen sarreran betetzen den ekuazioa analizatzen badugu,

$$❶ \quad 0 = 2,4 I_{B1} + V_{BE1},$$

agerikoa da T_1 transistoreak kortean egon behar duela, oinarri-igorle junturan ezarritako tentsioa 0,7 V baino txikiagoa delako. Ondorioz, beste elementuei buruzko hipotesia egitea sinplifikatu da, zentzuzkoena egingo baitugu, hots, korronteen noranzkoak kontuan hartu. Hona hemen:

1. hipotesia. T_1 transistorea **kortean**, Zener diodoa **alderantziz polarizatuta Zener eskualdean**, LED diodoa **zuzenki polarizatuta**, eta T_2 transistorea **Z.A.A.-ean**:

Ekuazioak:	❽ $I_{B1} = 0$	❾ $I_{C1} = 0$
	❿ $V_{DZ} = -5$ V	⓫ $V_{LED} = 1{,}7$ V
	⓬ $V_{BE2} = 0{,}7$ V	⓭ $I_{C2} = 100 I_{B2}$
Baldintzak:	$V_{BE1} \leq 0{,}7$ V	$I_Z \geq 0$
	$I_{LED} = I_{C2} \geq 0$	$V_{CE2} \geq 0{,}2$ V

Hamahiru ekuazio horiek osatutako ekuazio-sistema ebatzi ondoren, hauxe da soluzioa:

Soluzioa: $I_{B1} = 0$ mA, $I_{C1} = 0$ mA, $V_{BE1} = 0$ V, $V_{CE1} = 5$ V,

$I_{E2} = 15{,}9$ mA, $I_{B2} = 0{,}16$ mA, $I_{C2} = 15{,}8$ mA, $V_{BE2} = 0{,}7$ V, $V_{CE2} = 4$ V,

$V_{DZ} = -5$ V, $I_Z = 20{,}7$ mA, $V_{LED} = 1{,}7$ V, $I_{LED} = 15{,}8$ mA

Hipotesiaren egiaztapena: $V_{BE1} = 0 \text{ V} < 0{,}7$ V; $I_Z = 20{,}7 \text{ mA} > 0$;

$I_{LED} = 15{,}8 \text{ mA} > 0$; $V_{CE2} = 4 \text{ V} > 0{,}2$ V

beraz, hipotesia **zuzena** da.

b) V_{BB} = 10 V denean. Berriro ere, T_1 transistorearen sarreran betetzen den ekuazioa analizatzen badugu, agerikoa izango da, oraingo honetan T_1 transistorea ez dela kortean egongo. Eta hor dago gakoa: zona aktibo arruntean zein asetasunean egon baitaiteke. Arazoa da, hipotesia egin eta dagozkion ekuazioak ebaztea luzea izango dela, gero lehenengo hipotesia okerra izan dela ikusteko. Horregatik, lehendabizi zirkuitua intuitiboki analizatuko dugu, bi hipotesi horietatik egokiena zein den ikusteko.

Horretarako, demagun T_1 transistorea Z.A.A.-ean dagoela (beste elementuen egoerari buruzko hipotesirik egin gabe). Kasu horretan $V_{BE1} = 0{,}7$ V-ekoa izango denez gero, berehalakoa da ❶ ekuazioa erabiliz T_1 transistorearen oinarri-korrontea kalkulatzea :

$$❶ \quad 10 = 2,4 I_{B1} + V_{BE1} \quad \rightarrow \quad I_{B1} = 3{,}875 \text{ mA}$$

Balio horretatik abiatuta, berehalakoa da T_1 transistorearen kolektore-korrontea kalkulatzea, $I_{C1} = 100I_{B1}$ dela kontuan hartuz:

$$I_{C1} = 387{,}5 \text{ mA}$$

Korronte hori I korronte osoaren zati bat izango da (gogoratu ❻ ekuazioa); hots, 240 Ω-eko erresistentziatik igaroko da, Zener diodoak eta T_2 transistorearen oinarriak behar duten korronteekin batera (azken bi hauek elementu pasiboak izanik, ezinezkoa da korrontea bidaltzea T_1 transistorerantz). Hori dela eta, I korrontearen balioa I_{C1}-erako kalkulatu dugun hori baino handiagoa izango da, edo kasurik hoberenean, horren berdina, inoiz ez txikiagoa. Ondorioz:

$$I_{minimoa} = 387{,}5 \text{ mA}$$

Hori dela eta, Ohm-en legea aplikatuz, 240 Ω-eko erresistentziaren muturren arteko tentsioaren balio minimoa kalkula dezakegu:

$$V_{minimoa} = 93 \text{ V !}$$

Hau da, T_1 transistorea Z.A.A.-ean egoteko, zirkuituaren goiko puntuan gutxienez 93 V-eko tentsio-sorgailu bat konektatu beharko genuke! Dagoena 10 V-ekoa besterik ez denez gero, hortik ondorioztatzen da, ezinezkoa dela T_1 transistorea Z.A.A.-ean egotea. Horregatik, kortean ere ez dagoenez gero, pentsatzekoa da asetasunean egongo dela.

Hortik abiatuta, zirkuitua intuitiboki aztertuz, beste elementuen egoerari buruzko hausnarketa ere egin daiteke, edozein hipotesi egin baino lehen. Hona hemen, bada, hausnarketa hori:

Hasteko, ❸ ekuazioa kontuan hartuz, Zener diodoak honako tentsio hau izango du bere muturren artean:

$$V_{DZ} = -V_{CE1} = -0{,}2 \text{ V}.$$

Ondorioz, agerikoa da Zener diodoa ez dela egongo Zener eskualdean, alderantziz polarizatuta egon arren.

T_2 transistoreari dagokionez, berriz, ❸ eta ❹ ekuazioak batera kontuan hartuz, honako ekuazio hau beteko da oinarri-igorle junturan:

$$V_{CE1} = 0{,}2 \text{ V} = V_{BE2} + 0{,}27 I_{E2}\,.$$

Ondorioz, agerikoa da T_2 transistorea kortean egongo dela, bere sarreran ezarritako tentsioa 0,7 V baino txikiagoa baita.

Azkenik, T_2 transistorearen egoerarekin erabat lotuta dago LED diodoaren egoera: I_{C1} korrontea nulua izango denez gero, pentsatzekoa da LED diodoa alderantziz polarizatuta egongo dela.

Hori guztia kontuan hartuz, ondorengo hipotesia egingo dugu:

1. hipotesia. T_1 transistorea **asetasunean**, Zener diodoa **alderantziz polarizatuta eskualde arruntean**, LED diodoa **alderantziz polarizatuta**, eta T_2 transistorea **kortean**:

Ekuazioak:	❽ $V_{BE1} = 0{,}7$ V	❾ $V_{CE1} = 0{,}2$ V
	❿ $I_Z = 0$	⓫ $I_{LED} = 0$
	⓬ $I_{B2} = 0$	⓭ $I_{C2} = 0$
Baldintzak:	$I_{C1} \le 100 I_{B1}$	$-5\text{ V} \le V_{DZ} \le 0$
	$V_{LED} \le 1{,}7$ V	$V_{BE2} \le 0{,}7$ V

Hamahiru ekuazio horiek osatutako ekuazio-sistema ebatzi ondoren, hauxe da soluzioa:

Soluzioa: $I_{B1} = 3{,}875$ mA, $I_{C1} = 40{,}83$ mA, $V_{BE1} = 0{,}7$ V, $V_{CE1} = 0{,}2$ V,
$I_{E2} = 0$ mA, $I_{B2} = 0$ mA, $I_{C2} = 0$ mA, $V_{BE2} = 0{,}2$ V, $V_{CE2} = 10\text{ V} - V_{LED}$,
$V_{DZ} = -0{,}2$ V, $I_Z = 0$ mA, $V_{LED} = 10\text{ V} - V_{CE2}$, $I_{LED} = 0$ mA

Hipotesiaren egiaztapena: $I_{C1} = 40{,}83\text{ mA} < 387{,}5\text{ mA } (100 I_{B1})$;
$-5\text{ V} < V_{DZ} = -0{,}2\text{ V} < 0$; $V_{BE2} = 0{,}2\text{ V} < 0{,}7$ V

LED diodoari dagokionez, ez dago esaterik zenbatekoa den bere muturren arteko tentsioa; soilik esan daiteke $V_{LED} + V_{CE2} = 10$ V dela. Hau da, 1,7 V-ekoa izan zitekeen arazorik gabe, eta orduan esango genuke LED diodoa zuzenki polarizatuta dagoela. Baina, edozein kasutan, LED diodotik igarotzen den korrontea zero denez gero, $V_{LED} = 1{,}7$ V izatekotan, diodoa bi egoeren arteko mugan egongo litzateke, eta horrek ez du eraginik soluzioaren gainean; ondorioz, **hipotesia zuzena** da.

c) V_{BB} tentsioaren muga-balioak T_1 transistorea Z.A.A.-ean egoteko.

Kalkuluak egiten hasi baino lehen, oso argi izan behar dugu bi muga-balio aurkitu beharko ditugula: alde batetik, balio minimoa, transistorea kortetik ateratzeko behar dena, hain zuzen ere; beste aldetik, balio maximoa, transistorea zona aktibo arruntean egoteko, asetasunera sartu gabe. Hori argitu ondoren, kalkula ditzagun bi balio horiek.

Hasteko, berriro ere T_1 transistorearen sarreran betetzen den ekuazioa analizatzen badugu, agerikoa da T_1 transistorea kortean ez egoteko, 0,7 V baino handiagoa izan behar duela sarreran ezarritako tentsioak (gogoratu 1. ariketa). Ondorioz,

$$V_{BB} \ge 0{,}7 \text{ V}$$

izan behar da, T_1 transistorea Z.A.A.-ean egoteko.

Beste aldetik, T_1 transistorea Z.A.A.-ean dagoenean, bere kolektorean honako hau bete behar da, ❷ ekuazioaren arabera:

$$V_{CE1} = 10 - 0{,}24 I \ge 0{,}2 .$$

Hortik, I korrontearen balio maximoa ondorioztatzen da:

$$I \le \frac{10 - 0{,}2}{0{,}24} \text{ mA} = 40{,}83 \text{ mA}$$

Aurreko atalean ikusi dugun legez, ezinezkoa da T_1 transistorearen kolektore-korrontea I-ren balio maximo hori baino handiagoa izatea, I hori baita B_2 korapilora iritsiko den korronte bakarra eta beste elementuen artean banatuko baita; hots, T_1 transistoreak, Zener diodoak eta T_2 transistoreak I korronte horren zati bana hartuko dute. Hori dela eta, I-ren balio maximo hori, kasurik txarrenean, transistoreak hartuko du osorik. Ondorioz:

$$I_{C1} \leq \frac{10-0,2}{0,24}\ \text{mA} = 40,83\ \text{mA}$$

Kolektore-korrontearen balio maximo horretan oinarriturik, oinarri-korrontearen balio maximoa zenbatekoa izango den kalkula dezakegu:

$$I_{B1} = \frac{I_{C1}}{100} \leq \frac{40,83}{100}\ \text{mA} = 408,3\ \mu\text{A}$$

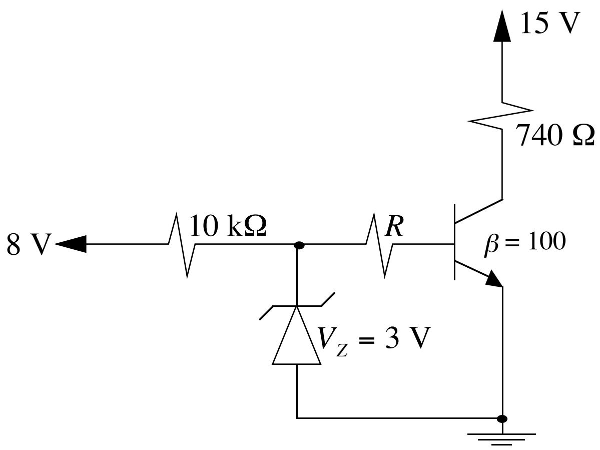
Berriro ere ❶ ekuazioa kontuan hartuz:

$$I_{B1} = \frac{V_{BB}-V_{BE1}}{2,4} \leq 0,4083\ \text{mA} \quad \rightarrow \quad V_{BB} \leq (2,4 \cdot 0,4083 + 0,7) = 1,68\ \text{V}$$

Laburbilduz, T_1 transistorea zona aktibo arruntean egoteko, sarrerako tentsioak honako tartean egon behar du:

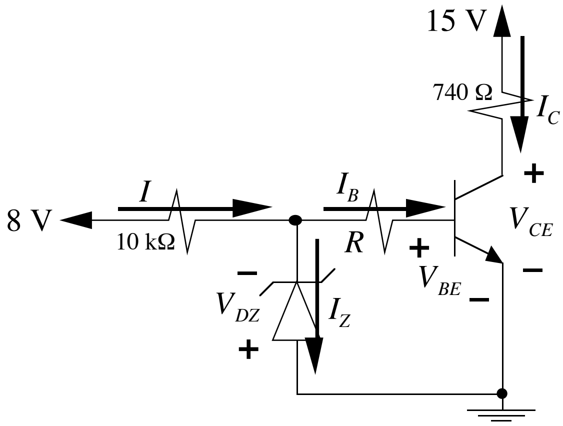
$$\boxed{0,7\ \text{V} \leq V_{BB} \leq 1,68\ \text{V}}$$

14. Kalkula ezazu zein balio-tartetan egon daitekeen R erresistentzia (maximoa eta minimoa) irudiko zirkuituan, transistorea asetasunean eta Zener diodoa Zener eskualdean alderantziz polarizatuta egon daitezen.



Ebazpena:

Beti bezala, lehendabizi, zirkuituko magnitudeak ipiniko ditugu. Oraingo honetan, transistoreaz gain, Zener diodo bat ere badago. Ondorioz:



Zirkuituari dagozkion ekuazioak:

KKL sarrerako korapiloan: ❶ $I = I_B + I_Z$

KTL sarrerako ezkerreko mailan: ❷ $8 = 10I - V_{DZ}$

KTL oinarri-igorle mailan: ❸ $-V_{DZ} = RI_B + V_{BE}$

KTL kolektore-igorle mailan: ❹ $15 = 0,74I_C + V_{CE}$

Oraingo honetan ez dugu hipotesirik egin behar, transistoreak asetasunean eta Zener diodoak Zener eskualdean alderantziz polarizatuta egon behar dutela baitakigu. Hori bai, aurreko ekuazioetan zortzi ezezagun daude (korronte eta tentsioez gain, *R* erresistentziaren balioa ere ezezaguna delako). Egoera ezaguna izan arren, hiru ekuazio baino ez ditugu lortuko (bi transistorearentzat eta bat Zener diodoarentzat), guztira zazpi ekuazio izango ditugularik. Falta den ekuazioa, beraz, nahi dugun egoeran egoteko bete beharreko baldintzatik lortuko dugu, baldintza betearaziz hain zuzen ere.

Egoera. Transistorea **asetasunean**, Zener diodoa **A.P. Zener eskualdean**:

Ekuazioak: ❺ $V_{BE} = 0,7$ V ❻ $V_{CE} = 0,2$ V ❼ $V_{DZ} = -3$ V

Baldintzak: $I_C \leq 100I_B$ $I_Z \geq 0$

Orain, hau bezalako ariketetan egin duguna egingo dugu: aurreko zazpi ekuazioek osatutako sistemaren soluzioa *R* parametroaren menpe bilatuko dugu, eta ondoren baldintzak betearaziko dizkiegu.

Soluzioa: $I = 0,5$ mA, $I_B = \dfrac{2,3}{R}$ mA, $I_C = 20$ mA, $I_Z = \left(0,5 - \dfrac{2,3}{R}\right)$ mA,

$V_{BE} = 0,7$ V, $V_{CE} = 0,2$ V, $V_{DZ} = -3$ V

Baldintzak betearaziz: $I_C = 20 \text{ mA} \le 100 I_B = \dfrac{230}{R}$, $\qquad I_Z = \left(0{,}5 - \dfrac{2{,}3}{R}\right) \ge 0$

Azken ekuazio hauetatik, R erresistentziarentzat honako bi muga-balio lortzen dira:

$R \le 11{,}5$ kΩ, transistorea asetasunean egon dadin,

$R \ge 4{,}6$ kΩ, Zener diodoa Zener eskualdean A.P. egon dadin.

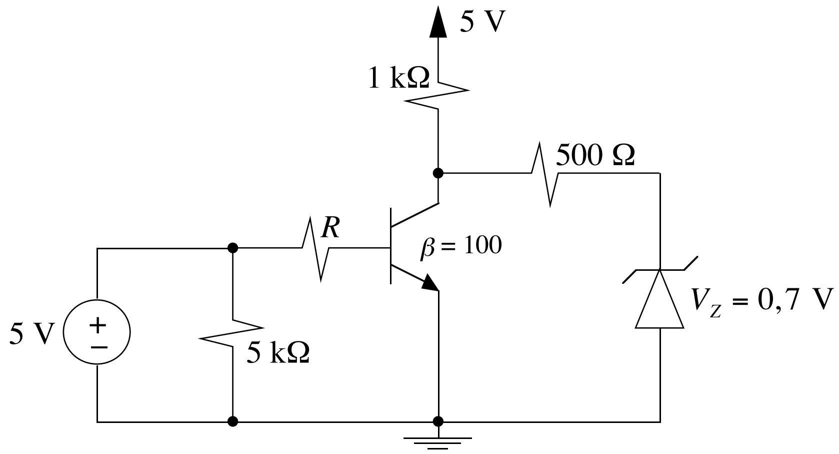
Ondorioz, R erresistentziaren balioa bi horien artean egon behar da, bi egoerak aldi berean bete daitezen:

$$\boxed{4{,}6 \text{ k}\Omega \le R \le 11{,}5 \text{ k}\Omega}$$

15. Irudiko zirkuituan:

a) Bila ezazu zenbatekoa izan behar duen R erresistentziaren balioak, Zener diodoa korrontea eroaten has dadin. Nolakoa da balio hori, maximoa ala minimoa?

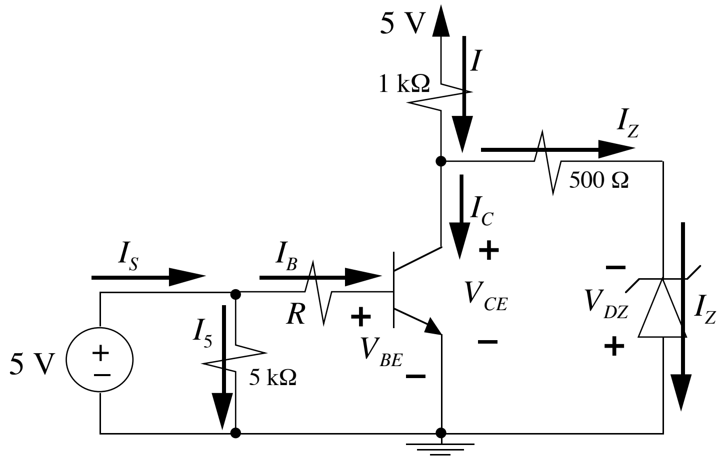
b) Aurki ezazu zein funtzionamendu-zonatan dagoen transistorea, aurreko atalean lortutako R-ren balio horretarako.



Ebazpena:

a) Hasi baino lehen, egin behar dugunari buruzko hausnarketa egitea komeni da, hots, zirkuituak zein egoeratan egon behar duen argitzea. Zener diodoa eroaten hastea nahi dugu, baina horretarako bi aukera daude: zuzenki polarizatuta egotea ala Zener eskualdean alderantziz polarizatuta egotea, bi kasuotan Zener diodoak korrontea eroaten baitu. Zirkuituari erreparatuz, agerikoa da bigarrena dela aukera bakarra, bestea (Zener diodoa Z.P. egotea, alegia) ezinezkoa baita: zirkuituko tentsiorik baxuena 0 V-ekoa da, erreferentziazko puntuarena, beste guztiak positiboak izango direlarik; ondorioz, Zener diodoaren N aldearen tentsioa P aldearena baino handiagoa izango da.

Hori argitu ondoren, beti bezala, zirkuituko magnitudeak ipini eta zirkuituari dagozkion ekuazioak idatziko ditugu. Aurreko ariketetan bezala, tentsio eta korronteez gain, R ere ezezaguna izango da. Horregatik, nahi dugun egoeran egoteko bete beharreko baldintza betearaziko diogu zirkuituari, R-ren balioa kalkulatu ahal izateko.



Zirkuituari dagozkion ekuazioak:

KTL sarrerako ezkerreko mailan:	❶ $5 = 5I_5$
KTL oinarri-igorle mailan:	❷ $5I_5 = RI_B + V_{BE}$
KKL sarrerako korapiloan:	❸ $I_S = I_B + I_5$
KTL kolektore-igorle goiko begiztan:	❹ $5 = 1I + V_{CE}$
KTL kolektore-igorle eskuineko mailan:	❺ $V_{CE} = 0,5I_Z - V_{DZ}$
KKL irteerako korapiloan:	❻ $I = I_C + I_Z$

Agerikoa denez, hamar ezezagun daude (R barne); ondorioz, beste lau ekuazio behar ditugu. Bi ekuazio transistorearen portaera-ekuazioak izango dira, funtzionamendu-zonaren arabera; beste bat, Zener diodoaren portaera-ekuazioa izango da; eta azkena, Zener diodoa nahi dugun egoeran egoteko bete beharreko baldintza betearaztean lortutako ekuazioa izango da.

Transistorearen funtzionamendu-zonari buruz ezer ez dakigun arren, Zener diodoaren egoerari buruz, ordea, bai. Horregatik, hortik abiatuko gara transistorearen funtzionamendu-zonari buruz intuitiboki zerbait ondorioztatzeko.

Egoera. Zener diodoa **Zener eskualdean A.P.**; transistorea ???:

Ekuazioa: ❼ $V_{DZ} = -V_Z = -0{,}7$ V **Baldintza**: $I_Z \geq 0$

Zener diodoaren ekuazioa eta baldintza kontuan hartuz, ❺ ekuaziotik transistorea asetasunean egotea ezinezkoa dela ondorioztatzen da, zeren:

$$V_{CE} = 0,5I_Z + 0,7 \geq 0,2 \text{ V} \text{ da beti, } I_Z \geq 0 \text{ delako.}$$

Bestalde, transistorearen sarrerako tentsioa 0,7 V baino handiagoa denez gero, ziur egon gaitezke transistorea ez dela kortean egongo. Hori dela eta, honako hipotesi hau egingo dugu transistorearen funtzionamendu-zonari buruz:

1. hipotesia. Transistorea **Z.A.A.-ean**:

Ekuazioak: ❽ $V_{BE} = 0{,}7$ V ❾ $I_C = 100 I_B$

Baldintza: $V_{CE} \geq 0{,}2$ V (ikusi dugunez, bete egiten da)

Ondorioz, honako hau da ebatzi beharreko ekuazio-sistema:

❶ $5 = 5I_5$

❷ $5I_5 = RI_B + V_{BE}$

❸ $I_S = I_B + I_5$

❹ $5 = 1I + V_{CE}$

❺ $V_{CE} = 0{,}5I_Z - V_{DZ}$

❻ $I = I_C + I_Z$

❼ $V_{DZ} = -0{,}7$

❽ $V_{BE} = 0{,}7$

❾ $I_C = 100 I_B$

Soluzioa: $I_5 = 1$ mA, $I_B = \dfrac{4{,}3}{R}$ mA, $I_C = \dfrac{430}{R}$ mA, $I_S = \left(\dfrac{4{,}3}{R} + 1\right)$ mA, $V_{BE} = 0{,}7$ V,

$$V_{CE} = \frac{6{,}4 - \dfrac{430}{R}}{3}\ \text{V},\ I_Z = \frac{8{,}6 - \dfrac{860}{R}}{3}\ \text{mA},\ V_{DZ} = -0{,}7\ \text{V},\ I = \frac{8{,}6 + \dfrac{430}{R}}{3}\ \text{mA}$$

Baldintza betearaziz: $I_Z = \dfrac{8{,}6 - \dfrac{860}{R}}{3}\ \text{mA} \geq 0 \quad \rightarrow \quad \boxed{R \geq 100\ \text{k}\Omega}$

Ondorioz, Zener diodoa doi-doi eroaten has dadin, $R = 100$ kΩ izan behar da, balio horrekin $I_Z = 0$ baita $V_{DZ} = -0{,}7$ V izanik, hau da, Zener diodoa A.P. egongo da, baina Zener eskualdearen eta eskualde arruntaren arteko mugan hain zuzen. Bestalde, balio hori minimoa da, baldintza betearaziz ikusi baitugu R-ren balioak 100 kΩ baino handiagoa izan behar duela.

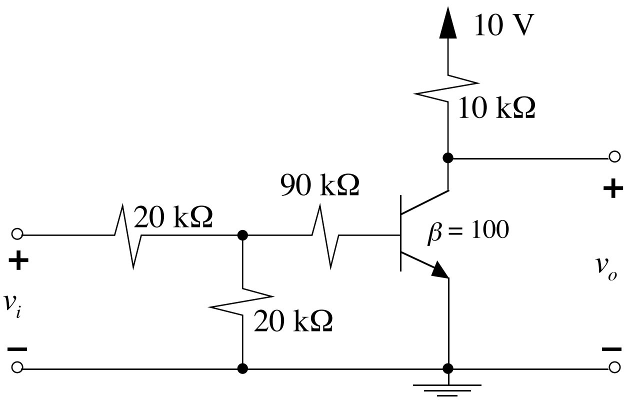
b) Orain, R-ren balio zehatz horretarako soluzioa kalkulatzen badugu, hauxe izango da soluzioa:

Soluzioa: $I_5 = 1$ mA, $I_B = 43$ µA, $I_C = 4{,}3$ mA, $I_S = 1{,}043$ mA, $V_{BE} = 0{,}7$ V, $V_{CE} = 0{,}7$ V, $I_Z = 0$ mA, $V_{DZ} = -0{,}7$ V, $I = 4{,}3$ mA

Transistorearen hipotesiaren egiaztapena: $V_{CE} = 0{,}7\ \text{V} > 0{,}2$ V;

beraz, hipotesia zuzena da; hots, transistorea zona aktibo arruntean dago.

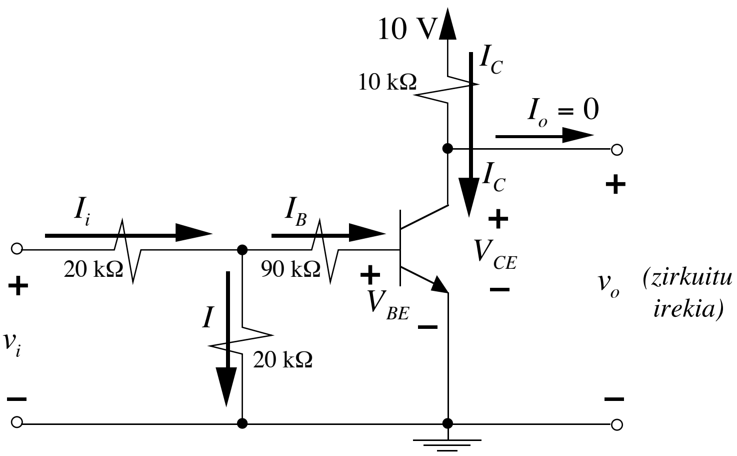
16. Irudiko zirkuiturako



marraz ezazu (v_o, v_i) transferentzia-kurba. Horretarako, azter ezazu sarrera-tentsioaren aldaketak (v_i-renak) irteera-tentsioaren gainean (v_o-ren gainean) duen eragina.

Ebazpena:

Beti bezala, lehendabizi, zirkuituko magnitudeak ipiniko ditugu; horretarako, kontuan hartuko dugu irteera zirkuitu irekian dagoela, hots, irteeratik ez dela korronterik igaroko:



Ondoren, zirkuituan betetzen diren ekuazioak idatziko ditugu:

Zirkuituari dagozkion ekuazioak:

KKL sarrerako korapiloan: ❶ $I_i = I_B + I$

KTL sarrerako ezkerreko mailan: ❷ $v_i = 20I_i + 20I$

KTL oinarri-igorle mailan: ❸ $20I = 90I_B + V_{BE}$

KTL kolektore-igorle mailan: ❹ $10 = 10I_C + V_{CE}$

Sarrerako tentsioa, v_i, aldakorra da (sarrerako bi puntu horien artean tentsio-sorgailu aldakor bat dagoela suposatuko dugu, eta 0 voltetik 10 volteraino handituko dela bere tentsioa), eta horren eragina irteerako tentsioaren gainean, v_o, aztertu behar dugu. Hori dela eta, irteerako tentsioa aurreko ekuazioetan ez dagoenez gero, horren adierazpena idaztea komeni da. Irteeran KTL aplikatuz:

$$v_o = V_{CE}$$

Beraz, dagoeneko zazpi ezezaguneko (v_i, I_i, I, I_B, V_{BE}, I_C, V_{CE}) lau ekuazio dauzkagu. Falta diren beste bi ekuazioak, transistorearen portaera-ekuazioak dira, hots, funtzionamendu-zonaren menpekoak. Hori dela eta, transistorearen funtzionamendu-zonari buruzko hipotesia egin beharko dugu, funtzionamendu-zona sarrerako tentsioaren menpekoa izango dela kontuan hartuz; hau da, 7. ekuazioa unean uneko hipotesiaren baldintza betearaziz lortuko dugu. Hona hemen:

1. hipotesia. Transistorea **kortean**:

Ekuazioak: ❺ $I_B = 0$ ❻ $I_C = 0$ **Baldintza**: $V_{BE} \le 0{,}7$ V

Sei ekuazioek osatutako sistemaren soluzioa bilatuko dugu, sarrerako tentsioa parametrotzat harturik:

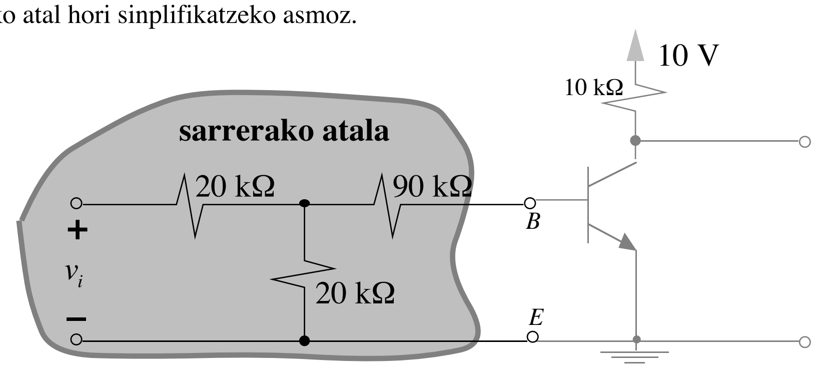
Soluzioa: $I = I_i = \dfrac{v_i}{40}$ mA, $I_B = 0$ mA, $V_{BE} = \dfrac{v_i}{2}$ V, $I_C = 0$ mA, $V_{CE} = 10$ V

Baldintza betearaziz: $V_{BE} = \dfrac{v_i}{2} \le 0{,}7 \quad \rightarrow \quad \boxed{v_i \le 1{,}4 \text{ V}}$

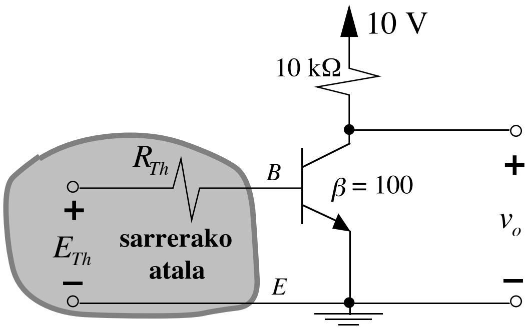
Hau da, sarrerako tentsioa 1,4 V baino txikiagoa den bitartean, transistorea kortean dago eta irteerako tentsioa $v_o = 10$ V da.

Aurrera jarraitu baino lehen, emaitza hori azaltzea merezi duelakoan gaude, irakurle batek baino gehiagok agian pentsatu duelako nonbait iruzur egin diogula, aurreko ariketa batzuetan aipatu baitugu sarrerako tentsioa 0,7 volt baino handiagoa denean transistorea ez dela kortean egongo. Ikus dezagun, bada, "kontraesan" hori.

Horretarako, zirkuituko sarrerako atalaren Thévenin-en zirkuitu baliokidea kalkulatuko dugu B eta E puntuen artean, hots, transistorearen oinarriaren eta igorlearen artean, sarrerako atal hori sinplifikatzeko asmoz.



Arrazoia agerikoa da: sarrerako atala bere Thévenin-en zirkuitu baliokideaz ordezkatuz gero, ariketa batzuetan analizatu dugun transistoredun zirkuiturik sinpleena lortzen da. Hona hemen:



Eta orain bai, irakurleak 1. ariketa errepasatzen badu, ariketa horretan, sarrerako tentsioa 0,7 volt baino txikiagoa denean transistorea kortean egongo dela esan dugula ikusiko du. Beraz, kasu honetan, honela lortzen da emaitza hori:

KTL sarrerako mailan: $E_{Th} = R_{Th} I_B + V_{BE}$

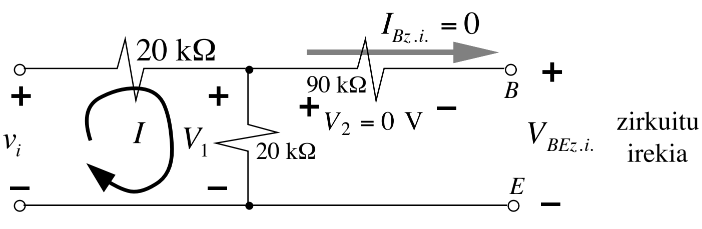
Transistorea kortean ($I_B = 0$): $E_{Th} = V_{BE}$

Kortean egoteko bete beharreko baldintza betearaziz: $V_{BE} = E_{Th} \leq 0,7$ V

Ondorioz, transistorea kortean egongo da $E_{Th} \leq 0,7$ V den bitartean. Beraz, gure kasuan ez dugu sarrerako atalaren Thévenin-en zirkuitu baliokide osoa bilatu behar: nahikoa da Thévenin-en tentsio baliokidea, emaitza Thévenin-en erresistentzia baliokidearen independentea baita.

Hortaz, Thévenin-en tentsio baliokidearen balioa ezagutzeko, jatorrizko zirkuituan B eta E puntuen arteko potentzial-diferentzia zirkuitu irekian ($V_{BEz.i.}$) kalkulatu behar dugu, horretarako ahalik eta bide erosoena erabiliz.

B eta E puntuen artean zirkuitu irekia dagoenez, B puntuarekin lotutako erresistentziatik ez da korronterik pasatuko ($I_{\mathrm{Bz.i.}} = 0$):



Orduan, ezker aldeko mailan KTL aplikatuz:

$$20I + 20I = v_i \quad \rightarrow \quad I = \frac{v_i}{40} \text{ mA}$$

Orain, tentsioak kalkulatu behar ditugu. Eskuin aldeko mailan KTL aplikatuz:

$$V_{BEz.i.} = V_1 - V_2 = V_1 - 0 = 20I = \frac{v_i}{2} \qquad \rightarrow \qquad E_{Th} = \frac{v_i}{2}$$

Lehen lortu dugun emaitza aplikatuz: $E_{Th} \leq 0{,}7$ V $\rightarrow v_i \leq 1{,}4$ V. Hau da, zirkuitua analizatuz hasieran lortu dugun balio bera lortu dugu modu honetan.

Laburbilduz, dagoeneko honako hau dakigu sarrerako eta irteerako tentsioen arteko erlazioari dagokionez:

$$\boxed{v_i \leq \mathbf{1{,}4\ V} \qquad \rightarrow \qquad v_o = 10\ \text{V}}$$

Orain, $v_i \geq 1{,}4$ V denean zer gertatzen den analizatu beharko dugu. Garbi dago transistorea ez dela kortean egongo; ondorioz, hipotesirik logikoena kortetik zona aktibo arruntera igaro dela suposatzea izango da:

2. hipotesia. Transistorea **Z.A.A.-ean**:

Ekuazioak: ❺ $V_{BE} = 0{,}7$ V ❻ $I_C = 100 I_B$

Baldintza: $V_{CE} \geq 0{,}2$ V

Berriro ere sei ekuazioek osatutako sistemaren soluzioa bilatuko dugu, sarrerako tentsioa parametrotzat harturik:

Soluzioa: $I_i = \dfrac{11v_i - 1{,}4}{400}$ mA, $I = \dfrac{9v_i + 1{,}4}{400}$ mA, $I_B = \dfrac{v_i - 1{,}4}{200}$ mA,

$$V_{BE} = 0{,}7\ \text{V}, \quad I_C = \frac{v_i - 1{,}4}{2}\ \text{mA}, \quad V_{CE} = \left(17 - 5v_i\right)\ \text{V}$$

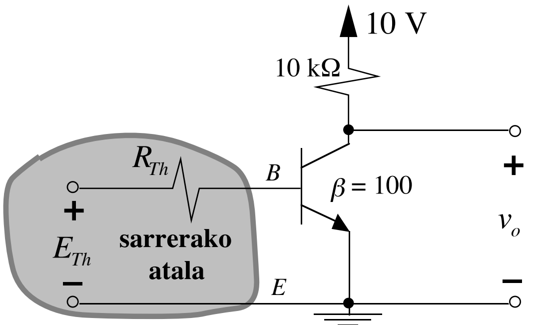
Baldintza betearaziz: $V_{CE} = \left(17 - 5v_i\right) \geq 0{,}2 \qquad \rightarrow \qquad \boxed{v_i \leq 3{,}36\ \text{V}}$

Hau da, sarrerako tentsioa 1,4 V baino handiagoa eta 3,36 V baino txikiagoa den bitartean, transistorea zona aktibo arruntean dago, eta irteerako tentsioa $v_o = 17 - 5v_i$ da.

Beraz, laburbilduz, dagoeneko honako hau dakigu sarrerako eta irteerako tentsioen arteko erlazioari dagokionez:

$v_i \leq$ **1,4 V**	$\rightarrow$	$v_o = 10$ V
1,4 V $\leq v_i \leq$ **3,36 V**	$\rightarrow$	$v_o = (17 - 5v_i)$ V

Berriro ere, aurrera jarraitu baino lehen, zirkuituko sarrerako atalaren Thévenin-en zirkuitu baliokidea —*B* eta *E* puntuen artean— erabiliz, emaitza hori bera lortzen dela ikusiko dugu.



Zirkuitu baliokide hori analizatzen badugu:

KTL sarrerako mailan: $E_{Th} = R_{Th} I_B + V_{BE}$

Transistorea Z.A.A.-ean (V_{BE} = 0,7): $I_B = \dfrac{E_{Th} - 0,7}{R_{Th}} \rightarrow I_C = \dfrac{100 E_{Th} - 70}{R_{Th}}$

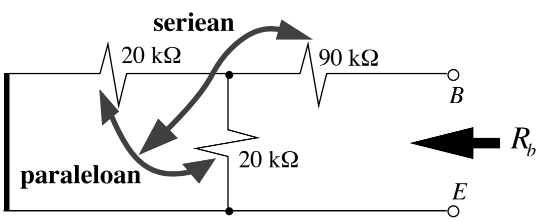
KTL irteerako mailan: $10 = 10 I_C + V_{CE} \rightarrow V_{CE} = 10 - 10 I_C$

Z.A.A.-ean egoteko bete beharreko baldintza betearaziz: $V_{CE} \geq 0,2$ V →

$$I_C \leq \frac{10 - 0,2}{10} \text{ mA} = 0,98 \text{ mA} \qquad \rightarrow \qquad E_{Th} \leq \frac{0,98 R_{Th} + 70}{100}$$

Hau da, E_{Th}-ren muga-balioa kalkulatu ahal izateko, Thévenin-en erresistentzia baliokidea kalkulatu behar dugu.

Hortaz, Thévenin-en erresistentzia baliokidearen balioa ezagutzeko, jatorrizko zirkuituan *B* eta *E* puntuen arteko erresistentzia bilatu behar dugu, sarrerako tentsio--sorgailua anulatu ondoren, hots, zirkuitulaburraz ordezkatu ondoren.



Irudian agerikoa da 20 kΩ-eko bi erresistentziak paraleloan daudela; horien baliokidea 10 kΩ-ekoa erresistentzia bat da, eta seriean dago 90 kΩ-eko erresistentziarekin. Ondorioz:

$$\boxed{R_{Th} = 100 \text{ k}\Omega}$$

Balio hori goiko ekuazioan ordezkatuz: $E_{Th} \leq 1,68$ V. Eta $E_{Th} = \dfrac{v_i}{2}$ denez → $v_i \leq 3,36$ V.

Hau da, zirkuitua analizatuz hasieran lortu dugun balio bera lortu dugu orain ere.

Dena den, orain $v_i \geq 3{,}36$ V denean zer gertatzen den analizatu beharko dugu. Garbi dago transistorea ez dela ez kortean ez eta zona aktibo arruntean egongo; ondorioz, asetasunean egon beharko da:

3. hipotesia. Transistorea **asetasunean**:

Ekuazioak: ❺ $V_{BE} = 0{,}7$ V ❻ $V_{CE} = 0{,}2$ V

Baldintza: $I_C \leq 100 I_B$

Berriro ere, sei ekuazioek osatutako sistemaren soluzioa bilatuko dugu, sarrerako tentsioa parametrotzat harturik:

Soluzioa: $I_i = \dfrac{11v_i - 1{,}4}{400}$ mA, $I = \dfrac{9v_i + 1{,}4}{400}$ mA, $I_B = \dfrac{v_i - 1{,}4}{200}$ mA,

$V_{BE} = 0{,}7$ V, $I_C = 0{,}98$ mA, $V_{CE} = 0{,}2$ V

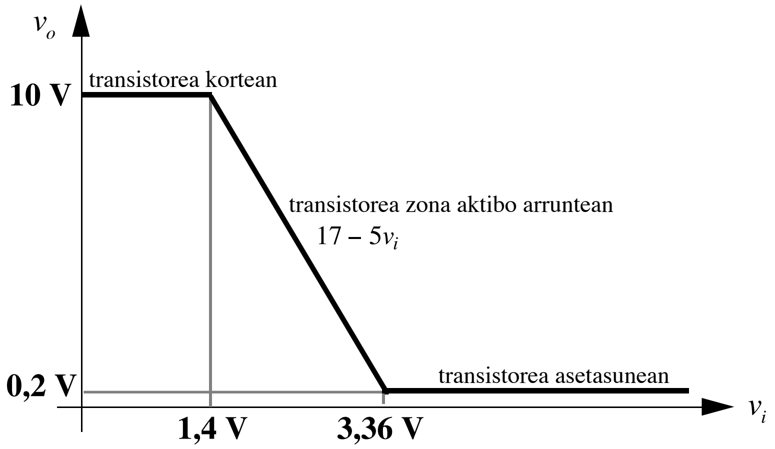
Baldintza betearaziz: $I_C = 0{,}98 \leq 100 \cdot \dfrac{v_i - 1{,}4}{200} \rightarrow \boxed{v_i \geq 3{,}36\ \text{V}}$

Hots, jadanik ezagutzen genuen muga.

Beraz, laburbilduz, dagoeneko honako hau dakigu sarrerako eta irteerako tentsioen arteko erlazioari dagokionez:

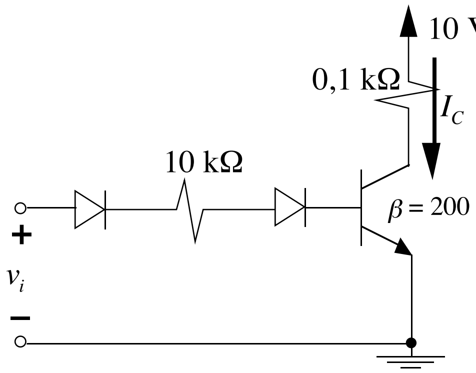
$v_i \leq$ **1,4 V**	$\rightarrow$	$v_o = 10$ V
1,4 V $\leq v_i \leq$ **3,36 V**	$\rightarrow$	$v_o = (17 - 5v_i)$ V
3,36 V $\leq v_i$	$\rightarrow$	$v_o = 0{,}2$ V

Grafikoki:



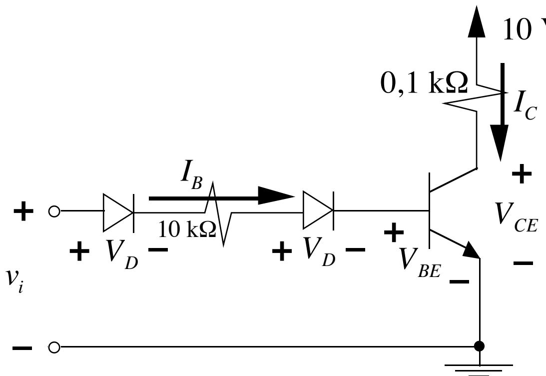
Hurrengo gaian, transferentzia-kurba hori zirkuitu digitalen artean oinarrizkoa den alderanzkailu izeneko zirkuituarena dela ikusiko dugu.

17. Irudiko zirkuiturako, marraz ezazu (I_C, v_i) kurba.



Ebazpena:

Beti bezala, lehendabizi, zirkuituko magnitudeak ipiniko ditugu. Sinplifikatzeko asmoz, bi diodoen tentsioak berdinak direla suposatuko dugu, hots, bi diodoak egoera berean daudela (biak A.P. edo biak Z.P.); hipotesi hori zilegia da, bi diodoak seriean daudela kontuan hartuz. Izan ere, bata Z.P. eta bestea A.P. baldin badaude, seriean egoteagatik bietatik korronte bera igarotzen denez gero, ez da korronterik igaroko nahiz eta bat Z.P. egon. Horrexegatik bi egoera bakarrik dira analizatu beharrekoak: Bi diodoak Z.P. daudenean, korrontea igaroko da. Baten bat A.P. baldin badago, ez da korronterik igarotzen; ondorioz, biak A.P. baleude bezala jokatzen du serie-elkarketak.



Ondoren, zirkuituan betetzen diren ekuazioak idatziko ditugu:

Zirkuituari dagozkion ekuazioak:

KTL sarrerako mailan: ❶ $v_i = 2V_D + 10I_B + V_{BE}$

KTL irteerako mailan: ❷ $10 = 0{,}1I_C + V_{CE}$

Aurreko ariketan bezala, sarrerako tentsioa, v_i, aldakorra da (0 voltetik 10 volteraino), eta I_C kolektoreko korrontearen gainean horrek duen eragina aztertu behar dugu.

Dagoeneko, beraz, sei ezezaguneko (v_i, V_D, I_B, V_{BE}, I_C, V_{CE}) bi ekuazio dauzkagu. Falta diren beste ekuazioak, transistorearen (bi) eta diodoen (bat) portaera-ekuazioak dira. Hori dela eta, transistorearen eta diodoen funtzionamendu-zonari buruzko hipotesia egin beharko dugu, hipotesia sarrerako tentsioaren menpekoa izango dela kontuan hartuz. Horrela, 6. ekuazioa unean uneko hipotesiaren baldintzak betearaziz lortuko dugu. Hasteko, sarrerako tentsioa oso txikia denean, pentsatzekoa da transistorea kortean eta diodoak A.P. egongo direla. Hori izango da, beraz, gure lehenengo hipotesia:

1. hipotesia. Transistorea **kortean**, diodoak **A.P.**:

Ekuazioak: ❸ $I_B = 0$ ❹ $I_C = 0$ ❺ $I_D = 0$

Baldintzak: $V_{BE} \leq 0{,}7$ V $V_D \leq 0{,}7$ V

Bost ekuazioek osatutako sistemaren soluzioa bilatuko dugu, sarrerako tentsioa parametrotzat harturik:

Soluzioa: $v_i = 2V_D + V_{BE}$, $I_D = I_B = 0$ mA, $I_C = 0$ mA, $V_{CE} = 10$ V

Baldintzak betearaziz: $v_i = 2V_D + V_{BE} \leq 2 \cdot 0{,}7 + 0{,}7 \rightarrow \boxed{v_i \leq 2{,}1 \text{ V}}$

Hau da, sarrerako tentsioa 2,1 V baino txikiagoa den bitartean, transistorea kortean eta diodoak A.P. daude, eta kolektore-korrontea $I_C = 0$ mA da.

$$\boxed{v_i \leq \mathbf{2{,}1\ V} \quad \rightarrow \quad I_C = 0 \text{ mA}}$$

Orain, $v_i \geq 2{,}1$ V denean zer gertatzen den analizatu beharko dugu. Garbi dago tentsio hori nahikoa dela transistorea kortetik ateratzeko eta bi diodoak zuzenki polarizatzeko, bakoitzak 0,7 V besterik ez duelako behar; beraz, hiruren artean, 2,1 V behar dute. Ondorioz, hipotesirik logikoena transistorea kortetik zona aktibo arruntera igaro dela eta diodoak Z.P. daudela suposatzea izango da:

2. hipotesia. Transistorea **Z.A.A.-ean**, diodoak **Z.P.:**

Ekuazioak: ❸ $V_{BE} = 0{,}7$ V ❹ $I_C = 100 I_B$ ❺ $V_D = 0{,}7$ V

Baldintzak: $V_{CE} \geq 0{,}2$ V $I_D \geq 0$

Berriro ere, bost ekuazioek osatutako sistemaren soluzioa bilatuko dugu, sarrerako tentsioa parametrotzat harturik:

Soluzioa: $I_B = I_D = \dfrac{v_i - 2{,}1}{10}$ mA, $I_C = \left(20v_i - 42\right)$ mA, $V_{CE} = \left(14{,}2 - 2v_i\right)$ V,

$V_{BE} = 0{,}7$ V, $V_D = 0{,}7$ V

Baldintzak betearaziz: $V_{CE} = \left(14{,}2 - 2v_i\right) \geq 0{,}2 \rightarrow \boxed{v_i \leq 7 \text{ V}}$

$I_D \geq 0 \rightarrow v_i \geq 2{,}1$ V (dagoeneko, bete egiten da)

Hots, sarrerako tentsioa 2,1 V baino handiagoa eta 7 V baino txikiagoa den bitartean, transistorea zona aktibo arruntean dago, diodoak Z.P., eta kolektore-korrontea hauxe da:

$$I_C = \left(20v_i - 42\right) \text{ mA}$$

Beraz, laburbilduz, dagoeneko honako hau dakigu sarrerako tentsioaren eta kolektore--korrontearen arteko erlazioari dagokionez:

$v_i \leq$ **2,1 V**	$\rightarrow$	$I_C = 0$ mA
2,1 V $\leq v_i \leq$ **7 V**	$\rightarrow$	$I_C = (20v_i - 42)$ mA

Orain, $v_i \geq 7$ V denean zer gertatzen den analizatu beharko dugu. Garbi dago transistorea ez dela ez kortean ez eta zona aktibo arruntean egongo; ondorioz, asetasunean egon beharko da; hori bai, diodoak Z.P. daude:

3. hipotesia. Transistorea **asetasunean**, diodoak **Z.P.**:

Ekuazioak: ❸ $V_{BE} = 0{,}7$ V ❹ $V_{CE} = 0{,}2$ V ❺ $V_D = 0{,}7$ V

Baldintza: $I_C \leq 100 I_B$ $I_D \geq 0$

Berriro ere, bost ekuazioek osatutako sistemaren soluzioa bilatuko dugu, sarrerako tentsioa parametrotzat harturik:

Soluzioa: $I_B = I_D = \dfrac{v_i - 2{,}1}{10}$ mA, $I_C = 98$ mA,

$$V_{BE} = 0{,}7 \text{ V},\ V_{CE} = 0{,}2 \text{ V},\ V_D = 0{,}7 \text{ V}$$

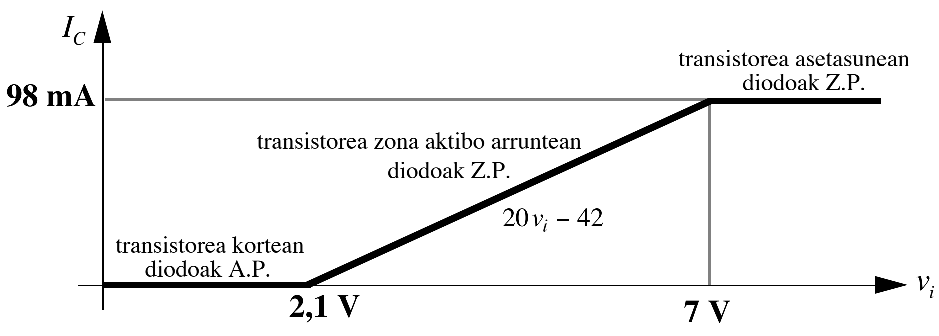
Baldintzak betearaziz: $I_C = 98 \leq 200 \cdot \dfrac{v_i - 2{,}1}{10} \quad \rightarrow \quad \boxed{v_i \geq 7 \text{ V}}$

Hots, jadanik ezagutzen genuen muga. Bestalde, diodoen baldintza betearaziz, aurreko emaitza bera lortzen da, $v_i \geq 2{,}1$ V, alegia.

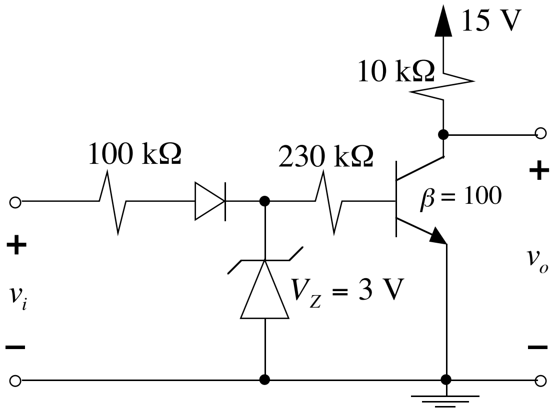
Beraz, laburbilduz, dagoeneko honako hau dakigu sarrerako tentsioaren eta kolektore--korrontearen arteko erlazioari dagokionez:

$v_i \leq$ **2,1 V**	$\rightarrow$	$I_C = 0$ mA
2,1 V $\leq v_i \leq$ **7 V**	$\rightarrow$	$I_C = (20v_i - 42)$ mA
7 V $\leq v_i$	$\rightarrow$	$I_C = 98$ mA

Grafikoki:

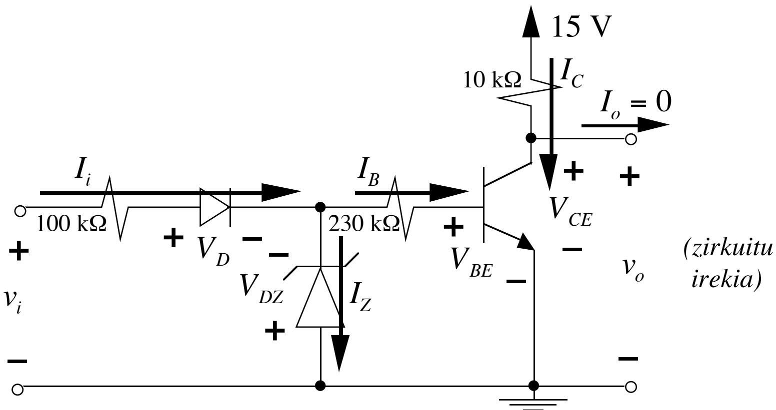


18. Irudiko zirkuiturako, marraz ezazu (v_o, v_i) transferentzia-kurba.



Ebazpena:

Beti bezala, lehendabizi, zirkuituko magnitudeak ipiniko ditugu; horretarako, kontuan hartuko dugu irteera zirkuitu irekia dela, hots, irteeratik ez dela korronterik igaroko:



Ondoren, zirkuituan betetzen diren ekuazioak idatziko ditugu:

Zirkuituari dagozkion ekuazioak:

KKL sarrerako korapiloan: ❶ $I_i = I_B + I_Z$

KTL sarrerako ezkerreko mailan: ❷ $v_i = 100 I_i + V_D - V_{DZ}$

KTL oinarri-igorle mailan: ❸ $-V_{DZ} = 230 I_B + V_{BE}$

KTL kolektore-igorle mailan: ❹ $15 = 10 I_C + V_{CE}$

Sarrerako tentsioa, v_i, aldakorra da (0 voltetik 15 volteraino handituko dela suposatuko dugu) eta horrek irteerako tentsioaren gainean, v_o, duen eragina aztertu behar dugu. Hori dela eta, irteerako tentsioa aurreko ekuazioetan ez dagoenez gero, horren adierazpena idaztea komeni da. Irteeran KTL aplikatuz:

$$v_o = V_{CE}$$

Hortaz, dagoeneko, bederatzi ezezaguneko (v_i, I_i, V_D, I_Z, V_{DZ}, I_B, V_{BE}, I_C, V_{CE}) lau ekuazio dauzkagu. Falta diren beste ekuazioak, transistorearen (bi), diodoaren (bat) eta Zener diodoaren (bat) portaera-ekuazioak dira, hots, funtzionamendu-zonaren edo egoeraren menpekoak. Hori dela eta, transistorearen funtzionamendu-zonari buruzko eta diodoen egoerari buruzko hipotesia egin beharko dugu, funtzionamendu-zona eta egoerak sarrerako tentsioaren menpekoak izango direla kontuan hartuz. Hau da, 9. ekuazioa unean uneko hipotesiaren baldintzak betearaziz lortuko dugu. Hona hemen:

1. hipotesia. Transistorea **kortean**, diodoa **A.P.**, Zener diodoa **A.P. eskualde arruntean**:

Ekuazioak: ❺ $I_B = 0$ ❻ $I_C = 0$ ❼ $I_D = 0$ ❽ $I_Z = 0$

Baldintzak: $V_{BE} \leq 0{,}7$ V $V_D \leq 0{,}7$ V $-3 \text{ V} \leq V_{DZ} \leq 0{,}7$ V

Zortzi ekuazioek osatutako sistemaren soluzioa bilatuko dugu, sarrerako tentsioa parametrotzat harturik:

Soluzioa: $I_i = I_B = I_D = I_Z = I_C = 0$ mA, $v_i = V_D + V_{BE}$, $V_{BE} = -V_{DZ}$, $V_{CE} = 15$ V

Baldintzak betearaziz: $v_i = V_D + V_{BE} \leq 0{,}7 + 0{,}7 \quad \rightarrow \quad \boxed{v_i \leq 1{,}4 \text{ V}}$

$$V_{DZ} = -V_{BE} \quad \rightarrow \quad V_{DZ} \geq -0{,}7 \text{ V}$$

Hau da, sarrerako tentsioa 1,4 V baino txikiagoa den bitartean, transistorea kortean eta diodo arrunta A.P. daude. Zener diodoari dagokionez, ordea, soilik ondorioztatzen da ez dagoela Zener eskualdean ($V_{DZ} \geq -0{,}7$ V izan behar duenez gero, ziur gaude $V_{DZ} \geq -3$ V izango dela); orduan, Z.P. egotea posible dela pentsa genezake ($V_{DZ} = 0{,}7 \text{ V} \geq -0{,}7$ V delako) baina oso argi izan behar dugu hori ezinezkoa dela, Zener diodoaren mutur positiboa 0 V-eko puntuarekin lotuta baitago eta mutur negatiboaren tentsioa beti positiboa izango baita; hau da, Zener diodoa beti A.P. egongo da zirkuituko tentsio guztiak 0 V eta 15 V artekoak baitira. Hori guztia kontuan hartuz, $v_o = 15$ V dela kalkulatu dugu.

Laburbilduz, dagoeneko honako hau dakigu sarrerako eta irteerako tentsioen arteko erlazioari dagokionez:

$$\boxed{v_i \leq \mathbf{1{,}4\ V} \quad \rightarrow \quad v_o = 15 \text{ V}}$$

Orain, $v_i \geq 1{,}4$ V denean zer gertatzen den analizatu beharko dugu. Garbi dago transistorea ez dela kortean egongo ez eta diodoa A.P.; ondorioz, hipotesirik logikoena transistorea kortetik zona aktibo arruntera igaro dela eta diodoa Z.P. dagoela suposatzea izango da. Baina, zer gertatuko da Zener diodoarekin? Bada, suposatuko dugu sarrerako tentsioa ez dela nahiko handia izango Zener diodoa Zener eskualdean sarrarazteko; hau da, eskualde arruntean dagoela suposatuko dugu:

2. hipotesia. Transistorea **Z.A.A.-ean**, diodoa **Z.P.**, Zener diodoa **A.P. eskualde arruntean**:

Ekuazioak: ❺ $V_{BE} = 0{,}7$ V ❻ $I_C = 100 I_B$ ❼ $V_D = 0{,}7$ V ❽ $I_Z = 0$

Baldintzak: $V_{CE} \geq 0{,}2$ V $I_D \geq 0$ $-3 \text{ V} \leq V_{DZ} \leq 0{,}7$ V

Berriro ere, zortzi ekuazioek osatutako sistemaren soluzioa bilatuko dugu, sarrerako tentsioa parametrotzat harturik:

Soluzioa: $I_i = I_D = I_B = \dfrac{v_i - 1,4}{330}$ mA, $I_Z = 0$ mA, $I_C = \dfrac{v_i - 1,4}{3,3}$ mA, $V_D = 0,7$ V,

$V_{BE} = 0,7$ V, $V_{DZ} = (0,28 - 0,7v_i)$ V, $V_{CE} = (19,24 - 3,03v_i)$ V

Baldintzak betearaziz: $V_{DZ} = (0,28 - 0,7v_i)\ \text{V} \geq -3\ \text{V} \quad\rightarrow\quad v_i \leq 4,7\ \text{V}$

$V_{CE} = (19,24 - 3,03v_i)\ \text{V} \geq 0,2\ \text{V} \quad\rightarrow\quad v_i \leq 6,28\ \text{V}$

$I_D = \dfrac{v_i - 1,4}{330}\ \text{mA} \geq 0 \quad\rightarrow\quad v_i \geq 1,4\ \text{V}$

Alegia, hiru baldintzak bete daitezen, sarrerako tentsiorako hiru balio desberdin lortu ditugu. Hasteko, diodo arrunta Z.P. egoteko, nahikoa da sarrerako tentsioa 1,4 V baino handiagoa izatea, eta ziur gaude hori betetzen dela, horixe izan baita gure bigarren hipotesiaren abiapuntua. Ondoren, Zener diodoa A.P. eskualde arruntean egongo da, sarrerako tentsioa 4,7 V baino txikiagoa den bitartean. Azkenik, transistorea Z.A.A.-ean egongo da, sarrerako tentsioa 6,28 V baino txikiagoa den bitartean.

Orain galdera hau egin dezakegu: non dago, bada, sarrerako tentsioaren hurrengo muga-balioa, zeinean hipotesia aldatu behar dugun? Erantzuna berehalakoa da: 4,7 V-eko tentsiotik aurrera, Zener diodoaren egoera aldatu egingo da, transistorearen funtzionamendu-zona aldatu ez arren.

Honelatan, bada, sarrerako tentsioa 1,4 V baino handiagoa eta 4,7 V baino txikiagoa den bitartean, transistorea zona aktibo arruntean, diodo arrunta Z.P. eta Zener diodoa eskualde arruntean A.P. daude, eta irteerako tentsioa $v_o = (19,24 - 3,03v_i)$ da.

Beraz, laburbilduz, dagoeneko honako hau dakigu sarrerako eta irteerako tentsioen arteko erlazioari dagokionez:

$v_i \leq$ **1,4 V**	$\rightarrow$	$v_o = 15$ V
1,4 V $\leq v_i \leq$ **4,7 V**	$\rightarrow$	$v_o = (19,24 - 3,03v_i)$ V

Orain, $v_i \geq 4,7$ V denean zer gertatzen den analizatu beharko dugu. Garbi dago transistorea oraindik zona aktibo arruntean egongo dela, hortik ateratzeko 6,28 V-eko tentsioa beharko bailuke (beste osagaien egoera aldatuko ez balitz); bestalde, diodo arrunta Z.P. egongo da eta Zener diodoa A.P. Zener eskualdean, hauxe baita sarrerako tentsioaren aldaketa nozitu duen osagaia:

3. hipotesia. Transistorea **Z.A.A.-ean**, diodoa **Z.P.**, Zener diodoa **A.P. Zener eskualdean**:

Ekuazioak: ❺ $V_{BE} = 0,7$ V ❻ $I_C = 100I_B$ ❼ $V_D = 0,7$ V ❽ $V_{DZ} = -3$ V

Baldintzak: $V_{CE} \geq 0,2$ V $I_D \geq 0$ $I_Z \geq 0$

Berriro ere, zortzi ekuazioek osatutako sistemaren soluzioa bilatuko dugu, sarrerako tentsioa parametrotzat harturik:

$$\textbf{Soluzioa:}\; I_i = I_D = \frac{v_i - 3,7}{100}\ \text{mA},\ I_B = 10\ \mu\text{A},\ I_C = 1\ \text{mA},\ I_Z = \frac{v_i - 4,7}{100}\ \text{mA},$$

$$V_D = 0,7\ \text{V},\ V_{BE} = 0,7\ \text{V},\ V_{DZ} = -3\ \text{V},\ V_{CE} = 5\ \text{V}$$

Baldintzak betearaziz: : $I_D = \frac{v_i - 3,7}{100}\ \text{mA} \geq 0 \rightarrow v_i \geq 3,7\ \text{V}$ (bete egiten da)

$I_Z = \frac{v_i - 4,7}{100}\ \text{mA} \geq 0 \rightarrow v_i \geq 4,7\ \text{V}$ (bete egiten da)

$V_{CE} = 5\ \text{V} > 0,2\ \text{V}$ (bete egiten da)

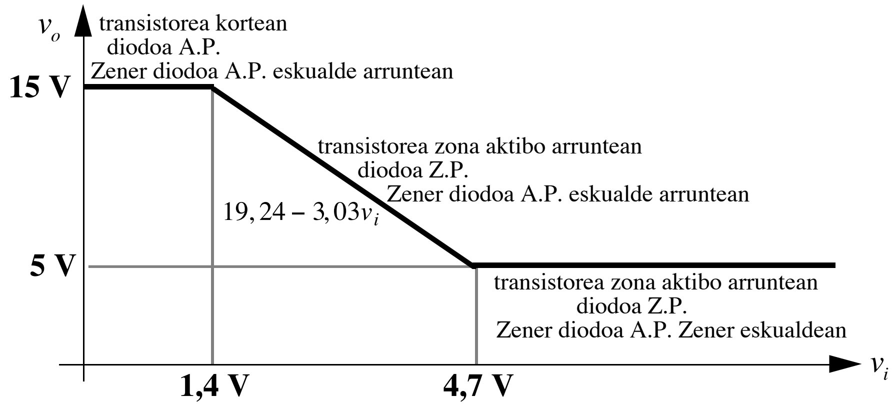
Honelatan, bada, $v_i \geq 4,7$ V denean, hiru baldintzak (transistorearena, diodo arruntarena eta Zener diodoarena) betetzen dira sarrerako tentsioaren balio guztietarako, eta irteerako tentsioa $v_o = 5$ V da.

Horrek soilik adierazi nahi du egindako hipotesi hori azkena dela, sarrerako tentsioa 4,7 V-etik gora handitu arren, osagaien egoera aldatuko ez delako. Hori zirkuitua intuitiboki analizatuz ere ondoriozta daiteke: Zener diodoa A.P. egonik Zener eskualdean sartzen denean (sarrerako tentsioa horretarako nahiko handia delako) bere tentsioa konstante mantentzen da (3 V, hain zuzen); horren eraginez, transistorearen oinarri-igorle junturaren polarizazioa ere ez da aldatuko, eta, ondorioz, transistorea Z.A.A.-ean geratuko da sarrerako tentsioa handitu arren, zeren, transistoreak egoera horretan egoteko behar duen oinarri-korronteaz gain (10 μA), sarreratik iritsiko den gainontzeko korrontea Zener diodoak hartuko baitu.

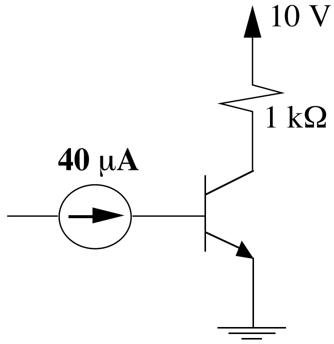
Beraz, laburbilduz, dagoeneko honako hau dakigu sarrerako eta irteerako tentsioen arteko erlazioari dagokionez:

$v_i \leq$ **1,4 V**	$\rightarrow$	$v_o = 15$ V
1,4 V $\leq v_i \leq$ **4,7 V**	$\rightarrow$	$v_o = (19,24 - 53,03 v_i)$ V
4,7 V $\leq v_i$	$\rightarrow$	$v_o = 5$ V

Grafikoki:

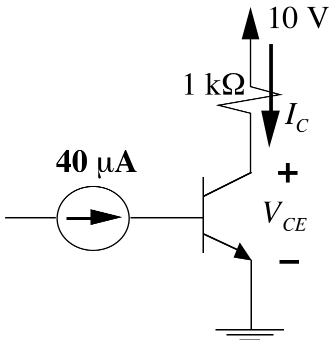


19. Irudiko zirkuituan dagoen transistorearen irteera-kurbak esperimentalki ezagunak dira (ebazpenean erabili ditugun irudiak, hain zuzen). Marraz ezazu kurba horien gainean zirkuituaren irteerako karga-lerrozuzena eta ondoren kalkula ezazu transistorearen irteerako operazio-puntua (I_C, V_{CE}).



Ebazpena:

Irudian agerikoa da transistorearen oinarri-korrontea ezaguna dela, 40 μA hain zuzen. Baina transistorearen operazio-puntua grafikoki bilatu ahal izateko, oinarri-korronteaz gain, irteerako karga-lerrozuzenaren ekuazioa behar dugu. Hori lortzeko, nahikoa da irteerako mailan KTL aplikatzea, eta horrela lortutako ekuazioa berridaztea. Hona hemen:



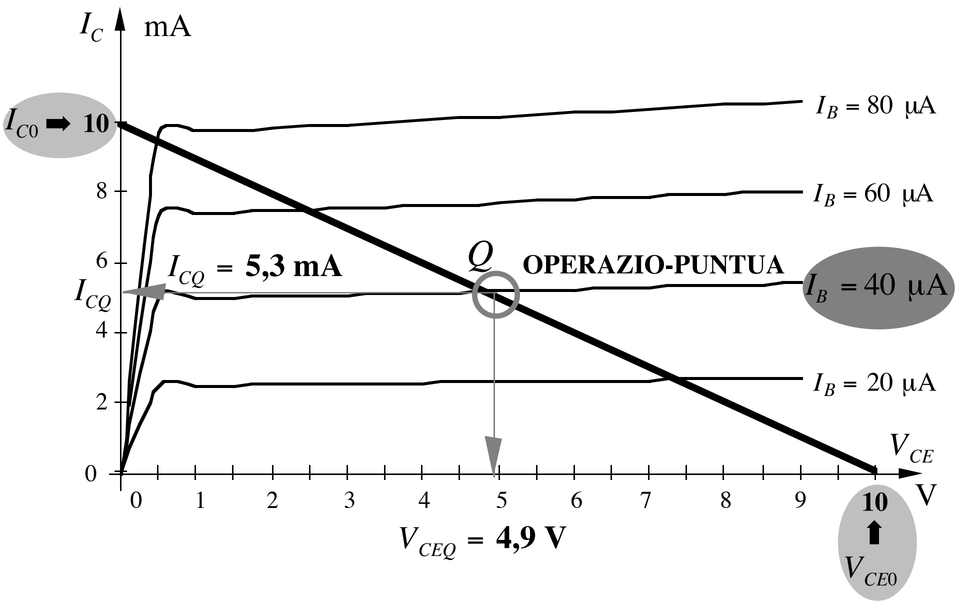
KTL kolektore-igorle mailan: $10 = 1I_C + V_{CE}$

Ekuazioa berridatziz: $I_C = 10 - V_{CE}$ (karga-lerrozuzena)

Ekuazio hori transistorearen irteerako kurben gainean irudikatzeko, lerrozuzena denez gero, nahikoa da bi puntu bilatzea: ardatzekiko ebakidura-puntuak hain zuzen.

ardatz bertikalarekiko ebakidura-puntua: $V_{CE} = 0 \rightarrow I_{C0} = 10$ mA

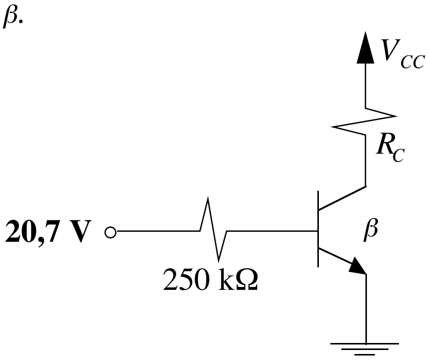
ardatz horizontalarekiko ebakidura-puntua: $I_C = 0 \rightarrow V_{CE0} = 10$ V



Agerikoa denez, operazio-puntua zirkuituari dagokion karga-lerrozuzenaren eta transistorearen I_B = 40 µA-ko kurbaren arteko ebakidura-puntua da. Irudian adierazitako balioen zehaztasuna, ardatzetako eskalaren menpekoa da. Horregatik, adierazi ditugunak gutxi gorabeherako balioak dira.

20. Irudiko zirkuituan dagoen transistorearen irteera-kurbak esperimentalki ezagunak dira. Bestalde, zirkuituaren irteerako karga-lerrozuzena ere ezaguna da, honako hauek izanik ardatzekiko ebakidura-puntuak: I_{C0} =12 mA; V_{CE0} = 9 V. (Bietarako, ikus ebazpeneko irudia.)

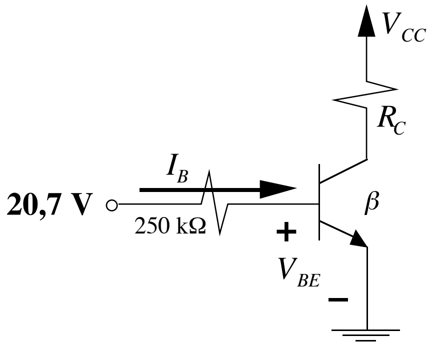
Datu horiek oinarritzat hartuz, kalkula itzazu honako balio hauek: zirkuituko V_{CC} eta R_C balioak, transistorearen operazio-puntua (I_B, V_{BE}, I_C, V_{CE}) eta β.



Ebazpena:

Transistorearen operazio-puntua bilatzeko, badakigu karga-lerrozuzenaren eta transistorearen irteerako kurben arteko ebakidura-puntua dela; baina oinarri-korronte desberdinetarako puntu desberdinak egotea da arazoa. Horregatik, transistorearen operazio-puntua grafikoki bilatu ahal izateko, lehendabizi oinarri-korrontearen balioa kalkulatu beharko dugu.

Horretarako, sarrerako mailan KTL aplikatuko dugu:



KTL oinarri-igorle mailan: $20{,}7 = 250 I_B + V_{BE}$

Baina ekuazio horretan bi ezezagun (I_B, V_{BE}) agertzen direnez gero, oinarri-korrontearen balioa kalkulatu ahal izateko, guztiz beharrezkoa da transistorearen funtzionamendu--zonari buruzko hipotesi bat egitea. Sarrerako tentsioa (20,7 V) nahiko handia denez gero, ziur egon gaitezke transistorea ez dela kortean egongo; horregatik, honako hipotesi hau egingo dugu:

1. hipotesia. Transistorea **Z.A.A.-ean**:

Ekuazioak: $V_{BE} = 0{,}7$ V $\qquad I_C = \beta I_B$

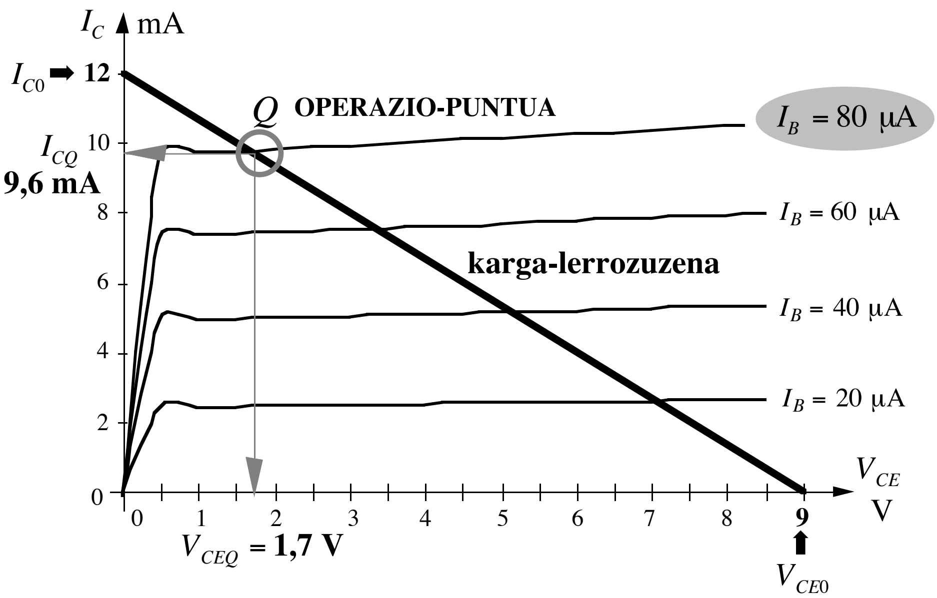
Baldintza: $V_{CE} \geq 0{,}2$ V

Begi-bistakoa da bi portaera-ekuazio horietatik lehenengoa bakarrik dela erabilgarria, bigarrenean β korronte-irabazia ezezaguna baita (gogoan izan ezen, operazio-puntua bilatu ondoren, hori ere kalkulatu behar dugula).

Baina, zorionez, lehenengoarekin nahikoa dugu oinarri-korrontea kalkulatzeko. KTL-ko adierazpenean oinarri-igorle tentsioaren balioa ($V_{BE} = 0{,}7$ V) ordezkatuz:

$$I_B = \frac{20{,}7 - V_{BE}}{250}\ \text{mA} \quad \rightarrow \quad \boxed{I_B = 80\ \mu\text{A}}$$

Ondorioz, hona hemen irteerako operazio-puntua, grafikoki:



Aurreko ariketan bezala, adierazi ditugun balioak gutxi gorabeherakoak dira.

Baina, beti bezala, operazio-puntu hori bilatzeko transistorearen funtzionamendu-zonari buruzko hipotesi bat egin dugunez gero, orain hipotesiari dagokion baldintza betetzen ote den egiaztatu behar dugu, kalkulatu dugun operazio-puntu hori ontzat eman ahal izateko. Ez dago esan beharrik, ebakidura-puntua aurkitu bezain pronto baldintzaren egiaztapena ere lortu dugula:

$$V_{CEQ} = 1{,}7 \text{ V} > 0{,}2 \text{ V} \qquad \textbf{bete egiten da}$$

Orain, kolektore-korrontea eta oinarri-korrontea ezagunak direnez gero, β korronte-irabazia kalkulatzea berehalakoa da:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{9{,}6 \text{ mA}}{80 \ \mu\text{A}} \quad \rightarrow \quad \boxed{\beta = 120}$$

Bukatzeko, zirkuituaren parametroak bilatzeko, irteerako karga-lerrozuzenaren ekuazioan oinarrituko gara. Zirkuitutik ateratzen den ekuazioa honako hau da:

KTL kolektore-igorle mailan: $\qquad V_{CC} = R_C I_C + V_{CE}$

Baina ekuazio horren ardatzekiko ebakidura-puntuak kontuan hartuz, berehalakoa da zirkuituaren parametro ezezagunak (V_{CC} eta R_C) kalkulatzea. Hona hemen:

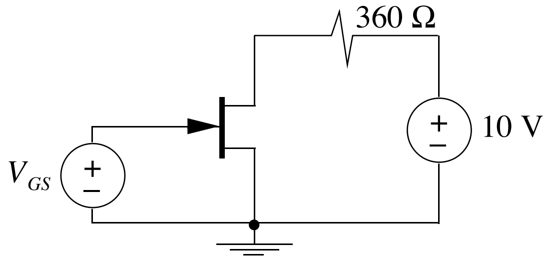
$$V_{CE} = 0 \ \rightarrow \ I_{C0} = 12 \text{ mA} = \frac{V_{CC}}{R_C} \qquad \text{eta} \qquad I_C = 0 \ \rightarrow \ V_{CE0} = 9 \text{ V} = V_{CC}$$

Aurreko bi ekuazioetatik honako balio hauek lortzen dira:

$$\boxed{V_{CC} = 9 \text{ V eta } R_C = 0{,}75 \text{ k}\Omega}$$

7.2. JFET transistoreak

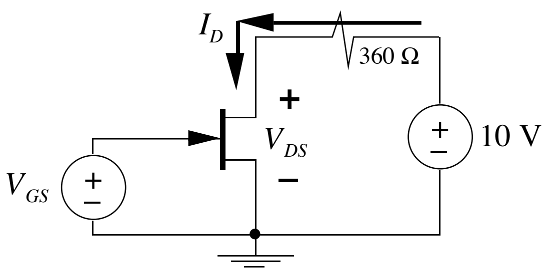
1. Irudiko zirkuituan, kalkula ezazu zenbatekoa izango den JFET transistorearen V_{DS} tentsioa $V_{GS} = 0$ V denean. JFET transistorearen ezaugarriak honako hauek dira: $I_{DSS} = 10$ mA, $V_{GSoff} = –4$ V.



Ebazpena:

Agerikoa da JFET transistorea ez dela kortean egongo, $V_{GSQ} = 0\text{ V} > V_{GSoff}$ baita. Baina zona ohmikoan edo asetasunean egon daiteke; ondorioz, funtzionamendu-zonari buruzko hipotesia egin beharko dugu.

Dena den, lehenik, zirkuituko irteerari dagokion ekuazioa idatziko dugu, irteerako mailan KTL aplikatuz, horretarako transistorearen magnitudeak kontuan hartuz.



KTL irteerako mailan:

❶ $10 = 360 I_D + V_{DS}$

1. hipotesia. JFET transistorea **zona ohmikoan** dago:

Ekuazioa: ❷ $I_D = \dfrac{V_{DS}}{R_{DS}}$

Baldintzak: $V_{GSoff} \le V_{GSQ} \le 0$ V eta $V_{DSQ} \le V_{DSase}$

Begi-bistakoa da bai ekuazioan eta bai baldintzetan ere, aldez aurretik ezezagunak diren parametro batzuk ageri direla. Horregatik, lehendabizi parametro horiek kalkulatu beharko ditugu, ezagutzen ditugun bi parametroetan oinarrituz.

Hasteko, gogora dezagun ekuazioan ageri den R_{DS} barne-erresistentzia honelaxe kalkulatzen dela:

$$R_{DS} = \frac{V_{DSS}}{I_{DSS}} = \frac{|V_{GSoff}|}{I_{DSS}} = \frac{4\text{ V}}{10\text{ mA}} = 400\ \Omega$$

Bestalde, baldintzei dagokienez, dagoeneko lehenengoa bete egiten dela ikusi dugu, V_{GSQ} = 0 V baita. Baina bigarren baldintza egiaztatzeko, V_{DSase} ezagutu behar dugu. Horretarako, honako ekuazio hau gogoratu behar dugu:

$$V_{DSase} = \left(1 - \frac{V_{GSQ}}{V_{GSoff}}\right)^2 \cdot \left|V_{GSoff}\right|$$

Kasu honetan, $V_{GSQ} = 0$ denez gero, $V_{DSase} = V_{DSS} = |V_{GSoff}| = 4$ V da. Hortaz, V_{DS} tentsioa 4 V baino txikiagoa bada, JFET transistorea zona ohmikoan egongo da; bestela, asetasunean egongo da.

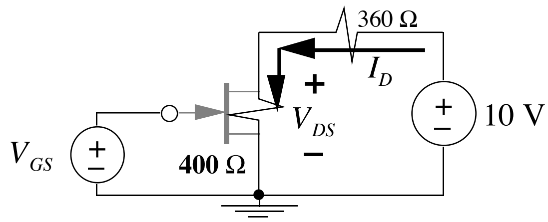
Orain arte lortu ditugun bi ekuazioak erabiliz, transistorearen egoera bilatuko dugu:

Zirkuituari dagokion ekuazioa: ❶ $10 = 360 I_D + V_{DS}$

Transistorean betetzen den ekuazioa: ❷ $V_{DS} = 400 I_D$

Soluzioa: I_{DQ} = 13,16 mA, V_{DSQ} = 5,3 V

Gogora ezazu emaitza bera lortuko genukeela zirkuituan JFET transistorearen modeloa ordezkatuz:



Orain, egindako hipotesia egiaztatzeko unea da. Ikusi dugunez, JFET transistorea zona ohmikoan egoteko, bi baldintza bete behar dira. Alde batetik, $0 \geq V_{GSQ} \geq V_{GSoff}$ izan behar da; kasu honetan, lehen aipatu dugun legez, baldintza hori bete egiten da, V_{GSQ} = 0 V delako. Beste aldetik, $V_{DSQ} \leq 4$ V izan behar da; baina kasu honetan, kalkulatu berri dugun bezala, V_{DSQ} = 5,3 V > 4 V atera zaigu. Ondorioz, JFET transistorea ez dago zona ohmikoan. Hori dela eta, bigarren hipotesia egin beharko dugu:

2. hipotesia. JFET transistorea **asetasunean** dago:

Ekuazioa: ❷ $I_D = KI_{DSS}$

Baldintzak: $V_{GSoff} \leq V_{GSQ} \leq 0$ V eta $V_{DSQ} \geq V_{DSase}$

Lehen bezala, K parametroa kalkulatu beharko dugu (V_{DSase} lehengo bera baita). Horretarako, gogora dezagun K honelaxe kalkulatzen dela:

$$K = \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GSoff}}\right)^2 = \left(1 - \frac{0}{-4}\right)^2 = 1$$

Ondorioz, asetasunari dagokion ekuazioa honako hau izango da: $I_D = I_{DSS}$ = 10 mA.

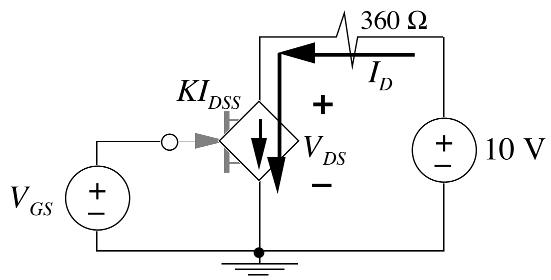
Orain arte lortu ditugun bi ekuazioak erabiliz, transistorearen egoera bilatuko dugu:

Zirkuituari dagokion ekuazioa: ❶ $10 = 360 I_D + V_{DS}$

Transistorean betetzen den ekuazioa: ❷ $I_D = 0{,}01$ (A-tan, erresistentzia Ω-etan baitago)

Soluzioa: $I_{DQ} = 10$ mA, $V_{DSQ} = 6{,}4$ V

Gogora ezazu emaitza bera lortuko genukeela zirkuituan JFET transistorearen modeloa ordezkatuz:



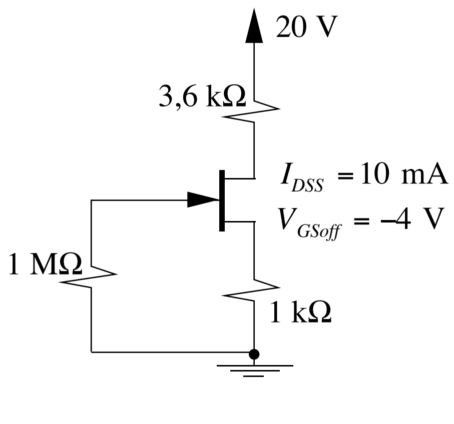
Hipotesiaren egiaztapena: $V_{DSQ} = 6{,}4 \text{ V} > V_{DSase} = 4 \text{ V}$

$V_{GSoff} = -4 \text{ V} < V_{GSQ} = 0 \text{ V} \leq 0$

Bi baldintzak betetzen direnez gero, ziur gaude $V_{GS} = 0$ V denean JFET transistorea asetasunean egongo dela; bestalde, V_{DS} tentsioa honako hau izango da:

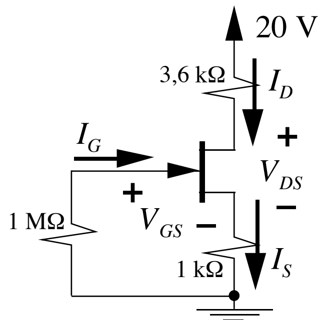
$$\boxed{V_{DSQ} = 6{,}4 \text{ V}}$$

2. Analiza ezazu irudiko zirkuitua.



Ebazpena:

Beti bezala, lehendabizi zirkuituko magnitudeak ipini eta zirkuituari dagozkion ekuazioak idatziko ditugu.



KTL sarrerako mailan:

❶ $-1000 I_G = V_{GS} + 1 I_S$

KKL transistorean:

❷ $I_S = I_G + I_D$

KTL irteerako mailan:

❸ $20 = 3{,}6 I_D + V_{DS} + 1 I_S$

Zirkuituan bost ezezagun (I_G, I_D, I_S, V_{GS}, V_{DS}) dauden arren, hiru ekuazio baino ez ditugu lortu oraingoz. Beste bi ekuazioak, beraz, JFET transistorearen portaera-ekuazioak izango dira, funtzionamendu-zonaren arabera.

Honez gero, irakurle azkarrak hauxe pentsatuko du: nola bi portaera-ekuazio? Teoria azaltzean ez dugu, bada, bat bakarra azaldu? Eta arrazoia du, portaera-ekuazioetariko bat hasieran bakarrik aipatu baitugu: JFET transistorea ongi polarizatuta baldin badago —PN junturak A.P. badaude, alegia— ate-korrontea zero izango da: $I_G = 0$ (aurreko ariketan ez dugu aipatu ere egin, ziur geundelako PN junturak alderantziz polarizatuta zeudela, $V_{GS} = 0$ izateagatik). Kasu honetan, V_{GS} tentsioa aldez aurretik ezezaguna denez gero, ez dakigu egokia den ala ez; horrexegatik hain zuzen, I_G korrontea ezezaguntzat hartu dugu.

Orain, JFET transistorearen funtzionamendu-zonari buruzko hipotesia egiteari ekin diezaiokegu. Hona hemen prozedura:

1. hipotesia. JFET transistorea **kortean** dago:

Ekuazioak: ❹ $I_G = 0$, ❺ $I_D = 0$

Baldintza: $V_{GSQ} \leq V_{GSoff}$

Azken bi ekuazio hauek aurreko hiruretan odezkatuz gero, zirkuituaren soluzioa bilatuko dugu:

Soluzioa: $I_{DQ} = I_{SQ} = I_{GQ} = 0$ mA, $V_{GSQ} = 0$ V, $V_{DSQ} = 20$ V

Baldintzaren egiaztapena: $V_{GSQ} = 0 \text{ V} > V_{GSoff} = -4$ V **ez da betetzen**

Ondorioz, bigarren hipotesia egin beharko dugu:

2. hipotesia. JFET transistorea **asetasunean** dago:

Ekuazioak: ❹ $I_G = 0$, ❺ $I_D = I_{Dase} = I_{DSS} \cdot \left[1 - \dfrac{V_{GSQ}}{V_{GSoff}}\right]^2$

Baldintzak: $V_{GSoff} \leq V_{GSQ} \leq 0$ V eta $V_{DSQ} \geq V_{DSase}$

❺ ekuazioan agerikoa da I_D korrontea V_{GS} tentsioaren menpekoa dela; gainera, dependentzia-legea kuadratikoa da:

$$❺ \quad I_D = 10\ \text{mA} \cdot \left(1 - \frac{V_{GSQ}}{-4}\right)^2 = \frac{10}{16} \cdot \left(4 + V_{GSQ}\right)^2\ \text{mA}$$

Bestalde, ❹ ekuazioa ❷ ekuazioan ordezkatuz, $I_S = I_D$ dela ondorioztatzen da. Berdintza hori beste bi ekuazioetan ordezkatuz, honako ekuazio hauek lortuko ditugu:

$$❶ \quad 0 = V_{GS} + 1 I_D$$

$$❸ \quad 20 = 3{,}6 I_D + V_{DS} + 1 I_D$$

Orain, ❶ ekuaziotik $I_D = -V_{GS}$ dela ondorioztatzen da; eta berdintza hori ❺ ekuazioan ordezkatuz, honako ekuazio kuadratiko hau lortuko dugu:

$$-1{,}6 V_{GS} = 16 + V_{GS}^2 + 8 V_{GS} \qquad \rightarrow \qquad V_{GS}^2 + 9{,}6 V_{GS} + 16 = 0$$

Ekuazio horren soluzioa honako hau izango da:

$$V_{GS} = \frac{-9{,}6 \pm \sqrt{9{,}6^2 - 4 \cdot 1 \cdot 16}}{2 \cdot 1} = \frac{-9{,}6 \pm 5{,}3}{2}$$

Hau da, bi soluzio daude: $V_{GS} = -2{,}15$ V eta $V_{GS} = -7{,}45$ V.

Aurrera jarraitu baino lehen, hots, beste ezezagunak bi aldiz kalkulatu baino lehen, lehenengo baldintza betetzen ote den egiaztatzea merezi du. Hau da, $0 \geq V_{GSQ} \geq V_{GSoff}$ izan behar da, bestela transistorea kortean egongo bailitzateke, edo gaizki polarizatuta. Kasu honetan, agerikoa da lortutako bi balioak negatiboak direla; hots, transistorea ongi polarizatuta dago. Baina lehenengo balioa (–2,15 V) itotze-tentsioa baino handiagoa den bitartean, bigarrena (–7,45 V), ordea, itotze-tentsioa baino txikiagoa da:

$V_{GSoff} = -4\ \text{V} < V_{GSQ1} = -2{,}15\ \text{V} < 0$ **baldintza bete egiten da**

$V_{GSoff} = -4\ \text{V} > V_{GSQ2} = -7{,}45\ \text{V}$ **ez da baldintza betetzen**

Hau da, bigarren soluzioaren arabera, transistorea kortean dago, eta ikusi berri dugunez, hori ezinezkoa da zirkuitu honetan. Hori dela eta, bigarren soluzioa zentzurik gabekoa da, eta ez da kontuan hartu behar. Ondorioz, soluzio bakarra daukagu:

$$\boxed{V_{GSQ} = -2{,}15\ \text{V}}$$

Soluzio hori kontuan hartuz, zirkuituko beste magnitudeen balioak kalkulatuko ditugu, hots, transistorearen egoera bilatuko dugu:

Soluzioa: $I_{GQ} = 0$ mA, $I_{DQ} = I_{SQ} = 2{,}15$ mA, $V_{GSQ} = -2{,}15$ V, $V_{DSQ} = 10{,}13$ V

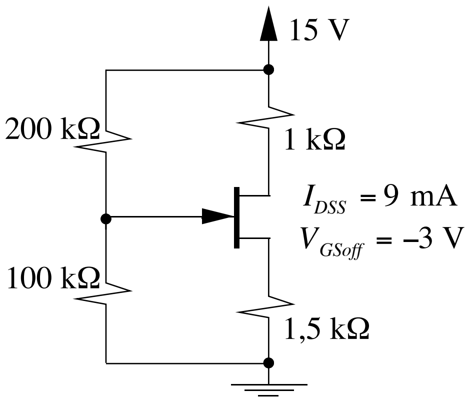
Orain, egindako hipotesiari dagokion bigarren baldintza egiaztatzeko unea da. Hau da, transistorea asetasunean egongo bada, $V_{DSQ} \geq V_{DSase}$ izan behar da.

Beraz, lehenik V_{GSQ} tentsioari dagokion V_{DSase} kalkulatu behar dugu. Hona hemen:

$$V_{DSase} = \frac{V_{DSS}}{I_{DSS}} \cdot I_{Dase} = V_{DSS} \cdot \left[1 - \frac{V_{GSQ}}{V_{GSoff}}\right]^2 = 4\ \mathrm{V} \cdot \left[1 - \frac{(-2{,}15\ \mathrm{V})}{(-4\ \mathrm{V})}\right]^2 = 0{,}86\ \mathrm{V}$$

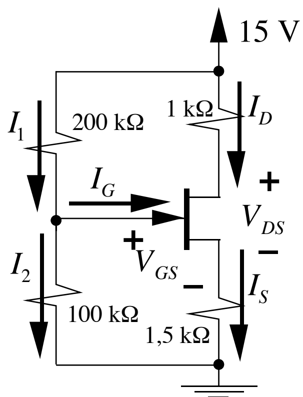
Kasu honetan, kalkulatu berri dugun bezala, V_{DSQ} = 10,13 V > 0,86 V atera zaigu. Hau da, baldintza bete egiten da, eta transistorea **asetasunean** dago.

3. Irudiko zirkuituan, kalkula itzazu JFET transistorearen hiru muturretako tentsioak, V_G, V_D eta V_S, alegia.



Ebazpena:

Beti bezala, lehendabizi zirkuituko magnitudeak ipini eta zirkuituari dagozkion ekuazioak idatziko ditugu.



KKL sarrerako korapiloan: ❶ $I_1 = I_G + I_2$

KTL sarrerako mailan: ❷ $100 I_2 = V_{GS} + 1{,}5 I_S$

KTL sarrerako begiztan: ❸ $15 = 200 I_1 + 100 I_2$

KKL transistorean: ❹ $I_S = I_G + I_D$

KTL irteerako mailan: ❺ $15 = 1 I_D + V_{DS} + 1{,}5 I_S$

Aurreko ariketan bezala, V_{GS} tentsioa aldez aurretik ezezaguna denez gero, ez dakigu PN junturak A.P. egongo diren ala ez; horregatik, hemen ere I_G korrontea ezezaguntzat hartu dugu.

Orain, JFET transistorearen funtzionamendu-zonari buruzko hipotesia egiteari ekin diezaiokegu. Hona hemen prozedura:

1. hipotesia. JFET transistorea **kortean** dago:

Ekuazioak: ❻ $I_G = 0$, ❼ $I_D = 0$ **Baldintza**: $V_{GSQ} \le V_{GSoff}$

Azken bi ekuazio hauek aurreko bostetan ordezkatuz gero, zirkuituaren soluzioa bilatuko dugu:

Soluzioa: $I_{DQ} = I_{SQ} = I_{GQ} = 0$ mA, $I_1 = I_2 = 50$ µA, $V_{GSQ} = 5$ V, $V_{DSQ} = 15$ V

Baldintzaren egiaztapena: $V_{GSQ} = 5$ V > $V_{GSoff} = -3$ V **ez da betetzen**

Ondorioz, bigarren hipotesia egin beharko dugu:

2. hipotesia. JFET transistorea **asetasunean** dago:

Ekuazioak: ❻ $I_G = 0$, ❼ $I_D = I_{Dase} = I_{DSS} \cdot \left[1 - \frac{V_{GSQ}}{V_{GSoff}}\right]^2$

Baldintzak: $V_{GSoff} \le V_{GSQ} \le 0$ V eta $V_{DSQ} \ge V_{DSase}$

Aurreko ariketan bezala, ❼ ekuazioan agerikoa da I_D korrontea V_{GS} tentsioaren menpekoa dela; gainera, dependentzia-legea kuadratikoa da:

$$❼ \quad I_D = 9 \text{ mA} \cdot \left[1 - \frac{V_{GSQ}}{(-3)}\right]^2 = \left(3 + V_{GSQ}\right)^2 \text{ mA}$$

Bestalde, $I_G = 0$ denez gero, $I_S = I_D$ dela ondorioztatzeaz gain, ❶ eta ❸ ekuazioetatik $I_1 = I_2 = 50$ µA dela ondorioztatzen da. Hori kontuan hartuz, ❷ ekuaziotik honako hau ondorioztatzen da:

$$❷ \quad 5 = V_{GS} + 1{,}5 I_D \quad \rightarrow \quad I_D = \frac{5 - V_{GS}}{1{,}5} \text{ mA}$$

Emaitza hori ❼ ekuazioan ordezkatuz, honako ekuazio kuadratiko hau lortuko dugu:

$$\frac{5 - V_{GS}}{1{,}5} = 9 + V_{GS}^2 + 6V_{GS} \quad \rightarrow \quad 1{,}5V_{GS}^2 + 10V_{GS} + 8{,}5 = 0$$

Lehen bezala, ekuazio horrek bi soluzio ditu: $V_{GS} = -1$ V eta $V_{GS} = -5{,}7$ V.

Lehen bezala, lehenengo baldintza betetzen ote den egiaztatzea komeni da. Hau da, ea $0 \ge V_{GSQ} \ge V_{GSoff}$ den. Lehenengo balioa (–1 V) itotze-tentsioa baino handiagoa den bitartean, bigarrena (–5,7 V), ordea, itotze-tentsioa baino txikiagoa da:

$V_{GSoff} = -3$ V < $V_{GSQ1} = -1$V < 0 **baldintza bete egiten da**

$V_{GSoff} = -3$ V **>** $V_{GSQ2} = -5{,}7$ V **ez da baldintza betetzen**

Hau da, lehenengo soluzioa bakarrik hartu behar dugu kontuan:

$$\boxed{V_{GSQ} = -1\ \text{V}}$$

Soluzio hori kontuan hartuz, zirkuituko beste magnitudeen balioak kalkulatuko ditugu, hots, transistorearen egoera bilatuko dugu:

Soluzioa: $I_{GQ} = 0$ mA, $I_{DQ} = I_{SQ} = 4$ mA, $I_1 = I_2 = 50$ μA, $V_{GSQ} = -1$ V, $V_{DSQ} = 5$ V

Orain, egindako hipotesiari dagokion bigarren baldintza egiaztatzeko unea da. Hau da, $V_{DSQ} \geq V_{DSase}$ izan behar da, transistorea asetasunean egongo bada. Beraz, lehenik V_{GSQ} tentsioari dagokion V_{DSase} kalkulatu behar dugu. Hona hemen:

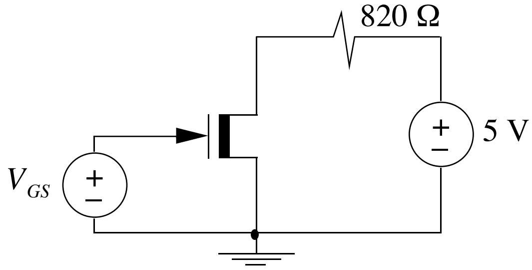
$$V_{DSase} = 3\ \text{V} \cdot \left[1 - \frac{(-1\ \text{V})}{(-3\ \text{V})}\right]^2 = 1,33\ \text{V}$$

Kasu honetan, kalkulatu berri dugun bezala, $V_{DSQ} = 5\ \text{V} > 1,33\ \text{V}$ atera zaigu. Hau da, bete egiten da baldintza, eta transistorea **asetasunean** dago. Ondorioz, transistorearen muturretako tentsioak honako hauek izango dira:

$$\boxed{\begin{array}{c} V_S = 1,5 I_D = 6\ \text{V} \\ V_G = V_{GS} + V_S = 5\ \text{V} \\ V_D = V_{DS} + V_S = 11\ \text{V} \end{array}}$$

7.3. MOS transistoreak

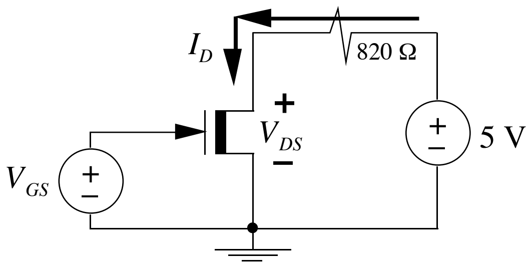
1. Irudiko zirkuituan, kalkula ezazu zenbatekoa izango den estuagotze--motako MOS transistorearen V_{DS} tentsioa $V_{GS} = -1$ V denean. Transistorearen ezaugarriak honako hauek dira: $I_{DSS} = 8$ mA, $V_{GSoff} = -5$ V.



Ebazpena:

Aurreko ataleko 1. ariketan bezalaxe, agerikoa da MOS transistorea ez dela kortean egongo, $V_{GS} = -1\ \text{V} > V_{GSoff} = -5$ V baita. Zer funtzionamendu-zonatan dagoen jakin ahal izateko, hipotesia egin beharko dugu.

Lehenik, zirkuituko irteerari dagokion ekuazioa idatziko dugu irteerako mailan KTL aplikatuz, horretarako transistorearen magnitudeak kontuan hartuz. Ez dago esan beharrik, $I_G = 0$ dela beti MOS transistoreetan.



KTL irteerako mailan:

❶ $5 = 820 I_D + V_{DS}$

1. hipotesia. Estuagotze-motako NMOS transistorea **zona ohmikoan** dago:

Ekuazioa: ❷ $I_D = \dfrac{V_{DS}}{R_{DS}}$

Baldintzak: $V_{GSQ} \geq V_{GSoff}$ eta $V_{DSQ} \leq V_{DSase}$

R_{DS} barne-erresistentzia honelaxe kalkulatzen da:

$$R_{DS} = \frac{V_{DSS}}{I_{DSS}} = \frac{|V_{GSoff}|}{I_{DSS}} = \frac{5\ \text{V}}{8\ \text{mA}} = 625\ \Omega$$

Orain arte lortu ditugun bi ekuazioak erabiliz, transistorearen egoera bilatuko dugu:

Zirkuituari dagokion ekuazioa: ❶ $5 = 820 I_D + V_{DS}$

Transistorean betetzen den ekuazioa: ❷ $V_{DS} = 625 I_D$

Soluzioa: $I_{DQ} = 3{,}46$ mA, $V_{DSQ} = 2{,}16$ V

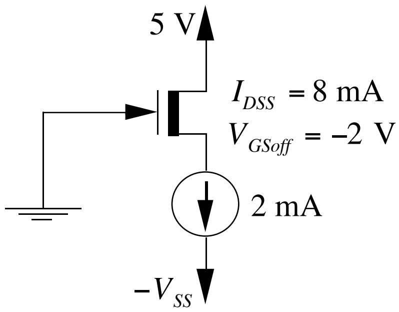
Bestalde, baldintzei dagokienez, lehenengoa bete egiten dela ikusi dugu; hots, transistorea ez dago kortean. Baina bigarren baldintza egiaztatzeko, V_{DSase} ezagutu behar dugu.

$$V_{DSase} = \left[1 - \frac{V_{GSQ}}{V_{GSoff}}\right]^2 \cdot |V_{GSoff}| = \left[1 - \frac{(-1)}{(-5)}\right]^2 \cdot 5\ \text{V} = 3{,}2\ \text{V}$$

Orain, egindako hipotesiari dagokion bigarren baldintza honako hau da: $V_{DS} \leq 3{,}2$ V izan behar da, transistorea zona ohmikoan egongo bada. Kasu honetan, kalkulatu berri dugun bezala, $V_{DSQ} = 2{,}16$ V $< 3{,}2$ V atera zaigu. Ondorioz, baldintza bete egiten da. Beraz, estuagotze-motako NMOS transistorea zona ohmikoan dago, eta V_{DS} tentsioa honako hau da:

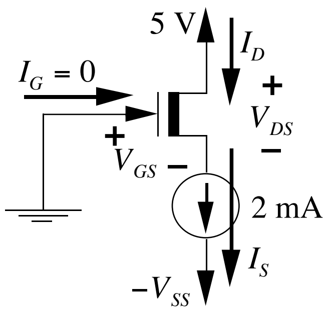
$$\boxed{V_{DSQ} = 2{,}16\ \text{V}}$$

2. Analiza ezazu irudiko zirkuitua.



Ebazpena:

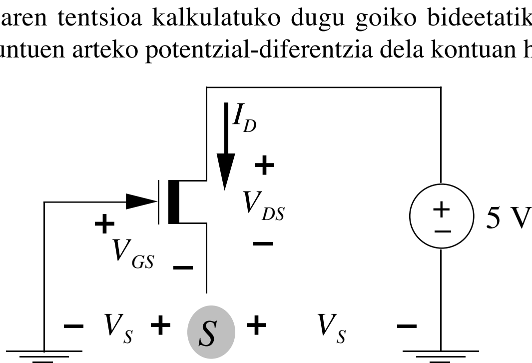
Beti bezala, lehendabizi zirkuituko magnitudeak ipiniko ditugu.



Irudian agerikoa da zirkuituari dagozkion ekuazioak korronte-sorgailuak baldintzatzen dituela, bere muturren arteko tentsio ezezaguna dela kausa. Baina, badakigu honako ekuazio hau beteko dela: I_S = 2 mA. Bestalde, $I_G = 0$ denez gero, $I_D = I_S$ betetzen da. Ondorioz:

❶ I_D = 2 mA.

Baina beste ekuazio bat beharko dugu transistorearen tentsioak erlazionatzeko, horiexek baitira transistorearen portaera-ekuazioetan agertzen direnak. Horretarako, korronte-sorgailuaren muturren arteko tentsioa saihesteko asmoz, honako hau egingo dugu: *S* puntuaren tentsioa kalkulatuko dugu goiko bideetatik, V_S tentsioa *S* eta erreferentziazko puntuen arteko potentzial-diferentzia dela kontuan hartuz, honelaxe:



ezkerretik:

$$V_S = -V_{GS}$$

eskuinetik:

$$V_S = -V_{DS} + 5$$

biak berdinduz:

❷ $V_{DS} = 5 + V_{GS}$

Orain, transistorearen funtzionamendu-zonari buruzko hipotesia egiteari ekin diezaiokegu. Hasteko, agerikoa da transistorea ez dela kortean egongo, I_D = 2 mA ≠ 0 delako. Ondorioz, gure abiapuntua beste bat izango da. Hona hemen:

1. hipotesia. Estuagotze motako NMOS transistorea **asetasunean** dago:

Ekuazioa: ❸ $I_D = I_{Dase} = I_{DSS} \cdot \left[1 - \dfrac{V_{GS}}{V_{GSoff}}\right]^2$

Baldintzak: $V_{GSQ} \geq V_{GSoff}$ eta $V_{DSQ} \geq V_{DSase}$

❸ ekuazioan agerikoa da I_D korrontea V_{GS} tentsioaren menpekoa dela; gainera, dependentzia-legea kuadratikoa da:

$$❸ \quad I_D = 8 \text{ mA} \cdot \left[1 - \frac{V_{GSQ}}{(-2)}\right]^2 = 2 \cdot \left(2 + V_{GSQ}\right)^2 \text{ mA}$$

Bestalde, ❶ ekuazioa ❸ ekuazioan ordezkatuz, honako ekuazio kuadratiko hau lortuko dugu:

$$I_D = 2 \cdot \left(2 + V_{GSQ}\right)^2 \text{ mA} = 2 \text{ mA} \rightarrow \left(2 + V_{GSQ}\right)^2 = 1 \rightarrow \textbf{soluzioa}: \left(2 + V_{GSQ}\right) = \pm 1$$

Hots, bi soluzio daude: V_{GS} = –1 V eta V_{GS} = –3 V.

Aurreko ariketetan bezala, lehenik lehenengo baldintza betetzen ote den egiaztatuko dugu. Hau da, ea $V_{GSQ} \geq V_{GSoff}$ den:

$V_{GSoff} = -2 \text{ V} < V_{GSQ1} = -1 \text{ V}$ **bete egiten da baldintza**

$V_{GSoff} = -2 \text{ V} > V_{GSQ2} = -3 \text{ V}$ **ez da baldintza betetzen**

Honelatan, bada, bigarren soluzioaren arabera, transistorea kortean dago, eta ikusi berri dugunez, hori ezinezkoa da zirkuitu honetan. Hori dela eta, bigarren soluzioa zentzurik gabekoa da, eta ez da kontuan hartu behar. Ondorioz, soluzio bakarra daukagu:

$$\boxed{V_{GSQ} = -1 \text{ V}}$$

Soluzio hori kontuan hartuz, zirkuituko beste magnitudeen balioak kalkulatuko ditugu, hots, transistorearen egoera bilatuko dugu:

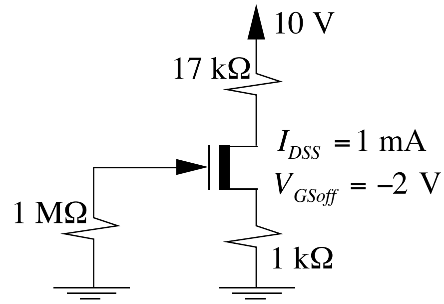
Soluzioa: I_{GQ} = 0 mA, $I_{DQ} = I_{SQ}$ = 2 mA, V_{GSQ} = –1 V, V_{DSQ} = 4 V

Orain, egindako hipotesiari dagokion bigarren baldintza egiaztatzeko unea da. Hau da, $V_{DSQ} \geq V_{DSase}$ izan behar da, transistorea asetasunean egongo bada. Beraz, lehenik V_{GSQ} tentsioari dagokion V_{DSase} kalkulatu behar dugu. Hona hemen:

$$V_{DSase} = \frac{V_{DSS}}{I_{DSS}} \cdot I_{Dase} = V_{DSS} \cdot \left[1 - \frac{V_{GSQ}}{V_{GSoff}}\right]^2 = 2 \text{ V} \cdot \left[1 - \frac{(-1 \text{ V})}{(-2 \text{ V})}\right]^2 = 0{,}5 \text{ V}$$

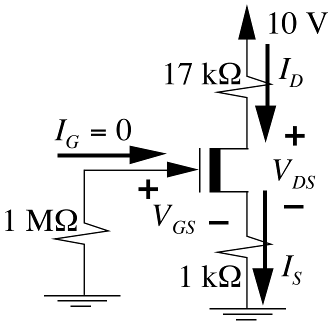
Kasu honetan, kalkulatu berri dugun bezala, V_{DSQ} = 4 V > 0,5 V atera zaigu. Hau da, baldintza bete egiten da, eta transistorea **asetasunean** dago.

3. Irudiko zirkuituan, kalkula itzazu estuagotze-motako NMOS transistorearen hiru muturretako tentsioak, V_G, V_D eta V_S, alegia.



Ebazpena:

Beti bezala, lehendabizi zirkuituko magnitudeak ipini eta zirkuituari dagozkion ekuazioak idatziko ditugu.



KKL transistorean: $I_S = I_G + I_D$, $\quad I_G = 0 \rightarrow$

❶ $I_S = I_D$

KTL sarrerako mailan: $0 = 1000 I_G + V_{GS} + 1 I_S$

$I_G = 0 \rightarrow$ ❷ $V_{GS} = -1 I_S$

KTL irteerako mailan: ❸ $10 = 17 I_D + V_{DS} + 1 I_S$

Orain, NMOS transistorearen funtzionamendu-zonari buruzko hipotesia egiteari ekin diezaiokegu. Hona hemen:

1. hipotesia. Estuagotze-motako NMOS transistorea **kortean** dago:

Ekuazioa: ❹ $I_D = 0$

Baldintza: $V_{GSQ} \leq V_{GSoff}$

Azken ekuazio hau aurreko hiruretan ordezkatuz gero, zirkuituaren soluzioa bilatuko dugu:

Soluzioa: $I_{DQ} = I_{SQ} = I_{GQ} = 0$ mA, $V_{GSQ} = 0$ V, $V_{DSQ} = 10$ V

Baldintzaren egiaztapena: $V_{GSQ} = 0 \text{ V} > V_{GSoff} = -2$ V **ez da betetzen**

Ondorioz, bigarren hipotesia egin beharko dugu:

2. hipotesia. NMOS transistorea **asetasunean** dago:

Ekuazioa: ❹ $I_D = I_{Dase} = I_{DSS} \cdot \left[1 - \dfrac{V_{GSQ}}{V_{GSoff}}\right]^2$

Baldintzak: $V_{GSQ} \geq V_{GSoff}$ eta $V_{DSQ} \geq V_{DSase}$

Aurreko ariketan bezala, ❹ ekuazioan agerikoa da I_D korrontea V_{GS} tentsioaren menpekoa dela; gainera, dependentzia-legea kuadratikoa da:

$$❹ \quad I_D = 1\text{ mA}\cdot\left[1-\frac{V_{GSQ}}{(-2\text{ V})}\right]^2 = 0,25\cdot\left(2+V_{GSQ}\right)^2\text{ mA}$$

❷ ekuazioa ($I_D = -V_{GS}$) eta aurrekoa kontuan hartuz, honako hau ondorioztatzen da:

$$-4V_{GS} = \left(2+V_{GSQ}\right)^2 \quad\rightarrow\quad V_{GS}^2 + 8V_{GS} + 4 = 0$$

Lehen bezala, ekuazio horrek bi soluzio ditu: $V_{GS} = -0,54$ V eta $V_{GS} = -7,5$ V.

Lehen bezala ere, lehenengo baldintza betetzen ote den egiaztatzea komeni da. Hau da, ea $V_{GSQ} \geq V_{GSoff}$ den:

$V_{GSoff} = -2\text{ V} < V_{GSQ1} = -0,54\text{ V}$ **bete egiten da baldintza**

$V_{GSoff} = -2\text{ V} > V_{GSQ2} = -7,5\text{ V}$ **ez da baldintza betetzen**

Hau da, lehenengo soluzioa bakarrik hartu behar dugu kontuan:

$$V_{GSQ} = -0,54\text{ V}$$

Soluzio hori kontuan hartuz, zirkuituko beste magnitudeen balioak kalkulatuko ditugu, hots, transistorearen egoera bilatuko dugu:

Soluzioa: $I_{GQ} = 0$ mA, $I_{DQ} = I_{SQ} = 0,54$ mA, $V_{GSQ} = -0,54$ V, $V_{DSQ} = 0,35$ V

Orain, egindako hipotesiari dagokion bigarren baldintza egiaztatzeko unea da. Hots, $V_{DSQ} \geq V_{DSase}$ izan behar da, transistorea asetasunean egongo bada. Beraz, lehenik V_{GSQ} tentsioari dagokion V_{DSase} kalkulatu behar dugu. Hona hemen:

$$V_{DSase} = 2\text{ V}\cdot\left[1-\frac{(-0,54\text{ V})}{(-2\text{ V})}\right]^2 = 1,07\text{ V}$$

Kasu honetan, kalkulatu berri dugun bezala, $V_{DSQ} = 0,35\text{ V} < 1,07\text{ V}$ atera zaigu. Hau da, baldintza **ez da betetzen**, eta transistorea ez dago asetasunean. Ondorioz, hirugarren hipotesia egin beharko dugu:

3. hipotesia. NMOS transistorea **zona ohmikoan** dago:

Ekuazioa: ❹ $I_D = \dfrac{V_{DS}}{R_{DS}}$

Baldintzak: $V_{GSQ} \geq V_{GSoff}$ eta $V_{DSQ} \leq V_{DSase}$

❹ ekuazioko R_{DS} parametroa honelaxe kalkulatzen da: $R_{DS} = \dfrac{V_{DSS}}{I_{DSS}} = \dfrac{2\text{ V}}{1\text{ mA}} = 2\text{ k}\Omega$

Balio hori kontuan hartuz, honako hau da ❹ ekuazioa:

$$❹ \qquad V_{DS} = 2I_D$$

Eta ❹ ekuazioa ❸ ekuazioan ordezkatuz, ondokoa ondorioztatzen da:

$$10 = 17I_D + 2I_D + 1I_D = 20I_D$$

Soluzioa: $I_{GQ} = 0$ mA, $I_{DQ} = I_{SQ} = 0{,}5$ mA, $V_{GSQ} = -0{,}5$ V, $V_{DSQ} = 1$ V

Orain, egindako hipotesiari dagozkion baldintzak egiaztatzeko unea da. Hau da, ea $V_{GSQ} \geq V_{GSoff}$ eta $V_{DSQ} \leq V_{DSase}$ diren. Horretarako, lehendabizi V_{DSase} kalkulatuko dugu:

$$V_{DSase} = 2\text{ V} \cdot \left[1 - \frac{(-0{,}5\text{ V})}{(-2\text{ V})}\right]^2 = 1{,}125\text{ V}$$

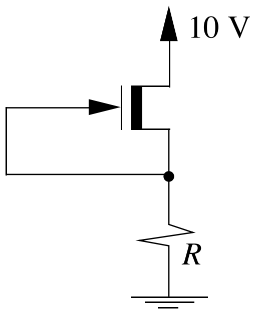
$V_{GSoff} = -2$ V $< V_{GSQ} = -0{,}5$ V **lehenengo baldintza bete egiten da**

$V_{DS} = 1$ V $< V_{DSase} = 1{,}125$ V **bigarren baldintza ere betetzen da**

Ondorioz, transistorea zona ohmikoan dago, eta transistorearen muturretako tentsioak honako hauek izango dira:

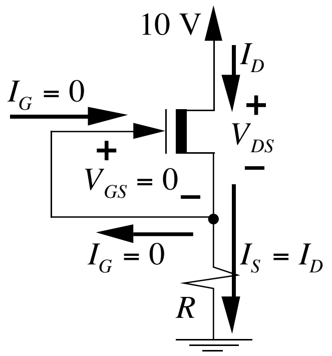
$$\boxed{\begin{array}{c} V_S = 1I_D = 0{,}5\text{ V} \\ V_G = V_{GS} + V_S = 0\text{ V} \\ V_D = V_{DS} + V_S = 1{,}5\text{ V} \end{array}}$$

4. Irudiko zirkuituan, kalkula ezazu zenbatekoa izan behar den R erresistentziaren balioa, estuagotze-motako NMOS transistorearen iturrian 9,9 V-eko tentsioa izateko.



Ebazpena:

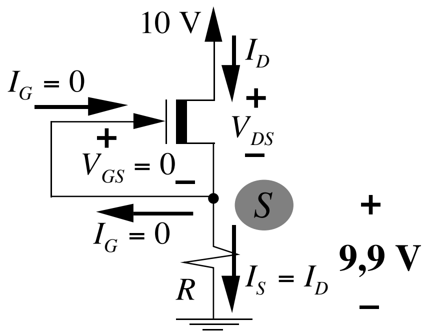
Beti bezala, lehendabizi zirkuituko magnitudeak ipini eta zirkuituari dagozkion ekuazioak idatziko ditugu. Horretarako, aldez aurretik MOS transistoreetan ateko korrontea nulua dela hartuko dugu kontuan: $I_G = 0$. Horrez gain, zirkuitu honetan, transistorearen atea eta iturria elkarrekin konektatuta daudenez gero, $V_{GS} = 0$ da. Ondorioz:



KTL irteerako mailan:

❶ $10 = V_{DS} + RI_D$

Honelatan, bada, ekuazio bakarra lortu dugu, non transistorearen bi magnitudeak baino ez diren ageri. Ondorioz, soluzioa bilatzeko behar dugun beste ekuazioa, transistorearen portaera-ekuazioa izango da. Hori bai, kontuan hartu behar dugu transistorearen iturrian 9,9 V-eko tentsioa agertzea nahi dugula. Beraz:



$V_S = 9{,}9$ V $\rightarrow$

$RI_D = 9{,}9$ V edo $10 = V_{DS} + 9{,}9$

$\rightarrow$ $V_{DS} = 0{,}1$ V

Orain, NMOS transistorearen funtzionamendu-zonari buruz honako hau esan dezakegu. Lehenik, $V_{GS} = 0$ V denez gero, agerikoa da transistorea ez dela kortean egongo, $V_{GS} = 0$ V > $V_{GSoff} = -1$ V baita. Bigarrenik, eta honako hau ere $V_{GS} = 0$ V izatearen ondorioz, asetasunaren eta zona ohmikoaren arteko muga honako tentsio honek finkatuko du: $V_{DSase} = V_{DSS} = -|V_{GSoff}| = 1$ V, eta lehen kalkulatu dugun bezala $V_{DS} = 0{,}1$ V denez gero, agerikoa da, baita ere, NMOS transistorea ez dela asetasunean egongo, $V_{DS} = 0{,}1$ V < $V_{DSase} = 1$ V baita. Ondorioz, **transistorea zona ohmikoan** egongo da, $V_S = 9{,}9$ V izango bada, behinik behin:

Ekuazioa: ❷ $I_D = \dfrac{V_{DS}}{R_{DS}}$

NMOS transistorearen R_{DS} erresistentzia baliokidea honelaxe kalkulatzen da:

$$R_{DS} = \frac{V_{DSS}}{I_{DSS}} = \frac{1\text{ V}}{0{,}5\text{ mA}} = 2\text{ k}\Omega$$

Emaitza hori kontuan hartuz, ❷ ekuazioa honelaxe geratuko da: ❷ $V_{DS} = 2I_D$.

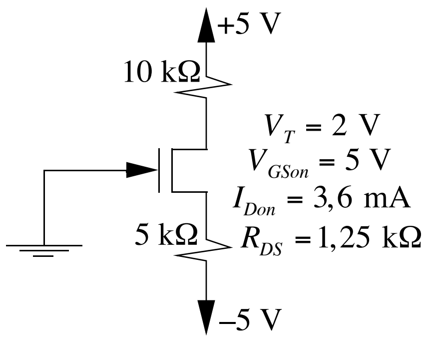
Orain, bi ekuazioek osatutako sistemaren soluzioa bilatuko dugu:

Soluzioa: $I_{GQ} = 0$ mA, $I_{DQ} = I_{SQ} = 0{,}05$ mA, $V_{GSQ} = 0$ V, $V_{DSQ} = 0{,}1$ V

Balio horiek kontuan hartuta, R erresistentziaren balioa kalkulatuko dugu:

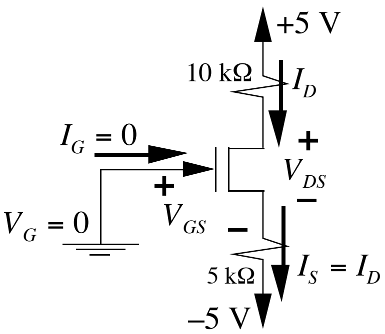
$$\boxed{R = 198\ \text{k}\Omega}$$

5. Irudiko zirkuituan, kalkula itzazu zabaltze-motako NMOS transistorearen hiru muturretako tentsioak, V_G, V_D eta V_S, alegia.



Ebazpena:

Beti bezala, lehendabizi zirkuituko magnitudeak ipini eta zirkuituari dagozkion ekuazioak idatziko ditugu.



KTL sarrerako mailan: $0 = V_{GS} + 5I_S - 5 \rightarrow$

❶ $V_{GS} = 5 - 5I_D$

KTL irteerako mailan:

$5 - (-5) = 10I_D + V_{DS} + 5I_S \rightarrow$

❷ $10 = 15I_D + V_{DS}$

Orain, NMOS transistorearen funtzionamendu-zonari buruzko hipotesia egiteari ekin diezaiokegu. Hona hemen:

1. hipotesia. Zabaltze-motako NMOS transistorea **kortean** dago:

Ekuazioa: ❸ $I_D = 0$

Baldintza: $V_{GSQ} \leq V_T$

Azken ekuazio hau aurreko bietan odezkatuz gero, zirkuituaren soluzioa bilatuko dugu:

Soluzioa: $I_{DQ} = I_{SQ} = I_{GQ} = $ 0 mA, $V_{GSQ} = 5$ V, $V_{DSQ} = 10$ V

Baldintzaren egiaztapena: $V_{GSQ} = 5\text{ V} > V_T = 2$ V **baldintza ez da betetzen**

Ondorioz, bigarren hipotesia egin beharko dugu:

2. hipotesia. NMOS transistorea **asetasunean** dago:

Ekuazioa: ❸ $I_D = I_{Dase} = I_{Don} \cdot \left(\dfrac{V_{GSQ} - V_T}{V_{GSon} - V_T} \right)^2$

Baldintzak: $V_{GSQ} \geq V_T$ eta $V_{DSQ} \geq V_{DSase}$

❸ ekuazioan agerikoa da I_D korrontea V_{GS} tentsioaren menpekoa dela; gainera, dependentzia-legea kuadratikoa da:

$$❸ \quad I_D = 3{,}6\text{ mA} \cdot \left(\frac{V_{GSQ} - 2}{5 - 2} \right)^2 = 0{,}4\left(V_{GSQ} - 2\right)^2 \text{ mA}$$

❶ ekuazioa eta aurrekoa kontuan hartuz, honako hau ondorioztatzen da:

$$I_D = \frac{5 - V_{GSQ}}{5} = 0{,}4\left(V_{GSQ} - 2\right)^2 \quad \rightarrow \quad 2V_{GSQ}^2 - 7V_{GSQ} + 3 = 0$$

Lehen bezala, ekuazio horrek bi soluzio ditu: $V_{GS} = 3$ V eta $V_{GS} = 0{,}5$ V.

Lehen bezala ere, lehenengo baldintza betetzen ote den egiaztatzea komeni da. Hau da, ea $V_{GSQ} \geq V_T$ den:

$V_T = 2\text{ V} < V_{GSQ1} = 3$ V **bete egiten da baldintza**

$V_T = 2\text{ V} > V_{GSQ2} = 0{,}5$ V **ez da baldintza betetzen**

Hau da, lehenengo soluzioa bakarrik hartu behar dugu kontuan: $V_{GSQ} = 3$ V

Soluzio hori kontuan hartuz, zirkuituko beste magnitudeen balioak kalkulatuko ditugu, hots, transistorearen egoera bilatuko dugu:

Soluzioa: $I_{GQ} = $ 0 mA, $I_{DQ} = I_{SQ} = 0{,}4$ mA, $V_{GSQ} = 3$ V, $V_{DSQ} = 4$ V

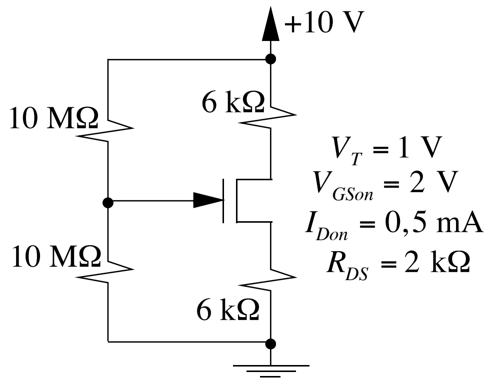
Orain, egindako hipotesiari dagokion bigarren baldintza egiaztatzeko unea da. Hau da, $V_{DSQ} \geq V_{DSase}$ izan behar da, transistorea asetasunean egongo bada. Beraz, lehenik V_{DSase} kalkulatu behar dugu. Hona hemen:

$$V_{DSase} = R_{DS} I_D = 1{,}25\text{ k}\Omega \cdot 0{,}4\text{ mA} = 0{,}5\text{ V}$$

Kasu honetan, kalkulatu berri dugun bezala, $V_{DSQ} = 4\text{ V} > 0{,}5$ V atera zaigu. Alegia, baldintza **bete egiten da** eta transistorea asetasunean dago. Ondorioz, transistorearen muturretako tentsioak honako hauek izango dira:

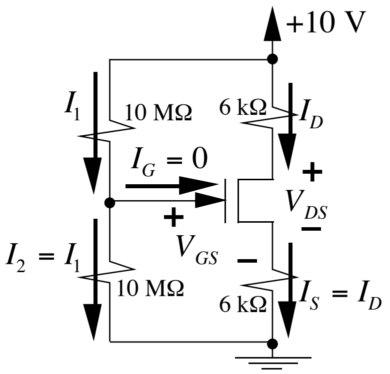
$$\boxed{V_S = -V_{GS} = -3\text{ V}} \qquad \boxed{V_G = 0\text{ V}} \qquad \boxed{V_D = V_{DS} + V_S = 1\text{ V}}$$

6. Irudiko zirkuituan, kalkula itzazu zabaltze-motako NMOS transistorearen hiru muturretako tentsioak, V_G, V_D eta V_S, alegia.



Ebazpena:

Beti bezala, lehendabizi zirkuituko magnitudeak ipini eta zirkuituari dagozkion ekuazioak idatziko ditugu. $I_G = 0$ denez gero, $I_1 = I_2$ eta $I_S = I_D$ izango dira. Ondorioz:



KTL sarrerako mailan:

❶ $10000 I_1 = V_{GS} + 6 I_D$

KTL sarrerako begiztan:

❷ $10 = 10000 I_1 + 10000 I_2$

KTL irteerako mailan:

❸ $10 = 6 I_D + V_{DS} + 6 I_D$

Orain, zabaltze-motako NMOS transistorearen funtzionamendu-zonari buruzko hipotesia egiteari ekin diezaiokegu. Hona hemen:

1. hipotesia. NMOS transistorea **kortean** dago:

Ekuazioa: ❹ $I_D = 0$

Baldintza: $V_{GSQ} \le V_T$

Azken ekuazio hau aurreko hiruretan ordezkatuz gero, zirkuituaren soluzioa bilatuko dugu:

Soluzioa: $I_{DQ} = I_{SQ} = I_{GQ} =$ 0 mA, $I_1 = I_2 = 0{,}5$ μA, $V_{GSQ} = 5$ V, $V_{DSQ} = 10$ V

Baldintzaren egiaztapena: $V_{GSQ} = 5 \text{ V} > V_T = 1$ V **ez da betetzen**

Ondorioz, bigarren hipotesia egin beharko dugu:

2. hipotesia. NMOS transistorea **asetasunean** dago:

Ekuazioa: ❹ $I_D = I_{Dase} = I_{Don} \cdot \left(\dfrac{V_{GSQ} - V_T}{V_{GSon} - V_T} \right)^2$

Baldintzak: $V_{GSQ} \geq V_T$ eta $V_{DSQ} \geq V_{DSase}$

❹ ekuazioan agerikoa da I_D korrontea V_{GS} tentsioaren menpekoa dela; gainera, dependentzia-legea kuadratikoa da:

$$❹ \quad I_D = 0{,}5 \text{ mA} \cdot \left(\frac{V_{GSQ} - 1}{2 - 1} \right)^2 = 0{,}5\left(V_{GSQ} - 1\right)^2 \text{ mA}$$

❶ eta ❷ ekuazioak eta aurrekoa kontuan hartuz, honako hau ondorioztatzen da:

$$I_D = \frac{5 - V_{GSQ}}{6} = 0{,}5\left(V_{GSQ} - 1\right)^2 \quad \rightarrow \quad 3V_{GSQ}^2 - 5V_{GSQ} - 2 = 0$$

Lehen bezala, ekuazio horrek bi soluzio ditu: $V_{GS} = 2$ V eta $V_{GS} = -0{,}33$ V.

Lehen bezala ere, lehenengo baldintza betetzen ote den egiaztatzea komeni da. Hau da, ea $V_{GSQ} \geq V_T$ den:

$V_T = 1 \text{ V} < V_{GSQ1} = 2 \text{ V}$ **bete egiten da baldintza**

$V_T = 1 \text{ V} > V_{GSQ2} = -0{,}33 \text{ V}$ **ez da baldintza betetzen**

Hau da, lehenengo soluzioa bakarrik hartu behar dugu kontuan:

$$V_{GSQ} = 2 \text{ V}$$

Soluzio hori kontuan hartuz, zirkuituko beste magnitudeen balioak kalkulatuko ditugu, hots, transistorearen egoera bilatuko dugu:

Soluzioa: $I_{GQ} = 0$ mA, $I_{DQ} = I_{SQ} = 0{,}5$ mA, $I_1 = I_2 = 0{,}5$ μA, $V_{GSQ} = 2$ V, $V_{DSQ} = 4$ V

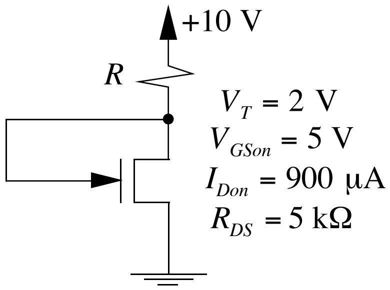
Orain, egindako hipotesiari dagokion bigarren baldintza egiaztatzeko unea da. Hau da, $V_{DSQ} \geq V_{DSase}$ izan behar da, transistorea asetasunean egongo bada. Beraz, lehenik V_{DSase} kalkulatu behar dugu. Hona hemen:

$$V_{DSase} = R_{DS} I_D = 2 \text{ k}\Omega \cdot 0{,}5 \text{ mA} = 1 \text{ V}$$

Kasu honetan, kalkulatu berri dugun bezala, $V_{DSQ} = 4 \text{ V} > 1 \text{ V}$ atera zaigu. Hau da, baldintza **bete egiten da,** eta transistorea asetasunean dago. Ondorioz, transistorearen muturretako tentsioak honako hauek izango dira:

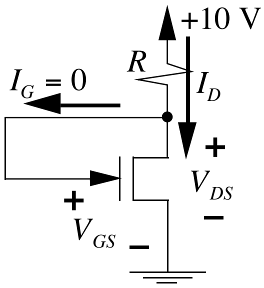
$$\boxed{\begin{array}{c} V_S = V_G - V_{GS} = 3 \text{ V} \\ V_G = 10000 I_2 = 5 \text{ V} \\ V_D = V_{DS} + V_S = 7 \text{ V} \end{array}}$$

7. Irudiko zirkuituan, kalkula ezazu zenbatekoa izan behar den R erresistentziaren balioa, zabaltze-motako NMOS transistorearen hobi-korrontea 0,4 mA-koa izateko.



Ebazpena:

Beti bezala, lehendabizi zirkuituko magnitudeak ipini eta zirkuituari dagozkion ekuazioak idatziko ditugu.



Agerikoa da $V_{GS} = V_{DS}$ dela.

KTL irteerako mailan:

❶ $10 = RI_D + V_{DS}$

Orain, NMOS transistorearen funtzionamendu-zonari buruz honako hau esan dezakegu. $I_D = 0{,}4$ mA izatea nahi dugunez gero, agerikoa da transistorea ez dela kortean egongo. Ondorioz, hurrengo hipotesia egingo dugu:

1. hipotesia. NMOS transistorea **asetasunean** dago:

Ekuazioa: ❷ $I_D = I_{Dase} = I_{Don} \cdot \left(\dfrac{V_{GSQ} - V_T}{V_{GSon} - V_T} \right)^2$

Baldintzak: $V_{GSQ} \geq V_T$ eta $V_{DSQ} \geq V_{DSase}$

❷ ekuazioan $I_D = 0{,}4$ mA ordezkatuz:

$$❷ \quad I_D = 0{,}4 \text{ mA} = 0{,}9 \text{ mA} \cdot \left(\frac{V_{GSQ} - 2}{5 - 2} \right)^2 = 0{,}1 \cdot \left(V_{GSQ} - 2 \right)^2 \text{ mA}$$

Hau da, honako ekuazio kuadratiko hau lortuko dugu:

$$V_{GS}^2 - 4V_{GS} = 0$$

Lehen bezala, ekuazio horrek bi soluzio ditu: $V_{GS} = 4$ V eta $V_{GS} = 0$ V.

Lehen bezala ere, lehenengo baldintza betetzen ote den egiaztatzea komeni da. Hau da, ea $V_{GSQ} \geq V_T$ den:

$V_T = 2$ V < $V_{GSQ1} = 4$ V **bete egiten da baldintza**

$V_T = 2$ V **>** $V_{GSQ2} = 0$ V **ez da baldintza betetzen**

Hau da, lehenengo soluzioa bakarrik hartu behar dugu kontuan:

$$V_{GSQ} = 4 \text{ V}$$

Soluzio hori kontuan hartuz, zirkuituko beste magnitudeen balioak kalkulatuko ditugu, hots, transistorearen egoera bilatuko dugu:

Soluzioa: $I_{GQ} = 0$ mA, $I_{DQ} = I_{SQ} = 0{,}4$ mA, $V_{GSQ} = 4$ V, $V_{DSQ} = 4$ V

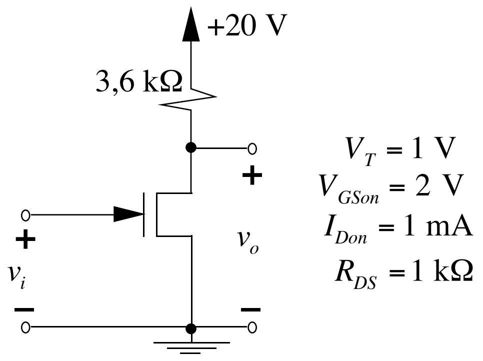
Orain, egindako hipotesiari dagokion bigarren baldintza egiaztatzeko unea da. Hau da, $V_{DSQ} \geq V_{DSase}$ izan behar da, transistorea asetasunean egongo bada. Beraz, lehenik V_{DSase} kalkulatu behar dugu. Hona hemen:

$$V_{DSase} = R_{DS} I_D = 5 \text{ k}\Omega \cdot 0{,}4 \text{ mA} = 2 \text{ V}$$

Kasu honetan, kalkulatu berri dugun bezala, $V_{DSQ} = 4$ V > 2 V atera zaigu. Hau da, baldintza **bete egiten da**, eta transistorea asetasunean dago. Balio horiek kontuan hartuta, R erresistentziaren balioa kalkulatuko dugu:

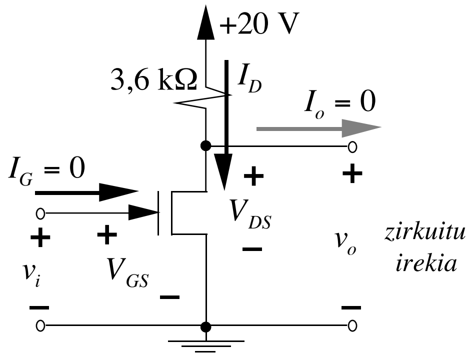
$$\boxed{R = 15 \text{ k}\Omega}$$

8. Irudiko zirkuituan, marraz ezazu (v_o, v_i) transferentzia-kurba. Horretarako, azter ezazu sarrera-tentsioaren aldaketak (v_i-renak) irteera-tentsioaren gainean (v_o-ren gainean) duen eragina.



<u>Ebazpena:</u>

Beti bezala, lehendabizi, zirkuituko magnitudeak ipiniko ditugu; horretarako, kontuan hartuko dugu irteera zirkuitu irekian dagoela, hots, irteeratik ez dela korronterik igaroko:



Ondoren, zirkuituan betetzen diren ekuazioak idatziko ditugu:

Zirkuituari dagozkion ekuazioak:

KTL irteerako mailan: ❶ $20 = 3,6I_D + V_{DS}$

Sarrerako tentsioa, v_i, aldakorra da (sarrerako bi puntu horien artean tentsio-sorgailu aldakor bat dagoela suposatuko dugu, eta bere tentsioa 0 voltetik 20 volteraino handituko dela), eta horrek v_o irteerako tentsioaren gainean duen eragina aztertu behar dugu. Hori dela eta, ez sarrerako tentsioa ez eta irteerako tentsioa ere aurreko ekuazioetan ageri ez direnez gero, horien adierazpenak idaztea komeni da. Sarreran eta irteeran KTL aplikatuz:

$$v_i = V_{GS} \text{ eta } v_o = V_{DS}$$

Beraz, dagoeneko, zirkuituan betetzen den ekuazioa idatzi dugu. Soluzioa bilatzeko falta dena, transistorearen portaera-ekuazioa da, hots, funtzionamendu-zonaren menpekoa. Hori dela eta, transistorearen funtzionamendu-zonari buruzko hipotesia egin beharko dugu, funtzionamendu-zona sarrerako tentsioaren menpekoa izango dela kontuan hartuz. Hona hemen:

1. hipotesia. Transistorea **kortean** dago:

Ekuazioa: ❷ $I_D = 0$

Baldintza: $V_{GS} \leq V_T = 1$ V

Soluzioa: $I_G = 0$ mA, $I_D = I_S = 0$ mA, $V_{GS} = v_i$, $V_{DS} = 20$ V

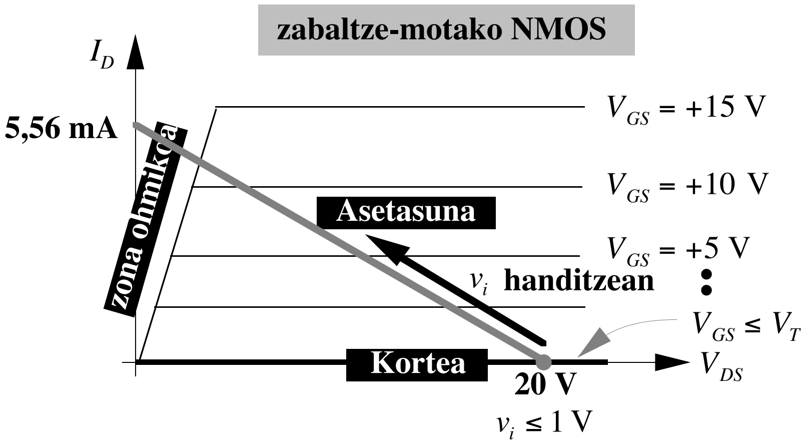
Baldintza betearaziz: $V_{GS} = v_i \leq 1$ V → $\boxed{v_i \leq 1 \text{ V}}$

Hau da, sarrerako tentsioa 1 V baino txikiagoa den bitartean, transistorea kortean dago, eta irteerako tentsioa $v_o = 20$ V da. Hortaz, dagoeneko honako hau dakigu sarrerako eta irteerako tentsioen arteko erlazioari dagokionez:

$$\boxed{v_i \leq \mathbf{1\ V} \quad \rightarrow \quad v_o = \mathbf{20\ V}}$$

Orain, $v_i \geq 1$ V denean zer gertatzen den analizatu beharko dugu.

Garbi dago transistorea ez dela kortean egongo; ondorioz, hipotesirik logikoena kortetik asetasunera igaro dela suposatzea izango da, zirkuituaren karga-lerrozuzenaren gainean mugituko baita transistorearen operazio-puntua:



2. hipotesia. Transistorea **asetasunean** dago:

Ekuazioa: ❷ $$I_D = I_{Dase} = I_{Don} \cdot \left(\frac{V_{GSQ} - V_T}{V_{GSon} - V_T} \right)^2 = 1 \text{ mA} \cdot \left(\frac{v_i - 1}{2 - 1} \right)^2 = \left(v_i - 1 \right)^2$$

Baldintzak: $V_{GSQ} \geq V_T$ eta $V_{DSQ} \geq V_{DSase}$

Ekuazioan agerikoa da I_D korrontea sarrerako tentsioaren menpekoa dela. Balio hau ❶ ekuazioan ordezkatuz, irteerako tentsioaren adierazpena lortuko dugu:

❶ $$V_{DS} = 20 - 3,6 I_D = 20 - 3,6 \left(v_i - 1 \right)^2$$

Transistorea asetasunean egoteko bete beharreko baldintzei dagokienez, agerikoa da lehenengoa betetzen dela, bigarren hipotesia egiteko $V_{GSQ} = v_i \geq V_T = 1$ V dela suposatzea izan baita gure abiapuntua. Ordea, bigarren baldintza betearazi behar diogu zirkuituari. Hau da, $V_{DSQ} \geq V_{DSase}$ izan behar da, transistorea asetasunean egongo bada. Beraz, lehenik V_{DSase} kalkulatu behar dugu. Hona hemen:

$$V_{DSase} = R_{DS} I_D = 1 \text{ k}\Omega \cdot \left(v_i - 1 \right)^2 \text{ mA} = \left(v_i - 1 \right)^2 \text{ V}$$

Baldintza betearaziz: $V_{DS} = 20 - 3,6 \left(v_i - 1 \right)^2 \geq \left(v_i - 1 \right)^2 \quad \rightarrow \quad \boxed{v_i \leq 3,09 \text{ V}}$

Hau da, sarrerako tentsioa 1 V baino handiagoa eta 3,09 V baino txikiagoa den bitartean, transistorea asetasunean dago, eta irteerako tentsioa $v_o = 20 - 3,6(v_i - 1)^2$ da. Beraz, laburbilduz, dagoeneko honako hau dakigu sarrerako eta irteerako tentsioen arteko erlazioari dagokionez:

v_i **≤ 1 V**	→	v_o **= 20 V**
1 V ≤ v_i **≤ 3,09 V**	→	v_o **= 20 –3,6(**v_i**–1)**^{2} **V**

Orain, $v_i \geq 3{,}09$ V denean zer gertatzen den analizatu beharko dugu. Garbi dago transistorea ez dela ez kortean ez eta asetasunean egongo; ondorioz, zona ohmikoan egon beharko da.

3. hipotesia. Transistorea **zona ohmikoan** dago:

Ekuazioa: ❷ $V_{DS} = R_{DS} I_D = 1 I_D$

Baldintzak: $V_{GSQ} \geq V_T$ eta $V_{DSQ} \leq V_{DSase}$

Hona hemen bi ekuazioek osatutako sistemaren soluzioa:

Soluzioa: $I_G = 0$ mA, $I_D = I_S = 4{,}35$ mA, $V_{GS} = v_i$, $V_{DS} = 4{,}35$ V

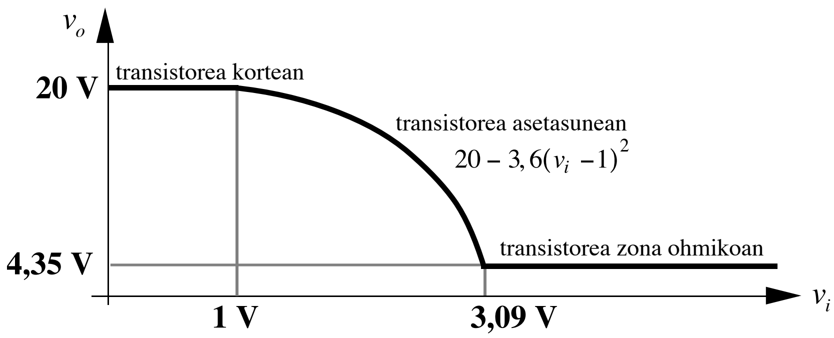
Baldintza betearaziz: $V_{DS} = 4{,}35 \leq (v_i - 1)^2 \rightarrow \boxed{v_i \geq 3{,}09 \text{ V}}$

Hau da, jadanik ezagutzen genuen muga.

Beraz, laburbilduz, dagoeneko honako hau dakigu sarrerako eta irteerako tentsioen arteko erlazioari dagokionez:

v_i **≤ 1 V**	→	v_o **= 20 V**
1 V ≤ v_i **≤ 3,09 V**	→	v_o **= 20 –3,6(**v_i**–1)**^{2} **V**
3,09 V ≤ v_i	→	v_o **= 4,35 V**

Grafikoki:

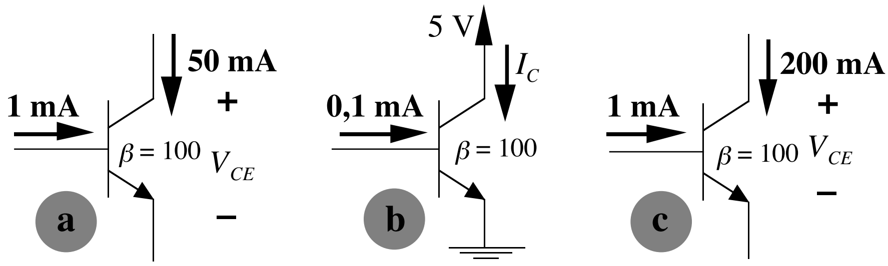


Transferentzia-kurba hau NMOS alderanzkailuarena da.

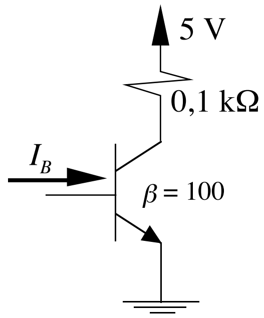
C) Proposaturiko ariketak

7.1. Transistore bipolarrak

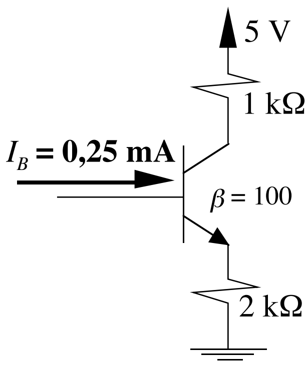
1. Analiza itzazu ondoko irudietako zirkuituak, hots, esan zein funtzionamendu-zonatan dagoen transistorea eta kalkula itzazu eskatutako magnitudeak:



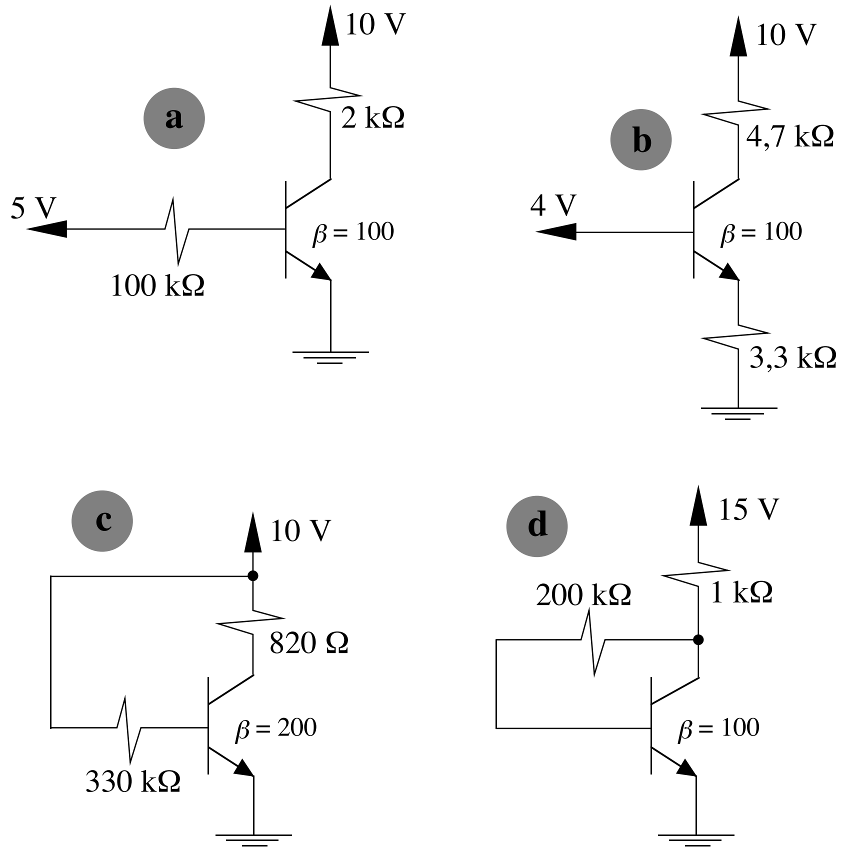
2. Esan ezazu zein funtzionamendu-zonatan egongo den irudiko zirkuituko transistorea, ondoko bi kasuetan: **a)** $I_B = 1$ mA; **b)** $I_B = 0{,}1$ mA.



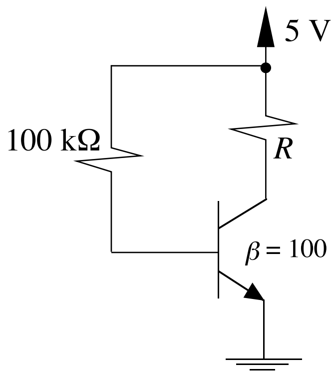
3. Aurki ezazu irudiko zirkuituko transistorearen egoera eta kalkula itzazu hiru muturretako tentsioak, V_B, V_C eta V_E, alegia.



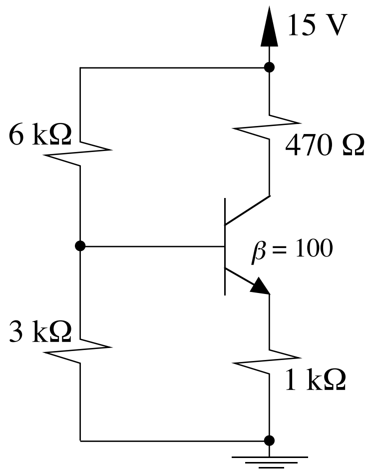
4. Analiza itzazu ondoko irudietako zirkuituak.



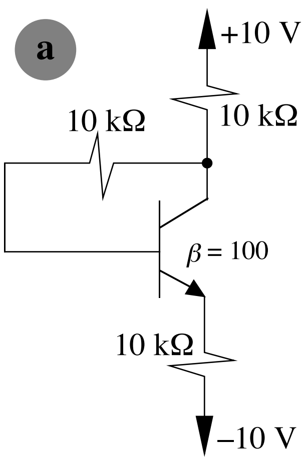
5. Esan ezazu zein funtzionamendu-zonatan egongo den irudiko zirkuituko transistorea, ondoko bi kasuetan: a) $R = 0{,}5$ kΩ; b) $R = 5$ kΩ.

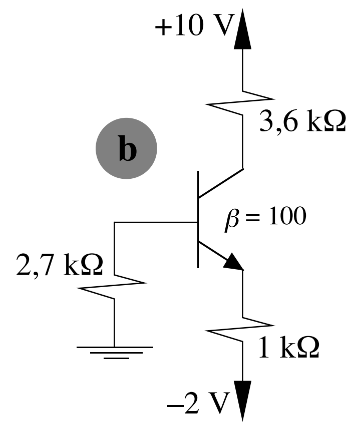


6. Analiza ezazu irudiko zirkuitua.



7. Analiza itzazu ondoko irudietako zirkuituak eta kalkula itzazu transistoreen hiru muturretako tentsioak, V_B, V_C eta V_E, alegia.

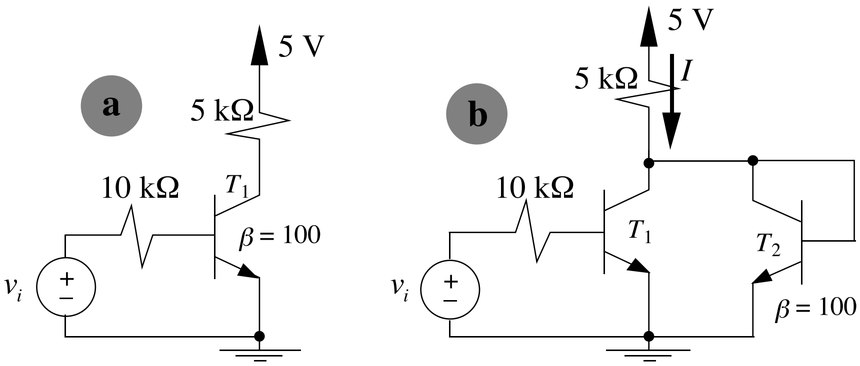




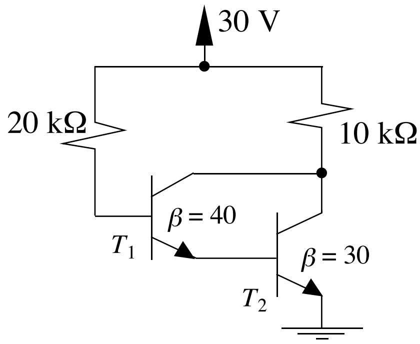
8. Irudiko ezkerreko zirkuitua kontuan izanik:

a) Azter ezazu zein funtzionamendu-zonatan egongo den T_1 transistorea honako bi kasuotan: 1) $v_i = 0$ V eta 2) $v_i = 4$ V. Zein izango da bi kasu horietan kolektorearen eta igorlearen arteko potentzial-diferentzia, V_{CE}?

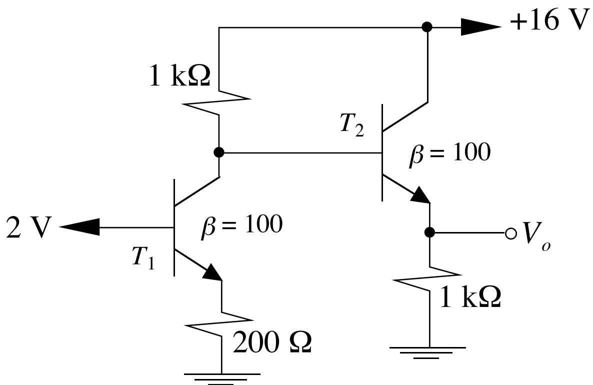
b) Aurreko zirkuituari T_2 transistorea gehitu zaio, eskuineko irudian ageri den moduan. Azter ezazu aurreko bi kasuetan zein funtzionamendu-zonatan egongo den T_2 transistorea eta zein izango den I korrontearen balioa.



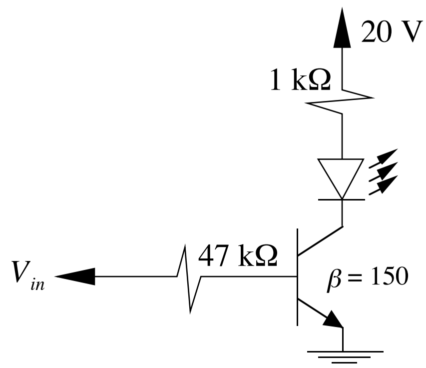
9. Analiza ezazu irudiko zirkuitua.



10. Analiza ezazu irudiko zirkuitua. Zenbatekoa da V_o tentsioa?



11. Irudiko zirkuituko LED diodoak argi berdea ematen du, eta funtzionatzen ari denean, beraren tentsioa 2,3 V-ekoa da. Transistorearen korronte-irabaziak 150 balio badu, zenbat balio du diodotik igarotzen den korronteak, transistorea asetasunean dagoenean? Zein da V_{in} tentsioaren balioa, transistorea asetasunean sar dadin?

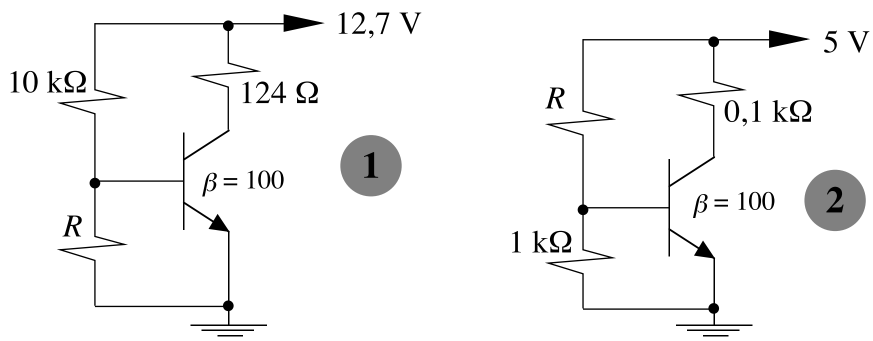


12. Irudietako bi zirkuituetarako kalkula itzazu:

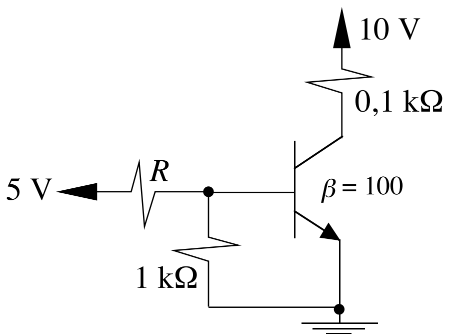
a) *R* erresistentziaren muga-balioa, transistorea korrontea eroaten has dadin. Nolakoa da balio hori, maximoa ala minimoa? Zergatik?

b) R = 1 kΩ baldin bada, zein funtzionamendu-zonatan dago transistorea? Zergatik? Eta R = 4,3 kΩ bada?

c) *R* erresistentziaren muga-balioa, transistorea asetasunean sar dadin. Nolakoa da balio hori, maximoa ala minimoa? Zergatik?



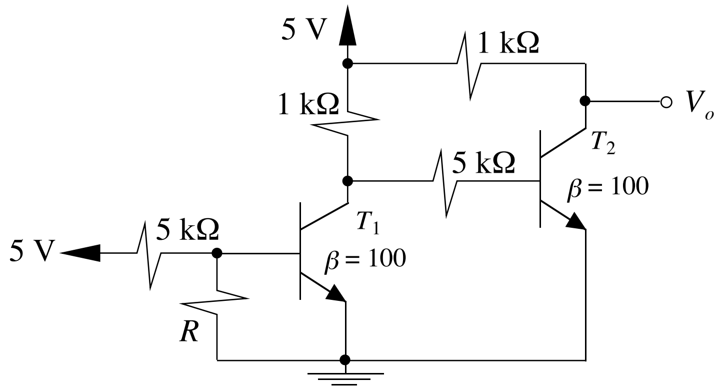
13. Kalkula ezazu *R* erresistentziaren balioa, transistorea asetasunean egon dadin.



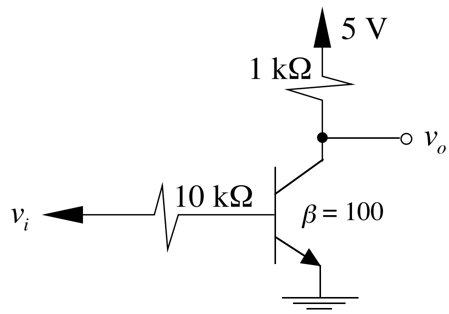
14. Irudiko zirkuituan:

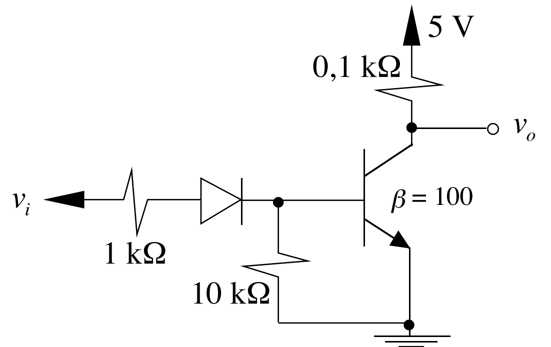
a) Zein funtzionamendu-zonatan egon behar da T_1 transistorea, T_2 transistorea korrontea eroaten has dadin? Zenbatekoa izan behar da R erresistentziaren balioa, hori gerta dadin?

b) T_1 transistorea asetasunean baldin badago, zein funtzionamendu-zonatan egongo da T_2 transistorea? Zenbatekoa izango da V_o irteera-tentsioa kasu horretan? Nolakoa da balio hori, maximoa ala minimoa?

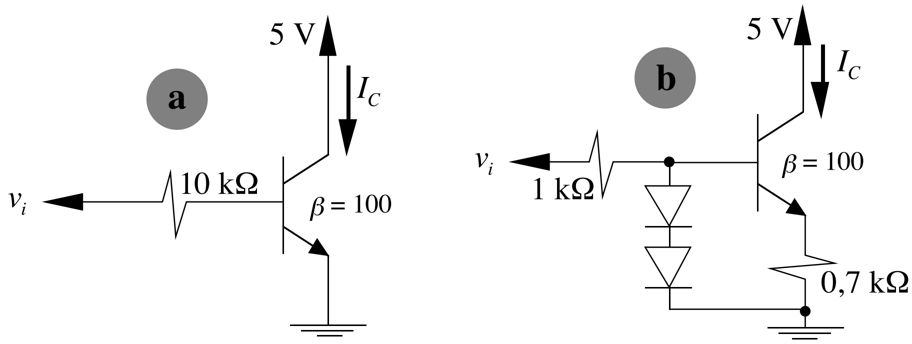


15. Irudiko zirkuituetarako, marraz ezazu (v_o, v_i) transferentzia-kurba.

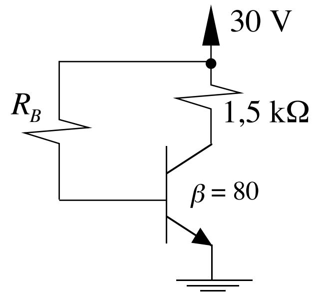




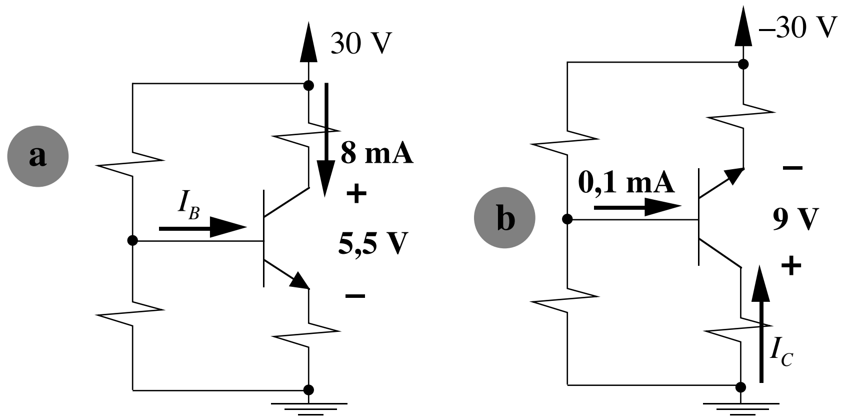
16. Irudiko zirkuituetarako, marraz ezazu (I_C, v_i) kurba.

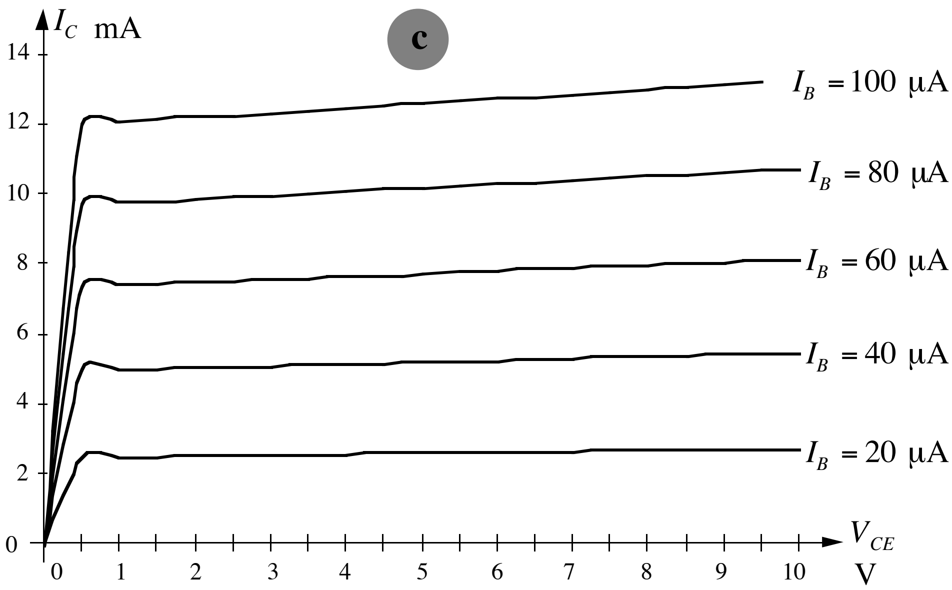


17. Irudiko zirkuituko transistorearen korronte-irabaziak 80 balioa du. Marraz itzazu sarrera- eta irteera-zirkuituei dagozkien karga-lerrozuzenak. R_B = 390 kΩ-ekoa baldin bada, zein da operazio-puntua?

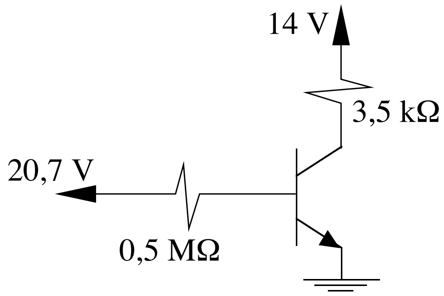


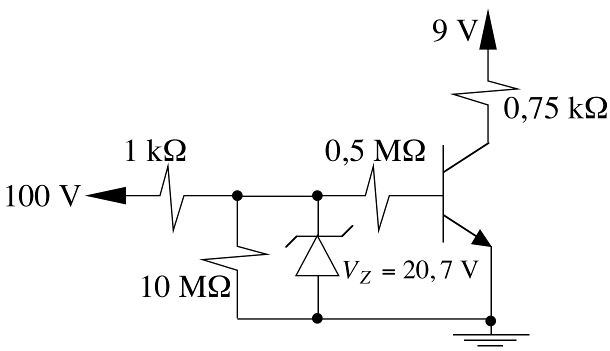
18. Transistore baten ezaugarri grafikoa ezaguna da, *c* irudikoa hain zuzen. Transistore hori *a* irudiko zirkuituan konektatu da eta magnitude batzuen balioak neurtu dira; balio horiek kontuan hartuz, zenbatekoa izango da, gutxi gorabehera, oinarri-korrontea? Eta *b* irudiko zirkuituan, zenbatekoa izango da kolektore-korrontea?





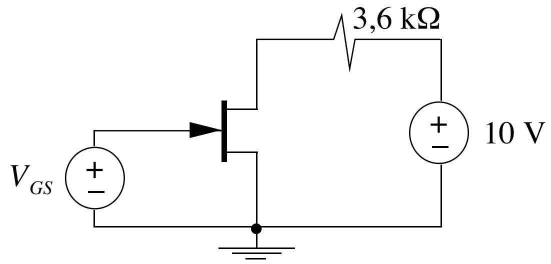
19. Irudiko zirkuituetako transistorearen ezaugarri-kurbak ezagunak dira (aurreko ariketako *c* irudikoak, hain zuzen). Kalkula itzazu transistorearen operazio-puntua (hots, I_B, I_C, V_{BE} eta V_{CE}) eta korronte-irabazia (β).



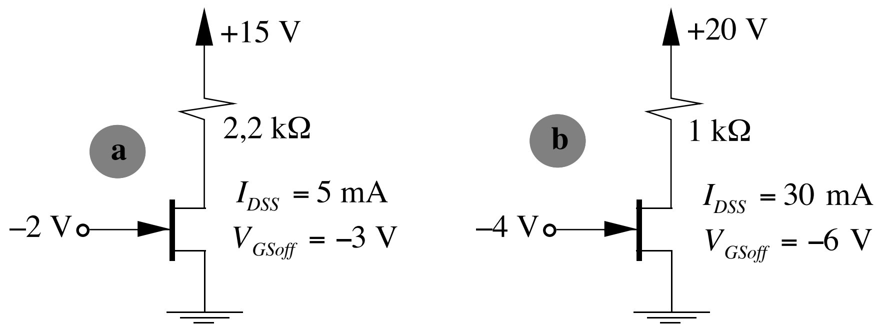


7.2. JFET transistoreak

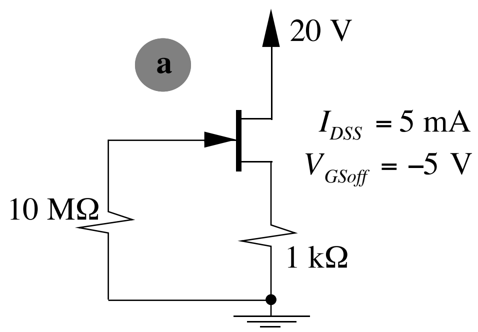
1. Irudiko zirkuituan, kalkula ezazu zenbatekoa izango den JFET transistorearen V_{DS} tentsioa V_{GS} = 0 V denean eta V_{GS} = –2,2 V denean. JFET transistorearen ezaugarriak honako hauek dira: I_{DSS} = 10 mA, V_{GSoff} = –4 V.

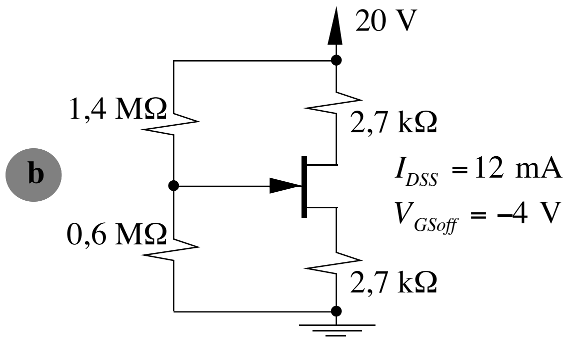


2. Analiza itzazu ondoko irudietako zirkuituak.



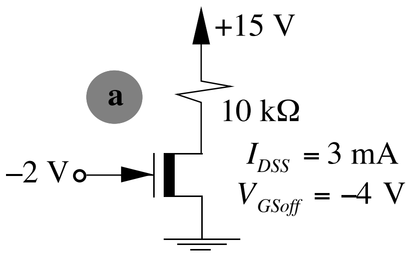
3. Aurki itzazu irudietako transistoreen egoerak, eta kalkula itzazu hiru muturretako tentsioak, V_G, V_D eta V_S alegia.

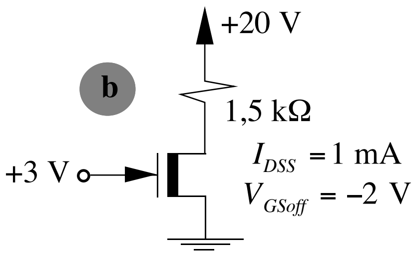




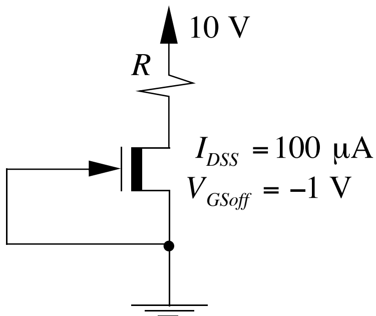
7.3. MOS transistoreak

1. Analiza itzazu ondoko irudietako zirkuituak.

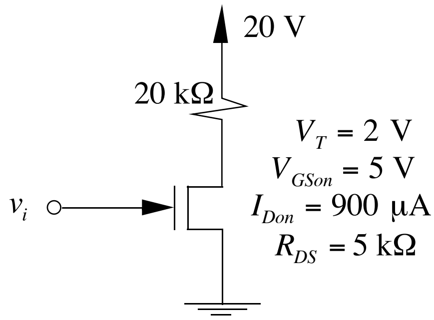




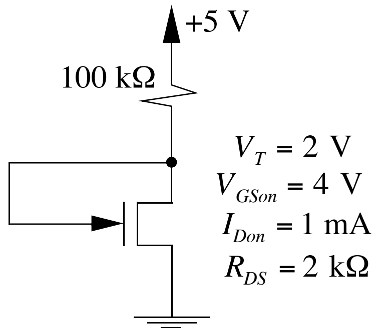
2. Irudiko zirkuituan, kalkula ezazu zenbatekoa izan behar den *R* erresistentzia, estuagotze-motako NMOS transistorearen hobi-korrontea 100 µA-koa izan dadin.



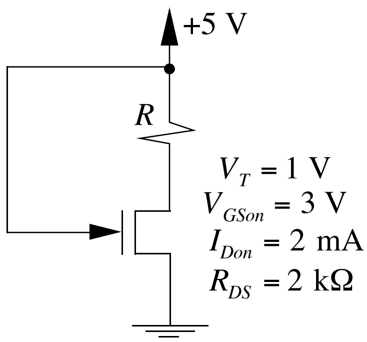
3. Irudiko zirkuituan, kalkula ezazu zabaltze-motako NMOS transistorearen hobi-tentsioa, V_D, honako kasu hauetan: $v_i = 0$ V, $v_i = 5$ V, $v_i = 10$ V eta $v_i = 20$ V.



4. Irudiko zirkuituan, kalkula ezazu zabaltze-motako NMOS transistorearen hobi-tentsioa, V_D.



5. Irudiko zirkuituan, kalkula ezazu zenbatekoa izan behar den *R* erresistentzia, zabaltze-motako NMOS transistorearen hobi-tentsioa 0,1 V-ekoa izan dadin.



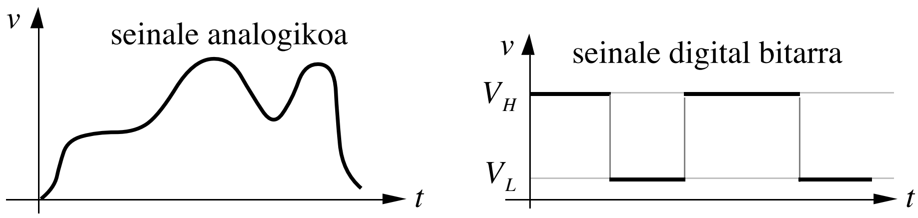
8. Zirkuitu digitalen analisirako sarrera

A) Zirkuitu digitalak: oinarrizko kontzeptuak

• Definizioak

Seinale digitalak

Zirkuitu digitalak sarrera eta irteera gisa seinale digitalak erabiltzen dituzten zirkuitu elektronikoak dira. Seinale digitalak balio jakin batzuk besterik hartzen ez dituzten seinale diskretuak dira; bereziki, seinale digital bitarrak erabiltzen dira, hots, bi balio besterik hartzen ez dituzten seinaleak.



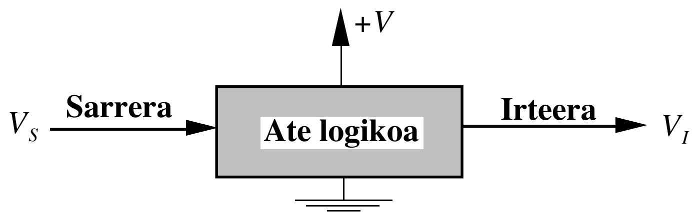
Seinale digitaletako bi balio horiek zirkuitu elektronikoetan bi tentsio-mailen bitartez adierazten dira, V_H edo tentsio-maila altua (H, ingelesez *High*) eta V_L edo tentsio-maila baxua (L, ingelesez *Low*). Jarraian aurkeztuko ditugun zirkuitu digitalen kasuan, $V_H = 5$ V (H) eta $V_L = 0$ V (L) izan ohi dira.

Tentsio hauei balio logiko bana egokitzen zaie: "1" logikoa edo egiazkoa eta "0" logikoa edo faltsua. Aipatutako bi balio logiko hauek dira, hain zuzen ere, informatikaren alorrean bit izena hartzen dutenak (ingelesezko "binary digit" izenaren laburdura, hots, digitu bitarra).

Bi balio logikoak eta bi tentsioak elkarri esleitzeko orduan, aukera bat baino gehiago dago; gehien erabiltzen dena logika positiboa da, non "1" logikoa H tentsioari eta "0" logikoa L tentsioari esleitzen zaizkien, hurrenez hurren. Baina kontrakoa ere egin daiteke, hots "1" logikoa L tentsioari eta "0" logikoa H tentsioari esleitu; kasu horretan logika negatiboa lortzen da. Gai honen helburua zirkuitu digitalen oinarrizko funtzionamendua aurkeztea besterik ez denez gero, hemendik aurrera logika positiboa baino ez dugu erabiliko.

Zirkuitu digitalak

Zirkuitu digitalik sinpleenak ate logikoak dira. Ate logikoetan, irteera-tentsioa sarrera-tentsioaren menpekoa da, eta, funtziona dezaten, elikadura beharrezkoa da. Sarrera-seinalea digitala eta aldakorra izan ohi da, eta aldatzen den heinean, ateak betetzen duen funtzio logikoaren arabera, irteera-seinalea ere aldatu egiten da.



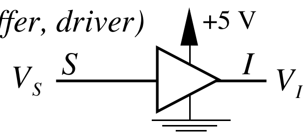
Ate logikoek sarrera bat edo gehiago eduki dezakete eta burutzen duten funtzioa adierazteko egia-taulak erabiltzen dira. Egia-tauletan, sarrerako balio posible guztietarako irteerako tentsioaren balioa ematen da.

Horietako funtzio logiko batzuk maiz erabiltzen dira, eta izen propioa eta ikur bana ematen zaie; hona hemen adibide batzuk:

Identitatea

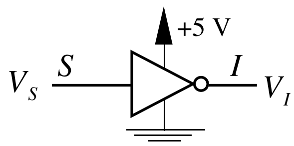
V_S	V_I
L	L
H	H

(Buffer, driver)



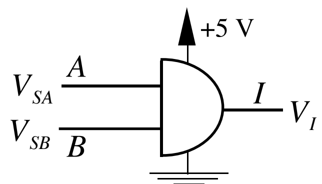
Alderanzkailua
NOT

V_S	V_I
L	H
H	L



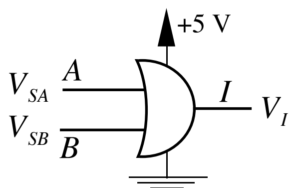
AND

V_{SA}	V_{SB}	V_I
L	L	L
L	H	L
H	L	L
H	H	H



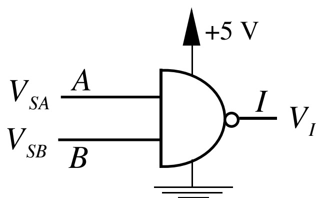
OR

V_{SA}	V_{SB}	V_I
L	L	L
L	H	H
H	L	H
H	H	H



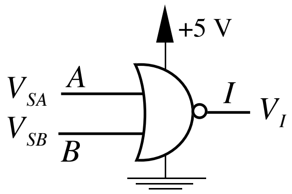
NAND

V_{SA}	V_{SB}	V_I
L	L	H
L	H	H
H	L	H
H	H	L



NOR

V_{SA}	V_{SB}	V_I
L	L	H
L	H	L
H	L	L
H	H	L



Balio-tarteak

Aurreko egia-tauletan ageri diren balioak idealak dira. Errealitatean ate logiko baten irteera-tentsioa neurtuko bagenu, lortuko genukeena ez litzateke zehazki ez V_L (L) eta ez V_H (H) izango. Zirkuitu digital baten sarrerak beste baten irteerak izan ohi direnez, sarrerekin ere gauza bera gertatzen da. Hau dela eta, neurketa batean lortutako balioak gertutasunaren arabera interpretatu beharko ditugu, eta helburu honekin bat eta zero logikoentzat tarte batzuk definitzen dira.

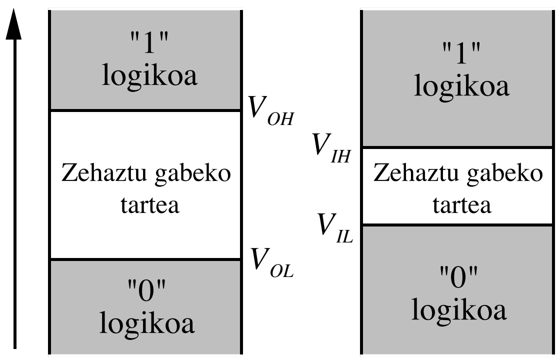
V_{IL}: Sarreran izan daitekeen tentsio baxuaren (L) balio maximoa, ateak 0 logikotzat har dezan.

V_{IH}: Sarreran izan daitekeen tentsio altuaren (H) balio minimoa, ateak 1 logikotzat har dezan.

V_{OL}: Ate baten irteeran ager daitekeen tentsio baxuaren (L) balio maximoa.

V_{OH}: Ate baten irteeran ager daitekeen tentsio altuaren (H) balio minimoa.

Horren arabera, ondokoak dira "1" logikoa eta "0" logikoarentzat definitzen diren tentsio-tarteak. "1" logikoari eta "0" logikoari dagozkien tarteetatik at dauden balioek aurresan ezin daitekeen erantzuna sortuko dute; ondorioz, ez dira erabili behar.



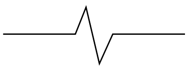
Irteerako tarteak   Sarrerako tarteak

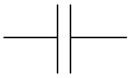
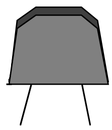
• Integrazio-mailak

Ate logikoak osagai diskretuak erabiliz eraiki daitezke, baina horrek esan nahi luke, ate bat erabili nahi den bakoitzean muntaketa-txartel baten gainean oso osorik eraiki beharko litzatekeela, edozein ate eraikitzeko beharrezkoa den espazioa handia izanik.

Bai ate logikoen kasuan eta baita zirkuitu digital konplexuagoenean ere, maiz erabiltzen dira funtzionaltasun bera dutenak, eta espazioa geroz eta garrantzitsuagoa bihurtzen ari da. Ondorioz, osagai diskretuak alde batera utzi eta zirkuitu integratuak dira erabilienak.

Osagai diskretuak: banaka agertzen diren elementu sinpleak dira. Elementu bakoitzari bere forma eta ezaugarri bereziak dagozkio. Adibidez:

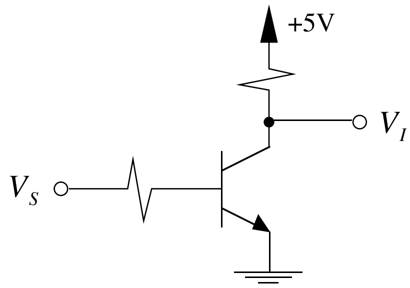
Erresistentzia: Ikurra:  laborategian: 

Kondentsadorea: Ikurra:  laborategian: 

Oinarrizko zirkuituak behin eta berriro ez eraikitzearren, eta espazio-murrizketak direla eta, zirkuitu integratuak edo txipak agertzen dira.

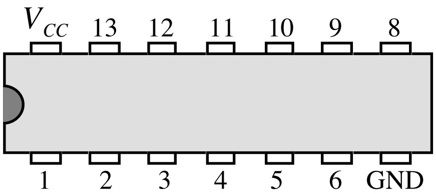
Zirkuitu integratuak (Z.I.): zirkuitu bat osatzeko elkarrekin konektatutako elementu desberdinen multzoa beharrezkoa izango da beti; baina horiek guztiak siliziozko puskatxo batean integratuta agertuko dira, eta elementuak ez dira erabiltzailearentzat ikusgarri izango.

Edozein ate logiko har genezake adibide gisa. Esate baterako, ondoko irudiko alderanzkailua:



Alderanzkailu hau laborategian muntatu ahal izateko, elementu diskretuak erabiliz bi erresistentzia eta transistore bat elkarrekin konektatu beharko lirateke muntaketa-txartel batean. Zirkuitu integratuetara jotzen badugu, berriz, horrelako alderanzkailu multzo bat duen Z.I.a topa dezakegu. Adibidez, sei alderanzkailu dituena. Honek bere barnean hamabi erresistentzia eta sei transistore edukiko ditu guk ikusiko ez ditugun arren.

Itxurari dagokionean, Z.I. bat edo **txip** bat bi alde luzeetan metalezko hankatxoak dituen paralelepipedo bat da, kanpotik ikusiko ez diren arren barnean zirkuituak eratuz elkarrekin konektaturik dauden elementuak dituena.



Txip batean sar daitezkeen osagaien kopurua zenbatekoa den integrazio-eskalak ematen digu:

SSI (integrazio-eskala txikia) (*Small Scale of Integration*): 10 transistore inguru sar daitezke mota honetako Z.I.etan. Hauek dira sinpleenak, eta ate logikoak izan ohi dira.

MSI (integrazio-eskala ertaina) (*Medium Scale of Integration*): 100 transistore inguru sartzen dira hauetan. Transistoreak SSI mailakoak baino txikiagoak izango dira noski, kanpoko itxurari dagokionez txipak berdinak baitira. Mota honetakoak dira ate logikoak baino zertxobaik konplexuagoak diren bloke konbinazionalak.

LSI (integrazio-eskala handia) (*Large Scale of Integration*): Milaka transistore sartzen dira hauetan eta osatzen dituzten zirkuituak konplexuagoak dira. Adibidez, mikroprozesadoreak eta memoriak multzo honetan sartzen dira.

VLSI (integrazio-eskala oso handia) (*Very Large Scale of Integration*): Milioika transistore sartzen dira mota honetako Z.I.etan, eta helburu bereziko zirkuituak eraikitzeko erabiltzen dira. Integrazio-eskala honetan lan egiten da batez ere gaur egun.

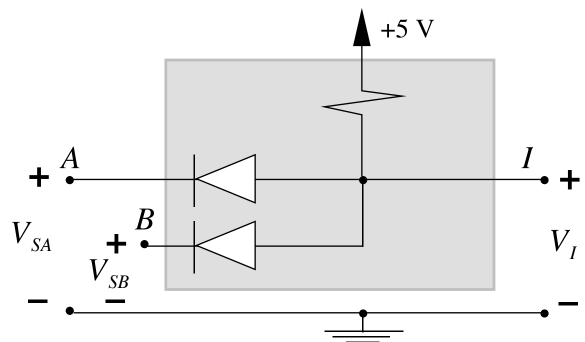
Azken urteotako garapena nolakoa izan den ikusirik, esan daiteke laster ULSI (*Ultra Large Scale of Integration*) integrazio-mailan arituko garela, eta auskalo garapena noraino iritsiko den!

Edozein zirkuitu integratu eraikitzean, mota desberdinetako osagaiak erabil daitezke. Erabilitako osagaien arabera, **familia logiko** desberdinak bereizten dira. Hona hemen ate logikoak eraikitzeko zenbait modu desberdin:

• Familia logikoak

Diodoz osatutako ate logikoak (*Diode Logic*, DL)

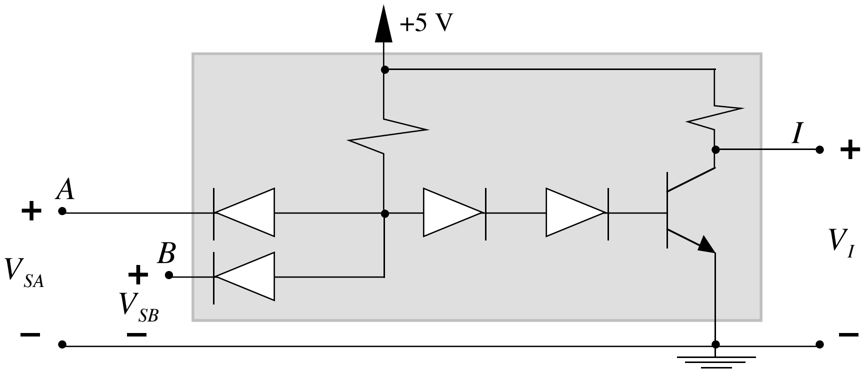
Integrazio-mailak aipatzean, Z.I. batean sartzen den transistore-kopuruaz hitzegin dugun arren, transistorerik erabili gabe ere badago ate logikoak eraikitzea; diodoak soilik erabiliz, hain zuzen ere. Eraiki nahi den ate logikoak duen sarrera-aldagai bakoitzeko diodo bat beharko du zirkuituak. Adibidez, ondoko irudiko zirkuitua AND ate logikoa eraikitzeko modu bat izango litzateke:



Dena den, ate logiko hauek ez dira apenas erabiltzen, ezin baitira ate desberdinak elkarren artean konektatu.

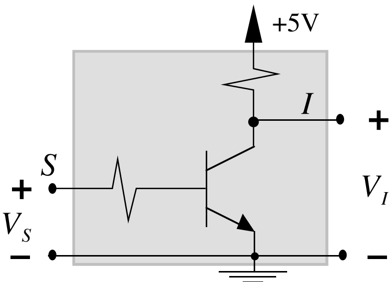
Diodo/transistore logika (DTL)

Ate logikoak diodo eta erresistentzia hutsez eraiki ordez, badago diodo eta transistoreen konbinaketaz eraikitzeko aukera ere, DTL (*Diode Transistor Logic*) familia logikoan egiten den moduan. Familia logiko hau bereziki interesgarria da, aurrerago ikusiko dugun TTL (*Transistor Transistor Logic*) familia logikoaren oinarria baita. Adibide gisa, ondoko irudiko NAND atea ikus dezakegu. Azken batean, aurreko ataleko AND ate logikoari alderanzkailu gisa lan egiten duen transistore bipolarra gehituz lortu da.



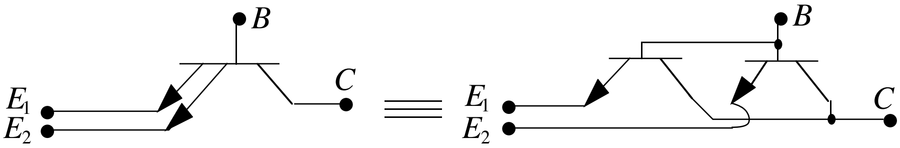
Erresistentzia/transistore logika (*Resistor Transistor Logic*, RTL)

Izenetik ondoriozta daitekeen moduan, erresistentzia eta transistore bipolarrez osatutako Z.I.ak dira hauek. Adibiderik sinpleena alderanzkailuarena da. NOT ateak sarrera bakarra duenez, transistore bakarra nahikoa da zirkuituaren eraikuntzarako. Sarrera gehiago edukiko balitu, berriz, sarrera adina transistore beharko lirateke, lortu nahi den funtzionaltasunaren arabera seriean edo paraleloan kontektatuak.

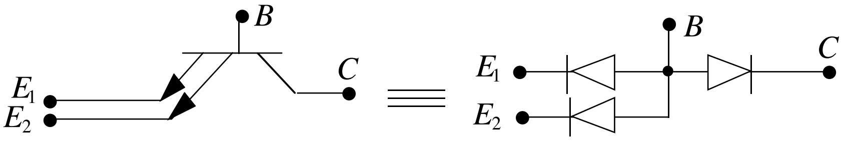


Transistore/transistore logika (TTL)

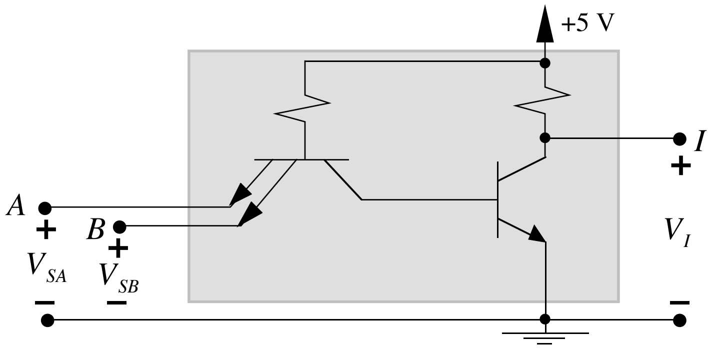
TTL familia logikoan oinarrizko osagaia igorle anitzeko transistorea da; transistore honek bi eta zortzi igorle artean eduki ditzake eta ondoko irudiko itxura du. Errealitatean, mota honetako transistore baten portaera, irudiaren eskuinaldean ageri den moduan, oinarriak eta kolektoreak elkarrekin konektatuta dituzten bi transistoreren portaeraren parekoa da; baina, zirkuitu integratuak eraikitzean, igorle anitzeko transistoreak txipean behar duen lekua paraleloan konektatutako bi transistore bipolar arruntek behar dutena baino txikiagoa da.



Igorle anitzeko transistorearen funtzionamendua errazago ulertu ahal izateko, eta mota honetako elementuak dituzten zirkuituen azterketa sinpleagotzeko, ondoko irudian agertzen den moduan konektatutako hiru diodorekin pareka dezakegu.



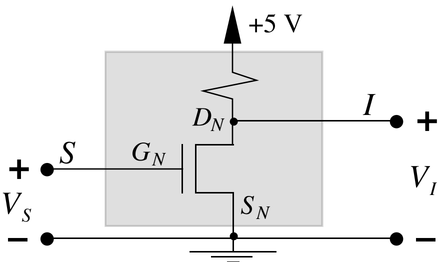
Familia logiko honetako ate logikoen adibide gisa, irudiko NAND atea har dezakegu:



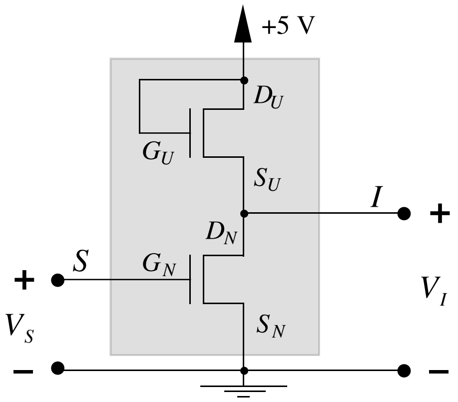
Familia logiko hau asko erabiltzen da, modu honetan eraikitako zirkuituak azkarrak baitira; baina potentzia handia kontsumitzen dute.

NMOS logika:

Familia logiko honetan, ate logikoak eraikitzeko NMOS (N kanaleko MOS transistoreak) erabiltzen dira. Mota honetako transistoreak egoera egonkorrean daudenean, atetik (G) korronterik igarotzen ez denez, NMOS familian sarrera-zirkuituko potentzia-galera ekiditen da, eta, ondorioz, potentzia-galera osoa TTL zirkuituetan baino txikiagoa da. Ondoko irudian NMOS familia logikoko alderanzkailua ageri da.

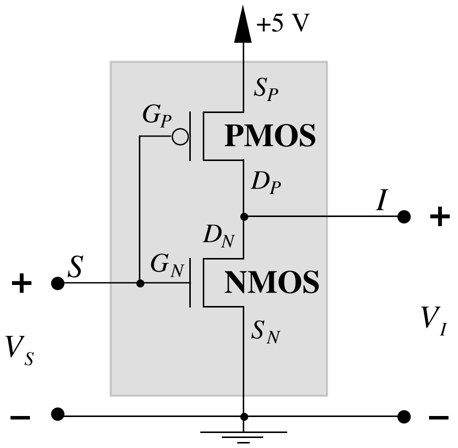


Txipetan MOS familiako transistoreekin batera erresistentziak integratzeak kostu handia du, espazio handia (azalera handia, bereziki) behar baita erresistentziak integratzeko; ondorioz, hobe izaten da, erresistentzia arruntak integratu ordez, MOS transistoreak integratzea eta zona ohmikoan funtzionaraztea, modu horretan transistorearen kanalari dagokion erresistentzia erabiltzen baita. Horrela eraikiz gero, ondoko itxura izango luke NMOS alderanzkailuak:



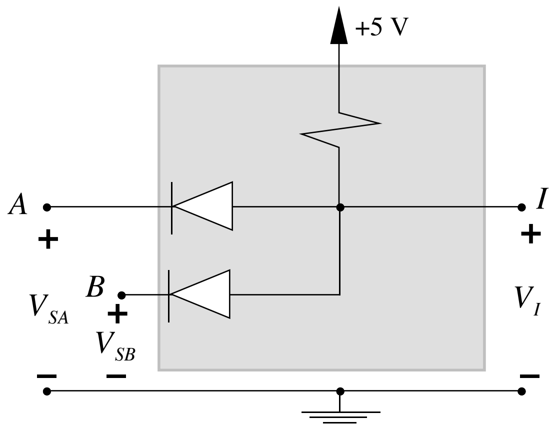
CMOS logika:

CMOS familia logikoan, MOS transistoreak soilik erabiltzen diren arren, aurreko familiarekin alderatuta oso desberdina da, CMOS familian N kanalekoak eta P kanalekoak erabiltzen baitira, bata bestearen osagarri (hortik ingelesezko izena: *Complementary MOS*). CMOS ate logikoak asko erabiltzen dira zirkuitu logikoetan, TTL ateak baino motelagoak izan arren, zeren, daukaten tamaina txikia dela eta, integrazio-maila handiak lor baitaitezke siliziozko txip batean. Zirkuitu hauek, abiadura oso garrantzitsua ez deneko aplikazioetan erabiltzen dira, beraz. Bestalde, CMOS familia logikoan, N eta P kanaleko MOS transistoreen ezaugarriak osagarriak izateari esker, beste familia logikoetan gertatzen diren potentzia-kontsumoak txikiagotu egiten dira. Adibide gisa, aurreko kasuetan bezala NOT atea edo alderanzkailua ageri da hurrengo irudian.



B) Ariketa ebatziak

1. Ondoko zirkuitua DL familia logikoko ate bat da. Analiza ezazu zirkuituaren funtzionamendua sarreren balio posible guztietarako, bete egia-taula eta esan zein ate logikori dagokion.



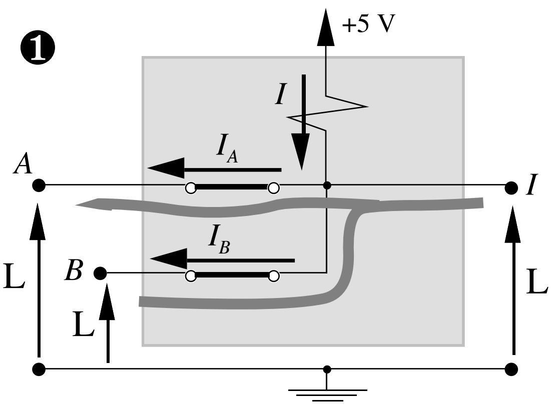
Ebazpena

Irudiko zirkuitua analizatu behar dugu sarreren balio posible guztietarako. Ate logikoekin ari garenez eta sarrerak seinale digitalak izango direnez, sarrera bakoitzak bi balio har ditzake: H (gutxi gorabehera 5 V) eta L (gutxi gorabehera 0 V). Zirkuituak bi sarrera dituenez, lau konbinazio posibleak aztertu beharko ditugu, eta bakoitzean diodoak nola dauden polarizatuta aztertu, dagokien elementuaz ordezkatu, eta horren arabera irteeraren balioa zein den ondorioztatu beharko dugu. Kasu honetan ez ditugu zirkuituko elementu guztien tentsio eta korronteen balio zehatzak lortu nahi; funtzionamendu orokorra aztertu nahi dugu soilik, eta horregatik diodo idealaren hurbilketa erabiliko dugu.

Hona hemen aztertu beharreko lau kasuak:

	V_{SA}	V_{SB}	V_I
❶	L	L	
❷	L	H	
❸	H	L	
❹	H	H	

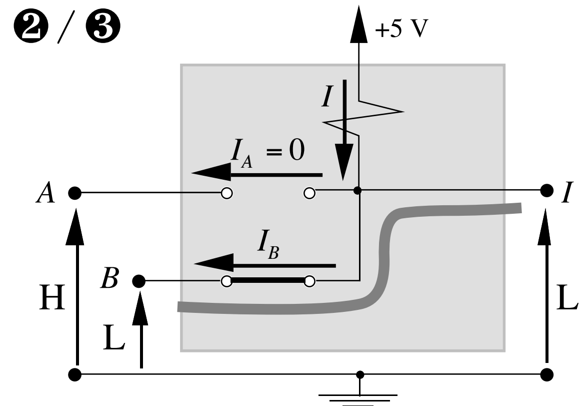
❶ Bai *A* sarreran eta bai *B* sarreran tentsio baxua dago, eta, ondorioz, bi diodoen alde negatibo edo katodoak tentsio baxueneko puntuarekin konektatuta geratzen dira; bi diodoen alde positibo edo anodoak, goiko erresistentzia dela medio, tentsio altueneko puntuari lotuta daudenez gero, bi diodoak zuzenki polarizatuta (Z.P.) daude. Hurbilketa ideala erabiliz, bi diodoak zirkuitulaburraz ordezka ditzakegu.



Irudian ikus daitekeen moduan, irteera-puntuaren eta *A* puntuaren artean —eta baita irteera-puntuaren eta *B* puntuaren artean ere— zirkuitulaburra dago. *A* zein *B* puntuetan L tentsioa (sarreraren balioa) dagoenez, irteerako tentsioa ere L izango da, eta egia-taulako lehenengo lerroa, ondorioz, honako hau izango da:

❶	L	L	L

❷ ❸ Bi kasu hauek aldi berean aztertuko ditugu, zeren, azken batean, irteerako tentsioa bera izango baita *A* sarreran tentsio baxua eta *B* sarreran tentsio altua, edo *A* sarreran H eta *B* sarreran L dagoenean. Demagun azken kasu hau gertatzen dela —hots, V_{SA} = H eta V_{SB} = L direla—; hortaz, *A* sarrerari konektatuta dagoen diodoa A.P. dago eta *B* sarrerari konektatuta dagoena, Z.P.. Hurbilketa idealaren arabera, *A* sarreran dagoen diodoa zirkuitu irekiaz eta *B* sarreran dagoena, berriz, zirkuitulaburraz ordezkatu behar dira.

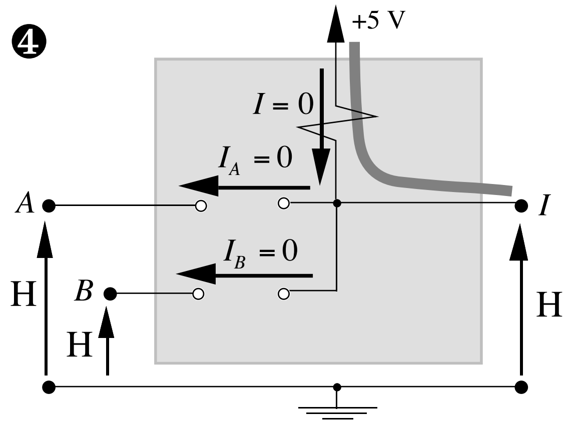


Zirkuitu irekia dela eta, *A* sarrerara ez da korronterik iritsiko, baina aurreko kasuan gertatzen zen moduan, *B* sarreraren eta irteeraren artean zirkuitulaburra dago, eta, ondorioz, bi puntuek tentsio bera edukiko dute; hau da, bi kasu hauetan ere, irteeran tentsio baxua edo L edukiko dugu.

Beraz, egia-taulako bigarren eta hirugarren lerroak honelaxe geratuko dira:

❷	L	H	L
❸	H	L	L

❹ Azken kasu honetan, bai *A* sarreran eta baita *B* sarreran ere, tentsio altua edo H dago, eta, ondorioz, bi diodoak alderantzizko polarizazioan daude. Aurreko azpiataletan egin dugun moduan, diodo idealaren hurbilketa kontuan izanik, bi diodoak zirkuitu irekiaz ordezkatu behar dira.



Bi sarreretan zirkuitu irekia dagoenez, ez da korronterik egongo ez batean eta ez bestean, eta, ondorioz, ezta erresistentzian zehar ere. Hori dela eta, erresistentziaren tentsioa nulua izango da; eta zirkuituan 5 V = $V_R + V_I$ ekuazioa betetzen denez, irteerako tentsioa 5 V edo, gauza bera dena, H izango da. Beraz, taulako azken lerroa honelaxe geratuko da.

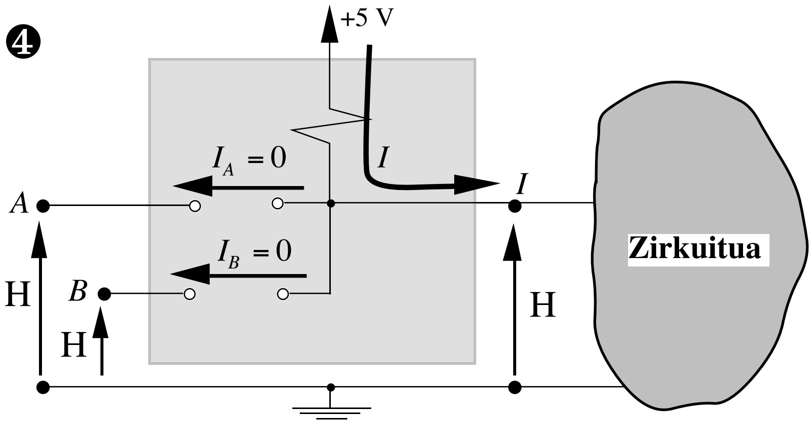
❹	H	H	H

Aurreko hiru azpiataletan lortutako emaitzak elkartuz, egia-taula osoa betea dugu. Egia--taulari erreparatuz, teorian deskribatutako ate logikoetako bat dugula konturatuko gara, **AND** ate logikoa hain zuzen ere.

	V_{SA}	V_{SB}	V_I
❶	L	L	L
❷	L	H	L
❸	H	L	L
❹	H	H	H

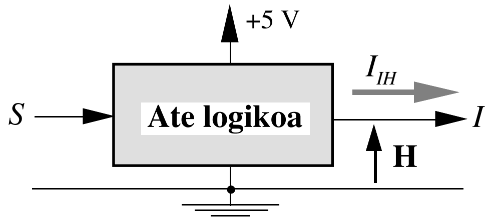
AND ate logikoa

Ariketaren ebazpenean zehar lortutako ondorietara iristeko, proposatutako zirkuitua isolatuta zegoela suposatu dugu. Hori dela eta, irteerarako lortu ditugun balioak beti zehatzak izan dira; L edo H. Azter dezagun orain, ❹ kasuan adibidez, irteera beste zirkuituren batekin konektatuta egongo balitz zer gertatuko litzatekeen.

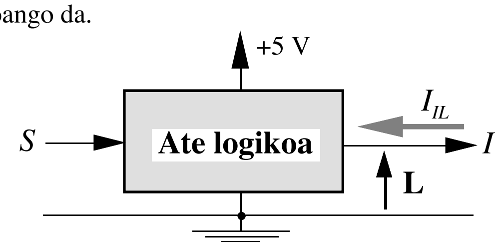


Kasu honetan, nahiz eta *A* eta *B* puntuetan zehar korronterik ez egon, ate logikoaren irteera beste zirkuitu batekin konektatuta dagoenez, goiko erresistentzian zehar korronte txiki bat pasatuko da. Ondorio gisa, 5 V = $V_R + V_I$ ekuazioa betetzen denez eta $V_R \neq 0$ denez, V_I ez da zehatz-mehatz 5 V izango, pixka bat txikiagoa baizik. Dena den, H edo "1" logiko gisa interpretatuko dugu. Gogoratu, gaiaren hasieran sarrerako eta irteerako balio-tarteak definitu ditugula: H (5 V) tentsio maximoa izango da bai sarreran eta bai irteeran "1" logikoarentzat; eta L (0 V) balio minimoa, sarreran zein irteeran "0" logikoa dagoenerako. Hori jakinik, ate logikoen irteeretan korrontearen noranzkoa nolakoa izango den suma daiteke.

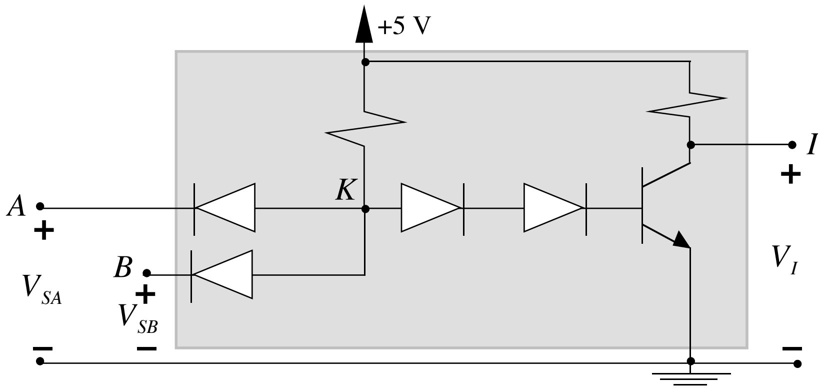
Irteerako tentsio-maila altua denean, atearekin konektatutako beste edozein punturen tentsioa gehienez ere H izango denez, korrontea pasatzekotan, irten egingo da ate logikotik. Gogoratu, korrontea potentzial altueneko puntutik potentzial txikienekora higitzen dela.



Irteera-tentsioa L denean, ate logikoaren irteerarekin konektatuta egon daitekeen beste edozein punturen tentsioa horren parekoa edo hori baino handiagoa izango da. Korrontea beti potentzial altueneko puntutik potentzial txikienekora doanez, korrontea egotekotan, zirkuiturantz joango da.



2. Ondoko zirkuitua DTL familia logikoko ate bat da. Azter ezazu zein izango den irteerako tentsioaren balioa sarrerako tentsioen balio posible guztietarako, bete egia-taula eta esan zein ate logikori dagokion.



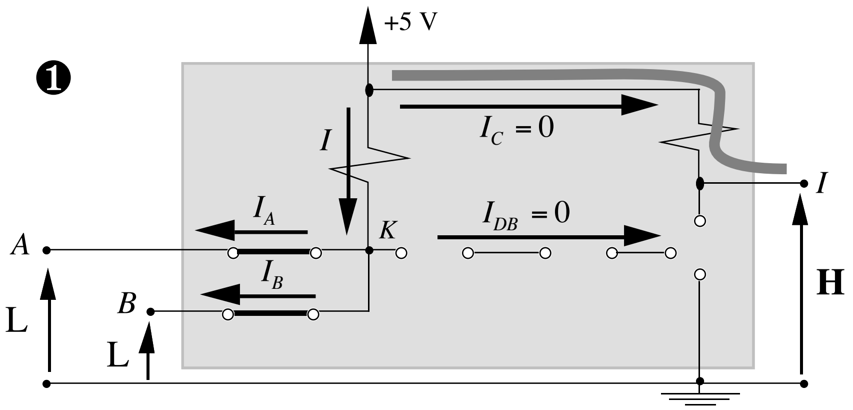
Ebazpena

Irudiko zirkuitua aztertu behar dugu sarreren balio posible guztietarako. Bi sarrerako zirkuitua da eta sarrera bakoitzak bi balio har ditzake, H eta L; beraz, lau konbinazio posible aztertu beharko ditugu, eta bakoitzean diodoak nola dauden polarizatuta eta transistorea zein funtzionamendu-zonatan dagoen aztertu, dagokien elementuaz ordezkatu, eta horren arabera irteeraren balioa zein den ondorioztatu beharko dugu. Funtzionamendu orokorra aztertzeko nahikoa izanik, lana erraztearren, diodoen eta transistorearen hurbilketa idealak erabiliko ditugu.

Hona hemen aztertu beharreko lau kasuak:

	V_{SA}	V_{SB}	V_I
❶	L	L	
❷	L	H	
❸	H	L	
❹	H	H	

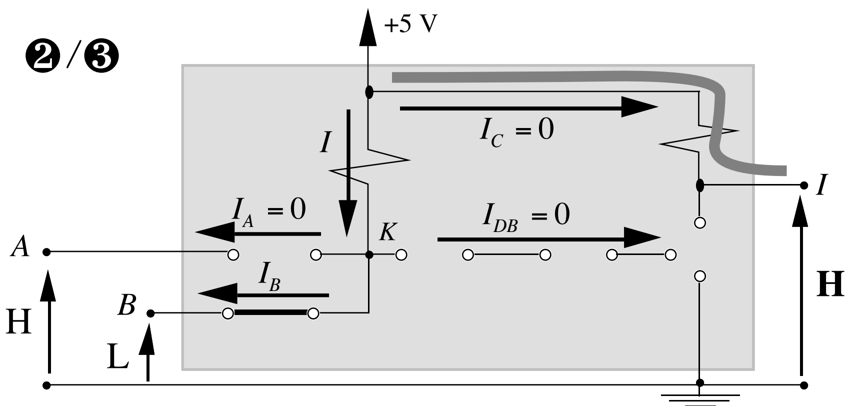
❶ Bai *A* sarreran eta bai *B* sarreran tentsio baxua dagoenez gero, ezker aldeko bi diodoak zuzenki polarizatuta daude. Hurbilketa ideala erabiliz, bi diodoak zirkuitulaburraz ordezka ditzakegu. Horrela, *K* korapiloaren eta *A* eta *B* puntuen artean zirkuitulaburra egongo da, hau da, *K* korapiloaren tentsioa ere L izango da; ondorioz, korapilo honetara eskuinetik konektatutako bi diodoak A.P. egongo dira (ikus anodoa daukatela *K* korapilora konektatuta eta zirkuituan L baino tentsio baxuagorik ez dela agertuko). Beraz, adar horretatik ez da korronterik igaroko, eta bi diodoak zirkuitu irekiaz ordezka daitezke. Eskuineko bi diodoek eta transistorearen oinarriak osatutako adarrean zehar korronterik ez dagoenez, transistorearen oinarriko korrontea nulua da (I_B = 0); beraz, transistorearen funtzionamendu-zonarako aukera bakarra kortea da. Hortaz, transistorea hiru terminalen arteko zirkuitu irekiaz ordezkatuko dugu.



Irudian ikus daitekeen moduan, transistorearen kolektoreko erresistentzian zehar ez da korronterik pasatzen, eta erresistentziaren tentsioa nulua da. Irteerako ekuazioari erreparatuz, 5 V = $V_{RC} + V_I$ denez, irteerako tentsioa 5 V edo, gauza bera dena, H izango da, eta, ondorioz, egia-taulako lehenengo lerroa honako hau izango da:

❶	L	L	H

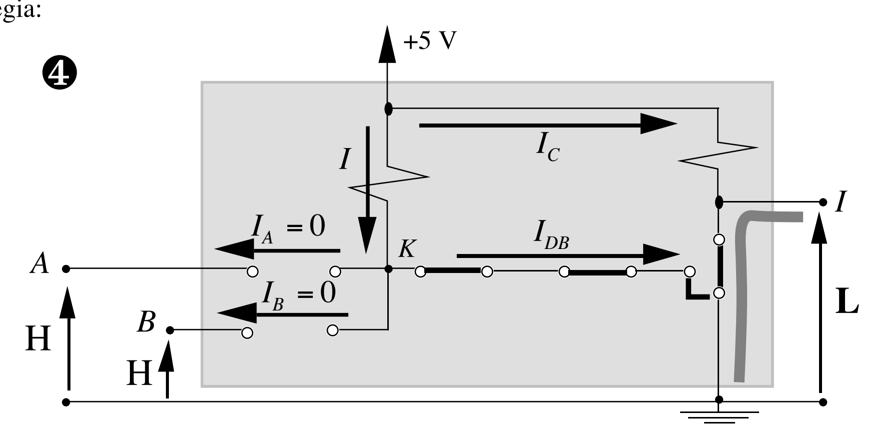
❷ ❸ Bi kasu hauek aldi berean aztertuko ditugu, zeren, azken batean, irteerako tentsioa bera izango baita *A* sarreran tentsio baxua eta *B* sarreran tentsio altua dagoenean, edo *A* sarreran H eta *B* sarreran L dagoenean. Demagun azken kasu hau gertatzen dela; hortaz, *A* sarrerari konektatuta dagoen diodoa A.P. dago eta *B* sarrerari konektatuta dagoena Z.P.. Hurbilketa idealaren arabera, *A* sarreran dagoen diodoa zirkuitu irekiaz eta *B* sarreran dagoena, berriz, zirkuitulaburraz ordezkatu behar dira. Kasu honetan ere, aurrekoan gertatzen zen modu berean, *K* korapiloaren eta *B* puntuaren arteko zirkuitulaburra dela eta, *K* korapiloaren tentsioa 0 V ingurukoa da; horrela, korapilo honetara eskuin aldean konektatuta dauden diodoak A.P. geratzen dira, eta, ondorioz, transistorea kortean egongo da. Beraz, bai *K* korapilora eskuin aldetik konektatutako bi diodoak eta baita transistorea ere zirkuitu irekiaz ordezkatu beharko ditugu.



Irudian ikus daitekeen moduan, sarreren balioak aldatu arren, aurreko kasuan bezala mantentzen da irteera, zeren transistorearen kolektoreko erresistentzian zehar ez baita korronterik pasatzen, eta, ondorioz, erresistentziaren tentsioa nulua delako. Irteerako ekuazioari erreparatuz, 5 V = $V_{RC} + V_I$ denez, irteerako tentsio-maila 5 V edo, gauza bera dena, H izango da, eta egia-taulako bigarren eta hirugarren lerroak honelaxe geratuko dira:

❷	L	H	H
❸	H	L	H

❹ Azken kasu honetan, bai *A* sarreran eta baita *B* sarreran ere, tentsio altua edo H dugu eta, ondorioz, sarreretara konektatutako bi diodoak alderantzizko polarizazioan daude. Aurreko azpiataletan egin dugun moduan, diodo idealaren hurbilketa erabiliz, bi diodoak zirkuitu irekiaz ordezkatu behar dira. Beraz, kasu honetan ez dago zirkuitulaburrik *K* korapiloaren eta *A* edo *B* puntuen artean. Baina *K* korapiloa, goiko erresistentzia dela medio, H tentsioarekin dago lotuta eta honako ekuazio hau betetzen da: 5 V = $V_R + V_K$. Honela, ba, *I* korrontearen balioa mugatuta baldin badago, hots, handiegia ez bada, goiko erresistentziaren muturren arteko tentsioa (V_R) txikia izango da, eta, ondorioz, *K* puntuaren tentsioa, altua (H izan ez arren, diferentzia oso txikia izango da). Hori dela eta, *K* puntuaren eskuinaldean dauden bi diodoak Z.P. egongo dira, eta haietan zehar korrontea pasatuko da, eta transistoreak ere eroan egingo du korrontea. Izan ere, asetasunean egongo da, sarrerako tentsioa nahiko altua izango baita. Beraz, transistorea asetasunari dagokion modelo idealaz ordezkatuko dugu, hiru terminalen arteko zirkuitulaburraz, alegia:



Irudian ikus daitekeen moduan, transistorea asetasunean dagoenez, kolektoreko erresistentziatik korrontea pasatzen da, eta irteera-puntuaren eta erreferentziaren artean zirkuitulaburra ageri da, irteerako tentsioa L eginez. Hortaz, egia-taulako laugarren lerroa honako hau izango da:

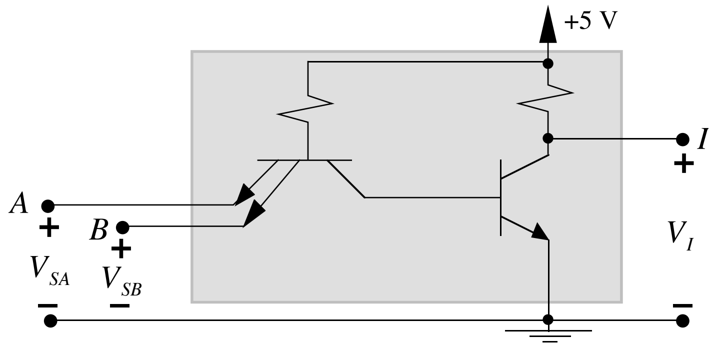
❹	H	H	L

Aurreko hiru azpiataletan lortutako emaitzak elkartuz, egia-taula osoa betea dugu. Egia--taulari erreparatuz, teorian deskribatutako ate logikoetako bat dugula konturatuko gara, **NAND** ate logikoa hain zuzen ere.

	V_{SA}	V_{SB}	V_I
❶	L	L	H
❷	L	H	H
❸	H	L	H
❹	H	H	L

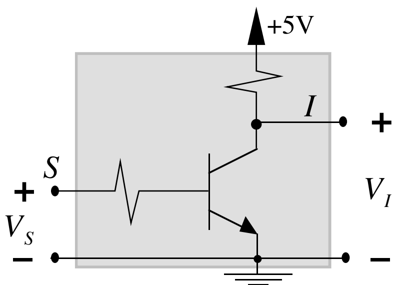
NAND ate logikoa

Oinarrizko kontzeptuetan aipatu dugun legez, igorle anitzeko transistore baten funtzionamendua ulertzeko, era egokian konektatutako diodo-multzo batekin pareka dezakegu. Hori jakinik, egin berri dugun ate logikoaren azterketa eta ondoko irudikoarena berdinak direla ondoriozta dezakegu.



Honelatan, bada, azken irudiko zirkuitua TTL familiako NAND atea dugu.

3. Ondoko zirkuitua RTL familia logikoko ate bat da. Azter ezazu zein izango den irteerako tentsioaren balioa sarrerako tentsioen balio posible guztietarako, bete egia-taula eta esan zein ate logikori dagokion.



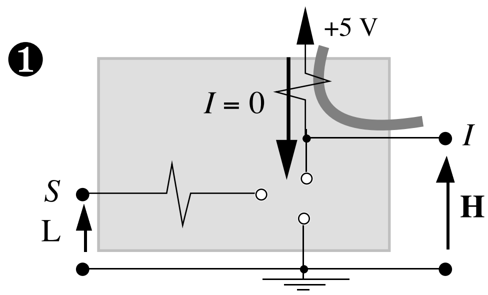
<u>Ebazpena</u>

Irudiko zirkuitua aztertu behar dugu, sarreren balio posible guztietarako. Sarrera bakarreko zirkuitua denez gero, bi aukera baino ez ditugu aztertu behar, V_S = H edo L.

Kasu bakoitzean transistorea zein funtzionamendu-zonatan dagoen aztertu, dagokion elementuaz ordezkatu, eta horren arabera irteeraren balioa zein den ondorioztatu beharko dugu. Bestalde, funtzionamendu orokorra aztertzeko nahikoa izanik, lana errazte-arren, transistore idealaren hurbilketak erabiliko ditugu. Hona hemen aztertu beharreko bi kasuak:

	V_S	V_I
❶	L	
❷	H	

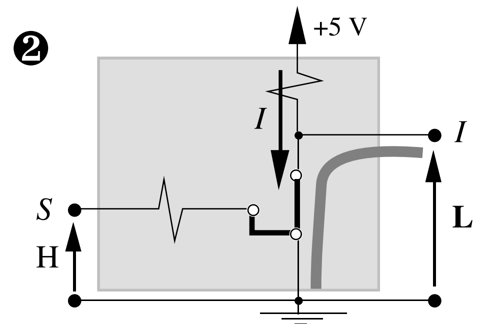
❶ Sarreran tentsio baxua dago, eta, ondorioz, transistorea zein funtzionamendu-zonatan dagoen erabakitzeko, ez da inongo arazorik egongo: transistorea kortean dago eta hiru terminalen arteko zirkuitu irekiaz ordezkatuko dugu.



Irudian ikus daitekeen moduan, ez dago korronterik zirkuituan zehar. Ondorioz, kolektoreko erresistentziaren tentsioa nulua da. Irteerako ekuazioari erreparatuz, 5 V = $V_R + V_I$ denez, irteerako tentsioa 5 V, edo, gauza bera dena, H izango da eta egia-taulako lehenengo lerroa honako hau izango da:

❶	L	H

❷ Kasu honetan sarreran 5 V-eko tentsioa dugu eta transistoreen gaiko ariketetan ikusi genuen moduan, sarrerako tentsio horrekin transistorea asetasunean egongo da. Beraz, hiru terminalen arteko zirkuitulaburraz ordezkatuko dugu.



Irudian ikus daitekeen moduan, sarreraren balioa aldatzean, zirkuituaren portaera ere aldatu da.

Kasu honetan, irteeraren eta erreferentzia-puntuaren arteko zirkuitulaburra sortu da; ondorioz, irteeraren tentsioa L izango da. Horrek taulako bigarren lerroa honela utziko du.

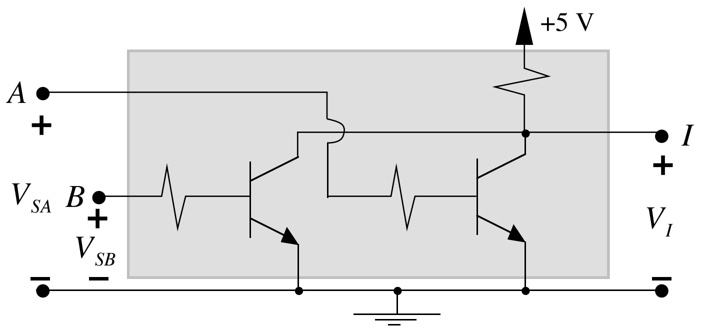
❷ H	L

Aurreko bi azpiataletan lortutako emaitzak elkartuz, egia-taula osoa betea dugu. Egia--taulari erreparatuz, teorian deskribatutako ate logikoetako bat dugula konturatuko gara, **NOT** ate logikoa edo alderanzkailua hain zuzen ere.

	V_S	V_I
❶	L	H
❷	H	L

NOT ate logikoa, alderanzkailua

4. Ondoko zirkuitua RTL familia logikoko ate bat da. Azter ezazu zein izango den irteerako tentsioaren balioa sarrerako tentsioen balio posible guztietarako, bete egia-taula eta esan zein ate logikori dagokion.

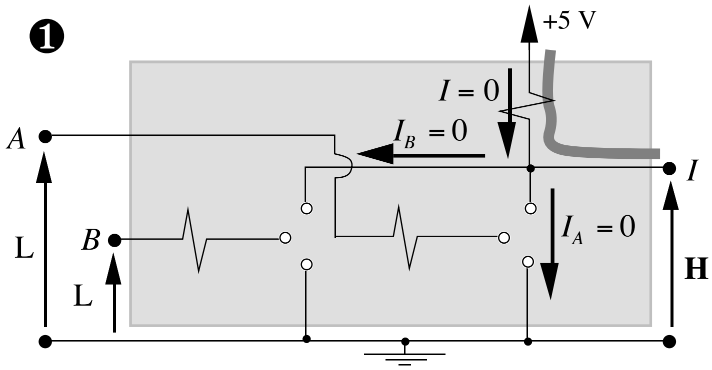


Ebazpena

Irudiko zirkuitua aztertu behar dugu, sarreren balio posible guztietarako. Bi sarrerako zirkuitua da eta sarrera bakoitzak bi balio har ditzake: H eta L. Beraz, lau konbinazio posible aztertu beharko ditugu, bakoitzean transistoreak zein funtzionamendu-zonatan dauden aztertu, dagokien elementuaz ordezkatu, eta horren ondorioak zein diren analizatu beharko dugu. Bestalde, funtzionamendu orokorra aztertzeko nahikoa izanik, lana erraztearren, transistore idealaren hurbilketa erabiliko dugu. Hona hemen aztertu beharreko lau kasuak:

	V_{SA}	V_{SB}	V_I
❶	L	L	
❷	L	H	
❸	H	L	
❹	H	H	

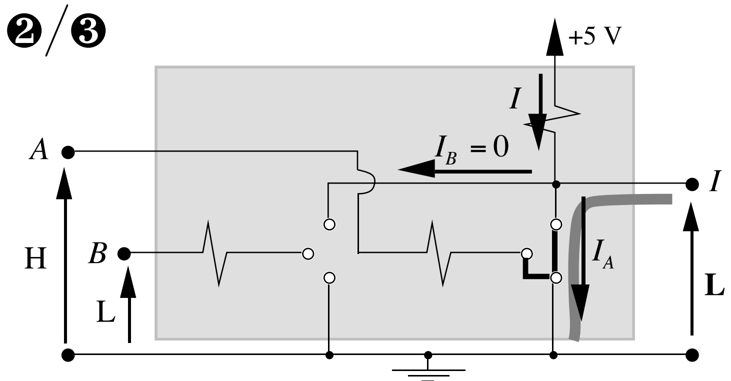
❶ Bai *A* sarrera eta bai *B* sarrera transistore banaren oinarrira konektatuta daude, erresistentzia baten bidez. Bietan tentsio baxua dago; ondorioz, bi transistoreak kortean egongo dira, hau da, ez da ez batetik eta ez bestetik korronterik pasatuko, eta biak zirkuitu irekiaz ordezka daitezke.



Irudian ikus daitekeen moduan, kolektoreetako erresistentzian zehar ez da korronterik igarotzen, eta erresistentziaren tentsioa nulua da. Irteerako ekuazioari erreparatuz, 5 V = $V_{RC} + V_I$ denez, irteerako tentsioa 5 V edo, gauza bera dena, H izango da, eta egia-taulako lehenengo lerroa honako hau izango da:

❶	L	L	H

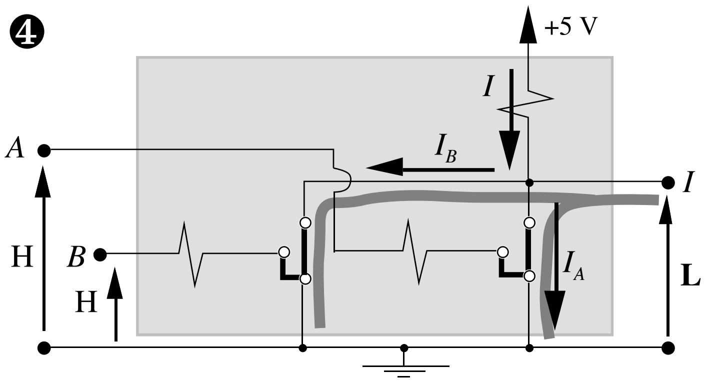
❷ ❸ Bi kasu hauek aldi berean aztertuko ditugu, zeren, azken batean, irteerako tentsioa bera izango baita *A* sarreran tentsio baxua eta *B* sarreran tentsio altua dagoenean, edo *A* sarreran H eta B sarreran *L* dagoenean. Demagun azken kasu hau gertatzen dela, eta, beraz, *A* sarreran 5 V-eko tentsioa dagoela, eta *B* sarreran 0 V. Kasu honetan, *B* sarrerari konektatutako trasistorea kortean egongo da, eta *A* sarrerari konektatutakoa, berriz, asetasunean. Beraz, lehenengo transistorea zirkuitu irekiaz ordezkatu beharko dugu, eta bigarrena, hiru terminalen arteko zirkuitulaburraz.



Irudiak argi aski erakusten du kasu honetan irteeraren balioa zein izango den. *A* sarrerari konektatutako transistorea asetasunean egotean, kolektoreetako erresistentziatik korrontea pasatzen da, eta irteeraren eta erreferentzia-puntuaren artean zirkuitulaburra dago, irteerako tentsioa L izatera behartuz. Beraz, egia-taulako bigarren eta hirugarren lerroak horrela geratuko lirateke:

❷	L	H	L
❸	H	L	L

❹ Azken kasu honetan, bai *A* sarreran eta baita *B* sarreran ere, tentsio altua edo H dugu; ondorioz, bi transistoreak asetasunean daude eta hiru terminalen arteko zirkuitulaburraz ordezkatu beharko ditugu.



Irudian ikus daitekeen moduan, kasu honetan sarreren balioak aldatzeak ez du eraginik irteeraren gainean. Bi transistoreak asetasunean daudenez, bietan zehar korrontea pasatzen da, eta bien bitartez irteera-puntuaren eta erreferentziaren artean zirkuitulaburra dago, irteerako tentsioa L eginez. Ondorioz, egia-taulako laugarren lerroa honako hau izango da:

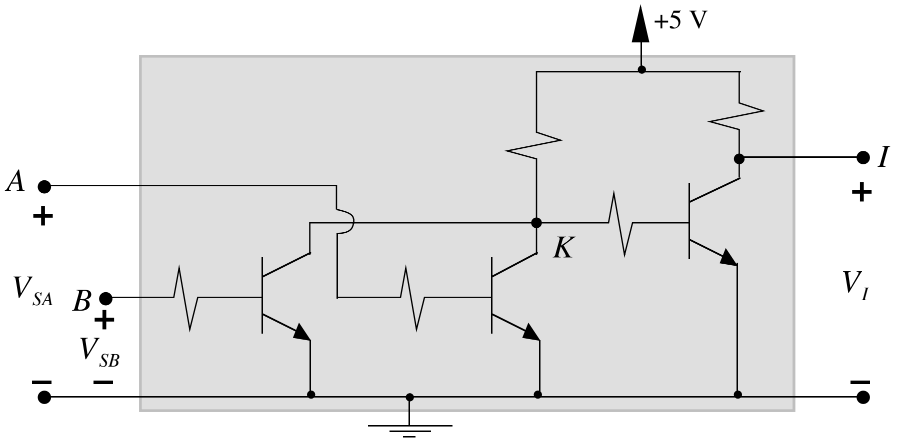
❹	H	H	L

Aurreko hiru azpiataletan lortutako emaitzak elkartuz egia-taula osoa betea dugu. Egia--taulari erreparatuz, teorian deskribatutako ate logikoetako bat dugula konturatuko gara, **NOR** ate logikoa hain zuzen ere.

	V_{SA}	V_{SB}	V_I
❶	L	L	H
❷	L	H	L
❸	H	L	L
❹	H	H	L

NOR ate logikoa

5. Ondoko zirkuitua RTL familia logikoko ate bat da. Azter ezazu zein izango den irteerako tentsioaren balioa sarrerako tentsioen balio posible guztietarako, bete egia-taula eta esan zein ate logikori dagokion.



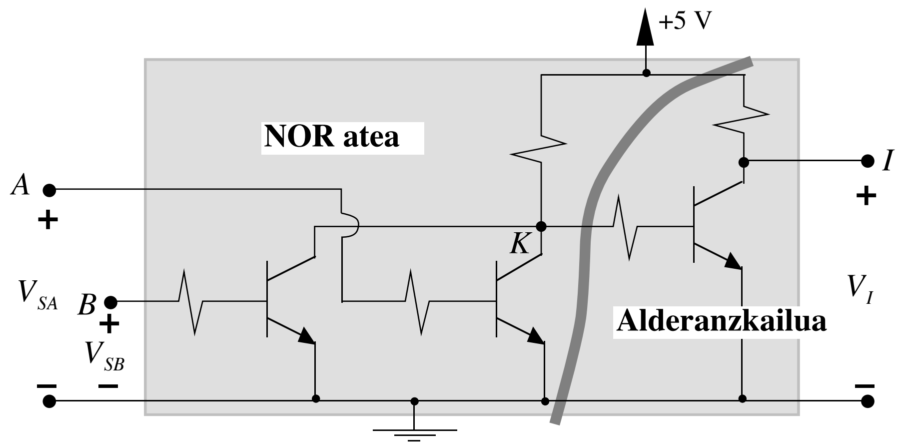
Ebazpena

Irudiko zirkuitua aztertu behar dugu, sarreren balio posible guztietarako. Bi sarrerako zirkuitua da, eta sarrera bakoitzak bi balio har ditzake: H eta L. Beraz, lau konbinazio posible aztertu beharko ditugu, bakoitzean transistoreak zein funtzionamendu-zonatan dauden aztertu, dagokien elementuaz ordezkatu, eta horren ondorioak zein diren analizatu beharko dugu. Bestalde, funtzionamendu orokorra aztertzeko nahikoa izanik, lana erraztearren, transistore idealaren hurbilketa erabiliko ditugu.

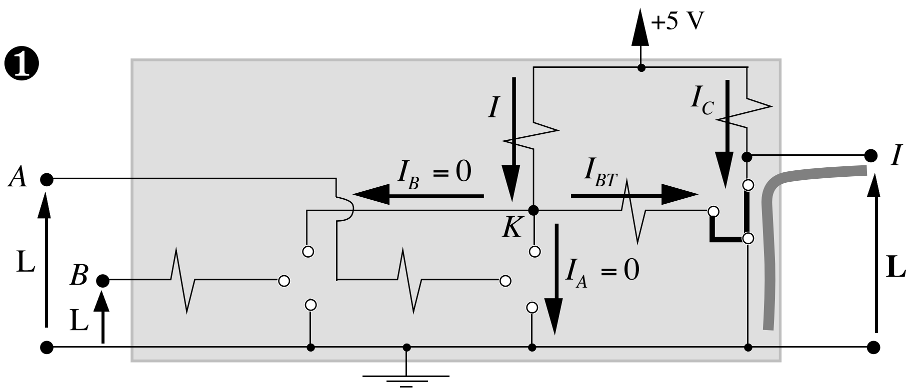
Hona hemen aztertu beharreko lau kasuak:

	V_{SA}	V_{SB}	V_I
❶	L	L	
❷	L	H	
❸	H	L	
❹	H	H	

Kasu bakoitza aztertzen hasi aurretik, aurreko ariketaz oroitu eta zirkuituari begirada bat ematea komenigarria da. Zer da benetan ebazteko eskatzen digutena? Aurreko ariketako zirkuituari beste atal bat gehitu zaio irteeran, hirugarren ariketan aztertu dugunaren antzeko zirkuitu bat hain zuzen ere; hau da, alderanzkailu bat erantsi zaio. Beraz, inongo eragiketarik egin gabe suposa daitekeenez, aurreko zirkuitua NOR ate logikoari dagokiona baldin bazen, eta ariketa honetan zirkuitu horren irteera NOT ate logiko baten sarrera gisa erabiltzen bada, zirkuitu honek betetzen duen funtzioa NOT(NOR) = OR izango da. Beraz, kasu guztien azterketa egin ordez, pare bat adibide aztertu, eta aurreko bi ariketetan oinarrituz, azken emaitza eman dezakegu.



❶ Bai *A* sarrera eta bai *B* sarrera transistore banaren oinarrira konektatuta daude erresistentzia baten bidez. Bietan tentsio baxua dago; ondorioz, bi transistoreak kortean egongo dira, eta ez da ez batetik eta ez bestetik korronterik pasatuko eta biak zirkuitu irekiaz ordezka daitezke. Ondorio gisa, *K* puntuaren tentsioa altua izango denez gero, hirugarren transistorea asetasunean egongo da, eta hiru terminalen arteko zirkuitulaburraz ordezkatu daiteke.

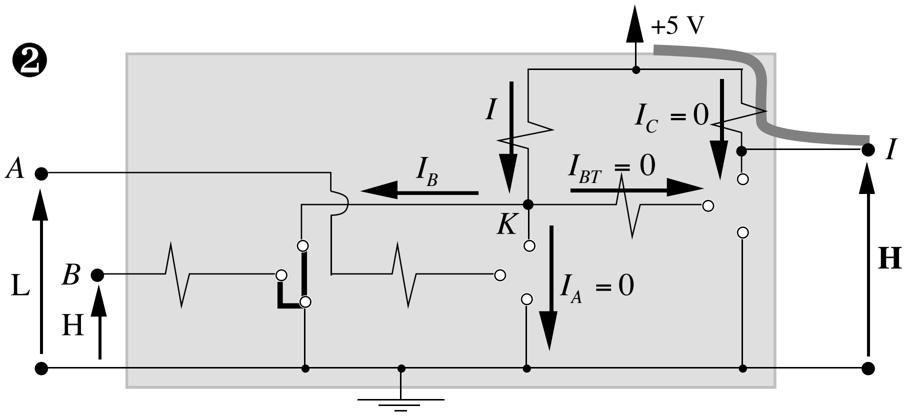


Irudian ikus daitekeen moduan, irteerako transistorea asetasunean dagoenez, irteeraren eta erreferentzia-puntuaren arteko zirkuitulaburra agertzen da. Beraz, irteerako tentsioa 0 V-ekoa izango da eta egia-taulako lehenengo lerroa honako hau izango da.

❶	L	L	L

❷ Bigarren lerroko sarrera-tentsioak ditugunean gertatzen dena aztertuko dugu azkenik. Kasu honetan *A* sarrera berdin mantentzen da (L tentsioarekin), eta baita hari konetatutako transistorea ere; baina *B* sarrerako tentsioa kasu honetan 5 V-ekoa da, eta honek zirkuituaren egoera aldaraziko du. *B* sarrera dela eta, harekin konektatutako transistorea asetasunean egongo da, eta hiru terminalen arteko zirkuitulaburraz ordezkatu ahal izango dugu.

Ondorioz, *K* korapiloaren eta erreferentzia-puntuaren arteko zirkuitulaburra agertzen da, *K* puntu horren tentsioa 0 V-ekoa eginez. Era horretan, irteerako transistorearentzat aukera bakarra geratzen da: kortea.



Irudiak argi aski erakusten du zein izango den kasu honetan irteeraren balioa. *B* sarrerari konektatutako transistorea asetasunean eta irteerako transistorea kortean daudenez, transistore honi konektatutako kolektoreko erresistentziatik ez da korronterik pasatuko, eta tentsioa nulua izango da. Zirkuituan 5 V = $V_{RC} + V_I$ ekuazioa betetzen denez, irteerako tentsioa H (5 V) izango da. Egia-taulako bigarren lerroa honelaxe geratuko da:

❷	L	H	H

❸ eta ❹ kasuetan, bietan gertatuko da sarrerei konektatutako trasistoreetako bat behintzat asetasunean egotea; ondorioz, *K* korapiloaren tentsioa 0 V-ekoa izango da. Beraz, irteerako transistorea bi kasuetan kortean egongo da, eta, ondorioz, irteerako tentsioa 5 V-ekoa izango da.

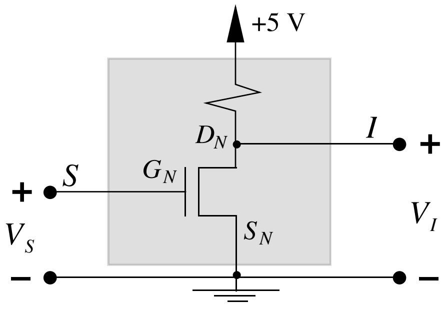
❸	H	L	H
❹	H	H	H

Beraz, aurreko analisian, ariketa ebazten hasi garenean suposatu duguna, egiaztatuta geratu da: NOT(NOR) = **OR**.

	V_{SA}	V_{SB}	V_I
❶	L	L	L
❷	L	H	H
❸	H	L	H
❹	H	H	H

OR ate logikoa

6. Ondoko zirkuitua NMOS familia logikoko ate bat da. Azter ezazu zein izango den irteerako tentsioaren balioa sarrerako tentsioen balio posible guztietarako, bete egia-taula eta esan zein ate logikori dagokion.



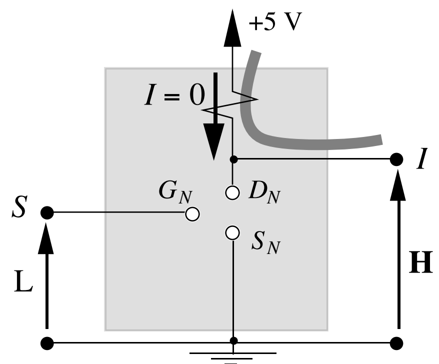
Ebazpena

Irudiko zirkuitua aztertu behar dugu, sarreren balio posible guztietarako. Sarrera bakarreko zirkuitua da, eta sarrerak bi balio har ditzake: H eta L. Beraz, bi aukera baino ez ditugu aztertu behar, bakoitzean transistorearen egoera aztertu, dagokion elementuaz ordezkatu, eta horren arabera irteeraren balioa zein den ondorioztatu beharko dugu. Bestalde, funtzionamendu orokorra aztertzeko nahikoa izanik, lana erraztearren, transistore idealaren hurbilketak erabiliko ditugu.

Hona hemen aztertu beharreko bi kasuak:

	V_S	V_I
❶	L	
❷	H	

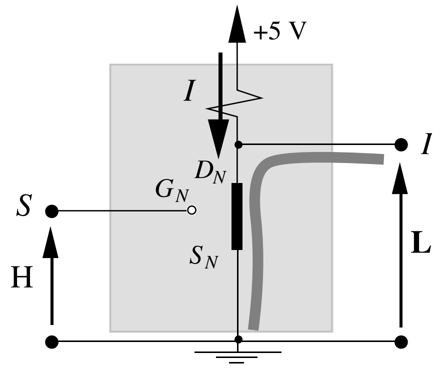
❶ Sarreran tentsio baxua dago eta, ondorioz, atearen eta iturriaren arteko potentzial-diferentzia ere 0 V-ekoa izango da ($V_{GS} = 0$). Hortaz, transistorea kortean egongo da, eta hiru terminalen arteko zirkuitu irekiaz ordezkatuko dugu.



Irudian ikus daitekeen moduan, zirkuituan zehar ez dago korronterik, eta hobiko erresistentziaren tentsioa nulua da. Irteerako ekuazioari erreparatuz, 5 V = $V_R + V_I$ denez, irteerako tentsioa 5 V edo, gauza bera dena, H izango da, eta egia-taulako lehenengo lerroa honako hau izango da:

❶ L | H

❷ Kasu honetan sarrera-tentsioa 5 V-ekoa da eta baita $V_{G_N S_N}$ ere; ondorioz, NMOS transistoreak eroan egingo du korrontea zona ohmikoan, eta hobiaren (D_N) eta iturriaren (S_N) arteko zirkuitulaburraz ordezkatu beharko dugu. (Gogora ezazu atea (G_N) zirkuitu irekia dela beti.)



Irudian ikus daitekeen moduan, sarreraren balioa aldatzean, zirkuituaren portaera ere aldatzen da. Kasu honetan irteeraren eta erreferentzia-puntuaren arteko zirkuitulaburra sortu da; ondorioz, irteeraren tentsioa L izango da. Horrek, taulako bigarren lerroa honelaxe utziko du:

❶ L | H

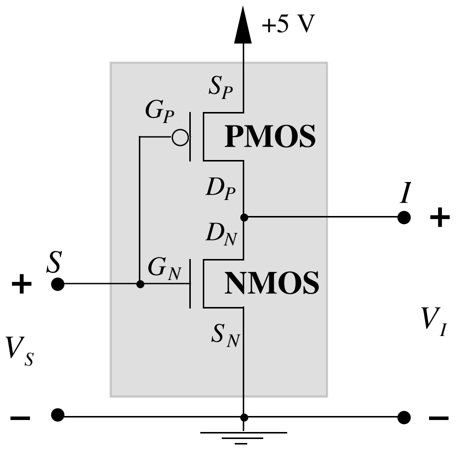
Aurreko bi azpiataletan lortutako emaitzak elkartuz, egia-taula osoa betea dugu. Egia--taulari erreparatuz, teorian deskribatutako ate logikoetako bat dugula konturatuko gara, **NOT** ate logikoa edo alderanzkailua hain zuzen ere.

	V_S	V_I
❶	L	H
❷	H	L

NOT ate logikoa, alderanzkailua

Hirugarren ariketan beste alderanzkailu bat azaldu da, RTL familia logikokoa hain zuzen ere. Bi alderanzkailu hauen funtzionamenduen artean badago diferentzia nabarmena: NMOS familiakoaren kasuan, sarrera-zirkuituan ez dago korronterik, eta hori dela eta, xurgatutako potentzia transistore bipolarrarekin eraikitako inbertsorean xurgatutakoa baino txikiagoa izango da.

7. Ondoko zirkuitua CMOS familia logikoko ate bat da. Azter ezazu zein izango den irteerako tentsioaren balioa sarrerako tentsioen balio posible guztietarako, bete egia-taula eta esan zein ate logikori dagokion.



Ebazpena

Irudiko zirkuitua aztertu behar dugu, sarreren balio posible guztietarako. Sarrera bakarreko zirkuitua da, eta sarrerak bi balio har ditzake: H eta L. Beraz, bi aukera baino ez ditugu aztertu behar, bakoitzean transistorearen egoera aztertu, dagokion elementuaz ordezkatu eta horren arabera irteeraren balioa zein den ondorioztatu beharko dugu. Bestalde, funtzionamendu orokorra aztertzeko nahikoa izanik, lana erraztearren, transistore idealaren hurbilketak erabiliko ditugu.

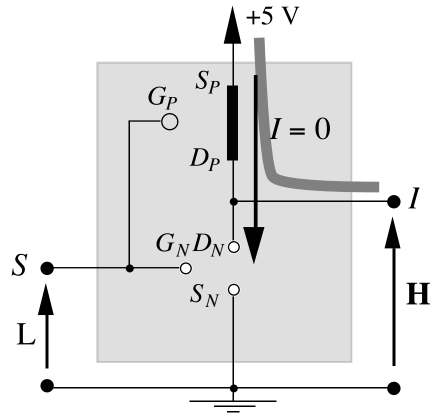
Hona hemen azteru beharreko bi kasuak:

	V_S	V_I
❶	L	
❷	H	

❶ Sarreran tentsio baxua dago; hortaz, azter dezagun nola egongo diren horren ondorioz zirkuituko bi transistoreak.

NMOS transistorean, atearen eta iturriaren arteko potentzial-diferentzia 0 V-ekoa izango da ($V_{G_N S_N} = 0$ V); beraz, transistorea kortean egongo da, eta hiru terminalen arteko zirkuitu irekiaz ordezkatuko dugu.

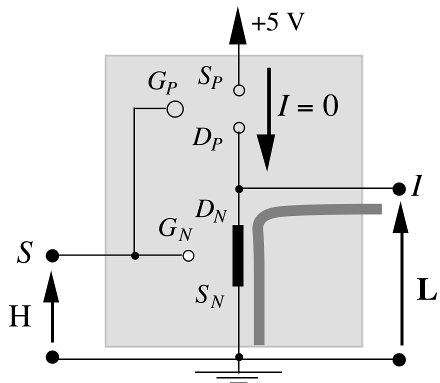
PMOS transistorean, berriz, atearen eta iturriaren arteko potentzial-diferentzia –5 V-ekoa da ($V_{G_P S_P} = -5$ V); tentsio hori nahikoa izango da transistoreak eroan dezan. Beraz, atea zirkuitu irekiaz (I_G beti zero baita) eta hobiaren eta iturriaren arteko zirkuitulaburraz ordezkatu beharko da.



Irudian ikus daitekeen moduan, zirkuituan zehar ez dago korronterik, eta irteeraren eta elikaduraren artean zirkuitulaburra dagoenez, irteeraren tentsioa 5 V-ekoa izango da. Egia-taulako lehenengo lerroa honako hau izango da:

❶	L	H

❷ Kasu honetan sarreran 5 V-eko tentsioa dugu, eta horren eraginez, NMOS transistorean atearen eta iturriaren arteko potentzial-diferentzia 5 V-ekoa izango da; PMOS transistorean, berriz, $V_{G_P S_P}$ sarreraren eta elikadura-puntuaren arteko potentzial-diferentzia denez, 0 V-ekoa izango da. Hau dela eta, NMOS transistoreak eroan egingo du korrontea; ondorioz, atea zirkuitu irekiaz eta hobiaren eta iturriaren arteko zirkuitulaburraz ordezkatu beharko dugu; PMOS transistoreak ez du korronterik eroango, eta terminal guztien arteko zirkuitu irekiaz ordezkatuko dugu.



Irudian ikus daitekeen moduan, sarreraren balioa aldatzean, zirkuituaren portaera ere aldatzen da. Kasu honetan, irteeraren eta erreferentzia-puntuaren arteko zirkuitulaburra sortu da; ondorioz, irteeraren tentsioa L izango da. Horrek, taulako bigarren lerroa honelaxe utziko du:

❷	H	L

Aurreko bi azpiataletan lortutako emaitzak elkartuz, egia-taula osoa bete dezakegu. Egia-taulari begiratuz, teorian deskribatutako ate logikoetako bat dugula konturatuko gara, **NOT** ate logikoa edo alderanzkailua hain zuzen ere.

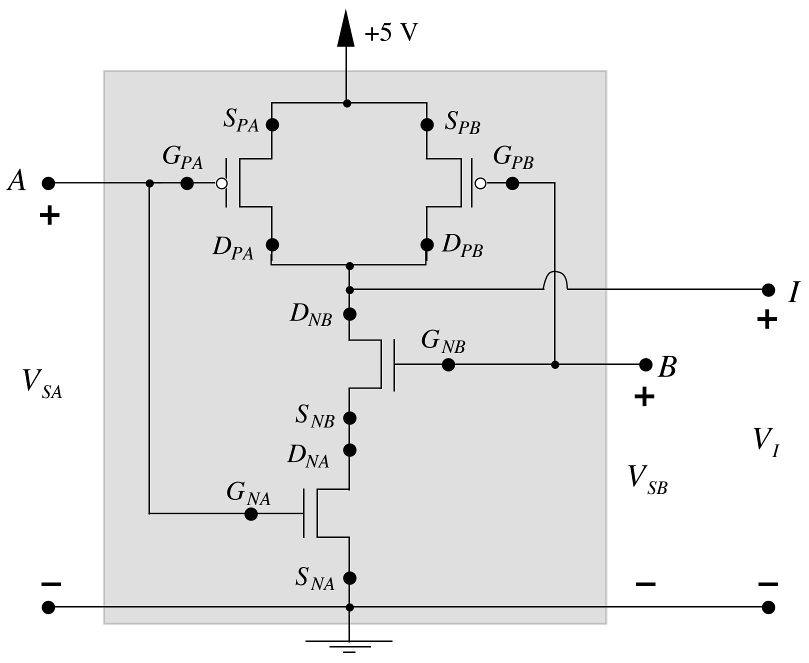
	V_S	V_I
❶	L	H
❷	H	L

NOT ate logikoa, alderanzkailua

Aurreko ariketan NMOS familiako alderanzkailua aztertu dugu, eta ikusi ahal izan dugunez, sarrera-zirkuituan ez dago korronterik; baina bi kasuetatik batean irteera-zirkuituan korrontea zegoen, eta, ondorioz, erresistentzian potentzia-galera.

CMOS alderanzkailuan, berriz, egia-taulako bi kasuetarako ez dago korronterik ez sarrera-zirkuituan eta ez irteera-zirkuituan ere; hori dela eta, ez da potentziarik xahutuko ez sarrera- eta ez irteera-zirkuituan.

8. Ondoko zirkuitua CMOS familia logikoko ate bat da. Azter ezazu zein izango den irteerako tentsioaren balioa sarrerako tentsioen balio posible guztietarako, bete egia-taula eta esan zein ate logikori dagokion.



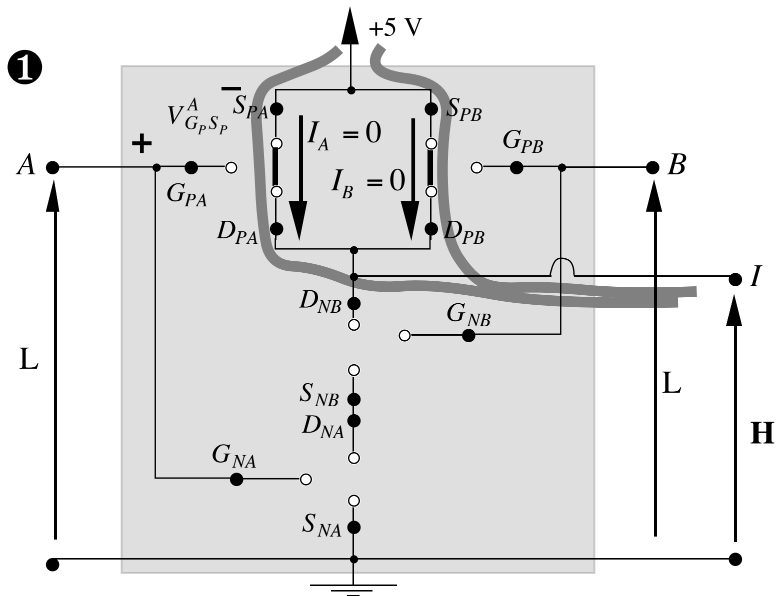
Ebazpena

Irudiko zirkuitua aztertu behar dugu, sarreren balio posible guztietarako. Bi sarrerako zirkuitua da, eta sarrera bakoitzak bi balio har ditzake: H eta L. Beraz, lau konbinazio posible aztertu beharko ditugu, eta bakoitzean bai NMOS eta baita PMOS transistoreak zein funtzionamendu-zonatan dauden aztertu, dagokien elementuaz ordezkatu, eta horren ondorioak zein diren analizatu beharko dugu. Transistore idealaren hurbilketak erabiliko ditugu.

Hona hemen aztertu beharreko lau kasuak:

	V_{SA}	V_{SB}	V_I
❶	L	L	
❷	L	H	
❸	H	L	
❹	H	H	

❶ Bai *A* sarrera eta bai *B* sarrera bi transistoreren atera (*G*-ra) konektatuta daude. Bietan tentsio baxua dago; ondorioz, bi NMOS transistoreen atearen eta iturriaren arteko potentzial-diferentzia 0 V-ekoa da eta ez dute korronterik eroango. Bi PMOS transistoreen atearen eta iturriaren arteko potentzial-diferentzia, berriz, –5 V-ekoa da eta, ondorioz, hauek korrontea eroango dute. Hori dela eta, bi NMOS transistoreak terminal guztien arteko zirkuitu irekiaz eta bi PMOSak atea zirkuitu irekiaz eta hobiaren eta iturriaren arteko zirkuitulaburraz ordezkatuko ditugu.



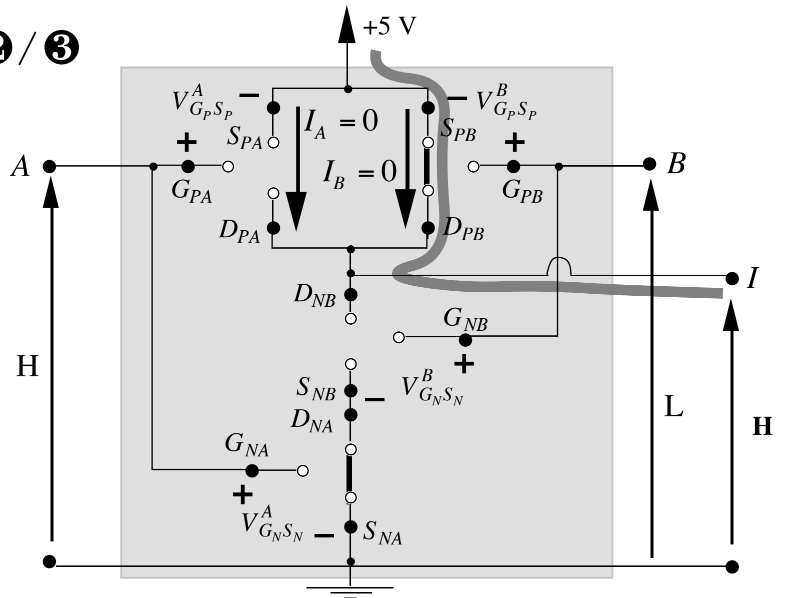
Irudian bi gauza nabarmendu daitezke: ez da korronterik pasatzen zirkuituan zehar, eta irteera-puntuaren eta elikaduraren artean zirkuitulaburra dago.

Beraz, hemen ere, lehenago CMOS familiari buruz aipatu dugun ezaugarria betetzen da: ez dago potentzia-galerarik; eta azkenik, irteerako tentsioa 5 V-ekoa denez, egia-taulako lehenengo lerroa honako hau izango da:

❶	L	L	H

❷ ❸ Bi kasu hauek aldi berean aztertuko ditugu, *A* eta *B* sarrerak modu berean konektatuta baitaude PMOS eta NMOS banara eta, ondorioz, irteerako tentsioa berbera izango da bi kasuetan. Demagun hirugarren kasua gertatzen dela, eta, beraz, *A* sarreran tentsio altua eta *B* sarreran tentsio baxua dugula. Kasu honetan, *A* sarrerari lotutako NMOS transistorean $V^{A}_{G_N S_N} = 5$ V da eta, ondorioz eroan egingo du korrontea; PMOS transistorean, berriz, $V^{A}_{G_P S_P} = 0$ V da eta ez du korronterik eroango. Horregatik, *A* sarrerako PMOS transistorea zirkuitu irekiaz ordezkatuko dugu, eta NMOSa hobiaren eta iturriaren arteko zirkuitulaburraz eta atea zirkuitu irekiaz. *B* sarrerari lotutako transistoreekin kontrakoa gertatzen da. NMOS transistorean $V^{B}_{G_N S_N} = 0$ V da eta ez du korronterik eroango; PMOSean, berriz, $V^{B}_{G_P S_P} = -5$ V da eta ondorioz eroan egingo du korrontea. Kasu honetan ere bakoitza dagokion ereduaz ordezkatuko dugu.

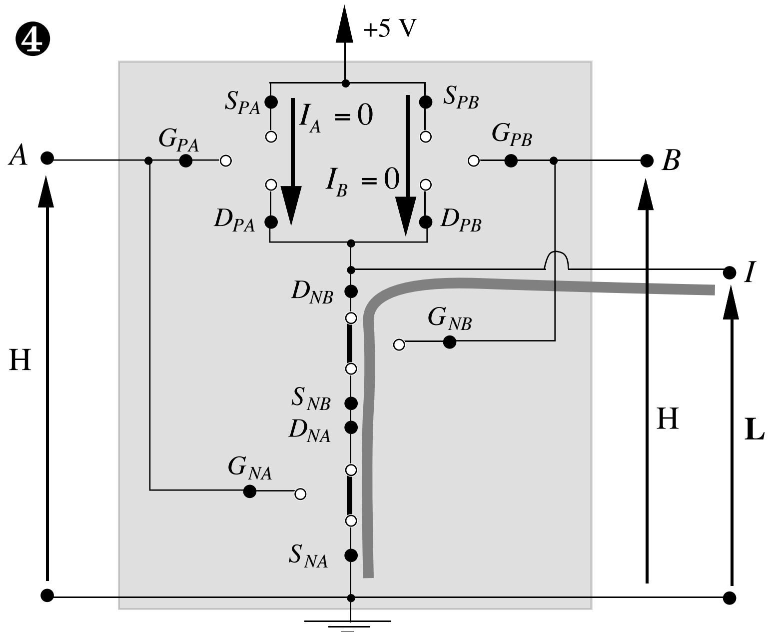
❷/❸



Oraingoan ere ez dago potentzia-kontsumorik, ez baitago korronterik zirkuituan zehar. Irteeraren balioari dagokionez, irteera-puntuaren eta elikaduraren arteko zirkuitulaburra sortu da; ondorioz, egia-taularen bigarren eta hirugarren lerroetan irteerak H balioa hartuko du.

❷	L	H	H
❸	H	L	H

❹ Azken kasu honetan, bai *A* sarreran eta baita *B* sarreran ere, tentsio altua edo H dugu; ondorioz, bi NMOS transistoreek korrontea eroaten dute eta PMOS transistoreek, berriz, ez dute eroaten. Transistore bakoitza dagokion modelo idealaz ordezkatuz, ondoko zirkuitua geratzen da.



Kasu honetan bi NMOS transistoreek korrontea eroaten dutenez, irteera-puntuaren eta erreferentzia-puntuaren artean zirkuitulaburra dago, eta ondorio zuzen gisa, irteeraren tentsio-maila L da. Egia-taulako laugarren lerroa, beraz, honelaxe geratuko da:

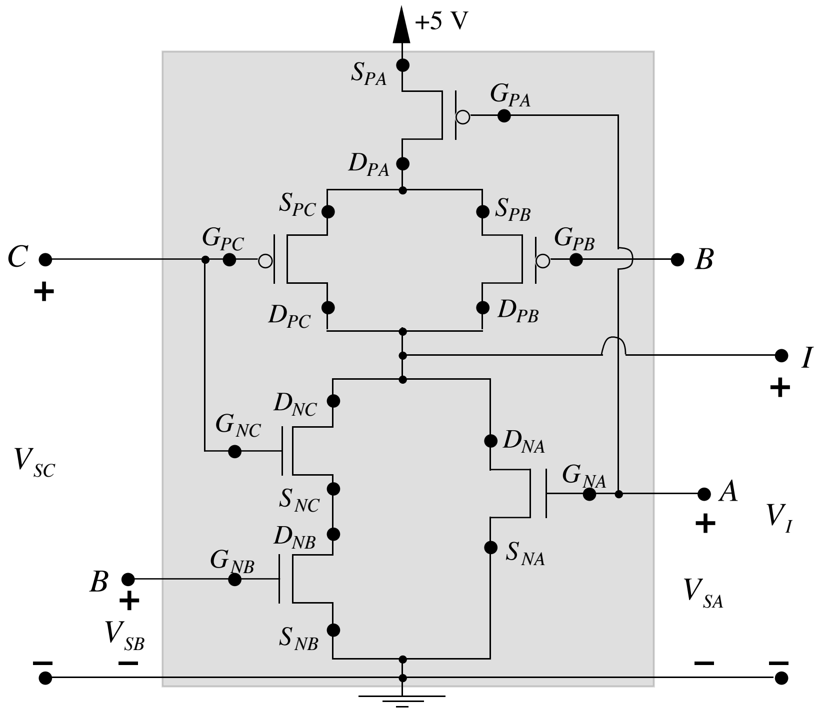
❹	H	H	L

Aurreko hiru azpiataletan lortutako emaitzak elkartuz, egia-taula osoa betea dugu. Egia--taulari erreparatuz, teorian deskribatutako ate logikoetako bat dugula konturatuko gara, **NAND** ate logikoa hain zuzen ere.

	V_{SA}	V_{SB}	V_I
❶	L	L	H
❷	L	H	H
❸	H	L	H
❹	H	H	L

NAND ate logikoa

9. Ondoko zirkuitua CMOS familia logikoko hiru sarrerako ate bat da. Azter ezazu zein izango den irteerako tentsioaren balioa sarrerako tentsioen balio posible guztietarako, eta bete egia-taula.



Ebazpena

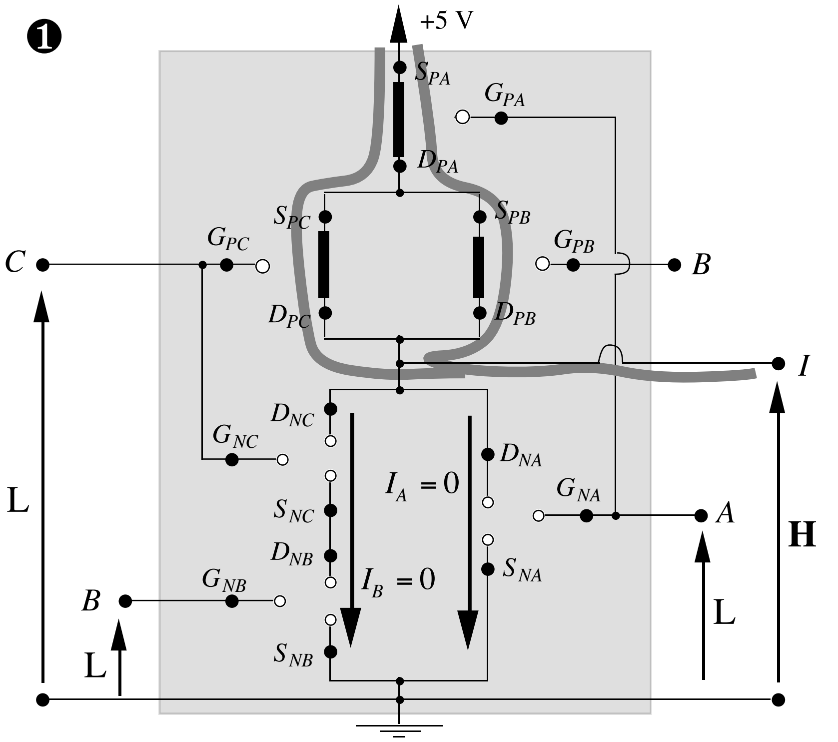
Irudiko zirkuituaren funtzionamendua aztertu behar dugu, sarreren balio posible guztietarako. Hiru sarrerako zirkuitua da, eta sarrera bakoitzak bi balio har ditzake: H eta L. Beraz, zortzi konbinazio posible aztertu beharko ditugu, bakoitzean bai NMOS eta baita PMOS transistoreak zein funtzionamendu-zonatan dauden aztertu, dagokien elementuaz ordezkatu, eta horren ondorioak zein diren analizatu beharko dugu.

Hona hemen aztertu beharreko zortzi kasuak:

	V_{SA}	V_{SB}	V_{SC}	V_I
❶	L	L	L	
❷	L	L	H	
❸	L	H	L	
❹	L	H	H	
❺	H	L	L	
❻	H	L	H	
❼	H	H	L	
❽	H	H	H	

❶ *A*, *B* eta *C* sarrerak bina transistoreren atera konektatuta daude. Hiruretan tentsio baxua dago; ondorioz, hiru NMOS transistoreen atearen eta iturriaren arteko potentzial-diferentzia 0 V-ekoa da, eta honen eragina, transistoreek korronterik ez eroatea izango da. Hiru PMOS transistoreen atearen eta iturriaren arteko potentzial-diferentzia ($V_{G_P S_P}$), aldiz, –5 V-ekoa da; ondorioz, hauek eroan egingo dute korrontea. Hori dela eta, hiru NMOS transistoreak terminal guztien arteko zirkuitu irekiaz, PMOSak hobiaren eta iturriaren arteko zirkuitulaburraz eta atea zirkuitu irekiaz ordezkatuko ditugu.

❶

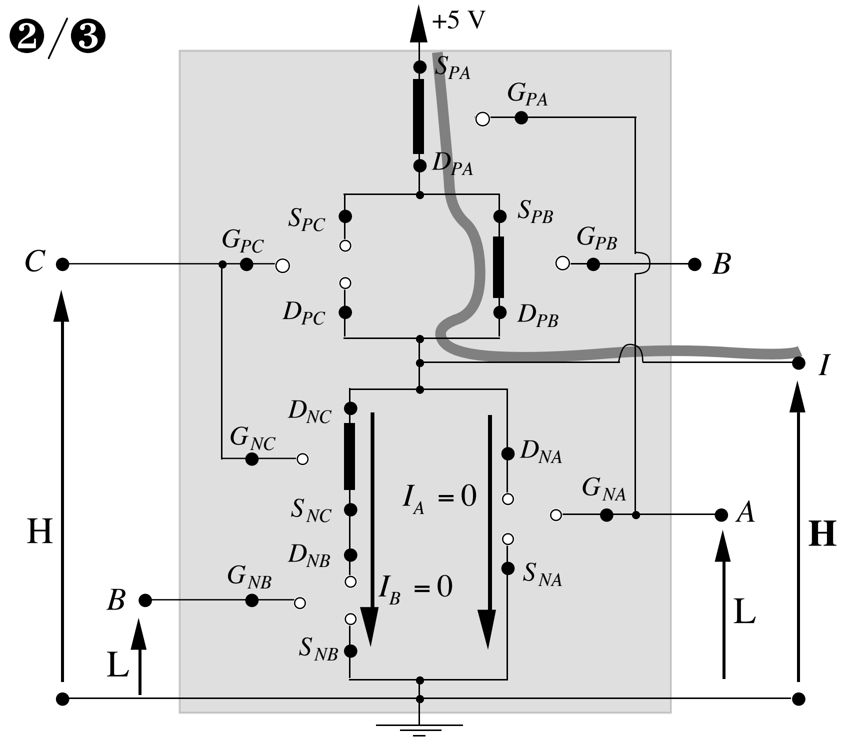


Irudian bi gauza nabarmendu daitezke: ez da korronterik pasatzen zirkuituan zehar, eta irteera-puntuaren eta elikaduraren artean zirkuitulaburra dago. Beraz, hemen ere, lehenago CMOS familiari buruz aipatu dugun ezaugarria betetzen da: ez dago potentzia-galerarik. Azkenik, irteerako tentsioa 5 V-ekoa denez, egia-taulako lehenengo lerroa honako hau izango da:

❶	L	L	L	H

❷ ❸ Bi kasu hauek aldi berean aztertuko ditugu, azken batean *B* eta *C* sarrerak modu berean konektatuta baitaude PMOS eta NMOS banara; ondorioz, irteerako tentsioa berbera izango da bai *B* sarreran tentsio baxua eta *C* sarreran tentsio altua edo *B* sarreran H eta *C* sarreran L dagoenean, *A* sarrerako tentsioa finkoa mantentzen bada, noski. Demagun bigarren kasua gertatzen dela, eta, beraz, *C* sarreran tentsio altua eta *B* sarreran tentsio baxua dugula, *A* sarrerako tentsioa L izanik.

Kasu honetan, *C* sarrerari lotutako NMOS transistorean V_{GS} = 5 V da eta, ondorioz, eroan egingo du korrontea; PMOS transistorean, berriz, V_{GS} = 0 V da, eta ez du eroango. Horregatik, PMOS transistorea zirkuitu irekiaz ordezkatuko dugu eta NMOSa hobiaren eta iturriaren arteko zirkuitulaburraz eta atea zirkuitu irekiaz. *A* eta *B* sarrerei lotutako transistoreekin, berriz, kontrakoa gertatzen da. NMOS transistoreetan V_{GS} = 0 V da eta ez dute korronterik eroango; PMOSetan, berriz, V_{GS} = –5 V da, eta, ondorioz, eroan egingo dute. Kasu honetan ere bakoitza dagokion ereduaz ordezkatuko dugu.

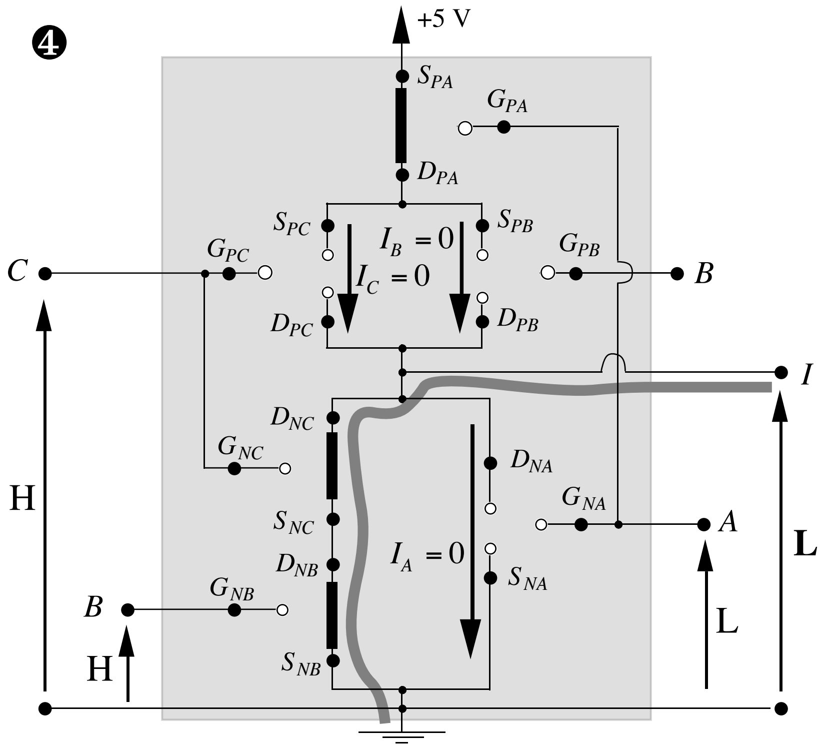


Oraingoan ere ez dago potentzia-kontsumorik, ez baitago korronterik zirkuituan zehar. Irteeraren balioari dagokionez, irteera-puntuaren eta elikaduraren arteko zirkuitulaburra sortu da; ondorioz, egia-taularen bigarren eta hirugarren lerroetan irteerak H balioa hartuko du.

❷	L	L	H	H
❸	L	H	L	H

❹ Kasu honetan, bai *B* sarreran eta baita *C* sarreran ere, tentsio altua edo H dugu eta *A* sarreran, berriz, tentsio baxua. Ondorioz, *B* eta *C* sarrerekin konektatutako bi NMOS transistoreek korrontea eroaten dute, eta PMOS transistoreek, berriz, ez dute eroaten; *A* sarrerarekin konektatutakoekin alderantzizkoa gertatzen da. Transistore bakoitza dagokion modelo idealaz ordezkatuz, ondoko zirkuitua geratzen da.

❹



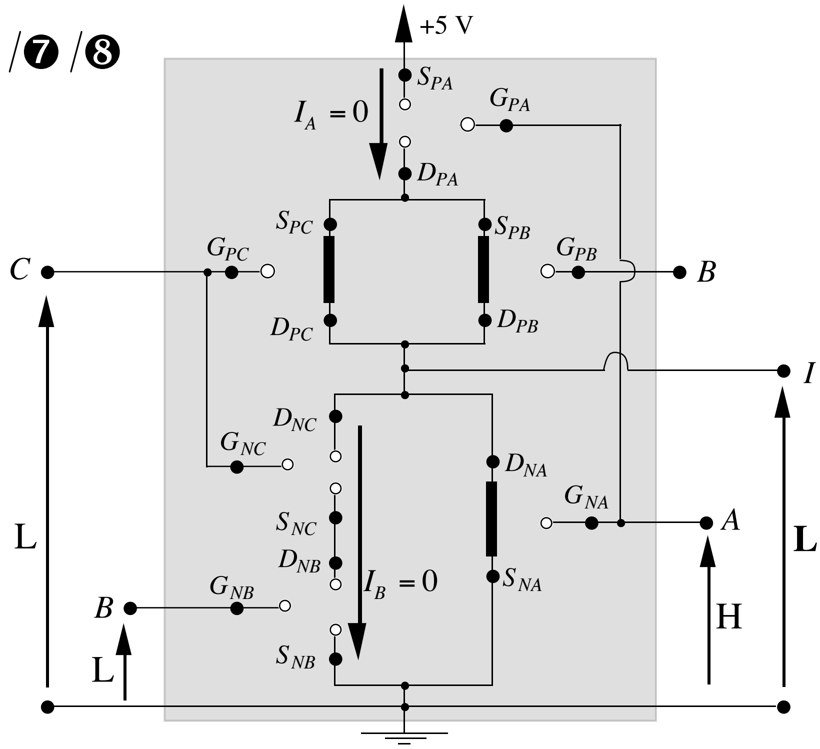
Kasu honetan sarreren balioak aldatzeak eragina izan du irteeraren gainean. *B* eta *C* sarrerekin konektatutako bi NMOS transistoreek korrontea eroaten dutenez, irteera-puntuaren eta erreferentziaren artean zirkuitulaburra dago, eta ondorio zuzen gisa, irteeraren tentsio-maila L da. Beraz, egia-taulako laugarren lerroa honelaxe geratuko da:

❹	L	H	H	L

❺ ❻ ❼ ❽ kasuetan, *A* sarreraren balioak baldintzatzen du zirkuituaren funtzionamendua. *A* sarreraren tentsioa H denez, honi konektatutako NMOS transistorearen atearen eta iturriaren arteko potentzial-diferentzia 5 V-ekoa da eta, beraz, eroan egingo du. Hau dela eta, irteeraren eta erreferentzia-puntuaren artean beti zirkuitulaburra egongo da. Bestalde, *A* sarrerari konektatutako PMOS transistorearen V_{GS} tentsioa 0 V-ekoa izango da eta, ondorioz, PMOSa terminal guztien arteko zirkuitu irekiaz ordezkatu beharko dugu. Beraz, ez da sekula irteera-puntuaren eta elikadura puntuaren arteko zirkuitulaburrik egongo. Irudikoa adibide bat da, hain zuzen ere, *B* eta *C* sarreretako tentsioa L denekoa.

Beraz, zirkuitua aztertuz egia-taulako azken lau lerroetan irteera berdina izango dela ondoriozta dezakegu.

❺/❻/❼/❽



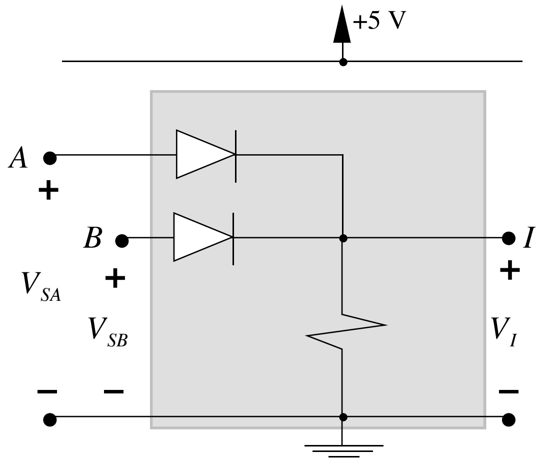
❺	H	L	L	L
❻	H	L	H	L
❼	H	H	L	L
❽	H	H	H	L

Aurreko lau azpiataletan lortutako emaitzak elkartuz, egia-taula osoa bete dugu.

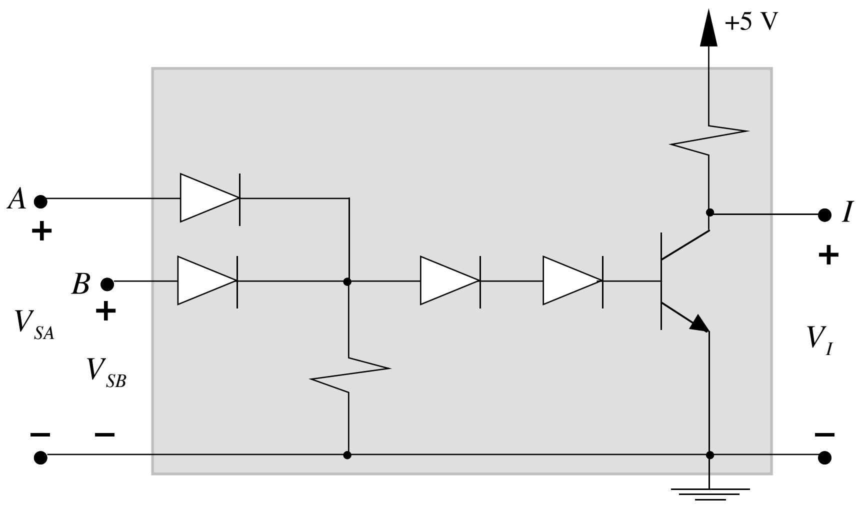
	V_{SA}	V_{SB}	V_{SC}	V_I
❶	L	L	L	H
❷	L	L	H	H
❸	L	H	L	H
❹	L	H	H	L
❺	H	L	L	L
❻	H	L	H	L
❼	H	H	L	L
❽	H	H	H	L

C) Proposaturiko ariketak

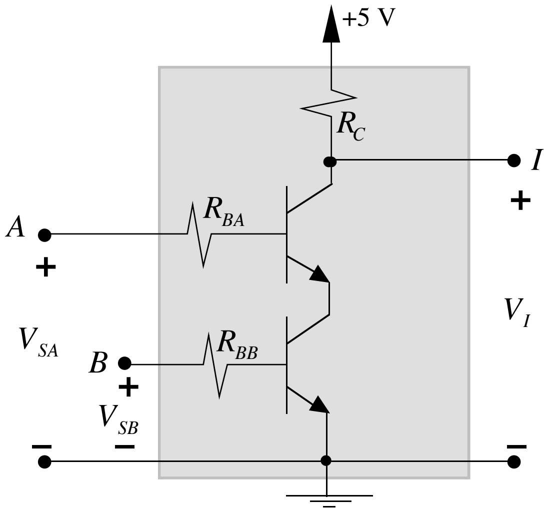
1. Esan ezazu zein familia logikotakoa den irudiko zirkuitua. Azter ezazu beraren funtzionamendua, egin egia-taula eta adieraz ezazu zein ate logikori dagokion.



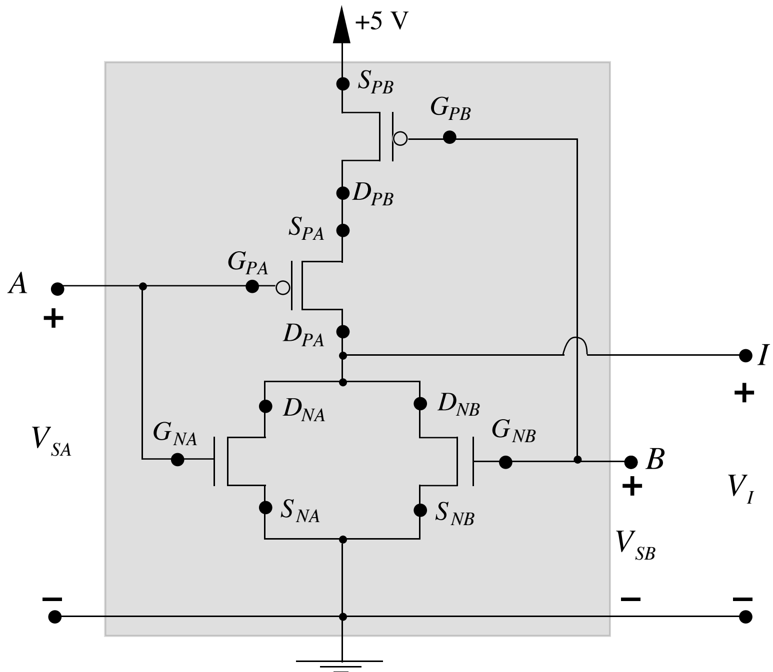
2. Errepika ezazu aurreko ariketan egindakoa, ondoko zirkuiturako:



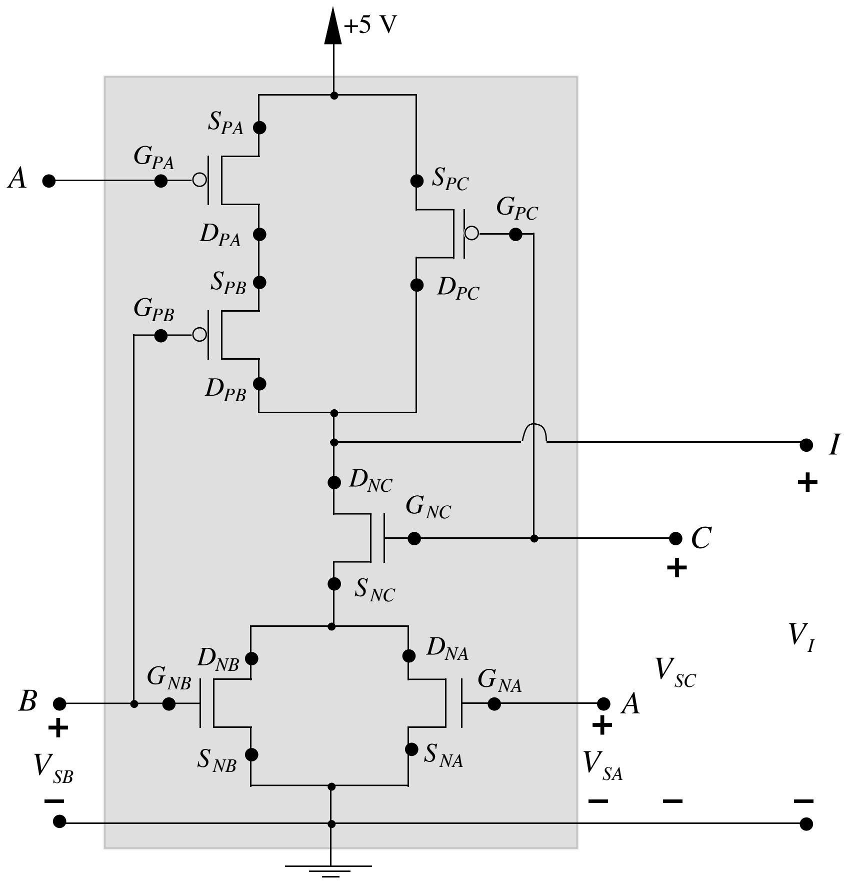
3. Irudiko zirkuiturako, esan ezazu zein familia logikotakoa den, azter ezazu irteera nolakoa izango den sarreren balio posible guztietarako, egin ezazu egia-taula eta adieraz ezazu zein ate logikori dagokion.



4 Esan ezazu irudiko zirkuitua zein familia logikotakoa den, egin ezazu egia-taula eta adieraz ezazu zein ate logikori dagokion.



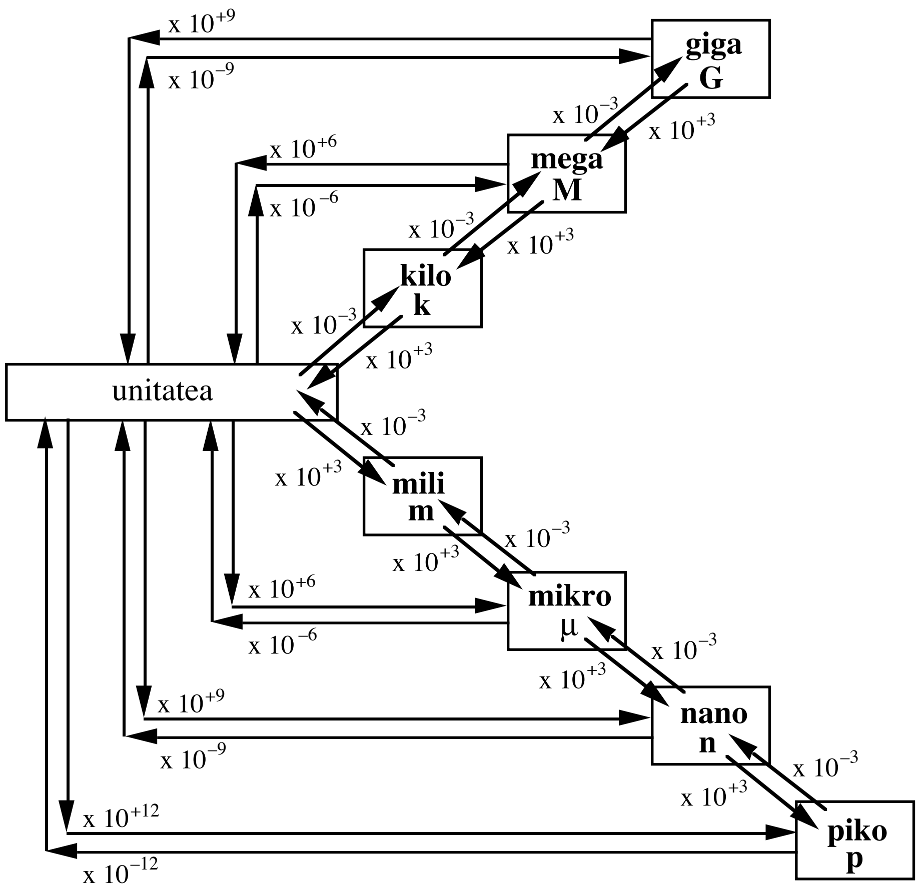
5. Zein familia logikotakoa da irudiko zirkuitua? Azter ezazu zirkuitua hiru sarreren balio posible guztietarako, eta adieraz ezazu zein izango den irteera kasu bakoitzean.



E1. Magnitude elektrikoen unitateak: anizkoitzak eta azpianizkoitzak

Liburuan zehar ikusi dugun legez, zirkuituetako magnitude elektrikoen balioak adieraztean unitate zehatzak erabiltzen dira, mundu guztiak adostuak. Baina batzuetan unitate horiek handiegiak edo txikiagoak suertatzen dira. Horregatik, unitate horien anizkoitzak eta azpianizkoitzak erabiltzen dira, hauek ere mundu guztiak adostuak. Oro har, Nazioarteko Sisteman anizkoitzak eta azpianizkoitzak sortzeko unitateari aurrizkiak gehitzen zaizkio eta aurrizkiak adierazten du unitatearekiko biderkatze- edo zatitze-faktorea.

Anizkoitz eta azpianizkoitz erabilienen artean pasatzeko, $10^{\pm 3}$ berreturez biderkatu edo zatitu behar da. Hona hemen lagungarria izan daitekeen taula bat, zirkuituetan gehien erabiltzen diren anizkoitz eta azpianizkoitzen artean pasatzeko:



Hona hemen, laburbilduta, liburuan zehar ageri diren magnitude elektrikoen unitateak eta maiztasun eta potentzia baxuko zirkuitu elektronikoetan gehien erabiltzen diren anizkoitzak eta azpianizkoitzak:

KORRONTEA:	unitatea: anpere, A azpianizkoitz erabilienak: mA, μA
TENTSIOA:	unitatea: volt, V azpianizkoitz erabilienak: mV
POTENTZIA:	unitatea: watt, W azpianizkoitz erabilienak: mW
ERRESISTENTZIA:	unitatea: ohm, Ω anizkoitz erabilienak: kΩ, MΩ
KONDENTSADOREAK:	unitatea: farad, F azpianizkoitz erabilienak: μF, nF (= kpF), pF
DENBORA:	unitatea: segundo, s azpianizkoitz erabilienak: ms, μs, ns
MAIZTASUNA:	unitatea: hertz, Hz (= s^{-1}) anizkoitz erabilienak: kHz, MHz, GHz

Adibideak:

$920.000\ \mu A = 920.000 \cdot 10^{-6}\ A = 0{,}92\ A$

$0{,}03\ V = 0{,}03 \cdot 10^{+3}\ mV = 30\ mV$

$2.500\ mW = 2.500 \cdot 10^{-3}\ W = 2{,}5\ W$

$0{,}1\ M\Omega = 0{,}1 \cdot 10^{+3}\ k\Omega = 100\ k\Omega$

$4.700\ nF = 4.700 \cdot 10^{-3}\ \mu F = 4{,}7\ \mu F$

$0{,}46\ ms = 0{,}46 \cdot 10^{+3}\ \mu s = 460\ \mu s$

$125.000\ kHz = 125.000 \cdot 10^{-3}\ MHz = 125\ MHz$

$f = 125\ kHz \rightarrow$

$$T = \frac{1}{125\ \text{Hz}} = \frac{1}{125 \cdot 10^{+3}\ \text{Hz}} = \frac{1}{125 \cdot 10^{+3}} \cdot 10^{+6}\ \mu s = \frac{1000}{125}\ \mu s = 8\ \mu s$$

Bukatzeko, honako hau azpimarratu nahi dugu: ahal dela, zenbaki osoak erabiltzea komeni da, zenbaki bateko zeroen kopurua ahal den txikiena izan dadin. Horrexetarako daude, hain zuzen ere, anizkoitzak eta azpianizkoitzak.

Esate baterako, zirkuitu bateko erresistentzia guztiak kΩ-etan baldin badaude eta tentsioak V-etan, zenbaki horiekin lan egingo dugu, erresistentziak Ω-etara pasatu gabe; modu horretan, korronte guztiak, A-tan lortu beharrean, mA-tan lortuko ditugu, honako hau gertatzen baita Ohm-en legearekin:

$$I = \frac{V}{R} \quad \rightarrow \quad 1\ \mathrm{A} = \frac{1\ \mathrm{V}}{1\ \Omega}$$

$$\frac{1\ \mathrm{V}}{1\ \mathrm{k}\Omega} = \frac{1\ \mathrm{V}}{10^3\ \Omega} = 10^{-3}\,\frac{V}{\Omega} = 10^{-3}\ \mathrm{A} = 1\ \mathrm{mA}$$

Beste horrenbeste gertatzen da zirkuitu bateko erresistentzia guztiak MΩ-etan daudenean eta tentsioak V-etan, orduan korronte guztiak μA-tan lortuko ditugu.

$$\frac{1\ \mathrm{V}}{1\ \mathrm{M}\Omega} = \frac{1\ \mathrm{V}}{10^6\ \Omega} = 10^{-6}\,\frac{V}{\Omega} = 10^{-6}\ \mathrm{A} = 1\ \mu\mathrm{A}$$

Beste adibide bat: RC zirkuitu bateko denbora-konstantea kalkulatu nahi dugunean, badakigu $R{\cdot}C$ dela, eta unitateak ohm · farad = segundo (Ω · F = s).

Baina zer gertatzen da erresistentzia kΩ-etan eta kapazitatea μF-etan baldin badaude? Lehendabizi Ω-etan eta F-etan adierazi behar ote ditugu, emaitza segundotan lortzeko? Agerikoa da erantzuna ezezkoa dela, zeren, azpianizkoitzen arteko erlazioa kontuan hartuz gero, berehalakoa baita emaitza:

$$\mathrm{k}\Omega \cdot \mu\mathrm{F} = \mathrm{ms},$$

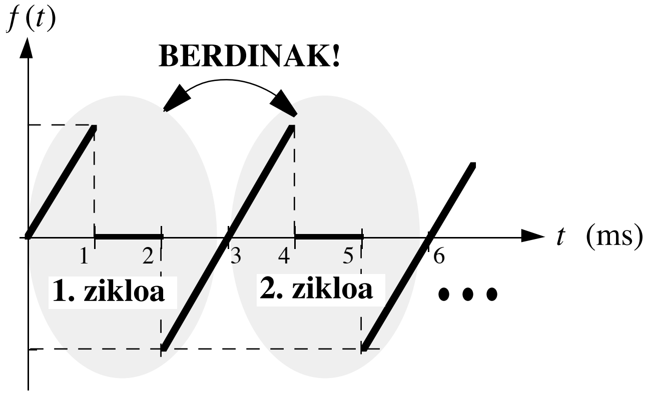
hots, $10^{+3} \cdot 10^{-6} = 10^{-3}$, edo kilo · mikro = mili.

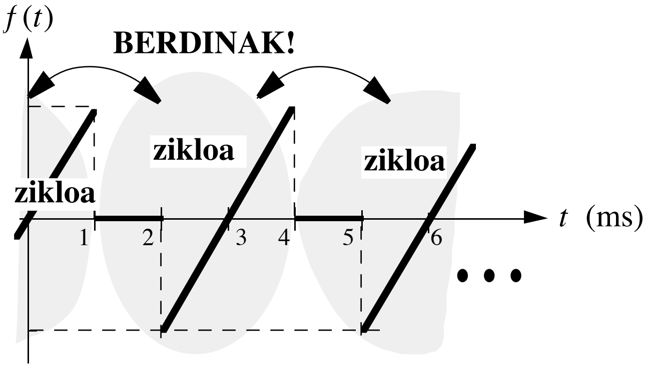
Hori bai, hauxe azpimarratu behar da: ekuazio batean (esate baterako, KTL aplikatzean lorturikoan) ziur egon behar dugu, ageri diren elementu guztiak unitate berberetan adierazita daudela (adibidez, erresistentzia guztiak kΩ-etan, edo denak MΩ-etan).

E2. Seinale periodikoen ezaugarriak

Seinale periodikoak, etengabe errepikatzen direnak dira. Errepikatzen den seinale-zatiari ziklo deritzo, eta seinalearen adierazpen grafikoari, uhin-forma.

Adibidea:





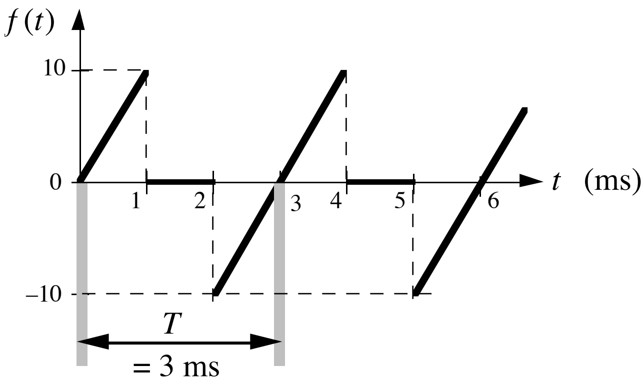
• Periodoa

Periodoa, T, zikloaren iraupena da. Hots, seinalearen periodoak adierazten du zenbat denbora behar duen ziklo batek berriro errepikatzeko.

Hori dela eta, periodoa denbora-unitatetan ematen da: segundotan (s), milisegundotan (ms), mikrosegundotan (µs) ...

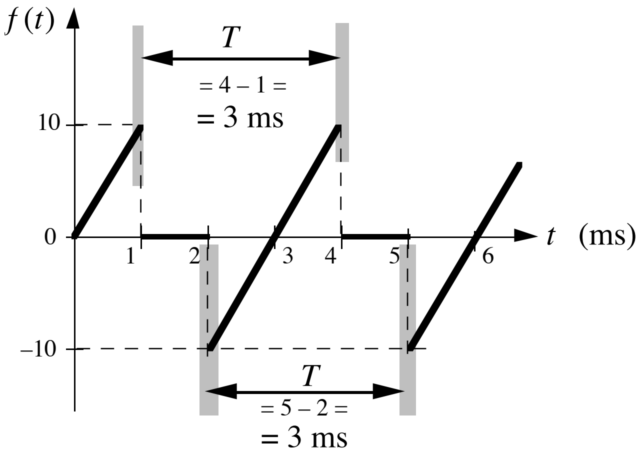
Seinale baten periodoa bilatu behar dugunean, seinalearen uhin-itxura aztertu behar dugu, errepikatzen den zatia zein den argi eta garbi finkatzeko.

Adibidea:



Periodoa kalkulatzean, berdin dio zein den aukeratzen den hasierako puntua, ziklo oso bat baita kontuan hartu behar dena.

Adibidea:



• Maiztasuna edo frekuentzia

Maiztasunak seinalea denbora-unitatean zenbat aldiz errepikatzen den adierazten du, hau da, segundo batean zenbat ziklo sartzen diren.

Beraz, matematikoki, maiztasuna (ziklo/segundo) periodoaren (segundo/ziklo) alderantziz proportzionala da.

$$\boxed{f = \frac{1}{T}}$$

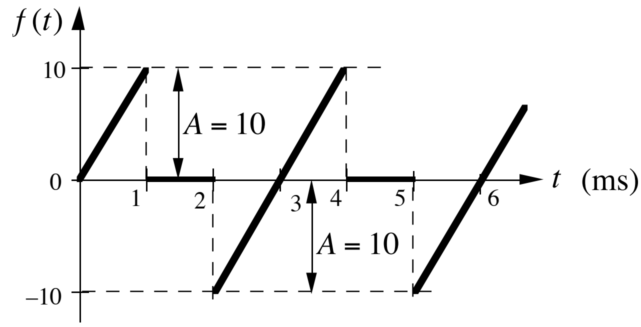
Beraz, maiztasunaren unitatea s^{-1} da; edo, gauza bera dena, hertz izenekoa, Hz. Normalean anizkoitzak erabiltzen dira: kilohertz, kHz; megahertz, MHz; ...

Adibidea: Irudiko seinalerako, T = 3 ms $\rightarrow f$ = 1/3 kHz = 0,333 kHz = 333,33 Hz

• Anplitudea

Anplitudeak adierazten du zenbatekoa den seinalearen balio absolutu maximoa.

Adibidea:



Seinalea simetrikoa bada, seinalearen erdia simetria-ardatzetik gora dago, eta beste erdia, behera. Hori dela eta, anplitudeaz gain, beste parametro bat ere erabili ohi da: bi balio maximoen arteko distantzia, hots, anplitudearen balio bikoitza, eta, hori adierazteko, pp azpi-indizea erabili ohi da (piko-piko edo muturren arteko distantzia baita), $F_{pp} = 2A$.

Anplitudearen eta piko-piko balioaren unitatea seinale-motaren araberakoa da: seinalea tentsioa baldin bada, anplitudea voltetan eman beharko da; seinalea korrontea bada, ordea, anperetan; ...

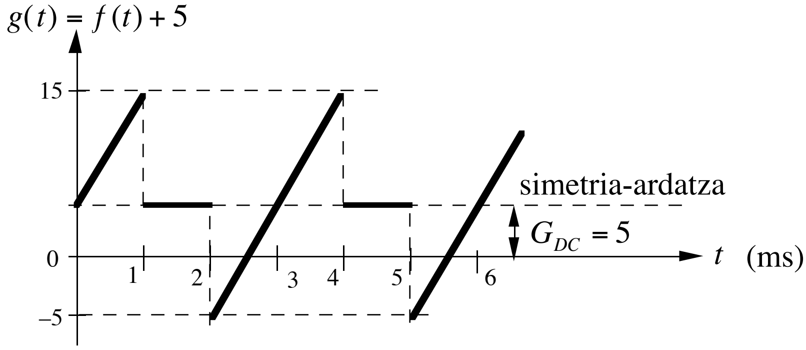
Adibidea: Aurreko irudiko seinalerako, $A = 10 \rightarrow F_{pp} = 2A = 20$

• Korronte zuzeneko osagaia

Korronte zuzeneko osagaiak (G_{DC}) zero balioko ardatzetik seinalea zenbat aldendu den adierazten du. Hori kalkulatzeko, seinalearen simetria-ardatzaren desplazamendua bilatu behar da. Ondoren ikusiko dugun legez, seinalearen batez besteko balioa da.

Korronte zuzeneko osagaiaren unitatea seinale-motaren araberakoa da, anplitudearen antzera.

Adibidea:



• Batez besteko balioa

Matematika arloko kontzeptua izan arren, oso baliagarria da elektrizitatean. Definizioz, T periodoa duen $f(t)$ seinale periodiko baten batez besteko balioa honelaxe kalkulatzen da matematikoki:

$$\boxed{F = \frac{1}{T}\int_0^T f(t)dt}$$

Elektrizitatean batez besteko balioaren esanahia honako hau da: korronte elektrikoa karga elektrikoaren mugimendua da berez. Hori dela eta, korronte elektriko batek denbora-tarte batean karga-kantitate jakin bat garraiatu du. Korrontea aldakorra baldin bada, honako galdera hau egin daiteke: zenbatekoa izango litzateke denbora berean karga-kopuru bera garraiatuko lukeen korronte konstantearen balioa? Bada, balio hori da, hain zuzen ere, korronte aldakorraren batez besteko balioa.

Kargaren eta korronte-intentsitatearen arteko erlazio matematikoa kontuan hartuz,

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt}$$

honako hau ondorioztatzen da korronte aldakorra periodikoa dela suposatuz eta seinaleak periodo batean garraiatutako karga-kantitatea aintzat hartuz:

$i(t)$ korronte aldakorrak:	I korronte konstanteak:
$Q(0,T) = \int_0^T dq = \int_0^T i(t)dt$	$Q(0,T) = \int_0^T dq = \int_0^T Idt = I \cdot T$

Bi adierazpenok berdinduz gero, I-ren balioa kalkulatzen da:

$$\int_0^T i(\mathrm{t})dt = I \cdot T \quad \rightarrow \quad I = \frac{1}{T}\int_0^T i(t)dt$$

Adibidea: Aurreko irudietako seinaleetarako, batez besteko balioak kalkulatzeko, lehendabizi seinaleen adierazpen matematikoak bilatu beharko ditugu; horretarako, kontuan hartu behar dugu seinaleen uhin-itxuran hiru zati bereizten direla:

	f(*t*) **seinalea:**	*g*(*t*) **seinalea:**
1. zatia (0 ms ≤ t ≤ 1 ms):	$f(t) = 10t$	$g(t) = 10t + 5$
2. zatia (1 ms ≤ t ≤ 2 ms):	$f(t) = 0$	$g(t) = 5$
3. zatia (2 ms ≤ t ≤ 3 ms):	$f(t) = 10t - 30$	$g(t) = 10t - 25$

Beraz, batez besteko balioaren formulan azaltzen den integrala ere hiru zatitan banatu beharko dugu:

$$F = \frac{1}{3}\left[\int_0^1 10tdt + \int_1^2 0dt + \int_2^3 (10t - 30)dt\right] = 0 = F_{DC}$$

$$G = \frac{1}{3}\left[\int_0^1 (10t + 5)dt + \int_1^2 5dt + \int_2^3 (10t - 25)dt\right] = 5 = G_{DC}$$

• Balio eraginkorra

Hau ere matematika arloko kontzeptua izan arren, oso baliagarria da elektrizitatean. Definizioz, T periodoa duen f(t) seinale periodiko baten balio eraginkorra honelaxe kalkulatzen da matematikoki:

$$\boxed{F_e = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T \left[\mathrm{f}(t)\right]^2 dt}}$$

Elektrizitatean esanahi hau du: erresistentzia batetik korronte elektrikoa igarotzean, erresistentziak energia elektrikoa xurgatu eta bero-energia bihurtzen du, bero-kantitate finko bat sortuz korrontea aldakorra zein konstantea izanik. Korrontea aldakorra baldin bada, honako galdera hau egin daiteke: zenbatekoa izango litzateke denbora berean eta erresistentzia beretik igarotzean bero-kantitate berdina sortuko lukeen korronte konstantearen balioa? Bada, balio hori da hain zuzen ere korronte aldakorraren balio eraginkorra, berak eragiten baitu potentzia erresistentzian.

Erresistentzia batek xurgatzen duen energiaren eta bertatik igarotzen den korrontearen arteko erlazio matematikoa kontuan hartuz,

$$\frac{dW(t)}{dt} = p(t) = Ri^2,$$

honako hau ondorioztatzen da korronte aldakorra periodikoa dela suposatuz, eta korronteak periodo batean sortutako bero-kantitatea aintzat hartuz:

$i(t)$ korronte aldakorrak:	I_e korronte konstanteak:
$W_T = \int_0^T R\left[i(t)\right]^2 dt$	$W_T = \int_0^T RI_e^2 dt = RI_e^2 T$

Bi adierazpen horiek berdinduz gero, I_e-ren balioa kalkulatzen da:

$$\int_0^T \left[\mathrm{i(t)}\right]^2 dt = I_e^2 T \qquad \rightarrow \qquad I_e = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T \left[i(t)\right]^2 dt}$$

Adibidea:

Aurreko irudietako seinaleetarako, lehen bezala, balio eraginkorrak kalkulatzeko integrala hiru zatitan banatu beharko dugu:

$$F_e = \sqrt{\frac{1}{3}\left[\int_0^1 (10t)^2 dt + \int_1^2 0^2 dt + \int_2^3 (10t-30)^2 dt\right]} = 4,71$$

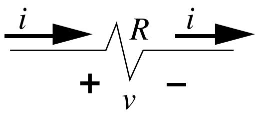
$$G_e = \sqrt{\frac{1}{3}\left[\int_0^1 (10t+5)^2 dt + \int_1^2 5^2 dt + \int_2^3 (10t-25)^2 dt\right]} = 6,87$$

E3. Oinarrizko elektronika

Material erdieroaleen azterketa

• Elektronikaren beharra

Osagai elektrikoek (erresistentziak, kondentsadoreak...) portaera finkoa dute. Erresistentzietan, adibidez, Ohm-en legeak dioen bezala, tentsioa eta korrontea zuzenki proportzionalak dira beti, proportzionaltasun-konstantea R izanik.



Portaera finkoa: i/v proportzionalak

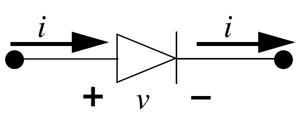
Antzeko zerbait gertatzen da ikusi ditugun beste elementuekin: kondentsadoreak, harilak...

Kasu askotan hau ez da nahikoa, eta beharrezkoa izaten da elementu baten portaera baldintza batzuen arabera aldatu ahal izatea; portaera kontrolatu ahal izatea hain zuzen ere. Helburu honekin sortu zen Elektronika, eta baita azken urteotan izugarri garatu ere. Garapen honen ondorioak dira gaur egun ezinbestekoak gertatzen zaizkigun gailu batzuk, hala nola irratia, kalkulagailua, telebista, konputagailua...

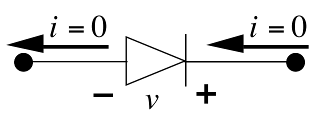
Garapena abiada bizian joan da. Hogeita hamarreko hamarkadan hasi zen balbulen elektronikarekin. Balbula hauek oso handiak ziren eta potentzia handia xahutzen zuten. Dena den, horrelako balbulekin eraiki ziren lehenengo irrati zaharrak. Garai hartako ordenagailu batek (oso eragiketa sinpleak egiteko gai besterik ez zena) gela oso bat behar zuen, eta eraikin bat berotzeko adina energia kontsumitzen zuen. Iraultza 40eko hamarkadan iritsi zen erdieroaleen elektronikarekin. Pixkanaka-pixkanaka, transistore bipolarrak eta MOS transistoreak agertu ziren, eta hortik aurrera zirkuitu integratuak (milaka transistore mm^2 batean). Erdieroaleen elektronikak berehala beharrezko lekua eta kontsumitutako potentzia nabarmenki txikiagotzea ekarri zuen.

Aztertuko ditugun osagai elektronikoak bi motakoak izango dira.

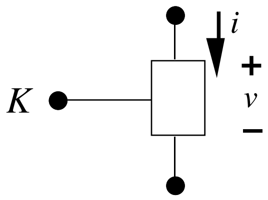
Biterminalak: bi terminal edo hankatxo baino ez dituztenak. Portaera, erabat kontrolagarria ez den arren, ez da lineala, eta aukera berriak ematen ditu. Diodoa elementu elektroniko biterminala da. Diodoak noranzko bakarrean utziko du korrontea pasatzen. Korrontea noranzko batean pasatzen denean, erresistentzia ez-lineal baten moduan funtzionatuko du. Korrontea kontrako noranzkoan badator, berriz, diodoak ez dio pasatzen utziko. Esan genezake, beraz, korrontea tentsioaren bidez nolabait kontrolatzen dugula.



$i = \mathrm{f}(v)$ $\rightarrow R$ ez-lineala



Triterminalak: izenak dioen eran, hiru terminal edo mutur dituztenak dira hauek. Hiru terminal horietako bat kontrol-terminala izango da, elementu triterminalaren funtzionamendua kontrolatzeko balio duena, hain zuzen ere. Transistoreak elementu triterminalak dira eta banan-banan edo milioika material puxka berean integraturik (mikroprozesadoreen kasuan adibidez) topa ditzakegu.

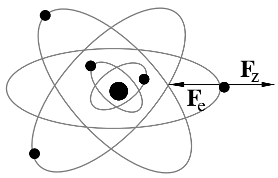


Gaur egungo elektronika erdieroaleetan oinarritzen da; eta erdieroaleen funtzionamenduaren funtsa, atomoaren egitura da. Hori hobe ulertu ahal izateko, zertxobait ikusiko dugu atomoari buruz.

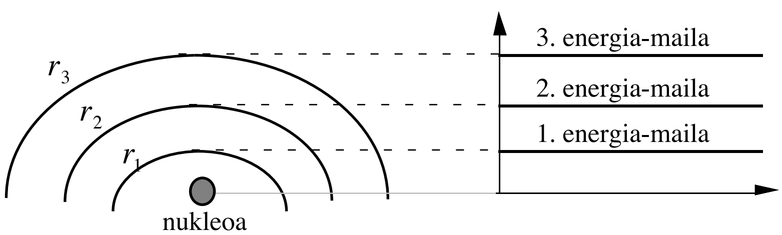
• Bohr-en eredu atomikoa

Bohr-en eredu atomikoak dioenez, atomoan bi atal nagusi bereiz ditzakegu:

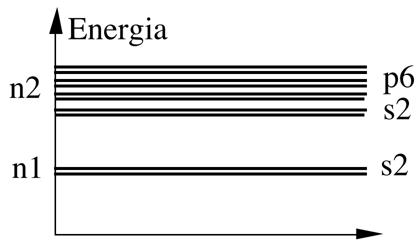
1. Nukleoa, non protoiak eta neutroiak dauden, hau da, karga positiboa eta masa.
2. Karga negatiboa, nukleoaren inguruan orbita eliptikoetan biratzen ari diren elektroien multzoa.



Elektroiek orbita jakin batean iraun dezaten, indarren arteko oreka ematen da, nukleoak sortzen duen erakarpen-indarraren eta indar zentrifuguaren arteko oreka, hain zuzen ere. Erradioa zenbat eta handiagoa izan, hainbat eta eragin txikiagoa izango du nukleoak elektroiaren gainean eta, ondorioz, indar zentrifugua, eta honekin batera abiadura ere, txikiagoa izango da. Eremu grabitatorioko puntu batean egoteagatik elementu batek energia potentziala duen bezala, elektroiei, orbita jakin batean egoteagatik, energia--maila jakina dagokie.



Elektroi bat orbita txikiago batetik orbita handiago batera pasatzen denean, energia potentziala irabazten du; kanpo-fenomeno batzuk, beroak, argiak eta tentsioak, adibidez, jauzi hori gertatzea eragin dezakete. Lurreko objektuekin gertatzen den antzera, kasu honetan elektroiak energia potentzial handiagoa du, nukleotik gehiago urrundu delako. Dena den, orbita bakoitzeko elektroi guztiek ez dute energia berdina; hau dela eta, orbita edo geruza bakoitza azpigeruzetan banatzen da.

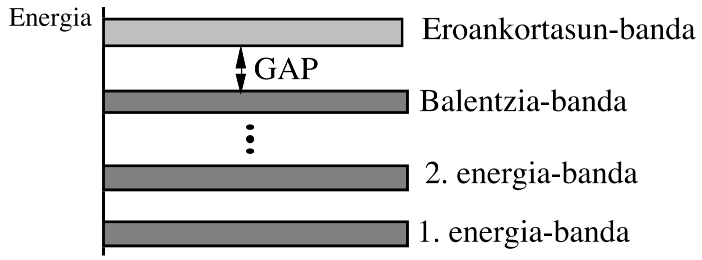


Atomoak kanpoko indar baten eragina jasaten duenean, nukleotik gertu dauden geruzek ez dute aldaketarik jasaten, oso egonkorrak baitira. Kanpoaldeko geruzek, ordea, eragina nozitzen dute, eta zenbat eta handiagoa izan nukleorainoko distantzia, hainbat eta txikiagoa izango da geruza horietako elektroiak atomotik bereizteko behar den indarra. Horregatik, elektronikaz aritzean, interesgarrienak azken geruzetako elektroiak dira, hauek baitira atomoaren portaera desberdinen oinarri.

Atomoa isolatuta dagoenean agertzen den azken geruza edo orbitari, balentzia-orbita deritzo eta nukleoaren eragin txikiena jasotzen duena da (bertako elektroiak balentzia--elektroiak dira). Kanpo-eragile batek balentzia-orbitako elektroia aska dezake, elektroi hau elektroi librea izatera pasaraziz.

• Energia-bandak

Orain arte aipatutakoa atomoak isolatuta daudenean gertatzen dena da; baina atomoak multzoka agertzen direnean, kristaletan adibidez, elektroi bakoitzak bere atomoaren aldarapen/erakarpen-indarrak jasateaz gain, inguruko atomo guztienak ere jasaten ditu. Atomo bakoitzaren posizioa desberdina denez, ez daude bi elektroi indar berdinen eragina nozitzen dutenak. Hori dela eta, energia-mailak gorago aipatu bezain zehatzak ez direla esan dezakegu; horrela, energia-bandak agertzen dira.



Energiaren balio guztiak ez dira posibleak, hau da, elektroiek energiaren balio desberdinak hartzen dituzten arren, ezin dute edozein balio hartu. Balio debekatu hauei banda debekatuak deritze.

Balentzia-bandan daude atomoari atxikita dauden azken geruzako elektroiak. Kanpoko eragile batek askatutako elektroi askeak, ordea, eroankortasun-bandan daude, zeren, askeak izateagatik mugitu daitezkeenez gero, korronte elektrikoa eroan baitezakete. Hots, eroankortasun-banda nukleotik urrunen geratzen dena da, eta bertan dauden elektroiak, elektroi askeak direla esan daiteke, ez baitute nukleoaren eraginik nabaritzen eta korrontea sortzeko mugi baitaitezke.

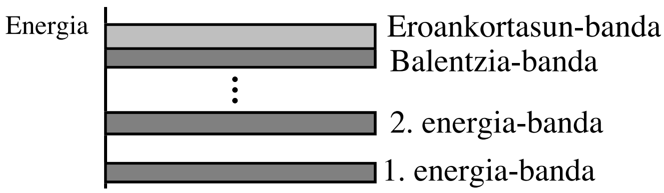
Balentzia-bandaren eta eroankortasun-bandaren artean dagoen banda edo zona debekatuari GAP deritzo eta eV-etan (elektroi-volt) neurtzen da. (eV-a, definizioz, elektroi batek volt bateko potentzial-diferentzia gainditzeko behar duen energia da.)

• Materialen sailkapena

Energia-bandak kontuan hartzen baditugu, material solidoak talde desberdinetan bana ditzakegu.

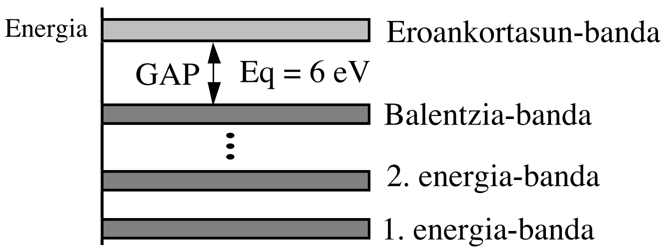
Eroaleak:

Metalak, azken orbitan (balentzia-orbitan, hain zuzen ere), elektroi gutxi izaten dituzten atomoak dira, elektroi horiek askatzea oso erraza izanik. Horregatik, metal-atomoak solido bat osatzeko hurbiltzean eroankortasun-banda balentzia-bandari gainjarrita geratzen da. Hori dela eta, tenperatura normaletan eroankortasun-bandan elektroi aske asko dago eta, gainera, balentzia-bandako elektroi-kopuru handi batek erraz lortzen du eroankortasun-bandara jauzteko behar adina energia. Ondorioz, solidoari potentzial-diferentzia bat ezartzen badiogu elektroiak mugitu egiten dira, korrontea sortuz. Hauxe da metalak eroaleak direla esatearen arrazoia.



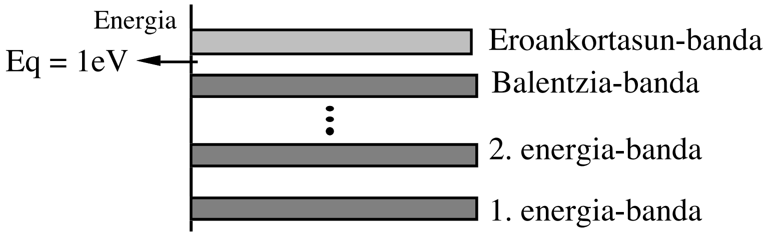
Isolatzaileak:

Dielektriko edo isolatzaileetan eroankortasun- eta balentzia-banda, banda debekatu zabal batez bereizita daude. Hau dela eta, balentzia-bandako elektroiek ezingo dute eroankortasun-bandara jauzi eta eroankortasun-banda ia hutsik egongo da. Balentzia-banda nahiko beteta duten atomoetan, atomo nahiko egonkorretan, gertatzen da hau, eta eroankortasuna mesprezagarria da.

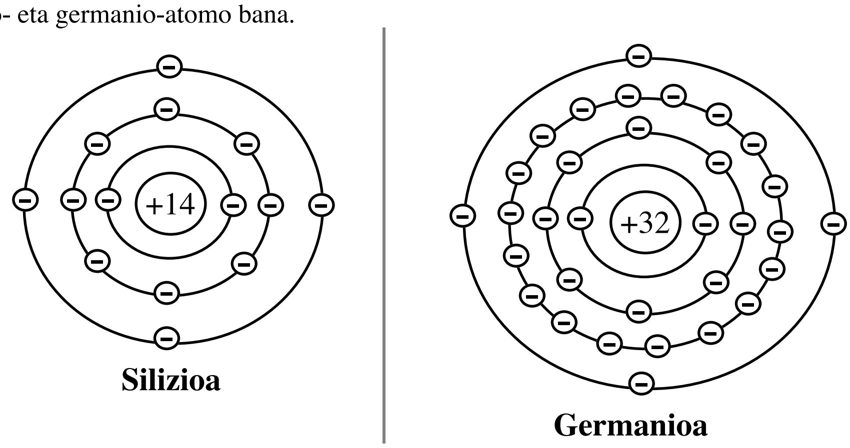


Erdieroaleak:

Taula periodikoko laugarren taldeko elementuak hartu eta kristal bat osatzen badugu, atomoak lotura kobalente bidez lotuko dira, azken mailan zortzi elektroi eduki eta egonkortasuna lortzeko. Zero absolutuaren inguruko tenperaturetan isolatzaileak dira hauek; elektroiek ez dute balentzia-bandaren eta eroankortasun-bandaren artean dagoen *gap*-a gainditzeko adina energia. Tenperatura handitzean, berriz, energia termikoa handitzen da eta balentzia-bandako elektroi batek eroankortasun-bandara pasatzeko adina energia har dezake. Ondorioz, energia handitu ahala eroankortasun-bandan elektroi askeak agertzen dira. Une horretan, material hori eroale bihurtzen da. Batzuetan isolatzaile gisa eta beste batzuetan eroale gisa jokatzen dutenez, erdieroaleak deitzen zaie hauei.



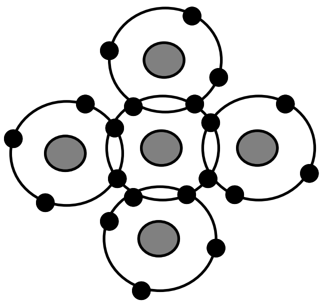
Material erdieroale tipikoenak germanioa eta silizioa dira. Si-ren zenbaki atomikoa 14 da eta materiale erdieroale erabiliena da. Germanioarena, berriz, 32 da. Bi atomo hauek duten bereizitasuna beren balentzia-orbitan lau elektroi edukitzea da. Hona hemen silizio- eta germanio-atomo bana.



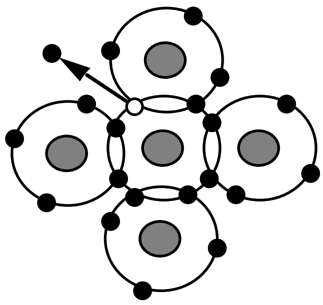
• Erdieroaleak

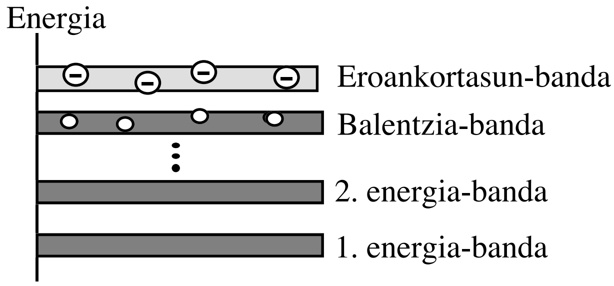
Atomo bat egonkorra izan dadin beharrezkoa du balentzia-orbitan zortzi elektroi edukitzea. Silizio-atomo bakoitzak bere azken geruzan dituen lau elektroiak beste lau atomorekin konpartitzen ditu, horrela, balentzia-orbitan zortzi elektroi eduki eta egonkortasuna lortzeko. Horrelako loturak egiten direnean, elektroiak bi atomorenak izaten dira. Bi atomok elektroiak konpartitzen dituzte. Honi lotura kobalentea deritzo. Bi atomoek indar berdina egiten dute konpartitutako elektroiaren gainean baina kontrako noranzkoan. Kontrako noranzkoetan sortzen diren indar horiek dira atomoak elkartuta mantentzen dituztenak eta silizio-kristalak sortzen dituztenak, hain zuzen ere.

Lotura kobalentea



Inguruneko tenperatura zero absolutua baino altuagoa denean, energia termikoak atomoei dardar eginarazten die. Silizio-atomoen dardara dela eta, zenbait kasutan balentzia-geruzako elektroi bat aska daiteke. Hau gertatzen denean, elektroiak nahikoa energia irabazten du orbita handiago batean kokatzeko. Orbita berri horretan, elektroia elektroi askea izango da eta tarte bat uzten du balentzia-bandan. Tarte horri hutsune izena ematen zaio eta karga positiboa balitz bezala jokatzen du. Hau da, inguruan dituen elektroiak erakarriko ditu.





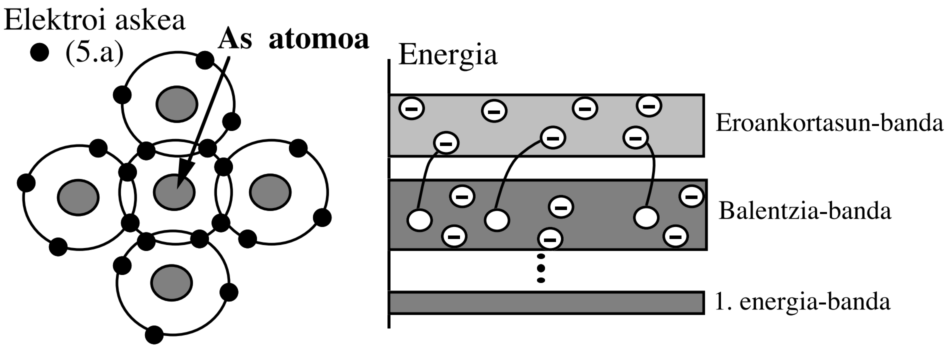
Tenperatura baxuetan silizio-kristal batean dauden hutsune eta elektroi askeen kopurua oso urria da eta isolatzaile gisa jokatzen du. Silizio-kristal puru batean sortzen diren elektroi aske eta hutsuneen kopuruak berdinak dira. Elektroi askeak ausaz higitzen dira kristalean zehar eta zenbait kasutan elektroi aske bat hutsune batera gerturatu eta erakarria izango da hutsune hori betez. Elkarketa honi birkonbinaketa deritzo eta elektroi bat aske bihurtzen denetik hutsune batean erortzen den arte pasatako denborari bizi-iraupena.

Erdieroale intrintsekoak: Erdieroale puruari esaten zaio erdieroale intrintsekoa. Silizio-kristal bat erdieroale purua da atomo guztiak siliziozkoak direnean. Kasu horretan sortzen diren hutsuneen eta elektroi askeen kopuruak berdinak dira. Hau da, eroankortasun-bandan agertzen diren elektroien kopurua eta balentzia-bandan dauden hutsuneen kopurua berdinak dira.

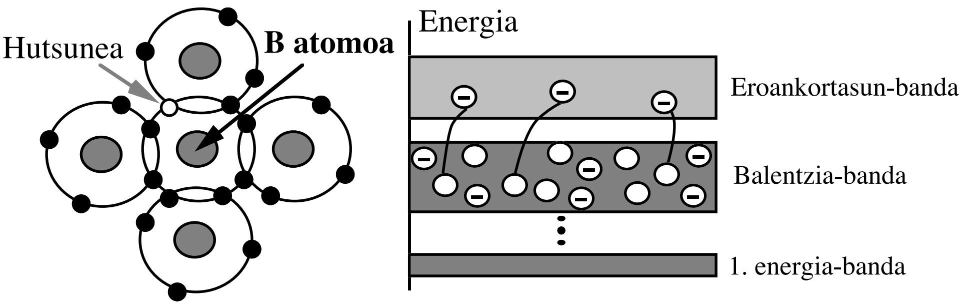
Erdieroale estrintsekoak: Erdieroale estrintsekoak edo ezpuruak lortzeko ezpurutasunak gehitzen zaizkio silizio-kristalari. Hau da, lehendabizi silizio-kristal puru bat sortu eta ondoren, siliziozkoak ez diren beste atomo batzurekin kutsatzen da. Zer da ezpurutasun hauek gehitzean lortzen dena? Azken batean, elektroi aske edo hutsune kopurua handiagotzen da.

N motako erdieroaleak: Balentzia-orbitan bost elektroi dituzten atomoak gehitzen dira silizio-kristal batean. Lehen aipatu den eran, lehenik kristal purua sortu behar da, eta ondoren kutsatu. Gehitzen diren elementuak taula periodikoko V. taldekoak dira: N, P, As, Sb eta Bi; erabilienak P eta As izanik. Hauei ezpurutasun emaile deritze, elektroi "askeak" ematen baitituzte.

Adibidez As-ak bere azken geruzan bost elektroi ditu, hauetako lau, inguruko lau silizio--atomorekin konpartitzen ditu, baina bosgarrena libre geratzen da.



P motako erdieroaleak: Balentzia-orbitan hiru elektroi dituzten atomoak gehitzen dira Si-kristalean. Hemen ere, noski, lehenik silizio-kristal purua sortu eta ondoren kutsatu egin beharko da. Gehitzen diren elementuak taula periodikoko III. taldeko elementuak dira: B, Al, Ga eta In, hain zuzen ere, erabilienak B eta Ga izanik. Atomo hauei ezpurutasun hartzaile deritze, kristal puruan zeuden elektroi aske batzuk "hartzen" baitituzte gehiegizko hutsuneak betetzeko. Atomo hauek azken geruzan dituzten hiru elektroiak inguruko hiru silizio-atomorekin konpartitzen dituzte. Kasu honetan hutsune bat agertzen da lotura kobalentean; hots, egonkortasuna lortzeko, elektroi bat falta da.

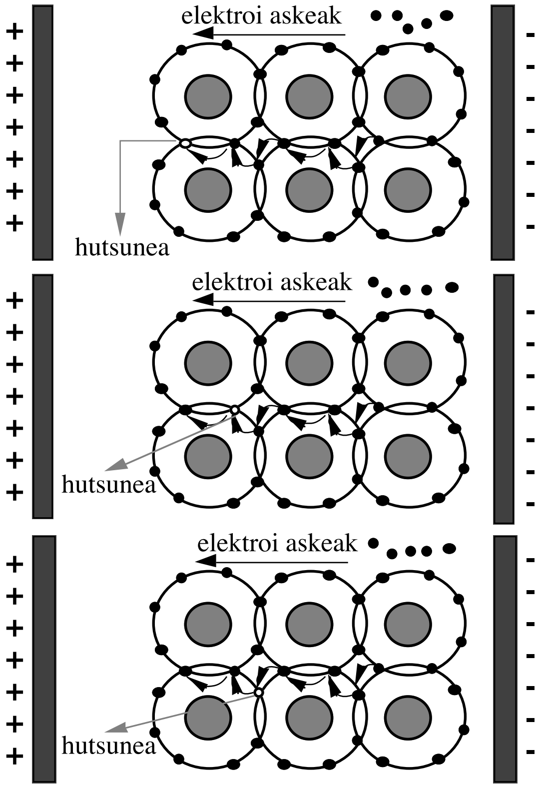


Eroankortasuna erdieroaleetan:

Material eroale baten borneen artean potentzial-diferentzia bat ezartzen badugu, korrontea igaroko da, elektroi askeak eremu elektrikoaren kontrako noranzkoan higituko baitira. Azter dezagun orain erdieroale batean zer gertatzen den.

Eroankortasun-bandan: Elektroi askeak, eroankortasun-bandan daudenak hain zuzen ere, eremu elektrikoaren kontrako noranzkoan higitzen dira, eremuak elektroien gainean egiten duen indarra dela eta.

Balentzia-bandan: Eremu elektrikoak elektroi guztien gainean eragiten du, bai elektroi askeen gainean eta baita lotuta daudenen gainean ere. Eremu elektriko honek nahiko indar badu, gerta daiteke silizio-kristaleko balentzia-bandako elektroi bat bere posiziotik mugitzea eta balentzia-bandako hutsune batekin birkonbinatzea (hutsune batera higitzea, bera zegoen lekuan hutsune berri bat sortuz, hain zuzen ere). Kasu honetan, elektroiak eremu elektrikoaren kontrako noranzkoan higituko dira eta hutsuneak, berriz, eremuaren noranzko berdinean.



Erdieroaleetan, beraz, bi motatako korronteak agertzen dira: alde batetik, eroankortasun-bandan ematen den elektroi askeen mugimendua, eta, beste aldetik, balentzia-bandan ematen den elektroi lotu eta hutsuneen mugimendua. Izan ere, horixe da erdieroaleen bereizitasuna. Eroaleetan, metaletan adibidez, elektroi askeak bakarrik higitzen dira, elektroi lotuak sekula ez. Erdieroaleetan, berriz, korronte osoa elektroiek sortutakoa eta hutsuneek sortutakoa batuz kalkulatzen da, $I = I_e + I_h$, eta hau kontrolagarria da potentzial-diferentzia aldatzean, hutsuneen kopurua eta elektroi askeen kopurua ere aldatzen direlako: hots, kontrolagarriak dira. Korrontearen kontrolagarritasun hori da, hain zuzen ere, elektronikak erdieroaleak erabiltzearen arrazoia.

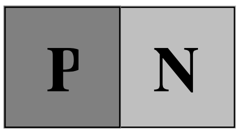
P motako erdieroale batean, hutsune kopurua ugaria denez, korrontearen sortzaile nagusiak edo eramale ugarienak hutsuneak izango dira eta eramale urrienak, berriz, eroankortasun-bandako elektroiak. N motako erdieroaleetan, ordea, eramale ugarienak elektroiak dira eta eramale urrienak, berriz, hutsuneak.

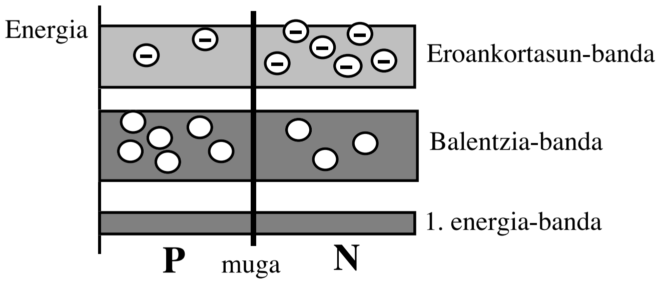
PN juntura

• PN juntura kanpoko polarizaziorik gabe

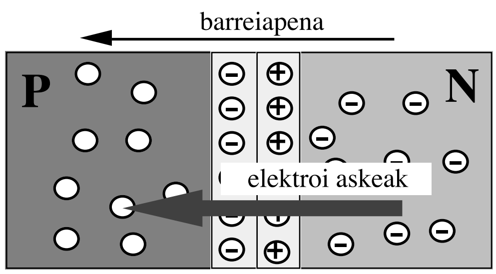
Orain arte azaldutako N eta P motako erdieroaleek, besterik gabe erabiliko bagenitu, ikatzezko erresistentzia batek duen portaeraren antzekoa edukiko lukete. Baina kristal bat kutsatzen bada, erdia P motakoa eta beste erdia N motakoa izan dadin, ezaugarri bereziak sortzen dira. Mota honetako kristalak erabiltzen dira bai diodoetan, bai transistoreetan eta baita zirkuitu integratuetan ere.

Azter dezagun P motako edieroale-zati bat eta N motako beste bat elkartzean gertatzen dena. Horretarako, gogora dezagun P motako eskualdean balentzia-bandako hutsuneak direla ugarienak, eta N motakoan, berriz, eroankortasun-bandako elektroi askeak.





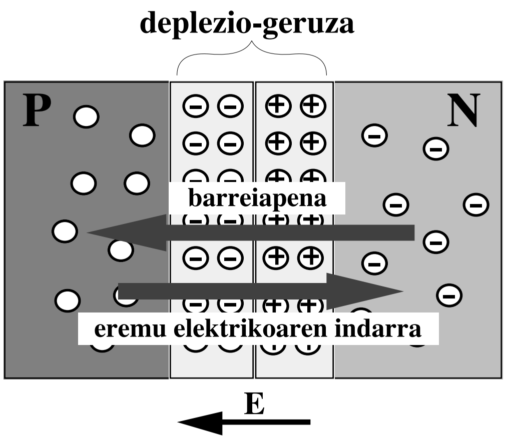
Elektroi askeen artean sortutako aldarapen-indarrak direla eta, elektroiak edozein noranzkotan higitzen dira. P eta N motako material-puxketan, elektroi askeen kontzentrazioak oso desberdinak izanik, kontzentrazioak berdintzeko joera dela eta, N aldean eramale ugarienak diren elektroi aske batzuk PN juntura (muga, alegia) zeharkatuko dute, P aldera pasatzeko; mugimendu horri barreiapena deritzo. N aldeko elektroi aske bat P eskualdean sartzen denean, honetan dagoen hutsune-kontzentrazio altua dela eta, berehala elektroi aske izateari utziko dio hutsune horietako batean eroriz; elektroi askea balentzia-elektroi bihurtuko da, eta hutsunea desagertu egingo da; honi birkonbinaketa esaten zaio. Hau gertatzen den bakoitzean, bi ioi sortzen dira, bat junturaren alde bakoitzean: N aldea utzi duen elektroiak V. taldeko atomo bat positiboki kargatuta utzi du, eta elektroi hori jaso duen P aldeko atomoa, berriz, ioi positibo bihurtu da. Lotura kobalenteak direla eta, ioi horiek finkoak dira, eta ezin dira higitu.



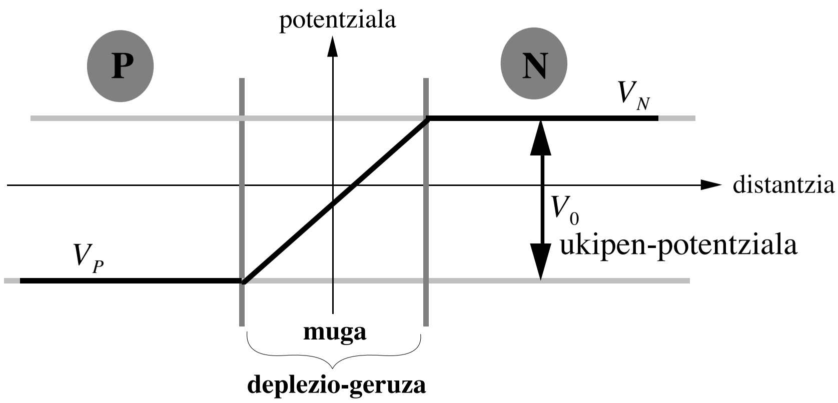
Barreiapenaren eraginez PN junturaren bi aldeetan sortutako karga finkoak direla eta, eremu elektriko bat sortuko da, karga positibotik negatibora zuzenduta.

Beraz, bi fenomeno gertatzen ari dira aldi berean. Alde batetik, elektroi askeen kontzentrazio-diferentzia dela eta, barreiapena gertatzen da N aldetik P aldera eta, ondorioz, junturaren bi aldeetako ioi edo karga finkoen kopuruaren hazkundea. Beste aldetik, barreiapenak eragindako ioi edo karga finkoen kopuruaren hazkunde horrek eremu elektrikoaren areagotzea dakar, eta, hori dela eta, eremu horrek elektroiei barreiapenaren kontrako noranzkoan egiten dien indarra ere handiagotuko da; hau da, zenbat eta elektroi gehiago barreiatu, hainbat eta eragozpen handiagoa izango dute N eskualdetik P eskualdera pasatzeko.

Une batetik aurrera elektroi askeek ezin izango dute eremuaren indarra gainditu, eta barreiapena amaitu egingo da, oreka lortuz. PN junturaren inguruan, erabat lotuta dauden ioi positiboen eta negatiboen multzoak deplezio-geruza osatuko du. Deplezio-geruzak hesi gisa jokatzen du, eta potentzial-langa (banda) ere esaten zaio.

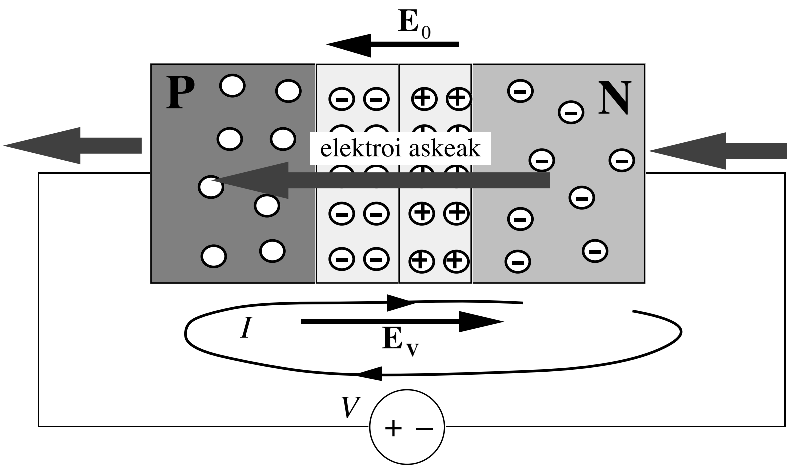


Zona positiboaren eta negatiboaren artean, ukipen-potentzial izena hartzen duen potentzial-diferentzia sortzen da. Potentzial-diferentzia, fabrikazio-prozesuaren menpekoa izan ohi da; siliziozko erdieroaleetan 0,7 V-ekoa izan ohi da, eta germaniozkoetan, berriz, 0,3 V-ekoa.

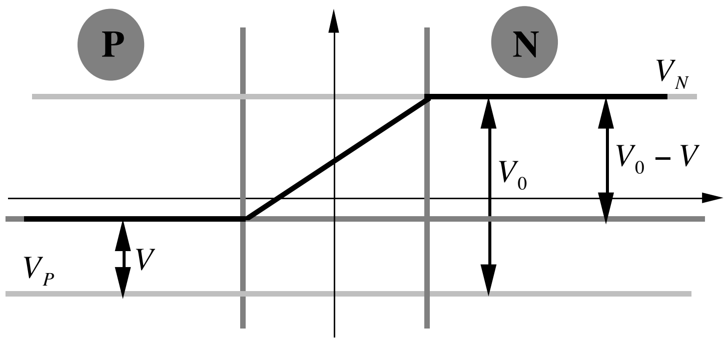


• PN juntura zuzeneko polarizazioan

PN juntura bat zuzeneko polarizazioan edo zuzenki polarizatuta (Z.P.) dago junturari ezarritako tentsioaren alde positiboa P eskualdearekin eta tentsioaren alde negatiboa N eskualdearekin konektatuta daudenean, edo, beste modu batera esanda, korrontea P eskualdetik sartu eta N eskualdetik irteten denean.



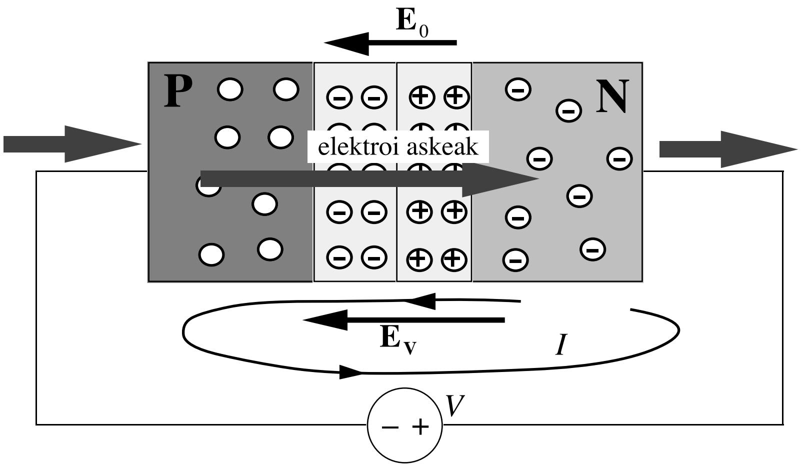
Tentsio-sorgailuak N aldeko elektroi askeak PN junturarantz bultzatzen ditu, eta elektroi horiek juntura zeharkatzeko adina energia izango dute; hots, potentzial-langa gainditu ahal izango dute, kanpoko potentzial-diferentziaren eraginez. Beraz, kanpotik ezarritako potentzial-diferentziaren bidez, deplezio-geruza estuagotu egiten da; edo, beste modu batera esanda, P eskualdearen potentziala handiago egiten da, kanpoko tentsio-sorgailuak junturaren berezko eremu elektrikoaren (**E_0**) kontrako noranzkoan dagoen eremu elektrikoa (**E_V**) sortzen baitu.



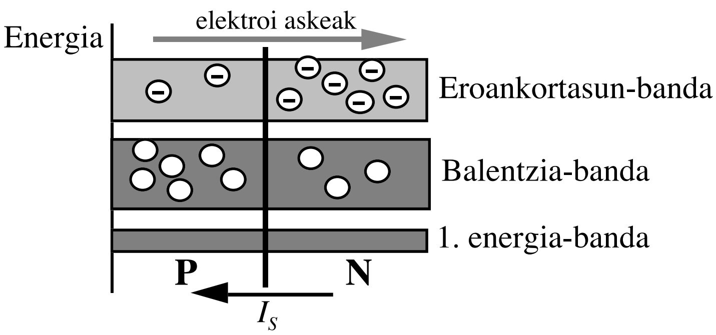
V kanpoko tentsioa handituz doan heinean potentzial-langa txikiagotuz doa. $V = V_0$ denean, potentzial-langa deuseztu egiten da eta une horretatik aurrera elektroiek oztoporik gabe zeharkatuko dute PN juntura; hau da, korrontea egongo da. Hau dela eta, V_0 tentsioari atari-tentsio izena ere ematen zaio.

• PN juntura alderantzizko polarizazioan

PN juntura bat alderantzizko polarizazioan edo alderantziz polarizatuta (A.P.) dago junturari ezarritako tentsioaren alde positiboa junturaren N aldearekin eta alde negatiboa junturaren P aldearekin konektatuta daudenean, edo, beste modu batera esanda, tentsioaren eraginez, korronteak junturaren N aldetik P aldera joateko joera duenean.



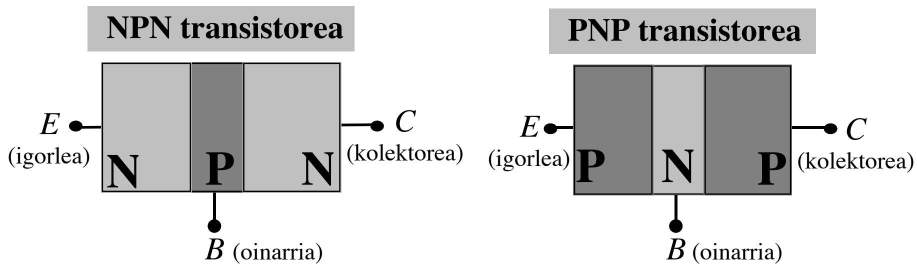
Sorgailuaren mutur positiboak elektroiak erakartzen ditu eta negatiboak, berriz, hutsuneak; ondorioz, elektroiak eta hutsuneak junturatik aldenduz doaz eta deplezio-geruza zabaldu egingo da. Izan ere, kanpoko tentsioak potentzial-langa handitu besterik ez du egiten. Ondorio gisa, ez da apenas korronterik egongo, hau da, ez da apenas PN juntura zeharkatzen duen elektroirik egongo. Dena den, energia-bandak aztertuz, korrontea erabat nulua izango ez dela ikus dezakegu; oso txikia izango da, baina egongo da.



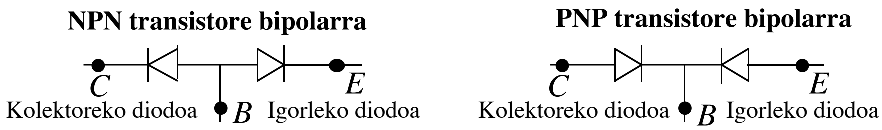
PN junturaren P eskualdean, badaude tenperaturaren kausaz sortutako elektroi aske gutxi batzuk, eta horiek, sorgailuaren alde positiboak erakarriak izango direnez gero, PN juntura zeharkatu eta asetasun-korrontea (I_S) sortuko dute. Era berean, N eskualdeko hutsuneak sorgailuaren alde negatiboak erakarriko ditu. Aipatutako elektroi askeen eta hutsuneen kopurua oso txikia denez, sortzen duten korrontea arbuiagarria da, eta nulua dela kontsideratu ohi da. (Silizioaren kasuan $I_S = 10^{-9}$ A da eta germanioarenean, berriz, $I_S = 10^{-6}$ A.)

• PN juntura transistore bipolarretan

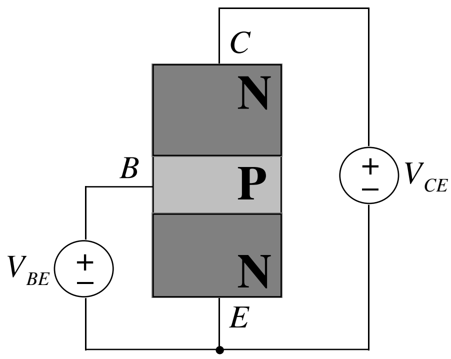
Transistore hauek bi PN junturaz osatuta daudenez gero, bi aukera desberdin agertzen zaizkigu: bi N eskualderen artean txertatutako P motako eskualde bat (NPN motako transistorea) ala P motako bi eskualderen artean gauzatutako N motako eskualde bat (PNP transistorea).



Zenbait kasutan, transistorearen funtzionamendua ulertu ahal izateko, elkarrekin konektatutako bi diodorekin pareka dezakegu; baina transistorearen egitura berezia dela eta, bere funtzionamendu erreala ezin da elkarrekin konektatutako bi diodoenarekin parekatu.



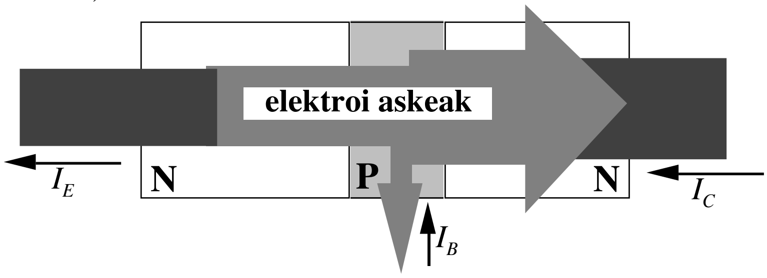
Transistorearen funtzionamenduaren funtsa P eta N eskualdeen zabaleran eta ezpurutasunen kontzentrazioan dago. Funtzionamendu hau ulertzeko, transistorearen polarizaziorik ohikoena azalduko dugu, baita kasu honetarako funtzionamendua ere.



Transistorearen fabrikazio-prozesuan, igorlea asko kutsatzen da, eta oinarria, berriz, estua eta kutsadura gutxikoa egin ohi da. Igorlearen kutsadura handia dela eta, eramale ugarienen kopurua oso handia izango da (elektroiak NPN transistore baten kasuan). Oinarriko kutsadura eskasa dela eta, P motakoa den eskualdeko eramale ugarienen, hau da hutsuneen, kopurua txikia da. Gainera, oinarriaren zabalera txikia ezin da ahaztu.

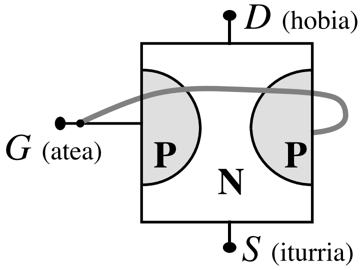
Oinarriaren eta igorlearen arteko potentzial-diferentzia dela eta, oinarrira pasatzen diren elektroi askeak ez dira birkonbinatzen (aukera gutxi baitute) eta eramale urrien motakoak bihurtzen dira, P motakoa den oinarrian. Oinarria oso estua denez, bertan sartzen diren elektroiak, oinarri-kolektore junturaren alderantzizko polarizazioaren eraginez sortutako eremu elektrikotik gertu daude. Gogora dezagun, alderantzizko polarizazioan PN junturatik gertu dauden eramale ugarienak aldendu egiten direla eta eramale urrienak, berriz, erakarriak direla, juntura zeharkatuz. Horrela, junturara gerturatzen den edozein elektroi kolektorera erakarria da, kolektoreko korrontea sortuz.

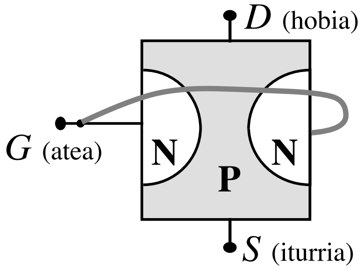
Transistorearen diseinua dela eta, oinarrian sartzen diren igorleko eramale ugarienen arteko gehienek, oinarri-kolektore PN juntura zeharkatzen dute. Horrela, maiz gertatzen da oinarri-kolektore korrontea, igorle-oinarri korrontea baino handiagoa izatea. Honek transistoreari korronte-anplifikatzaile gisa lan egiteko gaitasuna ematen dio; hau da, oinarriko korronte txiki bat izanik, kolektoreko korronte handia lor daiteke. Ondoko irudian agertzen da NPN transistore batean elektroien mugimendua nolakoa izango litzatekeen. Gogora dezagun, korrontearen noranzkoa elektroien mugimenduaren noranzkoaren kontrakoa dela. (PNP motako transistore batean irudikatutako noranzkoan hutsuneak higituko lirateke.)



• PN juntura JFET transistoreetan

Transistore hauek ere PN motako bi junturaz osatuta daude, baina transistore bipolarrenarekin alderatuta, egitura erabat desberdina da.



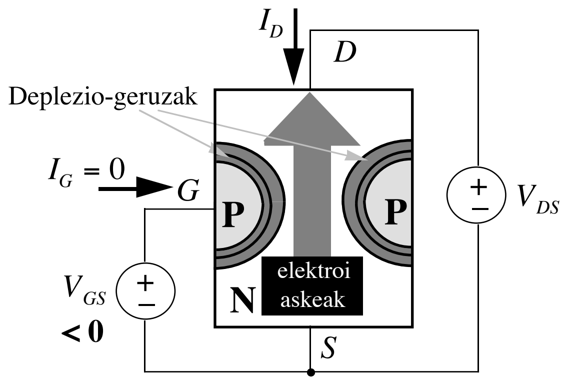


JFET transistorearen funtzionamenduaren funtsa ere oso desberdina da transistore bipolarrenekin alderatuta, kasu honetan ez elektroiek ez eta hutsuneek ere ez baitituzte PN junturak zeharkatzen, junturak A.P. baitaude; kargak, ordea, bi junturen arteko kanalean zehar higitzen dira. Horregatik esaten zaie N kanaleko JFET transistorea ala P kanaleko JFET transistorea. N kanalekoan korrontea sortzeko elektroiak soilik mugitzen dira; eta bestean, berriz, hutsuneak soilik. Horregatik esaten da unipolarrak direla.

Kontrol-terminalari atea deritzo, *G* (*gate*), eta beste biei bere funtzionamenduaren arabera: bata iturria da, *S* (*source*), kargak (elektroiak edo hutsuneak, transistore-motaren arabera) terminal honetatik abiatzen direlako; eta bestea hobia da, *D* (*drain*), kargak (elektroiak edo hutsuneak) hona heltzen direlako.

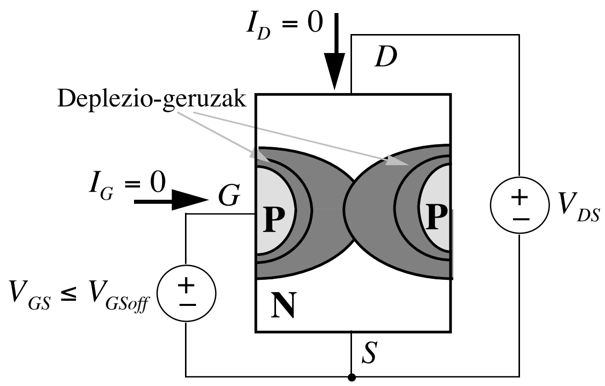
Azter dezagun N kanaleko JFET transistore baten funtzionamendua. Esan bezala, elektroiek PN junturak zeharka ez ditzaten, junturak alderantziz polarizatzen dira; P motako bi zatiak elkarri lotuta daudenez gero, bi junturak polarizatzeko, nahikoa da atearen eta iturriaren artean V_{GS} tentsio egokia ezartzea; hots, N kanaleko transistorean tentsio negatiboa jartzea. Modu horretan, ateko korrontea zero izango da ($I_G = 0$).

Bestalde, kanalean zehar korrontea igarotzeko, beste bi terminalen artean ere —hots, hobiaren eta iturriaren artean— potentzial-diferentzia bat ezarri behar da, V_{DS}.



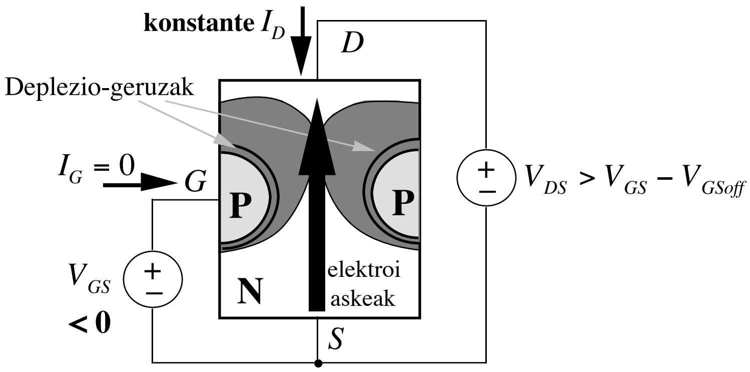
V_{GS} kontrol-tentsioaren balioaren bitartez, deplezio-geruzen zabalera kontrola dezakegu, eta, horrekin batera, kanalarena ere, hau da, elektroiak pasatzeko duten bidearen zabalera ere.

V_{GS} tentsioak maila jakin bat (V_{GSoff}) gainditzen duenean, kanala itxi egingo da, eta ez da korronterik egongo; orduan, kanala ito egin dela esaten da, eta V_{GSoff} balioari itotze-tentsio izena ematen zaio. Transistorea kortean egongo da kasu horretan.



Bestalde, hobiaren eta iturriaren arteko potentzial-diferentziaren eraginez, iturriko elektroi askeak hobirantz higituko dira, I_D korrontea sortuz; V_{GS} konstante mantenduz gero, V_{DS} handitzean I_D korrontea ere handituko da linealki; transistoreak erresistentzia bat bailitzen jokatzen du. Orduan, zona ohmikoan dagoela esaten da.

Baina hor ere, hobiaren aldean, V_{DS} tentsioaren eraginez, deplezio-geruzen zabalera aldatu egiten da; izan ere, deplezio-geruzen zabalera desberdina izango da, iturriaren aldean eta hobiaren aldean. Horrela, V_{GS} tentsioak itotze-tentsioa gainditu ez arren, $V_{GD} = V_{GS} - V_{DS}$ tentsioak V_{GSoff} balioa gainditzen duenean, kanala ito egingo da hobiaren aldean; alabaina, kasu horretan kanala erabat itota ez dagoenez gero —soilik hobiaren aldean—, korrontea pasatzen da kanaletik. Hori bai, hortik aurrera V_{DS} tentsioa gainditu arren, I_D korrontea konstante mantenduko da; orduan, transistorea asetasunean dagoela esaten da, ez baitu korronte gehiagorik onartzen.

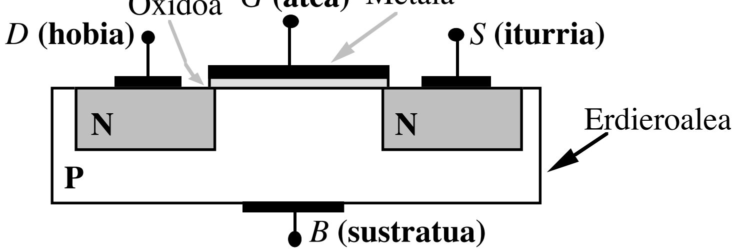


• PN juntura MOSFET transistoreetan

Transistore hauek ere PN motako bi junturaz osatuta dauden arren, ez da hori transistore hauen ezaugarri nagusia, metal-oxido-erdieroale (*Metal-Oxide-Semiconductor*) egitura baizik, horixe baita bere funtzionamenduaren oinarri. Kasu honetan ere, bi transistore-mota bereizten dira: N kanalekoak edo **NMOS**, P motako eskualde zabal bat eta N motako bi eskualde txikiz osatuak; eta P kanalekoak edo **PMOS**, N motako eskualde zabal bat eta P motako bi eskualde txikiz osatutakoak.

Zabaltze-motako MOS transistoreak:

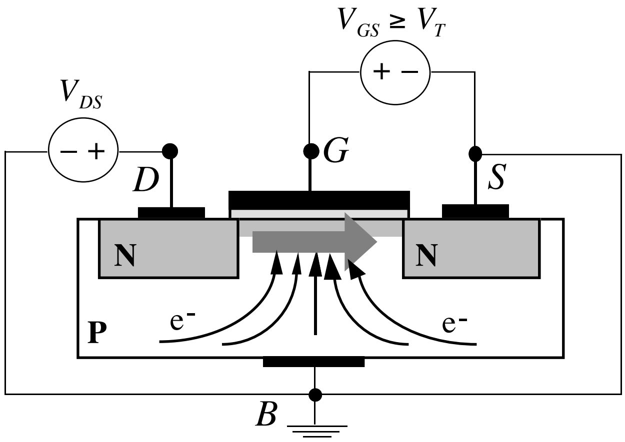
Zabaltze-motako NMOS transistore baten egitura ondoko irudian agertzen da.



Transistore honetan, hobiaren eta iturriaren artean korrontea egon dadin, beharrezkoa da *D* eta *S*-ren artean N motako kanal bat sortzea. Kanal hori izango da transistoreari izena ematen diona. (Hots, kanala P motakoa izango balitz, transistorea PMOS motakoa izango litzateke.)

Kanala sortu ahal izateko, *G*-ren (atearen) eta *S*-ren (iturriaren) artean potentzial-diferentzia positibo bat ezarri beharko dugu. V_{GS} tentsioa, atari-tentsioa (V_T) delakoa baino handiagoa izan beharko da kanala sortzeko. Hau da, $V_{GS} = 0$ denean, inoiz ez da korronterik pasatuko *D*-tik *S*-ra, $V_{DS} > 0$ izan arren.

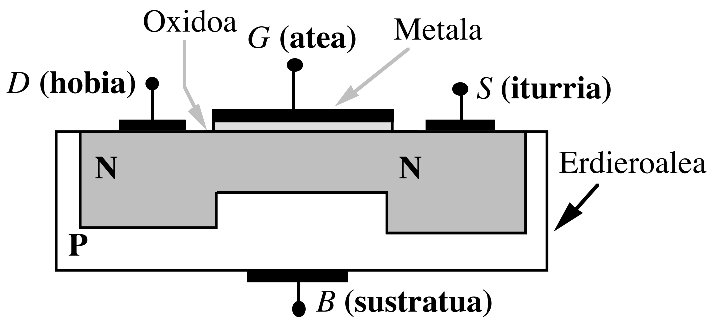
Edozein kasutan, ateko korrontea beti nulua da, isolatzailea (oxidoa) dagoelako (hau dela eta, IGFET izena ere eman ohi zaie: *Isolated Gate* FET = Ate Isolatuko FET).



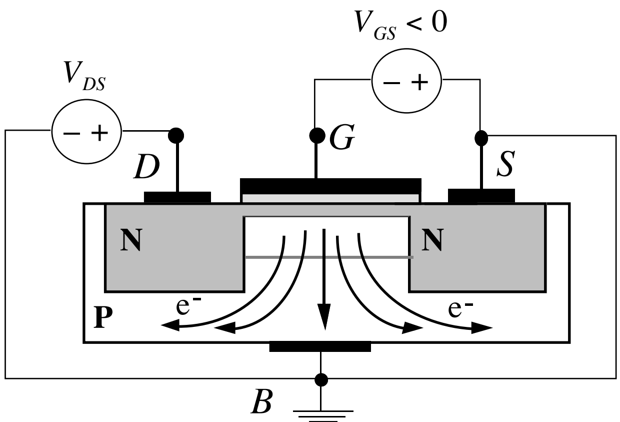
Baina, atea nahikoa positiboa denean, V_{GS} tentsioari dagokion eremu elektrikoa dela kausa, ateak P eskualdeko elektroi libreak erakartzen ditu. Elektroi hauek, oxidoa (isolatzailea) zeharkatu ezin dutenez, oxidotik gertu dauden hutsuneekin birkonbinatzen dira, hasieran behintzat. Une batetik aurrera, oxidoaren inguruan dauden hutsune guztiak elektroiez beteko dira, eta, V_{DS} tentsioari esker, elektroi askeak iturritik hobirantz higitzen hasiko dira: korrontea sortuko da, *D*-tik *S*-ra hain zuzen ere. Beraz, eragina oxidoaren inguruan N motako erdieroale zati bat sortzearen berdina da: kanala hain zuzen. Zabaltze-motako transistore esaten zaie, V_{GS} tentsioaren bidez N motako kanala sortzeaz gain, bere zabalera kontrola daitekeelako.

Estuagotze-motako MOS transistoreak:

Transistore hauek zabaltze-motakoen ezaugarri nagusiak dituzte, baina desberdintasun nabaria kanala da, zeren, hauetan, fabrikazio-prozesutik bertatik, *D* eta *S* terminalen artean kanal bat baitago, ondoko irudian agertzen den bezala. Beraz, funtzionamendua lortzeko, ez da kanala sortu behar. Kasu honetan ere, bi transistore-mota bereizten dira: N kanalekoak eta P kanalekoak. NMOS transistore baten egitura ondoko irudian agertzen dena da.



Transistore honetan, hobiaren eta iturriaren artean potentzial-diferentzia bat ezarriz gero, korrontea egongo da *D* eta *S*-ren artean, nahiz eta atea polarizatu gabe egon (hots V_{GS} = 0 izan arren), N motako kanala desegiten ez den artean. Kanal hori dela eta, transistore honen funtzionamendua zabaltze-motako transistorearenaren kontrakoa da: kasu honetan, *G* atea polarizatu ohi da kanala estuagotzeko (hortik izena). Horretarako, *G*-ren (atearen) eta *S*-ren (iturriaren) artean potentzial-diferentzia negatiboa ezarri beharko dugu.



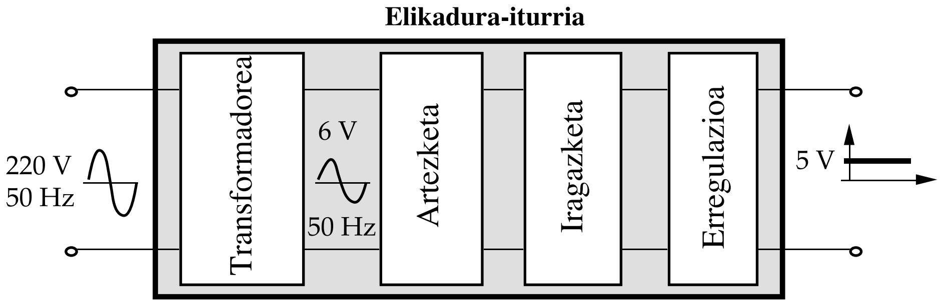
Atea negatiboa denean, N eskualdeko elektroi libreen gainean aldarapen-indarra sortzen du, eta hauek P aldera mugituko dira. Ondorioz, oxidoaren inguruan dagoen elektroi askeen kopurua txikiagotu egingo da, edo, beste modu batera esanda, N motako kanala estuagotu egingo da. Elektroi hauek, P eskualdera pasatu eta bertako hutsuneekin birkonbinatuko dira ziurrenik. Atea nahiko negatiboa denean, N kanala erabat desagertuko da eta bai eta *D*-tik *S*-ra zegoen korrontea ere. Hori V_{GSoff} itotze-tentsio izeneko tentsioarekin lortzen da, orduan kanala "ito" egiten baita. Beraz, eragina, oxidoaren inguruan zegoen N motako erdieroale zatia desagerrarazteearen parekoa da. (Estuagotze--motako MOS transistoreen funtzionamendua, beraz, JFET transistoreenaren parekoa da.)

E4. Diodoaren aplikazio bat: artezgailua

• Tentsio zuzeneko sorgailua

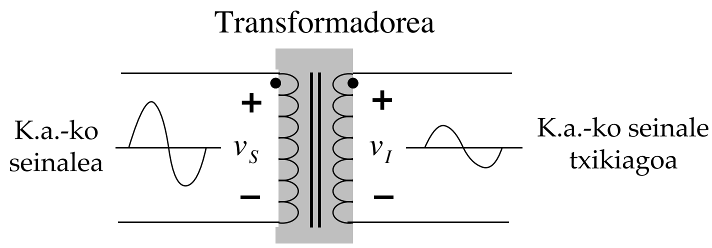
Edozein gailu elektroniko elikatzeko elektrizitatea (gure etxeetara iristen den sare elektrikoa) erabiltzen dugunean, artezgailu bat erabiltzen dugu. Gailu elektronikoek ezin dute sare elektrikoak ematen digun korrontearekin zuzenean lan egin: beharrezkoa da korronte hori eraldatzea. Izan ere, sare elektrikoak korronte alternoa ematen digu (tentsio handia eta maiztasun txikikoa), eta gailu elektronikoek korronte zuzenarekin (balio txikiko seinale konstantea) lan egiten dute.

Gure gailu elektronikoak elikatzen dituen elikadura-iturriak, korronte alternoa korronte zuzen bihurtu ahal izateko, behar-beharrezkoak ditu elkarrekin konektatutako lau etapa.



Etapa guztiak dira beharrezkoak, sare elektrikoko seinale bat hartu eta gailu elektroniko batentzat erabilgarri bihurtzeko. Guk sakonkien aztertuko duguna, artezgailuari dagokiona da, diodoak erabiltzen baititu.

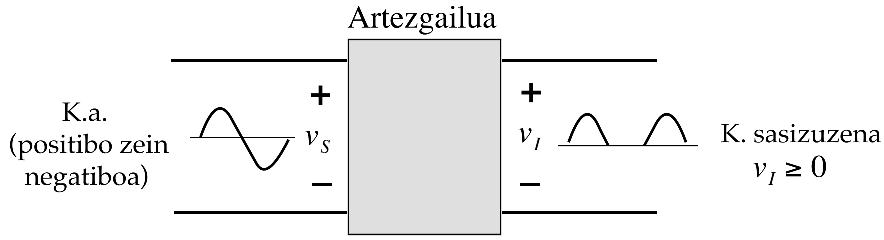
Transformadorea: transformadoreak seinale alterno bat hartzen du sarrera gisa, eta txikiagotu edo handiagotu egiten du. Gure kasuan, sare elektrikoko seinalea gailu elektronikoentzat handiegia denez, seinalea txikiagotu egingo du. Hain zuzen ere, $V_{sarrera}$ = 220 V-eko seinalea jasoko du sarreran eta $V_{irteera}$ = 5 ÷ 7 V-eko seinalea emango digu irteeran, hori baita gailu elektronikoek erabiltzen dutena.



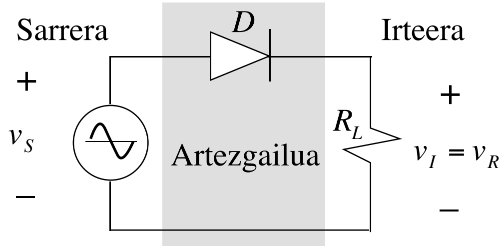
Uhina txikiagotzea lortu dugunean, hurrengo pausoa artezgailua jartzea da.

Uhin erdiko artezgailua:

Oro har, artezgailu batek korronte alternoa (positiboa eta negatiboa) hartzen du sarrera gisa; eta irteera gisa, berriz, korronte sasizuzena ematen du. Sasizuzena esaten zaio, erabat positiboa delako, baina konstantea ez delako.

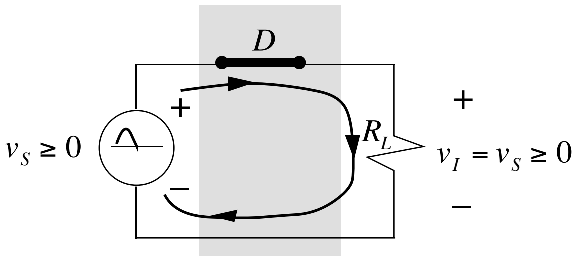


Azter dezagun uhin erdiko artezgailu baten funtzionamendua. Demagun korronte alternoko sarrera-seinale bat hartu eta seriean konektatutako diodo batez eta erresistentzia batez osatutako zirkuitua dugula. Artezgailuaren efektua aztertzeko, sarrera eta irteera konparatu beharko ditugu. Irteera, erresistentziaren borneen arteko potentzial-diferentzia da.



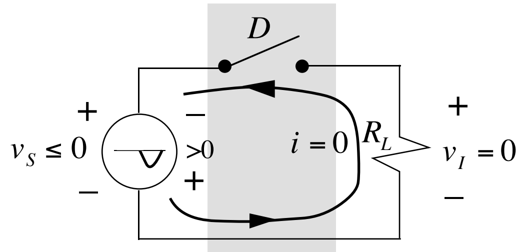
Zer gertatuko zaio seinaleari zirkuituan zehar? Seinale periodikoan bi zona bereiz ditzakegu, bi periodo-erdiak, hain zuzen ere, non batean tentsioa positiboa eta bestean negatiboa den; ondorioz, irteera ere bietan desberdina izango da.

1.- $v_S > 0 \rightarrow i > 0$ $\quad 0 \leq t \leq T/2$



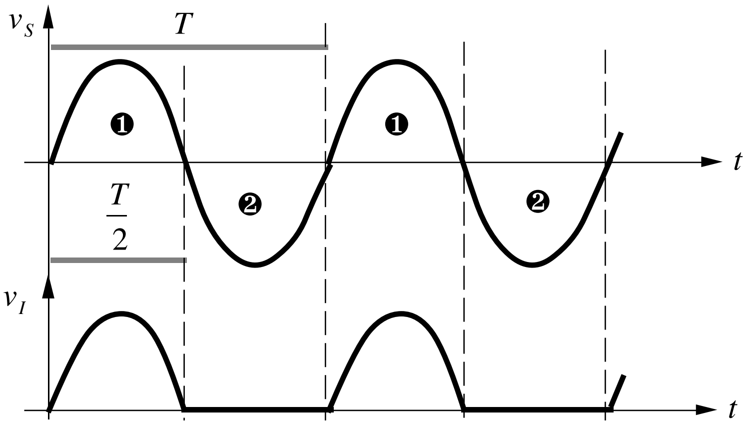
Kasu honetan diodoa Z.P. egongo da; hau da, korrontea eroango du. Diodo ideala izango bagenu, irteerako tentsioa sarrerakoaren berdina izango litzateke. Bestela, bigarren hurbilketa erabiliz, $v_I = v_S - 0{,}7$ izango da.

2.- v_S **< 0** → i **< 0** $T/2 \leq t \leq T$



Kasu honetan diodoa A.P. dago eta zirkuituaren funtzionamendua aztertu ahal izateko zirkuitu irekiaz ordezkatu beharko dugu; ondorioz, korronterik egongo ez denez, $V_{irteera}$ = 0 izango da.

Ondorioz, diodoa ideala izango balitz, sarrerako seinalearen erdia irteeran kopiatuko litzateke, eta beste erdia ez. Hemendik datorkio izena: uhin erdiko artezgailua. Bestalde, lortu dugun seinalea ez da konstantea, baina beti positiboa da; horregatik, sasizuzena dela esaten da.



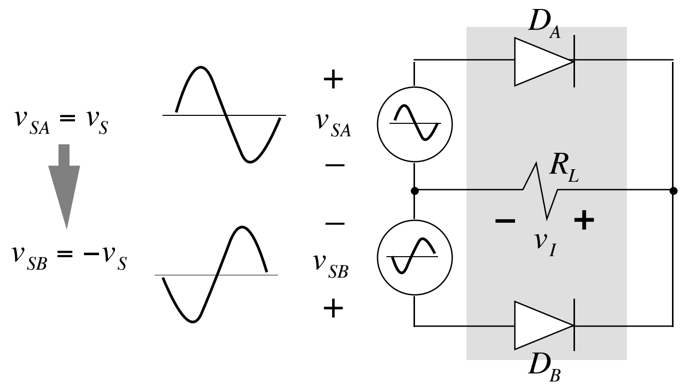
Seinale honen balioa polimetro batez neurtzen saiatuko bagina, hau da, korronte zuzenean emango lukeen balioa neurtuko bagenu, lortuko genukeen balioa batez besteko balioa izango litzateke, eta balioa v_S seinalearen anplitudearen %31,8a izango litzateke: $V_{DC} = 0{,}318A$.

Diodoak errealak direnez, zuzeneko polarizazioan daudenean ere, irteeran lortzen den seinalea ez da sarrerako seinalearen berdina izango. Bigarren hurbilketa erabiliko bagenu: $v_{irteera} = v_r = v_S - 0{,}7$ V izango litzateke.

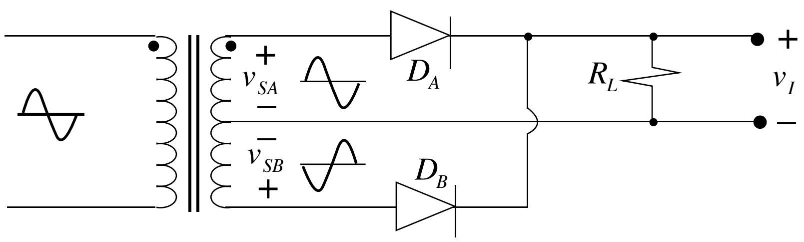
Uhin osoko artezgailua:

Uhin erdiko artezgailua erabiliz, irteerako seinalean uhin erdia besterik ez dugu lortzen; uhin osoa lortzeko, bi aukera ditugu:

1.- <u>Lehenengo hurbilketa</u>: uhin erdiko artezgailua bi sarrerekin errepikatzea.



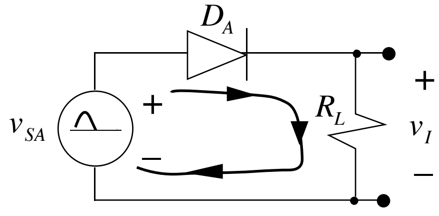
Transformadore bakarra erabiltzen denez gero, bi seinale alterno kontrajarriak lortzeko, transformadore berezia behar da: irteerako erdiko puntua eskuragarri duen bat, hain zuzen ere.



Transformadorearen erdiko puntuarekin eginiko konexioa dela eta, azpiziklo desberdinetan funtzionatzen duten uhin erdiko bi artezgailuren baliokidea da zirkuitu hori.

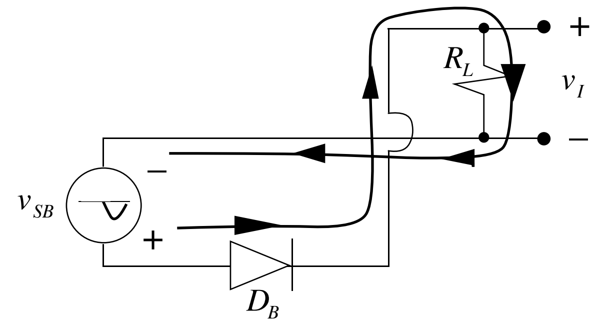
Sarreran oinarrituz, irteera nolakoa den aztertzeko, lehen bezala bi eskualde bereizi beharko dira, seinaleen bi periodo-erdiak berriro ere.

1.– v_{SA} > 0 eta v_{SB} < 0.



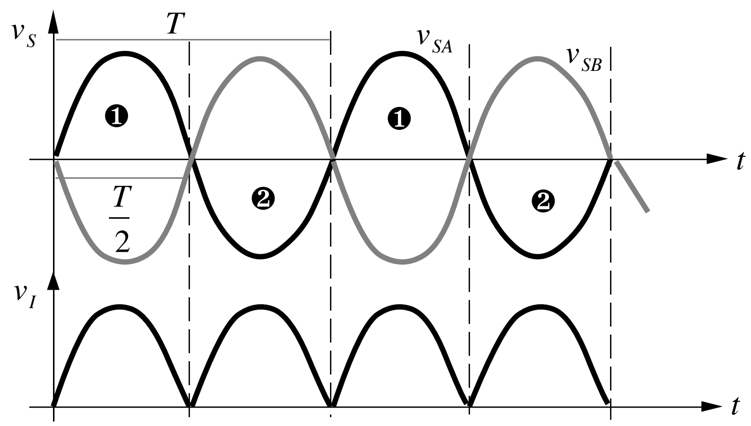
Kasu honetan D_A diodoa Z.P. egongo da eta D_B, berriz, A.P.. Erresistentziara iritsiko den korrontea, beraz, D_A diodotik igarotzen dena izango da. D_A diodoa ideala dela suposatzen badugu, kasu honetan $v_i = v_{SA}$ dela ondorioztatu ahal izango dugu. (Diodoak siliziozkoak direla suposatu eta 2. hurbilketa erabiliz, $v_i = v_{SA} - 0,7$ V izango litzateke.)

2.– v_{SA} < 0 eta v_{SB} > 0.



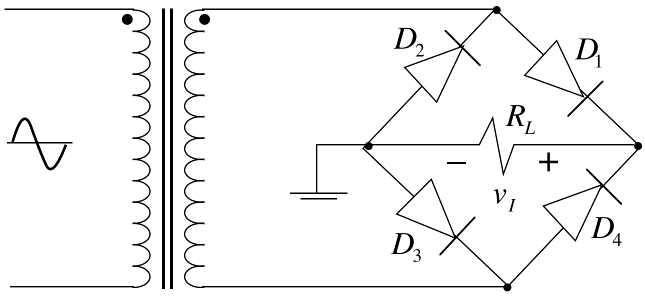
Kasu honetan, D_A diodoa A.P. egongo da, eta, ondorioz, bertatik ez da korronterik pasatuko; hau da, irteeran ez du eraginik edukiko. D_B diodoa, berriz, Z.P. dago. Bertatik korrontea pasatzen da, zeina korapiloraino hedatu eta erresistentziatik pasatuko den. D_B diodoa ideala dela suposatzen badugu, kasu honetan $v_i = v_{SB} = -v_{SA} = -v_S$. (Diodoak siliziozkoak direla suposatu eta 2. hurbilketa erabiliz, $v_i = v_{SB} - 0{,}7 = (-v_S - 0{,}7)$ V izango litzateke.)

Artezgailu honen irteeran lortutako uhina ere osoki positiboa da. Beraz, orain ere, korronte sasizuzena da daukaguna. Bestalde uhin osoa lortu dugu, hemendik izena: uhin osoko artezgailua.



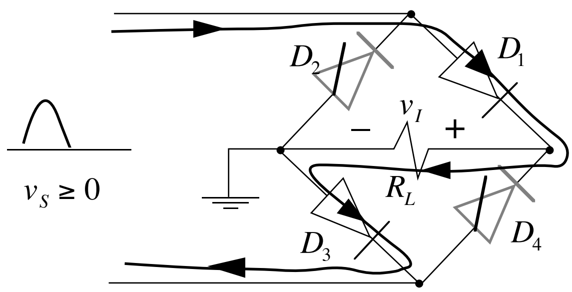
Artezgailua elikadura-iturriaren zati bat da, eta, ondorioz, helburua korronte zuzena lortzea den kasu honetan V_{DC} kalkulatzen badugu, aurrekoan baino balio handiagoa lortuko dugu ($V_{DC} = 0{,}636A$).

2.- **Zubi-artezgailua**. Badago uhin osoko artezgailua lortzeko modu bat, transformadorearen erdiko puntuan konexiorik egin gabe. Kasu honetan lau diodo artezle beharko dira.



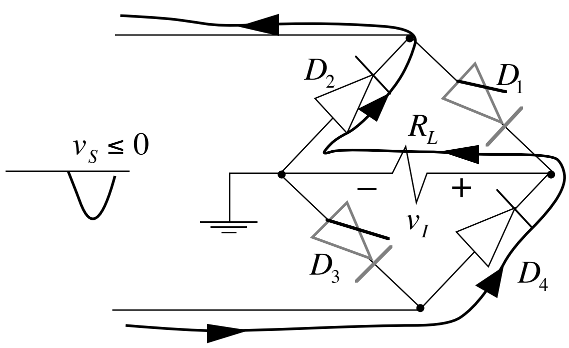
Azter dezagun zer gertatzen den sarrerako seinalearen azpiziklo bakoitzean.

1.– $v_S > 0$.

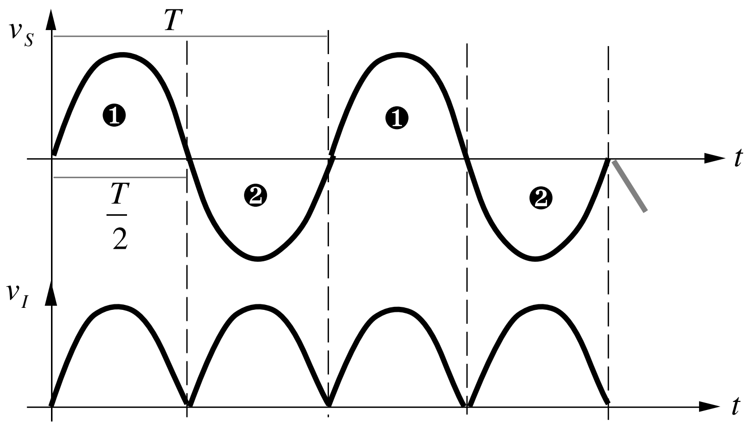


Kasu honetan D_1 eta D_3 diodoak Z.P. daude eta D_2 eta D_4 diodoak, berriz, A.P.; beraz, erresistentziatik korrontea pasatuko da. Diodoak idealak izango balira, $v_i = v_S$ izango litzateke; eta diodoak siliziozkoak direla suposatu eta 2. hurbilketa erabiltzen badugu, berriz, $v_i = v_S - 1{,}4$ V.

2.– $v_S < 0$



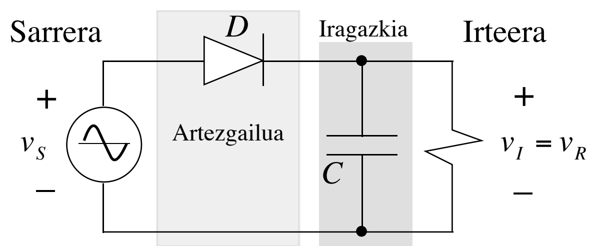
Kasu honetan, D_2 eta D_4 diodoak Z.P. daude eta D_1 eta D_3 diodoak, berriz, A.P.. Erresistentziatik korrontea pasatuko da aurreko kasuan pasatzen zen noranzko berean, tarte honetan $v_i = -v_S$ izanik (diodoak idealak diren kasuan, noski). Diodoak siliziozkoak direla suposatu eta 2. hurbilketa erabiltzen badugu, berriz, $v_i = (-v_S - 1{,}4)$ V.



Zubi-artezgailuarekin ere, beraz, irteeran lortutako uhina osoa da; horrexegatik da hau ere uhin osoko artezgailua.

Hasierako elikadura-iturrira itzuliz, dagoeneko artezgailuaren bidez balio positiboak baino ez dituen seinalea lortu dugu, baina ez dugu oraindik korronte zuzena lortu. Seinale zuzena lortzeko hurrengo pausoa, iragazki bat gehitzea da.

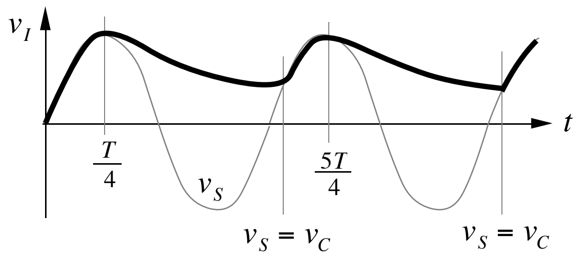
Iragazkia: iragazkirik ezagunena kondentsadorea da, eta honek egiten duena, artezgailuan lortutako seinalea leuntzea da. Demagun uhin erdiko artezgailuari kondentsadore bat gehitu diogula, eta lehen egindako moduan, sarrera aldatzen doan heinean, irteera-tentsioa analizatu nahi dugula.



Hasieran kondentsadorea deskargatuta dagoela suposatzen badugu, $t = 0$ eta $t = T/4$ artean diodoa Z.P. egongo da. Ondorioz, kondentsadorea kargatzen arituko da, eta erresistentziak korrontea jasoko du sorgailutik.

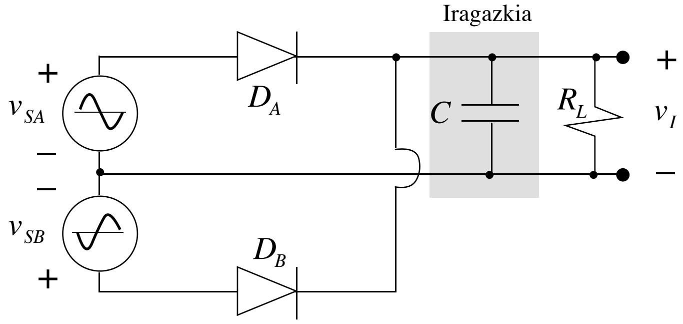
$t = T/4$ unea iristean, sarrerako seinalea txikiagotzen hasiko da; baina, dakigunez, kondentsadoreak atzerapena duenez, bere muturren arteko tentsioa deskargatzen hasteko denbora-tarte labur bat beharko du. Horren ondorioz, diodoaren muturren arteko tentsioa $v_D = v_S - v_C$ dela kontuan hartuz (goiko irudiko zirkuituko ezkerreko mailan KTL aplikatuz), diodoa A.P. geldituko da, $v_C > v_S$ izango delako, atzerapenaren eraginez. Ondorioz, ez da korronterik igaroko diodoan zehar. Une horretan kondentsadorea deskargatzen hasiko da, eta erresistentziatik kondentsadorearen deskargak sorrarazten duen korrontea pasatuko da.

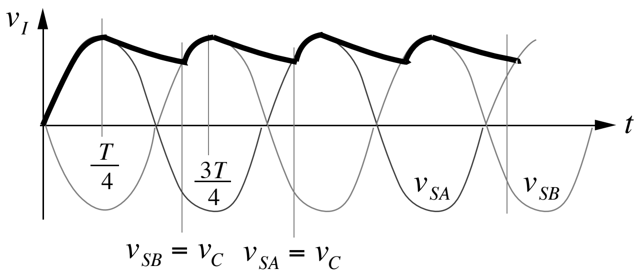
Egoera horrek diodoa berriz ere Z.P. egotera pasatzen den arte iraungo du, hau da, sorgailuaren tentsioa kondentsadorearena baino handiagoa izatera pasatzen den arte. Hau $t = t_1$ unean gertatuko da. Une horretatik aurrera, eta $t = 5T/4$ unera arte, kondentsadorea kargatuz joango da berriro, eta erresistentziatik pasatuko den korrontearen jatorria sorgailua izango da berriz ere.



Irteeran lortutako uhinak korronte zuzenaren antz handiagoa du, oraindik konstantea ez bada ere. Uhinak kirimiladura izeneko gorabehera batzuk baino ez ditu.

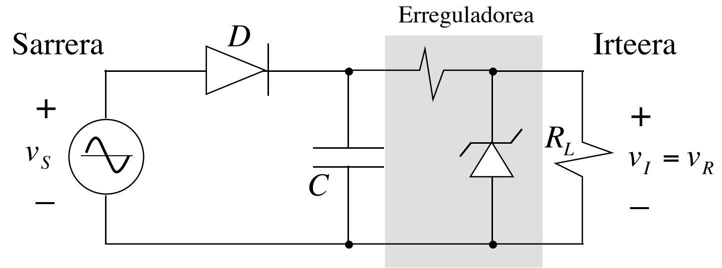
Iragazkia (kondentsadorea) uhin osoko artezgailuari gehitzen badiogu, lortuko dugun kirimiladura txikiagoa izango da.



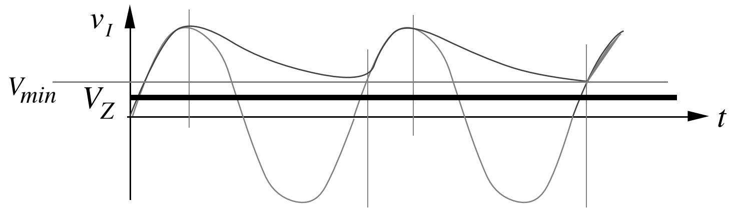


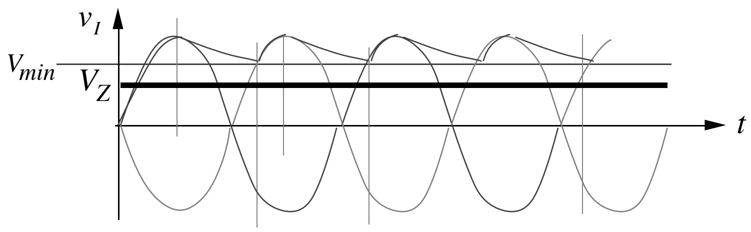
Benetako korronte zuzena lortu ahal izateko falta zaiguna, erreguladorea da.

Erreguladorea: Zener diodoak tentsio-mailak konstante mantentzeko erabiltzen dira, hau da, erregulazio-lanetarako. Beraz, gure zirkuituari, iragazkiaren ondoko irteera are konstanteagoa izan dadin, Zener diodo bat gehi diezaiokegu.



Iragazkiaren irteeran lortzen den seinale kirimilatuaren tentsiorik baxuena nahikoa handia baldin bada, Zener diodoa A.P. Zener eskualdean funtzionarazteko, hots, $V_{min} > V_Z$ baldin bada, Zener diodoa alderantziz polarizatuta egongo da Zener eskualdean eta, Zener diodoaren modeloa kontuan izanik, badakigu kasu horretan irteeran tentsio konstante bat izango dela, Zener tentsioa, hain zuzen ere.





Irudiak aztertuz, agerikoa da uhin osoko artezgailuaren kasuan tentsio zuzen altuagoa lor daitekeela uhin erdikoarekin baino.

Beraz, laburbilduz, artezgailuari esker gure helburua lortu dugu, hots, korronte alternoa korronte zuzen bihurtu dugu.

Bukatzeko, honelako tentsio-iturriak edo elikadura-iturriak, sare elektrikoaren bitartez elikatzen diren gailu elektroniko guztietan daudela esan behar dugu.

Bibliografia

- William H. Hayt Jr., Jack E. Kemmerly (1988).
  Análisis de circuitos en ingeniería. (4. edizioa)
  McGraw-Hill/Interamericana

- Donald E. Scott (1988).
  Introducción al análisis de circuitos: Un enfoque sistémico.
  McGraw-Hill/Interamericana

- James W. Nilsson (1995).
  Circuitos eléctricos. (4. edizioa)
  Addison-Wesley Iberoamericana

- Bernard Grob (1997).
  Basic electronics. (8. edizioa)
  Glencoe McGraw-Hill

- Albert Paul Malvino (1993).
  Principios de electrónica. (5. edizioa)
  McGraw-Hill/Interamericana

- Adel S. Sedra, Kenneth C. Smith (1998).
  Microelectronic Circuits. (4. edizioa)
  Oxford University Press

- Donald L. Schilling, Charles Belove (1993).
  Circuitos electrónicos. Discretos e integrados. (3. edizioa)
  McGraw-Hill/Interamericana

- L. Cuesta, A. Gil Padilla, F. Remiro (1991).
  Electrónica analógica. Análisis de circuitos. Amplificación. Sistemas de alimentación
  Serie Schaum. McGraw-Hill/Interamericana

Aurkibide alfabetikoa