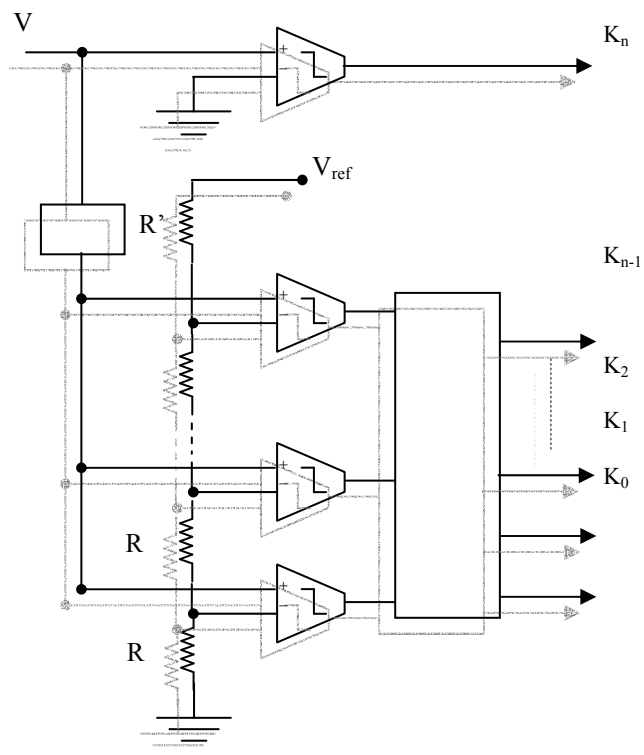


INNLEIÐANDI ELEKTRONIKKUR

Støði undir digitalum elektronikki

Magnus Danielsen



TECHNICAL REPORT
Tæknifrágreivning

TØKNIFRÁGREIVNING
Technical Report

UNDIRVÍSINGARTILFAR
Teaching Material

UPPRIT
Notes

NVD*Rit* 2005:12

Heiti / Title **INNLEIÐANDI ELEKTRONIKKUR
Støði undir digitalum elektronikki**

Høvundar / Authors **Magnus Danielsen**

Ritslag / Report Type **Undirvísingartilfar/Teaching Material**

NVDrit 2005:11

© Náttúruvísindadeildin og høvundurin

ISSN 1601-9741

Útgevvari / Publisher Náttúruvísindadeildin, Fróðskaparsetur Føroya

Bústaður / Address Nóatún 3, FO 100 Tórshavn, Føroyar (Faroe Islands)

Postrúm / P.O. box 2109, FO 165 Argir, Føroyar (Faroe Islands)

. □ □ □ @ +298 352550 □ +298 352551 □ nvd@setur.fo

Innihaldsvirlit

Fororð	1
1. Inngangur	3
2. Hugtakslýsingar og eindir	5
3. Mótstöðurásir	7
3.1 Seriu- og parallellbinding av mótstöðum	7
3.2 Spennings- og streymbýting	8
3.3 Kirchoffs streymlóg og knútapunktslíkningar	9
3.4 Kirchoffs spenningslóg og meskalíkningar	11
3.5 Thevenins lóg og Mayer-Nortons lóg	13
3.6 Superpositiónslógin	14
4. RC rásir	15
4.1 Parallellbinding av kondensatorum	16
4.2 Seriubinding av kondensatorum	17
4.3 Umløðing av kondensatorum í RC rásum	18
– almenn loysn av 1. ordans rásum	
4.3.1 Einfalt dømi við RC-rás	18
4.3.2 Almenn loysn fyri 1. ordans RC-rás	22
4.3.3 Samansett dømi við RC-rás	24
5. Hálvleiðarar	27
5.1 Elektrisk mótstöða í føstum evnum	27
5.2 Reinir hálvleiðarar	28
5.3 Døteraðir hálvleiðarar	29
5.4 Elektriskur streymur í hálvleiðarum	30
6. Diodur	33
6.1 Bygnaður og virknaður	33
6.2 Diodukarakteristikkur	34
6.3 Brúksendamál við diodum	35
6.4 Einfald javnmetisrás fyri diodur	40
7. Felteffekt transistorar (MOS-FET)	41
7.1 Bygnaður og virknaður	41
7.2 Karakteristikkar og javnmetisrásir fyri MOS-FET transistorar	43
7.3 CMOS – rásir	47
8. Bipolerir transistorar	49
8.1 Bygnaður og virknaður	49
8.2 Karakteristikkar og javnmetisrásir fyri bipolarar transistorar	51
8.3 Invertarauppseting	53
8.4 Normalir og inverteraðir transistorar	54
8.5 TTL rásir	55

9.	Operatíónsstyrkjarar	57
9.1	Operatíónsstyrkjarahugtakið	57
9.2	Ideellur operatíónsstyrkjari	59
9.3	Inverterandi styrkjari	60
9.4	Ikki inverterandi styrkjari	61
9.5	Summatíóns styrkjari	61
9.6	Differens styrkjari	62
9.7	Integrator	62
9.8	Differentiator	63
9.9	Komparator	63
9.10	Schmitt triggari	64
9.11	Astabilur multivibrator	66
9.12	Monostabilur multivibrator	70
9.13	Digital – analog (D/A) umsetarar	72
9.14	Analog – digital (A/D) umsetarar	74
10.	PSpice simuleringsforrit, stuttur leiðbeining	77
10.1	Inngangur	77
10.2	Uppseting av elektroniskari streymrás við “Schematics”	77
10.3	Simuleringsuppseting við “Probe”	79
10.4	Dømi til simulering við Pspice	84
	Dømi 1 Resistiv streymrás við mótstöðum	84
	Dømi 2 Tíðarsvar í RC-rás	84
	Dømi 3 Einsrættararás	85
	Dømi 4 Streymrás við MOS-FET (karakteristikkar)	85
	Dømi 5 Streymrás við bipolarum transistori (karakteristikkar)	86
	Dømi 6 Styrkjari við bipolarum transistori	86
	Dømi 7 Styrkjari við MOS-FET	87
	Dømi 8 Digital rás við teljara og kombinatoriskum logikki	87
	Leitorð	89

Fororð

Samfelag í dag uttan elektriska og elektroniska útgerð vildi verið óhugsandi. Kunningar og samskiftistækni – KST – byggir á hesa grund, elorkuveiting somuleiðis. Skip, ídnaðarvirki, heimalív, heilsuverk o.s.fr. er treytað av elektriskari útgerð. Fakliga verður henda tækni viðgjørd og ment í ravnagnsverkfrøðini. Sæð í hesum perspektivi, er ravnagnsverkfrøðin tí ein týðningarmikil liður í menning av vinnulívinum og samfelagnum.

Endamálið við hesi bók er at geva eina innleiðandi og grundleggjandi fatan av elektroniskum hugtøkum og viðgerðar- og greiningarhættum, ið brúkt verða í ravnagnsverkfrøðini til viðgerð av elektroniskum rásum. Evnið er lýst alment sum støði undir bæði analogum og digitalum rásum. Dentur er kortini lagdur á at lýsa fyrbrigdi, ið hava serligan áhuga fyri digitalar elektroniskar rásir.

Bókin verður brúkt í skeiðinum “Digitalur elektronikkur”. Í viðgerðini verða elektrisku spennings- og streymhugtøkini lýst. Grundleggjandi lutirnir mótstøða og kondensator eru viðgjørd. Við støði í stuttari alisfrøðiligari greining av hálvleiðarum verða elektrisku hálvleiðaralutirnir (komponentarnir) diodan, felteffekttransistorin og bipoleri transistorin viðgjørdir serliga við atliti til at lýsa teirra týðning fyri uppbygging av digitalum elektroniskum rásum. Nýtslan av felteffekttransistorum til CMOS digitalar integreraðar rásir (“IC = integrated circuits”) og bipolerum transistorum til TTL digitalar integreraðar rásir verður lýst. Operatiónsstyrkjari er lýstur við serligum denti á ideellar operatiónsstyrkjarar og brúk av honum til ymisk endamál. Av serligum týðningi fyri digitalan elektronikk er nýtslan av operatiónsstyrkjaranum til at gera spennings samanberandi eindir (komparatorar), spenningspulsgerðar og tað sera týðningamikla at gera analog-digital (A/D) og digital-analog (D/A) umsetarar, ið binda analogu verðina, sum flestu fyrbrigdi í lívinum hoyra til, saman við digitalu verðini, sum við teldum hevur gjørt viðgerð av dataupplýsingum og signalum serliga virki. Seinasta kapittul í bókini er ein stuttur inngangur til brúk av PSpice telduforritinum til at simulera analogar og digitalar streymrásir.

1. Inngangur

Søgan um ravnagnsverkfrøði byrjaði fyri gott hálvannað hundrað árum síðan. Varðar og vegamót á leiðini í menning av ravnagnstøkni eru telegrafur (ár 1844), sjókaðaltelegrafur um Atlantshavið (1858), telefon (1876), elorka (1878), radiotelegrafur (1898), radiotelefon (1916), útvarp (1909), sjónvarp (1922), sjókaðaltelefon um Atlantshavið (1956), ljósleiðarasamskipti (1966), mikroprosessorin (1971), persónsteldan (PC) (1977), sivilt internetsamband (1980'ini), internet í flestu Norðurlondum (1988).

Nakrir varðar á leiðini í føroyskari ravnagnsverkfrøði eru loyvi til Transatlantic Telegraph Company frá Frederik VII kongi at leggja telegrafkaðal til Føroyar (1854), men ætlanin varð tó av ongum, telefon (1905), sjókaðal telegrafur til útlandi (1906), royndir við elorku (1907), elorkuverk (1921), radiotelefon til útheimin (1954), útvarp (1957), sjókaðaltelefon til útheimin (1961), automattelefon til alt landið (1972), sjónvarp (1978/1983), digitalar telefonstöðir (1987), fartelefon (1989), ljósleiðarakaðalsamskipti til útheimin (1994), internet (Fróðskaparsetrið) (1995).

Elektronisk útgerð er í nútíðar samfeløgum ment til at vera nýtt í øllum lívsins viðurskiptum, í arbeiði, frítíð, ferðslu, trygdarskipanum og yvirvaking, samskipti, kringvarpi, t.e. útvarpi og sjónvarpi, sjúkrakanning og –viðgerð, húsarhaldi, vísindaligum rannsóknnum, spæli o.s.fr. Tað mesta av allari tí elektronisku útgerðini, vit gera brúk av, verður framleidd í stórum tali til nýtslu av stórari fjøld av fólki. Hvørt tólið er samansett av smærri eindum, sum verða endurbrúktar í nógvum ymiskum sløgum av tólum. Hvør av hesum eindunum er so aftur samansett av elektroniskum lutum (komponentum).

Endamálini við at brúka elektroniska útgerð eru fjølbroytt, og kunnu fevna m.a. um fyrbrigdi sum máting av alisfrøðiligum støddum, t.d. hitastigi, ljósi, longd, tíð, ferð, ljóði, seismikkbylgjum, radiosignalum, magnetiskum feltum, elektriskum feltum o.s.fr. og styrking av smáum signalum, sundurskiljing, greining og filtrering av signalum, stýring av mekaniskum skipanum so sum arbeiðstólum, skipum og bilum, flutning av signalum gjøgnum fjarskiptisskipanir, viðgerð av dátum og signalum í teldum, o.s.fr.

Til tess, at elektronisk útgerð skal kunna viðgera alisfrøðiligt fyrbrigdi, er neyðugt at gera elektriskt signal, ið kann vera spenningur ella streymur, til at umboða tað, og er tí skil fyri elektriskum spenningum og streymum og lógunum, ið hesar støddir lýða, ein treyt fyri innliti í uppbygging av elektroniskari útgerð og brúki í elektroniskum skipanum. Vanligt er, tá tað snýr seg um greining av elektronikki, at skilja millum analogan elektronikk og digitalan elektronikk.

Analogur elektronikkur er samanseting av elektroniskum lutum (komponentum) í streymrásir ætlaðar at viðgera analog signal, ið er annað orð fyri kontinuert signal, tað er signal, sum broytist kontinert við tíðini (ella øðrum óheftum variabli).

Digitalur elektronikkur er tilsvarandi samanseting av elektroniskum lutum (komponentum) í streymrásir ætlaðar at viðgera digital signal, ið er annað orð fyri diskontinuert og kvantiserað signal, t.e. signal sum bert kann hava ávís virði og skifta millum tey í ávísu diskret býttum oftast periodiskt afturvendandi tíðum. Hesi signal kunnu verða umboðað av talvirðum ella logiskum variablum, ið kunnu skifta millum eitt endaligt tal av virðum.

Heimurin, vit liva í, inniheldur fyri tað mesta alisfrøðiligar støddir, sum kunnu viðgerast sum analog signal. Tí hevur analogur elektronikkur fyri ein stóran part myndað tann teknikk, sum hevur verið brúktur inntil fyri fáum árum síðan. Kortini hevur tað verið greitt heilt síðan í 1930 árunum, at digitalur teknikkur eisini á ein sera nøktandi hátt kundi viðgera signal, hóast tey í útgangsstøðinum vóru analog. Orsøkin er tann einfalda, at tey analogu signalini kunnu verða mátað við jøvnum

millumbilum og geva talvirði, sum kunnu avrundast til slík virði, sum júst hoyra við til tað digitala savnið av møguligum virðum. Vit siga, at vit kvantiserað tey mátaðu analogu signalvirðini. Henda tilgongdin, nevnd digitalisering av tí analogu signalinum, gevur okkum eitt digitalt signal, sum kann viðgerast og brúkast í útrokningum í teldum.

Digitaliseringin letur upp fyri telduviðgerð og víttgangandi brúki av samskiftis- og fjarskiftistøkni í ein so stóran mun, at vit í dag kunnu breggja av, at eitt nýtt tíðarskeið, KT ella KST tíðarskeiðið, er byrjað. KT stendur fyri kunningartøkni, og KST stendur fyri kunningar- og samskiftistøkni (KFT, ið stendur fyri kunningar- og fjarsamskiftistøkni er eisini stytting, ið kann verða brúkt).

Digitalur elektronikkur er sostatt støðið undir KST tilgongdini í heiminum. Digitali elektronikkurin er hinvegin uppbygdur av elektroniskum streymrásum og lutum, ið grundleggjandi viðgera analog signal, spenningar og streymar. Digitalu eindirnar (komponentarnir) eru sera smáar (av millimetra stødd), men samansettar elektroniskar streymrásir, ið eru feldar niður á smáar hálvleiðarakrystallir, oftast silisium, og verða nevndar “integreraðar rásir” (“IC = integrated circuits”). Tær innihalda ein hóp av elektriskum lutum (komponentum), mest transistorar, diodur og mótstöður, ofta í millióna tali.

Fyri til fulnar at skilja hesar digitalu eindirnar (IC) og kunna brúka tær til meira samansettar digitalar rásir er ein grundleggjandi vitan um inngangandi transistorar, diodur og streymrásir týðningarmikil. Tey digitalu signalini eru umboðað av stuttvarandi spennings- ella streympulsum, sum grundleggjandi eru formað sum analog signal. Pulsgerðar til gerð av hesum signalum umframt tíðarbroytingar og –seinkingar av teimum í rásini eru týðningarmikil. Í hesum sambandi hevur kondensatorin ein avgerandi leiklut. Eisini er av avgerðandi týðningi fyri digitalan elektronikk at kunna umgera analog signal til digital signal, við sonevndum analog-digital (A/D) umsetara, og at umgera digital signal til analog signal, við sonevndar digital-analog (D/A) umsetarar.

Innleiðandi viðgerð av hesum fyrbrigdum verður gjørd í bókini. Kapittul 2 lýsir grundleggjandi hugtøk og eindir viðvíkjandi elektriskum streymi, spenningi, effekt og orku. Kapittul 3 viðger grundleggjandi lógir um streymrásir innihaldandi bert mótstöður, spenningsgerðar og streymgerðar. Í kapitli 4 verður kondensatorin og týðningur hansara fyri tíðarbroytingar og –seinkingar viðgjørdur. Kapittul 5 ger greiði á grundleggjandi alisfrøðiligum hálvleiðaraeginleikum, sum hava týðning fyri uppbygging av elektroniskum hálvleiðaralutum. Kapittul 6 lýsir stutt uppbygging, eginleikar og nøkur brúksendamál av dioduni. Í kapitli 7 verður felteffekttransistorin MOS-FET, hvat viðvíkur uppbygging, eginleikum og brúksendamáli í samband við CMOS digitalar IC rásir, lýstur. Í kapitli 8 verður bipoleri transistorin, hvat viðvíkur uppbygging, eginleikum og brúksendamáli í samband við TTL digitalar IC rásir lýstur. Í kapitli 9 verður operatiónsstyrkjarin viðgjørdur og lýstur, serliga í samband við tann leiklut, hann hevur í samband við pulsgerð, spenningsamanberara, analog-digital(A/D) og digital-analog(D/A) umsetarar. Kapittul 10 gevur ein stuttan inngang í brúkinum av týðningamestu pørtunum av simuleringforritinum PSpice, ið er hent at brúka í samband við viðgerð av bæði digitalum og analogum rásum.

2. Hugtakslýsingar og eindir

Ein og hvör alisfrøðilig ella teknisk stödd verður lýst við einum tali og eini eind. Eindirnar kunnu fylgja ymiskum lýsingum og skipanum, har ein tann mest brúkað í verkfrøðiligum høpi er SI eindarskipanin, ið stendur fyri á fronskum “Système International d'unités” ella á enskum “International System of Units”. Í talvu 2.1 eru grundleggjandi eindirnar í hesi skipan skrivaðar við feitum stavum. Fýra tær fyrstu stöddirnar verða oftast nýttar og hava tí givið skipanini eykanavnið MKSA-eindarskipanin av tí, at byrjunnarbókstavirnir fyri eindirnar metur, kilogram, sekund og Ampere geva navnið.

Í ravmagnsverkfrøði verður eindin fyri spenning, volt = $V = \text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^3/\text{A}$, ofta tikin sum ein grundleggjandi eind, og verður tað eisini gjørt í hesum skrivi, hóast hon í veruleikanum, sum nevnt, er ein samansett eind.

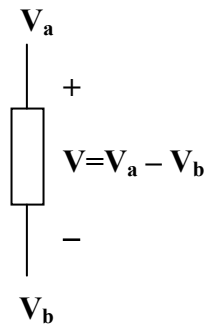
Talva 2.1 Alisfrøðiligar eindir:

Fyribrigdi	Ofta nýttur bókstavur	Eind	Stytting
Longd	l	metur	m
Massi	M	kilogram	kg
Tíð	t	sekund	s
Streymur	I	Ampere	A
Hitastig	T	Kelvin	K
Nøgd av evni		mole	mol
Ljósstyrki		candela	cd
Kraft	K	Newton	$N = \text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$
Spenningur, potential	V	Volt	$V = \text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^3/\text{A}$
Orka	W	Joule	$J = \text{VA}s$
Effekt	P	Watt	$W = J/s = \text{VA}$
Elektrisk løðing	Q	Coulomb	$C = \text{As}$
Mótstöða (resistansur)	R	Ohm	$\Omega = V/A$
Leiðaraevni (konduktansur)	G	Siemens = Ohm^{-1}	$S = \Omega^{-1} = A/V$
Frekvensur	f	Hertz	Hz
Vinkul		radian*	rad
Sykliskur frekvensur	ω	radian/sekund	rad/s ella s^{-1} *
Kapasitetur	C	Farad	$F = \text{As}/V$
Magnetiskur fluksur	ϕ	Weber	Vs
Sjálvinduktión	L	Henry	$H = \text{Vs}/A$
Sínámillum induktiión	M	Henry	$H = \text{Vs}/A$

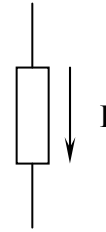
*radian verður ofta sagt at vera dimensiónsleys.

Tað er av stórum týðningi í greining av streymrásum at brúka neyvt lýstar (defineraðar) stöddir við áseting av forteknum fyri elektriskan spenning og streymrætning fyri elektriskan streym. Eins týðningarmikið er tað at hildið verður fast við hesi fortekn í øllum teimum eftirfylgjandi útrokningunum. Tí verða hesi hugtøk greina í hesum partinum.

Potentialið í einum punkti í eini streymrás, sum er lýst við dømumum V_a og V_b í mynd 2.1, er spenningsmunurin millum viðkomandi punkt í streymrásini, her endapunktini á elektroniskum luti, og null. Nulpunktið kann verða valt frítt, men verður ofta valt at vera jørð.



Mynd 2.1 Lýsing av spennungi V og potentialum V_a og V_b

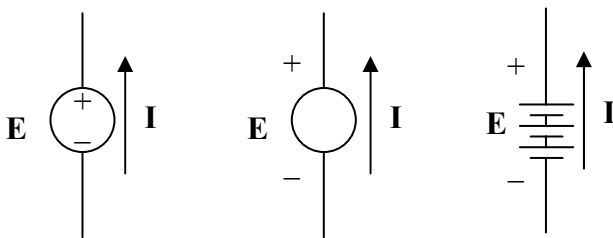


Mynd 2.2 Lýsing av streymi I

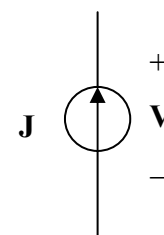
Spenningsmunurin millum endapunktini á einum elektriskum luti, ella spenningurin yvir tann elektriskan lutin, $V = V_a - V_b$ er munurin millum potencialini V_a og V_b á teimum punktum í rásini, ið spenningurin verður mátadur millum. Spenningsmunurin eigur altíð verða myndaður við forttekni soleiðis, sum víst í mynd 2.1, har valið av, hvar + og - verða sett, er frítt, men skal annars verða hildið fast við í øllum teimum útrokningum, sum verða gjørdar eftirfylgjandi.

Elektriski streymurin I gjøgnum ein elektriskan lut verður ásettur við einum pílrætningi, sum víst er í mynd 2.2. Pílrætningurin verður valdur frítt, men skal annars verða hildið fæst hann við í øllum teimum útrokningum, sum verða gjørdar eftirfylgjandi.

Ein “ideellur spenningsgerði” er ein eind, sum gevur ein fastan spennig E millum útgangsleiðararnar óheftur av hvør last er knýtt uppí teir, men kann væl broytast við tíðini. Hann verður myndaður við einum sirkli sum víst í mynd 2.3a, har forttekn + og - fyri spenningsstøddini verða sett antin inni í ella uttan fyri sirkulin. Er spenningsgerðin tann sami til allar tíðir, kann tekningin við fleiri parallellum linjum við skiftandi stødd eisini verða brúkt. Elektriski streymurin I gjøgnum spenningsgerðan er ásettur við einum píli í tann rætningin, sum verður lýstur at vera positiv streymrætningurin.



Mynd 2.3a Óheftir spenningsgerðar

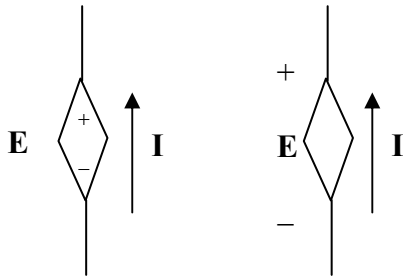


Mynd 2.3b Óheftur streymgerði

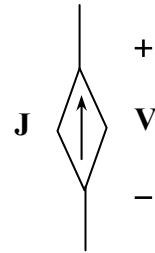
Ein “ideellur streymgerði” er tilsvarandi ein eind, sum gevur ein fastan streym J út, sum er óheftur av hvør last er knýttur uppí útgangsleiðararnar, men væl kann broytast við tíðini. Hann verður myndaður sum ein sirkul við einum píli innaní, sum víst í mynd 2.3b. Hesin gevur streymrætningin. Elektriski spennigurin V millum útgangsleiðararnar er merktur við forttekni.

Virðini av E og J í mynd 2.3 eru óheft av øðrum støddum, so sum spennigum ella streymum, í rásini. Hesir verða tí nevndir óheftir spenningsgerði og óheftur streymgerði.

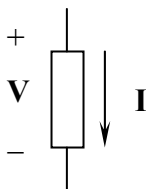
Viðhvørt eru spennings- og streymgerðarnir heftir av aðrari spennings ella streymstødd X í rásini soleiðis, at $E = E(X)$ ella $J = J(X)$. Tá verður ein onnur avmynding brúkt, sum víst er í mynd 2.4a og mynd 2.4b.



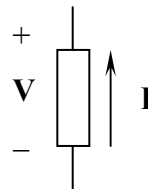
Mynd 2.4a Heftir spenningsgerðar



Mynd 2.4a Heftur streymgerði



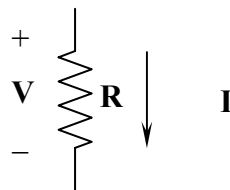
Mynd 2.5 Brúkarafortekn



Mynd 2.6 Gerðafortekn

Í myndunum 2.5 og 2.6 er vístur elektriskur lutur við áseting av spenningsi V og streymi I . Um spenningsi V og streymi I verða ásett sum á myndini 2.5, har streymurinn kemur inn har spenningsurinn er roknaður positivur, verður sagt, at vit nýta brúkarafortekn. Um spenningsi V og streymi I verða ásett sum á myndini 2.6, har streymurinn kemur inn har spenningsurinn er roknaður negativur, verður sagt, at vit nýta gerðafortekn.

3. Mótstøðurásir



Mynd 3.1 Mótstøða

Ein mótstøða er ein elektriskur lutur, har Ohms lóg er galdandi. Við brúkarafortekni er ein mótstøða avmyndað í mynd 3.1. Ohms lóg sigur, at streymur og spenningsur eru proportional:

$$(3.1) \quad \text{Ohms lóg:} \quad V = RI \quad \text{ella} \quad I = GV, \quad \text{har} \quad R = 1/G$$

R verður nevnt **mótstøðan** ella **resistansurinn**.

G verður nevnt **leiðaraevni** ella **konduktansurinn**.

Høvdu vit vent streympílinum hinvegin í mun til spenningsforteknini, t.e. brúkt gerðafortekn, hevði Ohms lóg fingið eitt $-$ tekn eyka ella $V = -RI$.

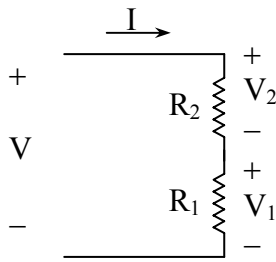
Orka verður avsett í einum og hvørjum elektriskum luti, har ein spenningsur liggur yvir og ein streymur rennur ígjøgnum. Fyri hesa orkuavseting er galdandi:

$$(3.2) \quad \text{Effekt (virkni) = Orka avsett í hvørjum sekundi:} \quad P = VI = RI^2 = GV^2$$

$$(3.3) \quad \text{Orka avsett í tíðarbílinum } t: \quad W = VI t$$

Eisini í útrokningini av effekt og orku er brúkarafortekn brúkt. Um gerðafortekn verður nýtt fáa P og W eitt $-$ tekn frammanfyri, ella $P = -VI$, og $W = -VI t$.

3.1 Seriu- og parallellbinding av mótstöðum



Mynd 3.2 Seríubinding av mótstöðum

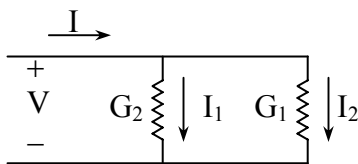
Um streymurinn I rennur í tveimur seriubundnum mótstöðum, R_1 og R_2 , sum víst í mynd 3.2, verður samlaði spenningurinn yvir mótstöðurnar

$$(3.4) \quad V = V_1 + V_2 = R_1 I + R_2 I = (R_1 + R_2) I = R I, \text{ har}$$

$$(3.5) \quad R = R_1 + R_2$$

R er úrslits mótstöðuvirðið (-resistansurinn). Vórðu fleiri mótstöður í seríu, varð úrslits mótstöðan funnin við at leggja allar saman.

Er spenningurinn V lagdur millum endarnar á tveimur parallellbundnum mótstöðum, hvørs konduktansar eru $G_1 = 1/R_1$ og $G_2 = 1/R_2$, sum víst í mynd 3.3, verður samlaði streymurinn gjøgnum mótstöðurnar



Mynd 3.3 Parallellbinding av mótstöðum

$$(3.6) \quad I = I_1 + I_2 = G_1 V + G_2 V = (G_1 + G_2) V = G V, \text{ har}$$

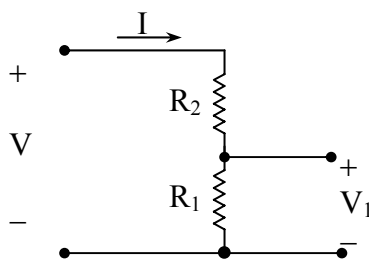
$$(3.7) \quad G = G_1 + G_2$$

G er úrslits leiðaraevnið (-konduktansurinn). Vórðu fleiri mótstöður í parallell, varð úrslits leiðaraevnið funnið við at leggja øll saman.

Tilsvarendi úrslits mótstöðuvirði (resistansurinn) $R = 1/G$ verður tí funnin av

$$(3.8) \quad \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

3.2 Spennings- og streymbýting

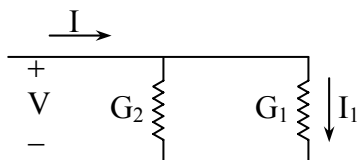


Mynd 3.4 Spenningsbýtari

Streymrásin í mynd 3.4 er ein spenningsbýtari, har spenningurinn V_1 verður gjørdur sum brotpartur av V við at brúka tvær mótstöður. Brúka vit Ohms lóg tvær ferðir fæst

$$(3.9) \quad V_1 = I \cdot R_1 = V \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Streymrásin í mynd 3.5 er ein streymbýtari, har streymurinn I_1 verður gjørdur sum brotpartur av samlaða streyminum I við at brúka tveir konduktansar. Ohms lóg verður eisini her brúkt tvær ferðir, og vit fáa úrslitið



Mynd 3.5 Streymbýtari

$$(3.10) \quad I_1 = V \cdot G_1 = I \cdot \frac{G_1}{G_1 + G_2}$$

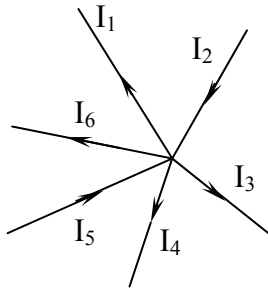
Innseta vit $G_1 = \frac{1}{R_1}$ og $G_2 = \frac{1}{R_2}$ verður

$$(3.11) \quad I_1 = I \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

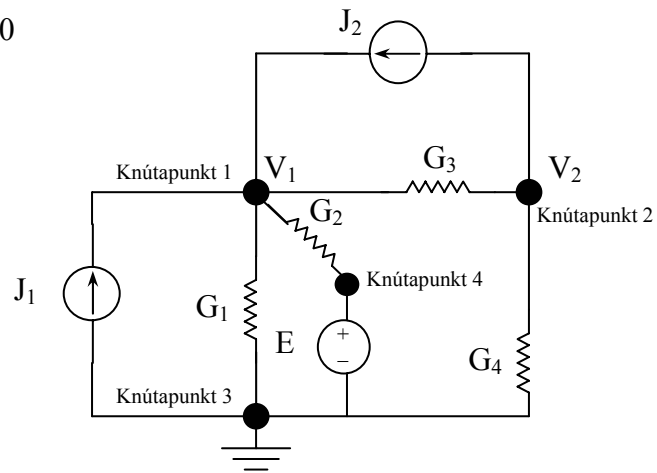
3.3 Kirchhoffs streymlóg og knútapunktslíkningar

Í eina streymrás verður eitt samanbindingarpunktur av tveimum ella fleiri elektriskum lutum nevnt knútapunktur. Um eitt knútapunktur sigur *streymlóg Kirchhoffs*, at samlaði elektrisk streymurin, sum rennur burtur frá knútapunktinum roknað við forttekni er null. Hetta er víst við døminum í mynd 3.6.

$$(3.12) \quad +I_1 - I_2 + I_3 + I_4 - I_5 + I_6 = 0$$



Mynd 3.6 Knútapunktur og greinstreymar



Mynd 3.7 Streymrásdømi við merking av knútapunktum

Henda lógin saman við ohms lóg kann verða brúkt til serstakan roknihátt at seta líkningar upp fyri eina streymrás. Tær kunnu so verða loystar til tess at finna allar streymar og spenningar í rásini. Hesar líkningarnar verða nevndar knútapunktslíkningar. Hesar roknihátturin verður her lýstur við døminum í mynd 3.7. Rásin er samansett av 4 konduktansum $G_1 = 1/R_1$, $G_2 = 1/R_2$, $G_3 = 1/R_3$ og $G_4 = 1/R_4$, tveimum streymgerðum J_1 og J_2 og einum spenningsgerða E .

Fýra knútapunktur eru 1, 2, 3 og 4, sum øll hava hvør sítt potential. Eitt av teimum, t.d. knútapunktur 3, kunnu vit velja at hava potentialið null, og nevna vit tað nullpunktið ella jørðpunktið og merkja tað við serligum tekni. Av tí at negativu endin á spenningsgerðanum E er bundin til jørðpunktið, verður potentialið á knútapunkti 4 kent og hevur støddina E .

Sostatt eru bert tvey knútapunktspotential V_1 og V_2 á knútapunktunum 1 og 2 enn ókend. Kunnu vit útrokna hesi potentialini, er eisini møguligt við ohms lóg at útrokna streymarnar í øllum mótstöðum og tilsvareandi spenningar yvir mótstöðurnar, og uppgávan er loyst. Hetta kann verða gjørt við at uppseta tvær líkningar, sonevndar knútapunktslíkningar, ið innihalda V_1 og V_2 við at brúka Kirchhoffs streymlóg fyri hvørt av knútapunktunum 1 og 2.

Fyri knútapunktur 1 er galdandi:

$$(3.13) \quad -J_1 + G_1 \cdot (V_1 - 0) + G_2 \cdot (V_1 - E) + G_3 \cdot (V_1 - V_2) - J_2 = 0$$

Fyri knútapunktur 2 er galdandi:

$$(3.14) \quad J_2 + G_3 \cdot (V_2 - V_1) + G_4 \cdot (V_2 - 0) = 0$$

Hesar líkningar kunnu vit skipa soleiðis, at allir streym- og spenningsgerðar, sum jú eru kendar støddir, standa á høgri síðu í líkningini

$$(3.15) \quad (G_1 + G_2 + G_3) \cdot V_1 - G_3 \cdot V_2 = J_1 + J_2 + G_2 E$$

$$(3.16) \quad -G_3 \cdot V_1 + (G_3 + G_4) \cdot V_2 = -J_2$$

Eisini kunnu líkningarnar verða skrifaðar sum eina matrikslíkning

$$(3.17) \quad \begin{Bmatrix} (G_1 + G_2 + G_3) & (-G_3) \\ (-G_3) & (G_3 + G_4) \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} J_1 + J_2 + G_2 E \\ -J_2 \end{Bmatrix}$$

Vit síggja, at matriksin er symmetrisk. Galdandi er, at tað i'ta diagonalelementið er ein samanlegging av øllum konduktansunum, sum eru bundnir til i'ta knútapuntið. Tilsvarandi hava ikki-diagonalelementini svarandi til i'ta rað og j'tu súlu í matriksini støddina “minus summin av konduktansum”, ið liggja millum i'ta og j'ta knútapunkt (her er kortini bert ein, nevniliga G_3).

Elementini í súluvektorinum høgrumegin hava støddir av tí streymi, sum streym- og spenningsgerðar leiða til knútapuntið. Soleiðis er knútapunkt 1 bundið til tveir streymgerðar, ið leiða streymarnar J_1 og J_2 til hetta knútapuntið, og ein spenningsgerða, sum hevur ein kortslutningsstreym $G_2 E$, sum verður leiddur til sama knútapunkt (kortslutningsstreymurin her verður sipað til er streymurin í G_2 , um knútapunkt 1 verður bundið til negativa endan á E). Tilsamans gevur tað streymin til knútapunkt 1 við støddini $J_1 + J_2 + G_2 E$, sum so skal vera 1. elementíð í súluvektorinum.

Tilsvarandi er knútapunkt 2 bundið til ein streymgerða, ið leiðir $-J_2$ til hetta knútapuntið og sostatt gevur 2. elementíð virðið $-J_2$.

Loysnin av V_1 og V_2 verður funnin sum fyri vanligar matrikslíkningar við at útrokna determinantarnar

$$(3.18) \quad \Delta = \begin{vmatrix} (G_1 + G_2 + G_3) & (-G_3) \\ (-G_3) & (G_3 + G_4) \end{vmatrix}$$

$$(3.19) \quad \Delta_1 = \begin{vmatrix} (J_1 + J_2 + G_2 E) & (-G_3) \\ (-J_2) & (G_3 + G_4) \end{vmatrix}$$

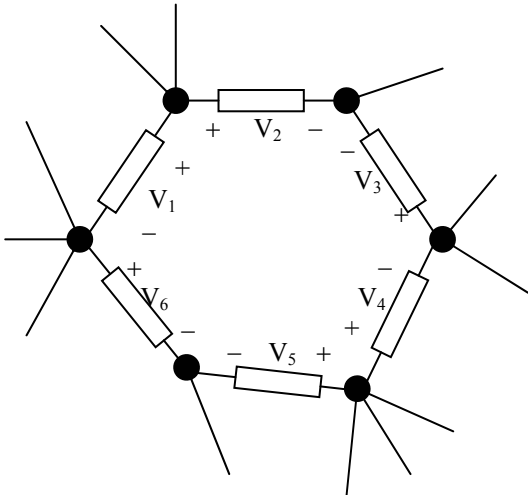
$$(3.20) \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} (G_1 + G_2 + G_3) & (J_1 + J_2 + G_2 E) \\ (-G_3) & (-J_2) \end{vmatrix}$$

Og potentialini verða

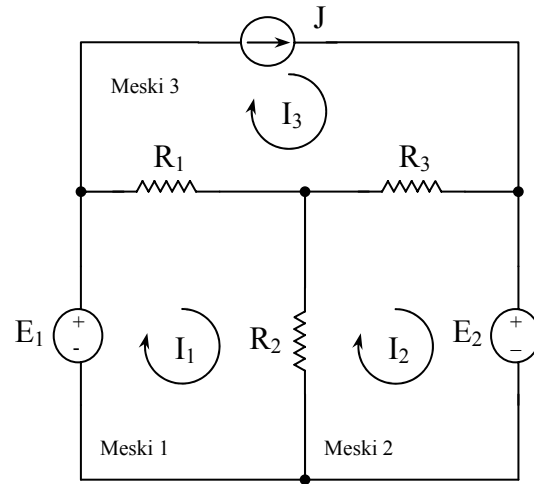
$$(3.21) \quad V_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta} \quad \text{og} \quad V_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta}$$

Hóast hetta dømi er gjørt fyri einfalda rás við bert 2 óheftum knútapunktum, kann hátturin við brúk av knútapunktslíkningum verða brúktur eftir somu reglum til allar streymrásir uttan mun til talið av knútapunktum. Ein eigur eisini at hefta seg við, at loysn av matrikslíkningum við nógvum ókendum, har talvirði eru innsett fyri tær inngangandi kendu støddirnar, er sera einfalt at finna við teldu við forritinum Matlab.

3.4 Kirchhoffs spenningslóg og meskalíknningar



Mynd 3.8 Meski og greinspenningar



Mynd 3.9 Streymrásdómi við merking av meskum

Vit definera elektriska grein í eini rás sum tann elektriska lutin ella samanseting av lutum, sum liggur millum tvey knútapunkt. Í eini streymrás verður ein rundrás frá einum knútapunkti til onnur gjøgnum elektriskar greinar og endar aftur í sama knútapunkti, nevnd ein meski.

Um ein meska sigur *spenningslóg Kirchhoffs*, at samanlagdu elektrisku spenningsfallini roknað við fortækni yvir allar tær elektrisku greinar í meskanum er null. Hetta er víst við døminum í mynd 3.8

$$(3.22) \quad -V_1 + V_2 - V_3 - V_4 + V_5 - V_6 = 0$$

Henda lógin saman við ohms lóg kann verða brúkt til at uppseta líkningar, nevndar meskalíknningar, fyri eina streymrás, sum so kunnu verða loystar til tess at finna allar streymar og spenningar í rásini.

Hesin rokniháttur verður lýstur við døminum í mynd 3.9. Rásin er samansett av trimum mótstöðum R_1 , R_2 og R_3 , spenningsgerðunum E_1 og E_2 umframt streymgerðanum J . Hesar støddirnar eru allar givnar.

Tríggir meskar 1, 2 og 3 eru. Í hvørjum av hesum meskum definera vit meskastreymarnar I_1 , I_2 og I_3 soleiðis, at streymurin í hvørjari grein verður samansettur av einum ella tveimum meskastreimum. Tað er týðningarmikið at velja ein positivan rætning runt í meskanum, ið kann veljast tilvildarliga, men her er valdur við klockuni. Tað gevur lættari yvirlit at velja tann sama rætningin í øllum meskunum. Í E_1 rennur soleiðis streymurin I_1 , í R_1 rennur $(I_1 - I_3)$, í R_2 rennur $(I_1 - I_2)$, o.s.fr. Kunnu vit tí útrokna meskastreymarnar, ber eisini til at finna allar greinstreymarnar, umframt við ohms lóg at útrokna spenningarnar yvir mótstöðurnar. Í hesum døminum síggja vit, at meskastreymurin, har streymgerðin er, er givin við $I_3 = J$. Tí er bert neyðugt at útrokna tvær støddir I_1 og I_2 , og brúka vit til hetta Kirchhoffs spenningslóg fyri hvønn av meskunum.

Fyri meska 1 er galdandi

$$(3.23) \quad -E_1 + R_1 \cdot (I_1 - J) + R_2 \cdot (I_1 - I_2) = 0$$

Fyri meska 2 er galdandi

$$(3.24) \quad R_2 \cdot (I_2 - I_1) + R_3 \cdot (I_2 - J) + E_2 = 0$$

Hesar líkningar kunnu vit skipa soleiðis, at allir streym- og spenningsgerðar, sum jú eru kendar støddir, verða fluttir yvir á høgru síðu í líkningini

$$(3.25) \quad (R_1 + R_2) \cdot I_1 - R_2 \cdot I_2 = E_1 + R_1 J$$

$$(3.26) \quad -R_2 \cdot I_1 + (R_2 + R_3) \cdot I_2 = -E_2 + R_3 J$$

Vit kunnu eisini skriva líkningarnar upp sum eina matrikslíkning

$$(3.27) \quad \begin{pmatrix} (R_1 + R_2) & (-R_2) \\ (-R_2) & (R_2 + R_3) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_1 + R_1 J \\ -E_2 + R_3 J \end{pmatrix}$$

Vit síggja her, at matriksin er symmetrisk. Galdandi er, at tað i'ta diagonalelementið er ein samanlegging av øllum móttstøðum, sum eru í i'ta meska. Tilsvarandi hava ikki-diagonalelementini svarandi til i'ta rað og j'tu súlu í matriksini støddina “minus summin av móttstøðum”, ið liggja millum i'ta og j'ta meska (her er kortini bert ein, nevnliga R_2).

Elementini í súluvektorinum høgru megin hava støddir av tí spennings- og streymgerðar skapa í meskanum. Soleiðis er í meska 1 ein spenningsgerði, sum skapar ein spenningsvøxstur E_1 , og ein streymgerði J sum í greinini R_1 skapar ein tómgangsspenning $R_1 \cdot J$ (Tómgangsspenningurin, her verður sipað til, er spenningurin yvir R_1 , um endarnir á J bert hava samband við R_1). Tilsamans gevur tað $E_1 + R_1 \cdot J$ í fyrsta elementi. Tilsvarandi er í meska 2 ein spenningsgerði, sum skapar ein spenningsvøxstur $-E_2$ og ein streymgerði, sum í greinini R_2 skapar ein tómgangsspenning $R_3 J$. Tilsamans gevur tað $-E_2 + R_3 J$ í øðrum elementi.

Loysnin av I_1 og I_2 verður eins og fyri knútapunktslíkningarnar funnin við at útrokna determinantarnar

$$(3.28) \quad \Delta = \begin{vmatrix} (R_1 + R_2) & (-R_2) \\ (-R_2) & (R_2 + R_3) \end{vmatrix}$$

$$(3.29) \quad \Delta_1 = \begin{vmatrix} E_1 + R_1 J & (-R_2) \\ -E_2 + R_3 J & (R_2 + R_3) \end{vmatrix}$$

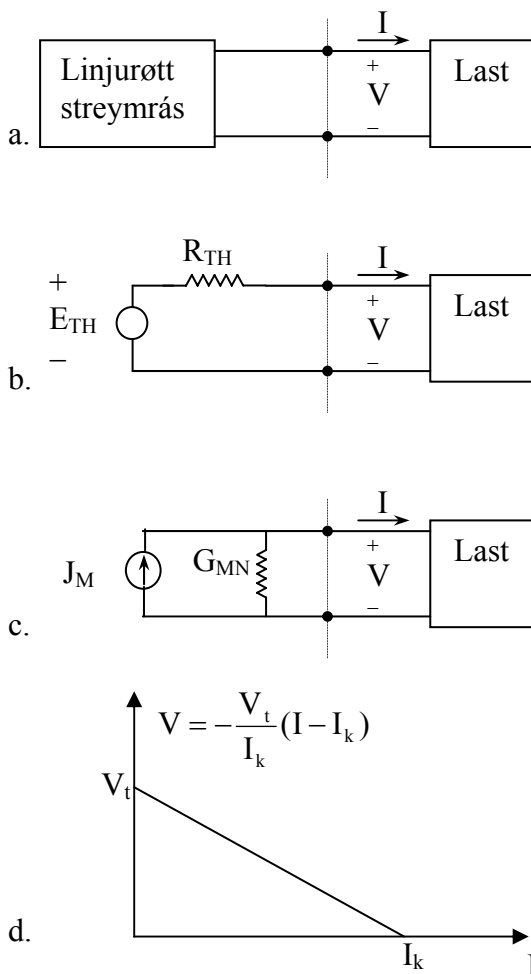
$$(3.30) \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} (R_1 + R_2) & E_1 + R_1 J \\ (-R_2) & -E_2 + R_3 J \end{vmatrix}$$

Meskastreymarnir verða

$$(3.31) \quad I_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta} \quad \text{og} \quad I_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta}$$

Hóast hetta dømi er gjørt fyri einfalda rás við bert 2 óheftum meskum, kann hátturin við meskalíkningum verða brúktur eftir somu reglum til allar streymrásir uttan mun til talið av meskum, men verður sjálvsagt talið av ókendum meskastreymum og talið av líkningum tilsvarandi størri. Ein eigur eisini at hefta seg við, at loysn av matrikslíkningum við nógvum ókendum, har talvirði eru innsett fyri tær inngangandi kendu støddirnar, er sera einfalt at finna í teldu við forritinum Matlab.

3.5 Thevenins lóg og Mayer-Nortons lóg.



Mynd 3.10 Linjurætt eittportur við last
 a. linjurætt streymrás
 b. Thevenin javnmetisrás
 c. Meyer – Norton javnmetisrás
 d. Spennungur V sum funktión av streymi I í lastini.

Ein eittporturrás (eittportur) er streymrás, ið er samansett av elektriskum lutum, spennings- og streymgerðum, har atgongd til rásina er uttanífrá til tvey knútapunkt ella leiðarar frá knútapunktum, og møguligt er at knýta eina ytru last (elektriskar lutir ella streymrás) í og harvið taka ein streym I úr rásini. Spennungurin millum útgangisleiðararnar er tá V . Tá slíkt eittportur er uppbyggt sum linjurætt streymrás, ið bert inniheldur streym- og spenningsgerðar og mótstöður, er linjurætt samband millum V og I (mynd 3.10 d). Um hesa rás sigur

Thevenins lóg: Eitt linjurætt eittportur (mynd 3.10 a), sum hevur tómgangsspenningin $V = V_t$ (t.e. spennungurin, tá vit seta $I = 0$), og kortslutningsstreymin $I = I_k$ (t.e. streymurin, tá vit seta $V = 0$), hevur eina javnmetisrás (mynd 3.10b), sum er samansett av spenningsgerða

$$(3.32) \quad E_{TH} = V_t \quad (\text{Thevenin spennungur})$$

í seriu við mótstöðuna

$$(3.33) \quad R_{TH} = \frac{V_t}{I_k} \quad (\text{Thevenin mótstöða})$$

Tilsvareandi kunnu hesi viðurskifti eisini verða orðað í

Mayer – Nortons lóg:

Eitt linjurætt eittportur sum hevur tómgangsspenningin V_t ($I = 0$) og kortslutningsstreymin I_k , hevur eina javnmetis-rás (mynd 3.10c), sum er samansett av streymgerða

$$(3.34) \quad J_{MN} = I_k \quad (\text{Meyer – Norton streymur})$$

í parallell við konduktansin

$$(3.35) \quad G_{MN} = \frac{I_k}{V_t} \quad (\text{Meyer – Norton konduktansur})$$

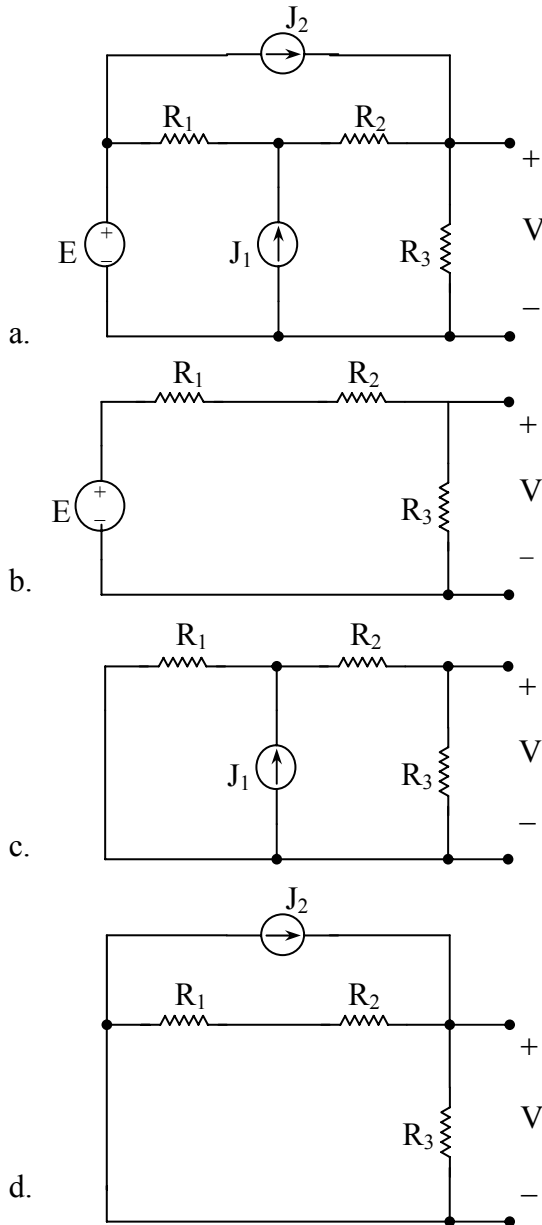
Hetta gevur samanhangið millum Thevenin og Mayer – Norton støddirnar:

$$(3.36) \quad R_{TH} = \frac{1}{G_{MN}} \quad \text{og} \quad E_{TH} = \frac{J_{MN}}{G_{MN}}$$

$$(3.37) \quad G_{TH} = \frac{1}{R_{MN}} \quad \text{og} \quad J_{MN} = \frac{E_{TH}}{R_{TH}}$$

Vit síggja sostatt eisini, at ein spenningsgerði í seriu við eina mótstöðu sum í mynd 3.10 b kann umformast til ein streymgerða parallellt við ein konduktans sum í mynd 3.10c og umvent, har støddirnar eru samanbundnar við formlunum (3.36) og (3.37).

3.6 Superpositiðnslóginn



Mynd 3.11 Streymrásdæmi um superpositiðn.

- Eingin generator er sløktur
- Bert E er tendraður,
- Bert J_1 er tendraður
- Bert J_2 er tendraður.

Í summum færum er superpositiðnshátturinn hentur til at finna loysnir fyri streymar og spenningar í linjurøttum streymrásum.

Superpositiðnshátturinn sigur, at í einari linjurøttari streymrás við fleri streym- og spenningsgerðum kunnu vit útrokna spenningar ella streymar í rásini við at leggja tey úrslitini saman, sum vit fáa hvørt sær við bert at tendra ein spennings- ella streymgerða ísenn, meðan hinir eru sløktir.

Lat okkum vísa háttin við dæminum í mynd 3.11a har ein streymrás er samansett av einum spenningsgerða E, tveimum streymgerðum J_1 og J_2 , umframt trimum mótstöðum R_1 , R_2 og R_3 . Vit seta okkum spurningin at finna virðið av spenninginum V. Til hetta endamál rokna vit trý úrslit fyri V, har bert ein av gerðunum E, J_1 ella J_2 er tendraður ísenn.

Vit skulu her minnst til, at ein sløktur spenningsgerði virkar sum ein kortslutningur, og at ein sløktur streymgerði virkar sum eitt avbrot. Við at brúka hetta fáa vit trýggjar ymiskar rásir, sum víst í mynd 3.11b, c og d.

Tá bert E er tendraður (mynd 3.11b) verður roknað við spenningsbýting

$$(3.38) \quad V = V_E = E \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$$

Tá bert J_1 er tendraður (mynd 3c), verður roknað við streymbýting og ohms lóg

$$(3.39) \quad V = V_{J1} = J_1 \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot R_3$$

Tá bert J_2 er tendraður (mynd 3.11d), verður roknað við ohms lóg

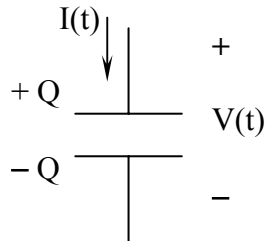
$$(3.40) \quad V = V_{J2} = J_2 \cdot (R_1 + R_2) \parallel R_3 = J_2 \frac{(R_1 + R_2) \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$$

Endaliga úrslitið, tá allir trýggir gerðarnir eru tendraðir:

$$(3.41) \quad V = V_E + V_{J1} + V_{J2} = E \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} + J_1 \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot R_3 + J_2 \frac{(R_1 + R_2) \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$$

4. RC rásir

Ein kondensator er bygdur av tveimum elektrískt leiðandi parallellum plátum, har elektrísk løðing kann verða leidd til og frá við elektrískum streymi í leiðingum heftir í pláturnar. Løðingin Q á aðrari plátuni er altíð eins stór, men hevur øvugt fortækn sum løðingin á hinari plátuni $-Q$.



Mynd 4.1 Kondensator

Tá ein elektrískur spenningur V er millum pláturnar kemur eitt elektrískt felt at verða bygt upp millum pláturnar. Hetta elektríska feltið dregur positiva løðing $+Q$ inn á plátuna, har penningurin er positivur, og negativa løðing $-Q$ inn á plátuna, har spenningurin er negativur. Sambandið millum spenning og løðing er linjurætt sambært líkningini

$$(4.1) \quad Q = C \cdot V$$

har C er ein konstantur og verður nevndur kapasiteturin fyri kondensatorin. Eindin er Farad (F). Hon er so stór, at oftast verða undireindirnar $\mu\text{F} = 10^{-6}$ F, $\text{nF} = 10^{-9}$ F, ella $\text{pF} = 10^{-12}$ F brúktar. Í alisfrøðini verður víst, at kapasiteturin kann verða skrivaður

$$(4.2) \quad C = \varepsilon \cdot A/d$$

har A er víddin (arealið) á plátunum, og d er fjarstøðan millum pláturnar.

Proportionalitetskonstanturin ε er ein tilfarskonstantur, nevndur tann elektríski permitiviteturin ella dielektrísitetskonstanturin. Vakuum hevur elektríska permitivitetin $\varepsilon = \varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m (As/Vm). Í øðrum tilfarum verður ε ofta skriva

$$(4.3) \quad \varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$$

har ε_r verður nevndur relativi elektríski permitiviteturin ella relativi dielektrísitetskonstanturin (í fakligum bókmentum verður av og á skrivað, at ε_r er dielektrísitetskonstanturin. Viðhvørt verður bókstavurin D brúktur um relativa dielektrísitetskonstantin).

Elektríski streymurin $I = I(t)$ í leiðninginum er defineraður sum tann løðingin, ið rennur gjøgnum ein tvørskurð av honum hvørt sekund. Tí verður I eisini differentialkoeffisienturin av løðingini $Q = Q(t)$, ella um vit brúka (4.1)

$$(4.4) \quad I(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = C \frac{dV(t)}{dt}$$

Hetta er ein einfald differentiallíkning. Er streymurin $I(t)$ givin, kunnu vit finna spenningin $V(t)$ við at integrera líkningina (4.4)

$$(4.5) \quad V(t) = \frac{1}{C} \int_{t_0}^t I(t') dt + V(t_0)$$

Kondensator, ið er uppløddur og hefur spenningin V millum pláturnar, inniheldur elektriska orku W . Vit kunnu finna W út frá alisfrøðiligu lógini um, at um lítill løðing dQ verður flutt frá negativu plátuni til positivu plátina á kondensatorinum verður eitt mekaniskt arbeiði gjørt og tilsvarandi elektrisk orkunøgð uppbygd í kondensatorinum av stødd

$$(4.6) \quad dW = VdQ$$

Innseta vit herí kondensatorlíkningina $dQ = CdV$, finna vit

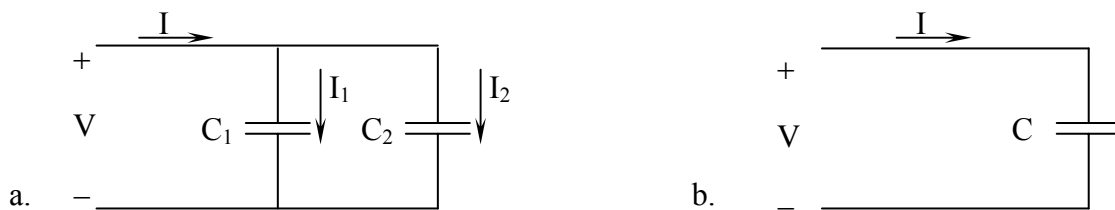
$$(4.7) \quad dW = CVdV$$

sum vit kunnu integrera og finna harvið, at samlaða orkan í einum kondensatori, har spenningurin er V millum pláturnar er

$$(4.8) \quad W = \int_0^V CV' dV' = \frac{1}{2} CV^2$$

4.1 Parallellbinding av kondensatorum

Parallellbinda vit kondensatarar virka teir sum ein kondensator, hvørs stødd er samanløgdu virðini av teimum einstøku parallellbundnu kondensatorunum. Hetta er víst í mynd 4.2a, har tveir kondensatarar eru parallelbundnir. Fyri hesa uppseting er galdandi, at $I = I_1 + I_2$, og við at brúka (4.4) finna vit



Mynd 4.2 a. Parallellbinding av kondensatorum. b. Javnmettur kondensator

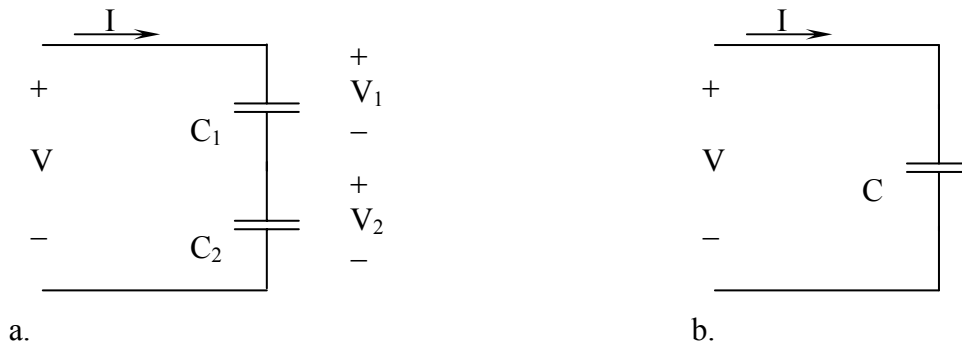
$$(4.9) \quad I = I_1 + I_2 = C_1 \frac{dV}{dt} + C_2 \frac{dV}{dt} = (C_1 + C_2) \frac{dV}{dt} = C \frac{dV}{dt}$$

ið vísur, at uppsetingin í mynd 4.2a kann javnmetast við mynd 4.2b, har úrslitskapasiteturin hefur støddina

$$(4.10) \quad C = C_1 + C_2$$

Eru fleiri enn tveir kondensatarar bundnir í parallell, verður tilsvarandi úrslitskapasiteturin funnin sum einstaku kapasitetarnir samanlagdir.

4.2 Seriubinding av kondensatorum



Mynd 4.3 a. Seriubinding av kondensatorum. b. Javnmettur kondensator

Seriubinda vit kondensatorar virka teir sum ein kondensator, hvørs resiprokka stödd er summurin av teirri resiprokku stöddini av einstöku seriubundnu kondensatorunum. Hetta er víst í myndini, har tveir kondensatorar eru seriubundnir. Fyri hesa uppseting er galdandi, at $V = V_1 + V_2$, og við at brúka (4.5) finna vit

$$\begin{aligned}
 (4.11) \quad V(t) &= \frac{1}{C_1} \int_{t_0}^t I(t') dt + V_1(t_0) + \frac{1}{C_2} \int_{t_0}^t I(t') dt + V_2(t_0) = \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) \int_{t_0}^t I(t') dt + (V_1(t_0) + V_2(t_0)) \\
 &= \frac{1}{C} \int_{t_0}^t I(t') dt + V(t_0)
 \end{aligned}$$

ið vísur, at uppsetingin í mynd 4.3a kann javnmetast við mynd 4.3b, har úrslits kapasiteturin C og byrjunnarspenningurin $V(t_0)$ hava stöddir, ið verða útroknaðar sambært hesum formlum

$$(4.12) \quad \frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

$$(4.13) \quad V(t_0) = V_1(t_0) + V_2(t_0)$$

Eru fleiri enn tveir kondensatorar bundnir í seriu, verður tilsvarandi resiprokki úrslitskapasiteturin funnin sum einstöku resiprokku kapasitetarnir samanlagdir, og byrjunnarspenningurin tilsvarandi samanlægdu byrjunnarspenningarnir fyri einstöku kondensatorunum.

4.3 Umløðingar av kondensatorum í RC rásum – almenn loysn av 1. ordans rásum

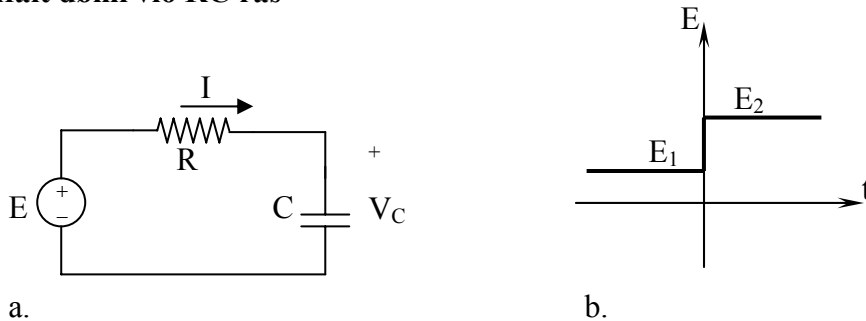
Tá broytingar henda í eini streymrás sum t.d. at ein spenningsgerði ella streymgerði broytir virði, ella at ein umskiftari broytir rásina sjálva, vil ein kondensator, sum er settur inn í rásina, umløðast, t.e. elektrisk løðing rennur til ella frá kondensatorplátunum og skapar ein streym gjøgnum kondensatorin. Harvið broytist spenningurin eisini. Vit skulu her hyggja at, hvussu hetta hendir.

Fyrst verður eitt einfalt dømi viðgjørt, sum í høvuðsheitum lýsir, hvussu umløðing fer fram tá ein spenningsgerði skiftir virði.

Næst verður ein almennur rokniháttur viðgjørdur til at útrokna spenningar og streymar í eini fyrsta ordans RC-rás, t.e. eini streymrás, sum bert inniheldur ein kondensator. Parallell- og seriubundnir kondensatarar virka sum og verða roknaðir sum ein kondensator.

Í triðja umfari verður eitt samansett dømi gjøgnumroknað, har broytingin í rásini fer fram við, at ein umskiftari broytir rásina sjálva, meðan spenningsgerðin er óbroyttur.

4.3.1 Einfalt dømi við RC rás



Mynd 4.4 a. Einfald RC rás við spenningsgerða E mótstøðu R og kondensatori C.
b. Skifti av spenningi frá spenningsgerða við tíðini.

Í mynd 4.4a er spenningsgerðin E bundin til mótstøðuna R og kondensatorin C í einum meska. Kondensatorspenningurin er $V_C = V_C(t)$, og meskastreymurin er $I = I(t)$, ið eisini er kondensatorstreymurin. Tað kann lætta lesturin av eftirfylgjandi útleiðing samstundis at hyggja at mynd 4.5, ið avmyndar úrslitini fyri eitt taldømi seinast í hesum parti.

Vit lata nú spenningsgerðan broytast við tíðini t sambært mynd 4.4b soleiðis, at

$$(4.14) \quad E = \begin{cases} E_1 & t < 0 \\ E_2 & t \geq 0 \end{cases}$$

t.e. $E = E_1$ er konstant upp til $t = 0$ og broytist tá til $E = E_2$. Meskalíknungin fyri rásina er

$$(4.15) \quad -E + RI + V_C = 0$$

Hetta er ein líkning við tveimum ókendum V_C og I . Hana kunnu vit umforma til líkning við einum ókendum við at brúka líkningina (4.4) fyri kondensatorin, $I(t) = C \frac{dV_C(t)}{dt}$, og harvið eliminera annan av teimum ókendu.

Tá $t < 0$, er $E = E_1$, og verður loysnirnar fyrir V_C og I fundar við at ásanna, at eingin broyting fer fram í rásini, og tí er $I(t) = C \frac{dV_C(t)}{dt} = 0$. Hetta førir við sær, at meskalíkningin hevur sum úrslit, at $V_C = E_1$. Hesar loysnir eru galdandi heilt upp at markinum $t = 0_-$, ið merkir tíðin beint vinstrumegin í infinitesimalari frástøðu frá $t = 0$. Sostatt kunnu vit skriva loysnirnar

$$(4.16) \quad I(0_-) = 0$$

$$(4.17) \quad V_C(0_-) = E_1$$

Tá $t = 0_+$, ið er tíðarpunktið í infinitesimalari frástøðu høgru megin nullpunktið á tíðarásinum, er tann broytingin farin fram, at E er skift diskontinuert frá E_1 til E_2 . Í hesum punkti $t = 0_+$, kunnu vit finna støddirnar av $V_C(t) = V_C(0_+)$ og $I(t) = I(0_+)$ og brúka tær sum byrjannarvirði í víðari greiningini av $V_C(t)$ og $I(t)$.

Av tí at kondensatorstreymurin $I(t) = C \frac{dV_C(t)}{dt}$ vil hava óendaligt virði, um V_C er diskontinuert, og at støðan við óendaliga stórum streymi er óverulig og tí ómøgulig, vil spenningurin yvir kondensatorin ikki kunna skifta virði. Soleiðis verður

$$(4.18) \quad V_C(0_+) = V_C(0_-)$$

Nú vil meskalíkningin geva okkum loysnina fyrir streymin eisini

$$(4.19) \quad I(0_+) = \frac{E_2 - V_C(0_+)}{R}$$

Tá $0_+ \leq t < \infty$, ber til at finna restina av loysnini fyrir $I(t)$ og $V_C(t)$ sum funkión av tíðini út frá meskalíkningini (4.15) við $E = E_2$ og teimum funnu virðunum $V_C(0_+)$ og $I(0_+)$ sum byrjannarvirði.

Differentiera vit meskalíkningina (4.15) og innseta $\frac{dV_C(t)}{dt} = \frac{I(t)}{C}$, fáa vit

$$(4.20) \quad \frac{dI}{dt} + \frac{I}{RC} = 0$$

Hetta er ein homogen 1.ordans differentiallíkning fyrir I og hevur loysnina

$$(4.21) \quad I = I_0 \cdot e^{-\frac{t}{RC}} = I_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{har} \quad \tau = RC \quad \text{verður nevndur tíðarkonstanturin}$$

Vit síggja, at byrjannarstreymurin er $I(0_+) = I_0$. Við tað, at streymurin hevur asymptotiska virðið $I \rightarrow I(\infty) = 0$, tá tíðin $t \rightarrow \infty$, kunnu vit umforma loysnina til

$$(4.22) \quad I = I(t) = I(\infty) + [I(0_+) - I(\infty)] \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

ið hevur sama form sum tann almenna loysnin fyrir uppgávur av hesum slagi, sum vit fara at síggja.

Tilsvorandi finna vit líkningina fyri kondensatorsþenningin við at innseta $I(t) = C \frac{dV_C(t)}{dt}$ í meskalíkningina

$$(4.23) \quad -E_2 + RC \frac{dV_C(t)}{dt} + V_C(t) = 0$$

ella í skipaðum formi

$$(4.24) \quad \frac{dV_C(t)}{dt} + \frac{V_C(t)}{\tau} = -\frac{E_2}{\tau} \quad \text{har} \quad \tau = RC$$

Hetta er ein inhomogen 1. ordans differentiallíkning. Loysnin til slíka líkning er summurin av eini partikkulerari loysn og loysnini fyri tilsvorandi homogenu differentiallíkningina. Vit síggja, at $V_C = E_2$ er ein partikkuler loysn. Sostatt verður

$$(4.25) \quad V_C(t) = E_2 + V_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

har τ hevur sama týðning og virði sum áður. Byrjannarsþenningurin, t.e. þenningurin tá $t = 0_+$, er

$$(4.26) \quad V_C(0_+) = E_2 + V_0 \quad \text{soleiðis, at} \quad V_0 = V_C(0_+) - E_2$$

Vit síggja eisini av (4.25), at, tá ið $t \rightarrow \infty$, verður

$$(4.27) \quad V_C(t) \rightarrow V_C(\infty) = E_2$$

Sama úrslit kunnu vit eisini fáa úr líkning (4.24) við tað, at $dV_C/dt \rightarrow 0$, tá $t \rightarrow \infty$, og líkningin verður $V_C(\infty)/\tau = E_2/\tau$.

Verða virðini $\tau = RC$, $E_2 = V_C(\infty)$ og $V_0 = V_C(0_+) - V_C(\infty)$ innsett í loysnina fyri V_C fæst

$$(4.28) \quad V_C = V_C(t) = V_C(\infty) + [V_C(0_+) - V_C(\infty)] \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{tá} \quad t > 0$$

Líkningarnar (4.22) fyri $I(t)$ og (4.28) fyri $V_C(t)$ hava júst sama form fyri $t > 0$, sum hóast funnin fyri eitt einfalt dømi, er ein almenn loysn eisini fyri meira samansettar uppgávur.

Taldømi:

Vit skulu at enda vísa úrslitið, ið fæst av hesum formlum við einum taldømi. Lat vera givið, at

$$E_1 = 1 \text{ V} \quad E_2 = 10 \text{ V} \quad R = 2 \text{ k}\Omega \quad C = 0,2 \text{ }\mu\text{F}$$

Við hesum virðum finna vit

Tíðarkonstantin:

$$\tau = RC = 2 \cdot 10^3 \cdot 0,2 \cdot 10^{-6} \text{ s} = 0,4 \text{ ms} \quad \text{galdandi fyri bæði spenning og streym}$$

Nulpunkts virðini og asymptotiskt virði fyri kondensatorspenningin:

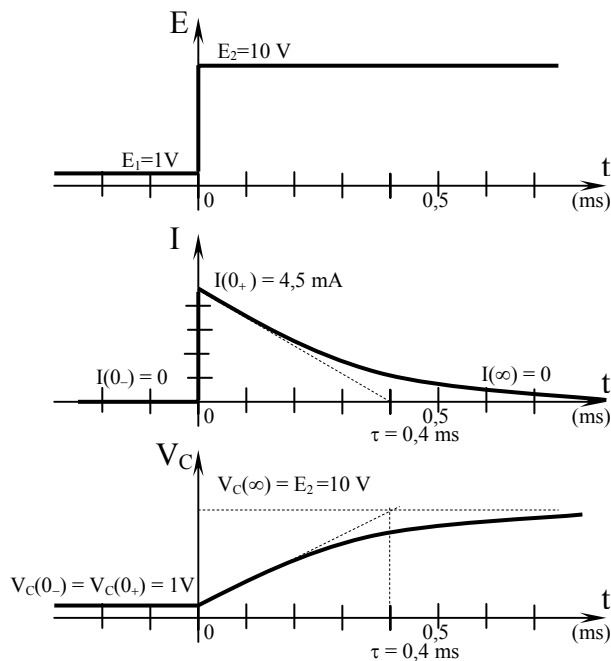
$$V_C(0_-) = V_C(0_+) = E_1 = 1 \text{ V} \quad \text{og} \quad V_C(\infty) = E_2 = 10 \text{ volt}$$

Nulpunkts virðini og asymptotiskt virði fyri kondensatorstreymin (meskastreymin):

$$I(0_-) = 0 \quad I(\infty) = 0 \quad \text{og}$$

$$I(0_+) = \frac{E_2 - V_C(0_+)}{R} = \frac{10 - 1}{2 \cdot 10^3} \text{ A} = 4,5 \text{ mA}$$

Við hesum sum støði tekna vit myndina 4.5 av gongdini hjá E, V_C , og I sum funktiún av tíðini t. Legg til merkis, at tangentarnir til I(t) og V(t) skera asymptoturnar $I(\infty)$ og $V_C(\infty)$ í $t = \tau$.



Mynd 4.5 Umløðing av kondensatori við uppseting í mynd 4.4 og við talvirðum fyri lutir og spenningsgerða, sum givið í døminum: a. Spenningur frá spenningsgerða E. b. Kondensatorstreymur ella meskastreymur I. c. Kondensatorspenningur V_C .

4.3.2 Almenn loysn fyri 1. ordans RC-rás

Hóast vit hava funnið úrslitini (4.22) og (4.28) fyri streym og spenning í sera einfaldari streymrás, er prinsipielli formurin í loysnini tann sami sum fyri allar streymrásir, har bert ein kondensator er í. Hetta kemst av, at líkningarnar fyri allar slíkar rásir verða 1.ordans differentillíkingar, og nevna vit tí hesar rásirnar 1.ordans RC-rásir. Tessvegna kunnu vit finna loysnina fyri einhvønn streym ella spenning í 1.ordans RC-rás, sum vit nú alment nevna $X = X(t)$, við 1.ordans differentillíkingini

$$(4.29) \quad \frac{dX}{dt} + \frac{1}{\tau}X = \frac{X(\infty)}{\tau}$$

har τ og $X(\infty)$ eru konstantar. Tað er eyðsýnt, at sum fylgja av, at $dX/dt \rightarrow 0$, tá $t \rightarrow \infty$, vil $X(t) \rightarrow X(\infty)$, og tí er tað asymptotiska virðið av $X(t)$.

Henda líkningin hevur júst sama form, sum vit í undangangandi parti 4.3.1 sóu, at kondensatorspenningurin hevði har, og hevur tí eina tilsvareandi formliga loysn fyri $t > 0$

$$(4.30) \quad X = X(t) = X(\infty) + [X(0_+) - X(\infty)] \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Uppgávan er tí at finna støddirnar fyri tíðarkonstant τ , byrjanarvirði $X(0_+)$ og asymptotiskt virði $X(\infty)$. Harumframt skulu vit eisini finna virðið $X(t) = X(0_-)$, sum er loysn fyri $t < 0$.

Vit byta loysnina av hesi uppgávu upp í tveir partar við tað, at spenningurin V_C yvir kondensatorin C í rásini hevur ein serligan leiklut í at finna byrjannarvirðið $X(0_+)$ fyri allar aðrar streymar og spenningar. Tí finna vit $V_C(t)$ fyrst, og síðan $X(t)$.

Loysnin fyri kondensatorspenningin

Tá $t < 0$, finna vit kondensatorspenningin $V_C(0_-)$ eins og í einfalda døminum. Við tað at ongar broytingar fara fram í rásini, t.e. d/dt av øllum støddum er null, vil kondensatorstreymurinn vera null, og vit kunnu rokna $V_C(0_-)$ út frá reinari mótstøðurás, har kondensatorin er tikin burtur. Hetta ger jú ongan mun, tá eingin streymur rennur í honum.

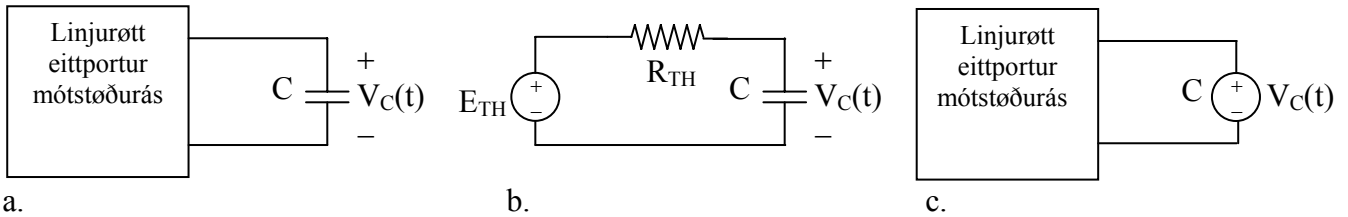
Av tí at kondensatorspenningurin ikki kann broyast diskontinuert, fáa vit eisini í hesum føri, at

$$(4.31) \quad V_C(0_-) = V_C(0_+)$$

Tá $t \rightarrow \infty$ verður $V_C \rightarrow V_C(\infty)$, ið er konstantur, og kondensatorstreymurinn tí gongur móti null. Tessvegna ber eisini til í hesum førinum at útrokna $V_C(\infty)$ út frá reinari mótstøðurás, har C er tikin úr upprunaligu rásini, men har vit skulu minnst til at hava broytingina við, sum er hend, tá $t = 0$.

Nú er so bert tíðarkonstanturin eftir at rokna út. Til hetta endamál brúka vit Thevenins lóg. Vit kunnu tekna rásina upp sum eina linjurætta streymrás við einans mótstøðum, spennings- og streymgerðum og einum útgangsportri, t.e. eitt eitt-portur, har kondensatorin er bundin til sum í mynd 4.6a. Vit gera nú Thevenins javnmetisrásina í mynd 4.6b. Henda rásin hevur júst sama form sum rásin í tí einfalda døminum í mynd 4.4 og tessvegna eisini somu loysn fyri tíðarkonstantin

$$(4.32) \quad \tau = R_{TH} \cdot C$$



- Mynd 4.6 a. Fyrsta ordans RC-rás samansett av linjurættum eittportri og einum kondensatori.
 b. Thevenin javnmetisrás er sett í staðin fyrir linjurætta eittportur mótstöðurásina í mynd a.
 c. Javnmetisrás fyrir fyrsta ordans RC-rás har spenningsgerði við sama spenningi $V_C(t)$ er settur í staðin fyrir kondensatorin.

Síðan er bert at innseta tær funnu stöddirnar í almennu loysnina

$$(4.33) \quad V_C = V_C(t) = V_C(\infty) + [V_C(0_+) - V_C(\infty)] \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Almenna loysnin fyrir allar hinar spenningarnar og streymarnar í 1.ordans RC-rásini, sum vit alment hava nevnt stöddina $X=X(t)$ skal nú verða viðgjörd.

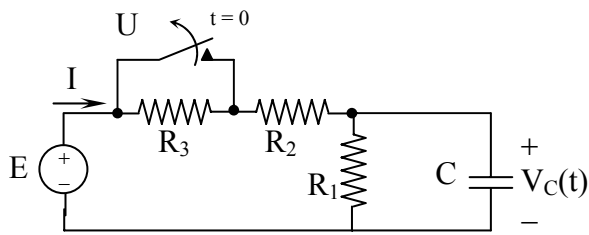
Tá $t < 0$ hefur rásin verið í frið í longri tíð, og $X(t) = X(0_-)$ er tí konstant. Vit vita eisini, at kondensator-streymurin er null. Tí kann $X(0_-)$ verða funnin við loysn av reinari mótstöðurás, har vit taka kondensatorin úr rásini.

Tá $t = 0_+$ er broyting hend í rásini. Við tað, at onkur spennings- ella streymgerði ella mótstöða hava broytt virði ella onkur umskiftari hefur broytt rásina sjálva. Vanliga hava tá $X(0_-)$ og $X(0_+)$ ikki sama virði. Men vit kunnu brúka vitan okkara um, at spenningurin yvir kondensatorin ikki verður broyttur og er funnin áður, $V_C(0_+) = V_C(0_-)$. Tískil vita vit, at millum knútapunktini, ið kondensatorin er bundin til, liggur hesin spenningur. Vit kunnu tí gera eina javnmetisrás mynd 4.6c, har kondensatorin verður skiftur um við ein spenningsgerða við stöddini $V_C(t) = V_C(0_+)$. Harvið hava vit fingið eina reina mótstöðurás til at útrokna $X(0_+)$ við til dömris knútapunkts- ella meskalíkingum, ella øðrum roknihættum.

Tá $t \rightarrow \infty$ verður kondensatorstreymurin aftur null, og til ber at rokna $X(\infty)$ út við at taka kondensatorin úr rásini og síðan rokna $X(\infty)$ út frá tí reinu mótstöðurásini, sum hon sær út, tá $t > 0$.

Tíðarkonstanturin τ er, sum vit nú skulu vísa, tann sami fyri $X(t)$ sum fyri kondensatorspenningin $V_C(t)$. Hetta úrslit kunnu vit koma til við at gera eina javnmetisrás, har kondensatorin við spenninginum $V_C(t)$ verður skiftur út við spenningsgerða við somu stödd $V_C(t)$, sum víst er í mynd 4.6c. Av tí at javnmetisrásin í síni heild er linjurætt, er $X(t)$ samansett sum ein linearkombinátión av øllum teimum inngangandi spennings- og streymgerðunum. Tí vil eitt lið í $X(t)$ koma at vera proportionalt við $V_C(t)$ og tessvegna innihalda liðið, sum broytist exponentielt við tíðini við faktorinum $e^{-\frac{t}{\tau}}$ við tíðarkonstantinum τ . Tessvegna vil tíðarkonstanturin fyri $X(t)$ eisini vera τ . Sostatt broytast allar stöddir $X(t)$ við sama tíðarkonstanti sum kondensatorspenningurin $V_C(t)$.

4.3.3 Samansett dæmi við RC-rás



Mynd 4.7 Dæmi um samansetta RC-rás, har rásin verður broytt við umskiftara, tá tíðin $t = 0$.

Fyri at vísa brúki av almennu loysnini til 1.ordans rásina, vilja vit finna kondensatorspenningin $V_C = V_C(t)$ og streymin $I = I(t)$ í streymrásini í mynd 4.7. Uppgávan verður sostatt at finna tíðarkonstantin τ , $V_C(0_-)$, $V_C(0_+)$, $V_C(\infty)$, $I(0_-)$, $I(0_+)$ og $I(\infty)$, og innseta hesar støddirnar í almennu loysnina..

Rásin er samansett av mótstöðunum R_1 , R_2 og R_3 , umframt kondensatorinum C , spenningsgerðanum E og umskiftaranum U . Broytingin í rásini er myndað av, at umskiftarin er kortsluttaður, tá $t < 0$, og opin, tá $t \geq 0$.

Tíðarkonstanturin τ verður funnin við opnum umskiftara. Tað merkir, at R_3 er virkið við í rásini og liggur í seriu við R_2 . Tá τ verður útroknað, innstilla vit spenningsgerðan $E = 0$, sum soleiðis virkar sum ein kortslutningur. Støddin á τ er tí

$$(4.34) \quad \tau = C \cdot R_{TH} = C \cdot R_1 \parallel (R_2 + R_3)$$

Spenningsurin $V_C(t)$ verður nú fyrst funnin. Hann er kontinuertur, tá $t = 0$, t.e. $V_C(0_-) = V_C(0_+)$. Fyri $t < 0$, er umskiftarin kortsluttaður, og R_3 verður tí ikki virkin. Vit finna tí við spenningsbýting, at

$$(4.35) \quad V_C(0_-) = V_C(0_+) = E \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Tá $t > 0$, er umskiftarin opin, og R_3 liggur nú í seriu við R_2 . Tí finna vit fyri $t \rightarrow \infty$ við spenningsbýting, at

$$(4.36) \quad V_C(\infty) = E \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3}$$

Almenna loysnin til kondensatorspenningin gevur okkum sostatt fyri $t > 0$

$$(4.37) \quad \begin{aligned} V_C &= V_C(t) = V_C(\infty) + [V_C(0_+) - V_C(\infty)] \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \\ &= E \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3} + \left[E \frac{R_1}{R_1 + R_2} - E \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3} \right] \cdot e^{-\frac{t}{C \cdot R_1 \parallel (R_2 + R_3)}} \end{aligned}$$

Innseta vit talvirði fyri E , R_1 , R_2 , R_3 og C í hesa loysn gevur tað okkum $V_C(t)$.

Streymurinn $I(t)$ verður funnin á tilsvarendi hátt. Tíðarkonstanturinn τ er tann sami sum fyri $V_C(t)$. $I(t)$ hevur ymisk virði fyri $t = 0_-$ og $t = 0_+$.

Tá $t < 0$ og umskiftarin kortsluttaður finna vit við at taka C úr rásini, at

$$(4.38) \quad I(0_-) = E \frac{1}{R_1 + R_2}$$

Tá $t = 0_+$ og kontaktin er opin, kunnu vit finna streymin gjøgnum mótstøðuna $R_2 + R_3$ við ohms lóg og at innseta fyrr funnað virðinum fyri $V_C(0_+)$

$$(4.39) \quad \begin{aligned} I(0_+) &= \frac{E - V_C(0_+)}{R_2 + R_3} \\ &= E \frac{R_2}{(R_2 + R_3) \cdot (R_1 + R_2)} \end{aligned}$$

Tá $t \rightarrow \infty$ finna vit

$$(4.40) \quad I(\infty) = E \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3}$$

Endaliga loysnin av $I(t)$ er tískil

$$(4.41) \quad \begin{aligned} I = I(t) &= I(\infty) + [I(0_+) - I(\infty)] \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \\ &= E \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3} + \left[E \frac{R_2}{(R_2 + R_3) \cdot (R_1 + R_2)} - E \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3} \right] \cdot e^{-\frac{t}{C \cdot R_1 \parallel (R_2 + R_3)}} \end{aligned}$$

Taldømi:

Lat okkum til seinast í einum taldømi innseta talvirði fyri inngangandi støddir:

$$E = 10 \text{ volt} \quad R_1 = 4 \text{ k}\Omega \quad R_2 = 1 \text{ k}\Omega \quad R_3 = 15 \text{ k}\Omega \quad C = 2 \text{ }\mu\text{F}$$

Hesi tøl innsett í formlarnar omanfyri geva

$$(4.42) \quad \begin{aligned} \tau &= C \cdot R_{TH} = C \cdot R_1 \parallel (R_2 + R_3) \\ &= 2 \cdot 10^{-6} \text{ F} \cdot \left[4 \cdot 10^3 \parallel (1 \cdot 10^3 + 15 \cdot 10^3) \right] \Omega \\ &= 2 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{4 \cdot 10^3 \cdot (1 \cdot 10^3 + 15 \cdot 10^3)}{4 \cdot 10^3 + 1 \cdot 10^3 + 15 \cdot 10^3} \text{ s} = 6,4 \text{ ms} \end{aligned}$$

$$(4.43) \quad V_C(0_-) = V_C(0_+) = E \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 10 \frac{4 \cdot 10^3}{4 \cdot 10^3 + 1 \cdot 10^3} \text{ V} = 8 \text{ V}$$

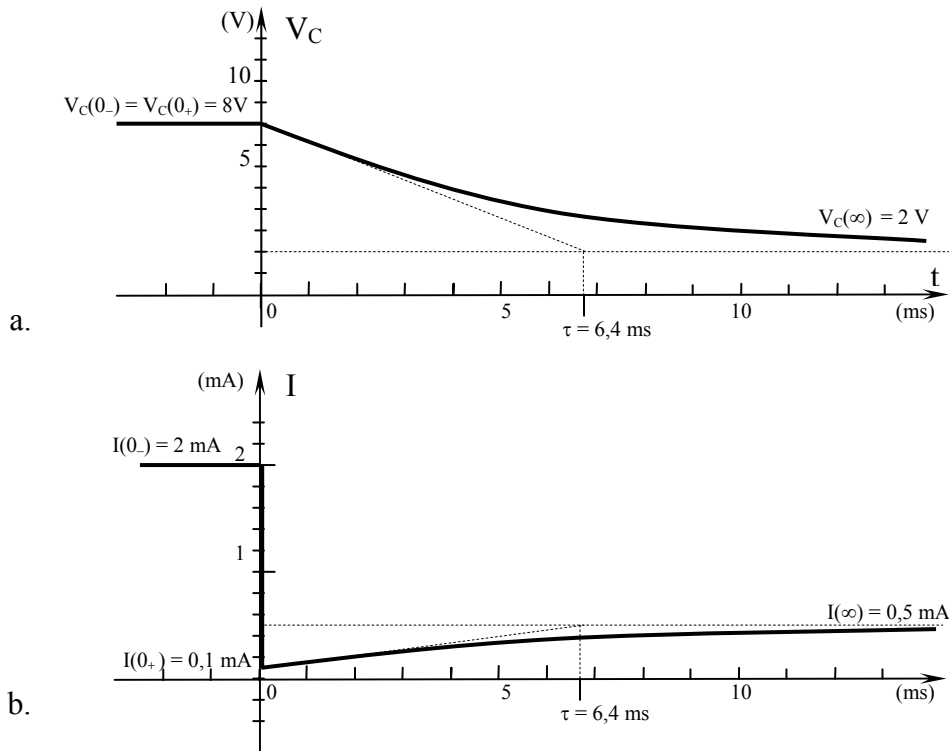
$$(4.44) \quad V_C(\infty) = E \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3} = 10 \frac{4 \cdot 10^3}{4 \cdot 10^3 + 1 \cdot 10^3 + 15 \cdot 10^3} \text{ V} = 2 \text{ V}$$

$$(4.45) \quad I(0_-) = E \frac{1}{R_1 + R_2} = 10 \frac{1}{4 \cdot 10^3 + 1 \cdot 10^3} A = 2 \text{ mA}$$

$$(4.46) \quad I(0_+) = E \frac{R_2}{(R_2 + R_3) \cdot (R_1 + R_2)} = 10 \frac{1 \cdot 10^3}{(1 \cdot 10^3 + 15 \cdot 10^3) \cdot (4 \cdot 10^3 + 1 \cdot 10^3)} A = 0,1 \text{ mA}$$

$$(4.47) \quad I(\infty) = E \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3} = 10 \frac{1}{4 \cdot 10^3 + 1 \cdot 10^3 + 15 \cdot 10^3} A = 0,5 \text{ mA}$$

Í mynd 4.8 eru $V_C(t)$ og $I(t)$ avmyndað sum funktión av tíðini. Legg til merkis, at tangentarnir til $I(t)$ og $V(t)$ skera asymptoturnar $I(\infty)$ og $V_C(\infty)$ í $t = \tau$.



Mynd 4.8 Umløðing av kondensatori við uppseting í mynd 4.7 og við talvirðum fyri lutir og spenningsgerða sum givið í døminum: a. Kondensatorspenningur $V_C(t)$, b. Streymur $I(t)$.

5. Hálvleiðarar

Öll evni eru uppbyggð av atomum, samansett av eini kjarnu við positivari elektriskari lœðing og elektronum við negativari lœðing. Elektronirnar sveima rundan um kjarnuna. Í flestu evnum kunnu elektronirnar stundum verða leysar og ferðast runt í evninum. Við tað, at tær eru lœddar við negativari lœðing, kunnu tær soleiðis bera elektriskan streym gjøgnum evni.

Mótstœðan í einum evni kann ímyndast við Ohms lóg, har spenningurin V og streymurin I eru proportional, $V = RI$, og har proportionalitetskonstanturin R verður nevndur mótstœðan, og resiprokka virðið $G = 1/R$ verður nevnt leiðaraevni. Mótstœðan í einum tráði ella stabba av evni við javnari tjúkd er proportionalur við longdina ℓ og umvent proportionalur við tvørskurðs víddina A .

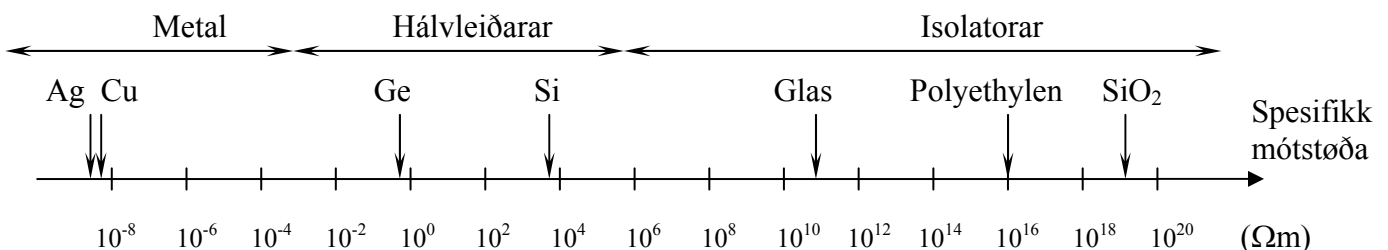
$$(5.1) \quad R = \rho \frac{\ell}{A}$$

Proportionalitetskonstanturin ρ verður nevndur **spesifikka mótstœðan**, og resiprokka virðið av honum $\sigma = 1/\rho$ verður nevnt **spesifikka leiðaraevni**.

5.1 Elektrisk mótstœða í fœstum evnum

Metal er sera góður elektriskur leiðari, og hevur líttla spesifikka mótstœðu soleiðis, sum mynd 5.1 vísir. Silvur (Ag) og kopar (Cu) eru best leiðandi metalini, og verða slík evni nevnd góðir leiðarar av elektriskum streymi. Myndin vísir eisini, at summi evni sum t.d. glas (her eru vanligt glas og kvartsglas SiO_2 tikið sum dømi) og plastikk (polyethylen og tílíkt) eru sera vánaligir leiðarar. Munurin er eitt stórt tal av tíggitalsfaktorum sum víst í myndini. Hesir vánaligu leiðararnir verða nevndir isolatorar.

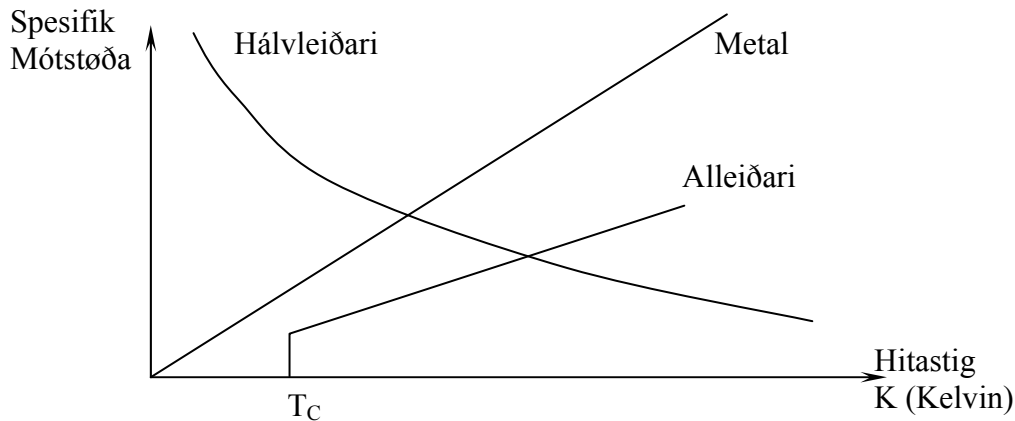
Evni við mótstœðuvirðum í einum øki á mótstœðuásinum millum metal og isolatorar verða ofta nevnd hálvleiðarar. Dømi eru germanium (Ge) og silisium (Si), umframt nógv samansett evni sum t.d. galliumarsenid (GaAs), gallium aluminium arsenid (GaAlAs), gallium-aluminium-indium-fosfid (GaAlInP), Indiumfosfid (InP) og nógv onnur. Serstakliga Si verður nógv brúkt til diodur, transistorar og integreraðar streymrásir, men eisini Ge hevur verið nógv brúkt til slíkar elektroniskar lutir, men ikki so nógv longur. Hálvleiðararnir úr samansettum evnum hava fingið ein serstakan leiklut í samband við elektrooptik, ljósleiðarafjarskifti og integreraðan elektrooptik, bæði sum serstakir elektrooptiskir lutir ljósdiodur, hálvleiðaralasarar og fotodetektorar, umframt í integreraðum optiskum rásum.



Mynd 5.1 Spesifikk mótstœða fyri ymisk evni (stovuhiti)

Spesifikka mótstœðan í flestu evnum er heft av hitastiginum. Vanligt er fyri metal, at hon er næstan linjurætt vaksandi við hitastiginum T í Kelvin, meðan hon fyri onnur evni, t.d. hálvleiðarar er

avtakandi við T , soleiðis sum mynd 5.1 vísir. Eitt serstakt fyrbrigdi vísir seg fyri nøkur evni (t.d. blýggj, tin, kyksilvur, niobium o.o.) við tað, at spesifikka mótstöðan heilt hvørvur, tá hitastigið er undir eitt ávíst virði T_c , nevnt kritiska hitastigið, ella hitastiggáttin. Hesi evni verða nevnd alleiðarar (superleiðarar).



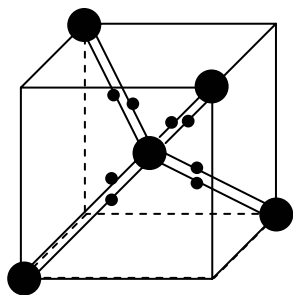
Mynd 5.2 Spesifikk mótstöða í metali, hálvleiðara og alleiðara sum funktión av hitastiginum

5.2 Reinir hálvleiðarar

Hálvleiðarar eru sera týðningarmiklir í samband við elektroniskar rásir. Silisium (Si) er evni, ið mest hevur verið og er brúkt til elektroniskar lutir og integreraðar streymrásir (IC=integrated circuits), har serstakliga skal nevast diodan ella einsrættarin, felteffekt transistorin og bipoleri transistorin, og verður tí lýst eitt sindur neyvvari. Germanium (Ge), sum varð nógv brúkt fyrr, men minni nú, hevur sama krystallbygnað. Aðrir hálvleiðarar eru eisini og kunnu hava annan krystallbygnað, men virka á líknandi hátt sum Si.

Silisium (Si) er tetravalent (t.e. 4 valenselektronir) grundevni við krystallstrukturi sum diamantur avmyndað í mynd 5.3. Silisiumatomini eru bundin saman við sonevndum kovalentum bindingum, har ein elektron frá hvørum silisiumatomi, ið eru bundin saman, luttekur í bindingini. Sostatt verða allar valenselektronirnar bundnar í teimum kovalentu bindingunum í krystallini.

Nakrar av elektronunum verða kortini rivnar leysar úr tí kovalentu bindingini av termiskum røslum. Til at leysríva eina elektron krevst orkan E_g (Fyri Si er $E_g = 1,1$ eV (elektronvolt)). E_g verður vanligi nevnt orkugapið. Hetta førir so við sær, at, um hitastigið (T Kelvin) er høgt, verða fleiri leysar elektronir í hálvleiðarakrystallini og kunnu flyta seg frítt. Leysu elektronirnar leiða elektriskan streym.



- Silisiumatom við positivari løðing
- Elektron við negativari løðing í kovalentari binding,
- Strikurnar millum silisiumatomini myndar kovalentu bindingarnar.

Mynd 5.3 Krystallstrukturur hjá silisium

Tey stöð í krystallini, har tær leysrivnu elektronirnar sótu, mangla nú eina elektron í kovalentu bindingini. Vit nevna hetta eitt hol. Við tað, at elektronir bera negativa løðing, manglar sostatt ein negativ løðing á hesum staði, og vit fáa tí, at positiva løðingin á føstu silisiumatomkjarnum í krystallini ikki longur eru javnað (neutraliserað av nóg nógvum elektronum. Vit kunnu eisini siga, at ein javnmett (ekvivalent) positiv løðing er skapt á hesum staði. Termiskar rørsur gera nú, at onkur granaelektron kann loypa úr síni binding yvir í holið, sum skapt varð í fyrstu atløgu. Hervið verður holið flutt til staðið, har henda elektronin var. Á henda hátt kann holið flyta seg runt í krystallini sum ein positiv løðing og sostatt bera elektriskan streym.

Vit síggja sostatt, at í einum hálvleiðara eru tvey virkin sløg av løðingsberarum, ið kunnu leiða elektriskan streym, **elektronir við negativari løðing** og **hol við positivari løðing**.

Eins og í silisium er eisini í øðrum hálvleiðarum móguleiki fyri at leysríva eina elektron úr kovalentu bindingini. Tá krevst ávís nøgd av orku, ið verður nevnd **orkugapið** E_g , ið er ymiskt til støddar fyri ymiskar hálvleiðarar. Til tess at lýsa støddina av E_g , kunnu vit nevna talvirðini á orkugapinum mátað í eindini elektronvolt (eV) fyri nakrar hálvleiðarar:

Si	$E_g = 1,1 \text{ eV}$	
Ge	$E_g = 0,7 \text{ eV}$	
GaAs	$E_g = 1,43 \text{ eV}$	
$\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$	$1,92 < E_g < 2,16 \text{ eV}$	$0 < x < 1$
$\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$	$0,354 < E_g < 2,16 \text{ eV}$	$0 < x < 1$
InP	$E_g = 1,34 \text{ eV}$	
AlAs	$E_g = 2,16 \text{ eV}$	

Elektronvolt (eV) er ein sera lítil orkueind, ið verður brúkt í atomarum samanhangi. Støddin 1 eV verður lýst sum tann rørsluorkan, sum ein elementarløðing, ið hevur løðingina $1,9 \cdot 10^{-19} \text{ As}$ (= Coulomb), fær, tá hon verður flutt undan elektriska feltinum millum tvey stöð, har potentialið fellur 1 volt, og hava vit tí, at

$$1 \text{ eV} = 1,9 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 1 \text{ V} = 1,9 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$$

Konsentratióinir av elektronum n_i og holum p_i í einum sovorðnum reinum, ofta nevndur “intrinsik hálvleiðara”, eru sostatt eins stórar. Sum dømi kunnu vit nevna, at í evnunum

$$\begin{aligned} \text{Si} \text{ er } n_i = p_i &= 1,45 \cdot 10^{16} \text{ m}^{-3}, \text{ og} \\ \text{Ge} \text{ er } n_i = p_i &= 2,40 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}, \end{aligned}$$

sum sjálvsagt eru stór tøl, men kortini rættuliga smá í lutfall til konsentratióinina av atomum, sum fyri Si er $5 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3}$, og Ge er $4,4 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3}$.

5.3 Doteradur hálvleiðarar

Sum nevnt varð, eru Si og Ge tetravalent við krystalbygnaði sum víst í mynd 5.3. Um vit nú seta eitt pentavalent atom, t.d. fosfor (P) inn í eina Si krystall, verða tær fyra elektronirnar nýttar til tær kovalentu bindingarnar, meðan hin fimta elektronin verður leys, og kann flyta seg frítt í krystallini. Hon kann nú sum aðrar leysar elektronir leiða streym. Hinvegin kann hon eisini koma framvið har ein elektron manglar í krystallini og gerast bundin har, ella “detta niður í holið”. Sostatt vil doteringin av krystallini við P-atomum føra við sær, at konsentratióin av holum minkar. Eitt slíkt evni við øktari konsentratióin av elektronum og minkaðari konsentratióin av holum nevna vit ein donordoteradur hálvleiðara ella n-hálvleiðara.

Brúka vit eitt trivalent evni sum t.d. bor (B) sum doringsevni og seta eitt boratom í staðin fyrir eitt silisiumatom, koma tær triggjar valenselektronirnar hjá B at gera kovalentar bindingar í krystallini. Men nú manglar 4. elektronin. Har er sostatt eitt hol skapt. Hetta holið kann flyta runt í krystallini sum øll onnur hol og verða við til at leiða streym. Hinvegin kann tað eisini verða fyllt út við onkrari leysari elektron og soleiðis minka um konsentrationina av elektronum í krystallini. Eitt slíkt evni við øktari konsentration av holum og minkaðari konsentration av elektronum nevna vit ein acceptordoteraðan hálvleiðara ella p-hálvleiðara.

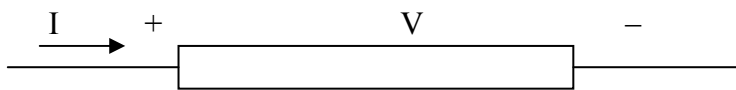
Við meira gjølla at gera alisfrøðiligar útrokningar, men sum tó ikki skulu verða gjørdar her, kann tað verða prógvað, at produktið av holkonsentrationini p og elektronkonsentrationini n altíð er tað sama uttan mun til, um krystallin er donor ella akseptor doterað ella er intrinsik og javnt við produktið $n_i \cdot p_i$. Eisini kann prógvast, at hetta produktið kann verða skrivað soleiðis

$$(5.2) \quad n \cdot p = n_i \cdot p_i = KT^3 \exp\left(\frac{E_g}{kT}\right)$$

har E_g er orkugapið, T er hitastigið í Kelvin, og $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K er Boltzmanns konstantur. K er ein tilfarskonstantur, sum fyri Si er $K=2,17 \cdot 10^{43} \text{ m}^{-6} \text{ K}^{-3}$ og fyri Ge er $K=1,17 \cdot 10^{43} \text{ m}^{-6} \text{ K}^{-3}$. Støddin kT kann roknast í Joule (J), men tað er hent í nevnda formlu at rokna hana í eV. Fyri $T = 300$ K, ið er vanligt hitastig fyri elektroniskar hálvleiðaralutir í nýtslu, er

$$(5.3) \quad kT = 4,14 \cdot 10^{-21} \text{ J} = 0,0259 \text{ eV} = 25,9 \text{ meV}$$

5.4 Elektriskur streymur í hálvleiðarum



Mynd 5.4

Vit hava nú sæð, at í hálvleiðarum eru tvey sløg av løðingsberarum, elektronir og hol, sum kunnu leiða elektriskan streym. Í hesum partinum skulu vit lýsa eginleikarnar hjá elektriska streyminum við útgangsstøði í myndini 5.4 av eini stong ella einum tráði av hálvleiðara. Millum endarnar seta vit ein spenning V , ið skapar eitt elektriskt felt í stongini, og í henni rennur streymurin I ígjøgnum. Fyri hesa uppseting seta vit nakrar formlar upp, sum lýsa, hvussu elektriski streymurin er samansettur av tveimum pørtum, driftsstreymur og diffusiónsstreymur.

Elektriska feltið togar í elektronirnar og holini og skapar ein sokallaðan **driftstreym**,

$$(5.4) \quad I_{\text{drift}} = I_{n,\text{drift}} + I_{p,\text{drift}}$$

ið fylgir ohms lóg soleiðis, at

$$(5.5) \quad I_{n,\text{drift}} = G_n \cdot V \quad \text{er streymurin borin av elektronunum, og}$$

$$(5.6) \quad I_{p,\text{drift}} = G_p \cdot V \quad \text{er streymurin borin av holunum.}$$

Her eru G_n og G_p leiðaraevni (t.e. resiprokku mótstøðurnar) fyri ávikavist elektronir og hol.

Umframt driftstreymin verður ein elektriskur streymur borin í hálvleiðaranum sum **diffusiónsstreymur**. Hugsa vit okkum, at konsentrationin av elektronum er ójovn vil ein streyming

fara fram, sum roynir at útjavna konsentratióina. Er t.d. elektronkonsentratióin stór í høggra enda á stongini, streyma fleiri elektronir móti vinstru enn øvugt; men hervið verður ein elektriskur streymur skaptur, sum gongur móti høggru av tí, at elektronirnar hava negatíva løðing. Vit siga, at elektronirnar hervið bera ein diffusiónsstreym, hvørs stødd kann vísast at vera

$$(5.7) \quad I_{n,diff} = qAD_n \frac{dn}{dx}$$

har A er víddin á tvørskurðinum av tráðnum, D_n er ein konstantur, nevndur diffusiónskonstanturin fyri elektronir, x er staðkoordinaturin, og differentialkvotienturin $\frac{dn}{dx}$ er sokallaði gradienturin av elektronkonsentratióini n. Tilsvarandi kunnu vit skriva ein diffusiónsstreym fyri holkonsentratióina

$$(5.8) \quad I_{p,diff} = -qAD_p \frac{dp}{dx}$$

har D_p er ein konstantur, nevndur diffusiónskonstanturin fyri hol, x er sami staðkoordinatur, og differentialkvotienturin $\frac{dp}{dx}$ er gradienturin av holkonsentratióini p. Samlaði diffusiónsstreymurin verður sostatt

$$(5.9) \quad I_{diff} = I_{n,diff} + I_{p,diff} = qAD_n \frac{dn}{dx} - qAD_p \frac{dp}{dx}$$

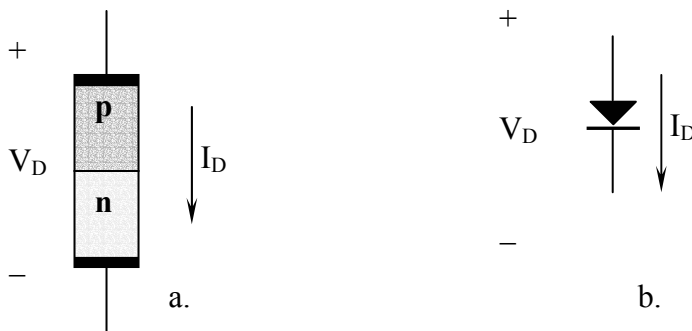
At enda kunnu vit gera tað niðurstøðu, at samlaði elektriskur streymurin í hálvleiðaranum er

$$(5.10) \quad I = I_{drift} + I_{diff}$$

Hesi viðurskifti eru av stórum týdningi í diodum og transistorum, sum vit skulu viðgera kvalitatívt í þørtunum um diodur, felteffekt transistorar og bipolarar transistorar. Men tað liggur uttan fyri evni í hesum riti at fara kvantitatívt í dýpdina við hesum.

6. Diodur

Diodur eru elektriskir lutir, sum leiða streym í annan rætningin, men ikki í hin, t.e. tær eru elektriskir ventilar. Tær verða m.a. brúktar til einsrættarar av veksulstreymi. Í digitalum elektronikki kunnu diodur innganga sum partur av integreraðum streymrásum (IC = integrated circuits), og síggja vit tá uttanífrá ikki so nógv til tær, men fyri at skilja hesar IC'arar til fulnar hevur tað týðning eisini at skilja, hvussu diodurnar virka. Eisini er týðningarmikið at skilja dioduvirkningin fyri at fáa greiði á felteffekttransistorinum og bipolarera transistorinum.



- Mynd 6.1 a. Einföld uppbygging av diodu gjørd av hálvleiðara pn-yvirgongd, samansett av p-hálvleiðara og n-hálvleiðara, umframt metalkontaktum í erva og neðra vístar við svartari striku.
- b. Tekn, ið nýtt verður at mynda eina diodu í eini streymrás. Spenningurin yvir dioduna = V_D . Streymurin gjøgnum dioduna = I_D .

6.1 Bygnaður og virknaður

Ein dioda er uppbygd sum ein sokallað pn-yvirgongd av tveimum lögum av hálvleiðara, ið liggja upp at hvørjum øðrum, sum mynd 6.1a vísir, annað er n-hálvleiðari við yvirskoti av elektronum, meðan hitt er p-hálvleiðari við yvirskoti av holum. Í mynd 6.1b er víst teknið fyri eina pn-yvirgongd, sum vanliga verður brúkt, tá tað snýr seg um elektriskan lut í eini streymrás, og verður tá nevnd dioda. Spenningurin yvir dioduna V_D og streymurin gjøgnum dioduna I_D eru víst.

Holini í p-lagnum og elektronirnar í n-lagnum, sum kunnu flyta seg frítt í allari dioduni, koma í eina javnvág svarandi til, at hol diffundera yvir í n-lagið, og elektronir diffundera yvir í p-lagið og skapa hervið ein elektriskan streym, diffusiónsstreymin, frá p-lagnum til n-lagið. Av tí at tey bera ávikavist negativa og positiva løðing, kemur eitt spenningsfall at verða skapt soleiðis, at n-lagið er positivt og p-lagið negativt. Hetta skapar hin vegin ein elektriskan streym, ið verður drivin fram av tí elektriska feltinum millum positivu og negativu løðingina. Hetta er sokallaði driftsstreymurin, ið rennur mótsættan veg av diffusiónsstreyminum.

Um driftsstreymur og diffusiónsstreymur eru eins til stóddar, men mótsætt rættaðir, er diodustreymurin $I_D = 0$. Í hesum føri verður tann innvendiga skapti spenningurin millum p-lag og n-lag útjavnður av einum spenningi millum hálvleiðaraløginu og metalkontaktirnar tey hava samband við soleiðis, at $V_D = 0$, sæð millum leiðingarnar uttanífrá.

Verður nú ein positivur spenningur $V_D > 0$ lagdur millum p- og n-lagið, verða fleiri hol í p-lagnum "skumpað" yvir í n-lagið og fleiri elektronir yvir í p-lagið enn svarandi til javnvágina. Holini og elektronirnar vilja á markinum millum lögini rekbinera, t.e. elektronirnar detta niður í holini, ella verða bundnar at krystallini. Hetta skapar ein elektriskan streym $I_D > 0$ gjøgnum dioduna. Vit siga, at diodan er forspent í leiðirætningin ella gjøgnumgangsrætningin.

Verður hin vegin spenningurinn $V_D < 0$ lagdur millum metalkontaktirnar á p- og n-lagnum, vil tann nú negativa kontaktin á p-lagnum toga hol til sín, og tann positiva kontaktin á n-lagnum vil toga elektronir til sín. Hvervið vil ökið rundan um sjálva pn-yvirgongdina verða tómt fyri lóðingsberarar, og eingin ella lítil streymur vil renna gjögnum dioduna, t.e. $I_D \approx 0$.

Í veruligum diodum kann meira nágreiniliga verða víst við alisfrøðiligum útrokningum, at $I_D = I_S \approx 1 \text{ pA} - 1 \mu\text{A}$, og at henda støddin er heft av, hvat slag av hálvleiðara talan er um, geometriskum støddum, doteringskonsentratiónum í hálvleiðaranum og hitastignum.

Um støddin á negativa spenninginum fer upp um eitt ávíst mark $|V_D| > V_Z$, verður tað elektriska feltið í dioduni so stórt, at tað rívir eyka elektronir leysar úr krystallgittarinum í pn-yvirgongdini, og skapar tí eisini eyka hol her. Hesar elektronirnar og hesi holini verða toga av stóra elektriska feltinum í pn-yvirgongdini móti kontaktunum og skapa ein stóran elektriskan driftsstreym, sum veksur skjótt við vaksandi spenningi $|V_D|$. Umframt hetta vilja nýggju skaptu elektronirnar og holini fáa so stórt dik á seg av stóra elektriska feltinum í pn-yvirgongdini, at tey tá tey renna móti elektronum, sum enn sita fast í krystallgittarinu, eisini ríva hesar elektronirnar leysar, og harvið skapa enn fleiri leysar lóðingsberarar, sum sjálvssagt økja enn meira um elektriska streymin.

Fyribrigdi, at elektriska feltið leysrívir elektronir verður nevnt zenervirknaðurin (zener effekt), meðan fyribrigdi, at leysu lóðingsberarnir við nógvari ferð leysríva fleiri lóðingsberarar verður nevnt skalvalops-virknaðurin (avalanche effekt).

6.2 Diodukarakteristikkurin

Hesi alisfrøðiligu fyribrigdini í dioduni geva dioduni eitt serstakt samband millum spenning V_D og streym I_D . Lata vit V_D broytast frá stórum negativum til stórt positivt virði, vil I_D broytast, sum mynd 6.2 vísir. Farmyndina nevna vit diodukarakteristikkinn. Í størsta partinum av karakteristikkinum, fyri spenningsvirði $V_D > -V_Z$ er sambandið millum streym og spenning sambært formlinum

$$(6.1) \quad I_D = I_S \cdot \left(\exp\left(\frac{qV_D}{kT}\right) - 1 \right)$$

har q er elementarløðingin, og k er Boltzmanns konstantur.

Tá $-V_Z < V_D < 0$ er $I_D \approx I_S$, ið oftast er ein sera lítil streymstyrki og heft av, hvussu diodan er uppbygd, stødd o.t. Fyri Si-diodur er vanligt, at $I_S \sim 1 \text{ pA} - 1 \text{ nA}$, meðan fyri Ge-diodur er $I_S \sim 1 \text{ nA} - 1 \mu\text{A}$. I_S er nevndur metningsstreymurin (S stendur fyri “saturation current”). Í hesum spenningsøki siga vit, at diodan er forspent í sperrirætning.

I_S broytist við hitastiginum og *tvífoldast* :

- í Si fyri hvørji 7°C og
- í Ge fyri hvørji 10°C

Tá $V_D > 0$, leiðir diodan streym, og vit siga, at diodan er forspent í leiðirætning ella gjøgnumgangs-rætning. Streymurin veksur eksponentielt við spenninginum soleiðis, at ein sera lítil broyting av V_D í einum intervalli rundan um V_{D0} gevur eina stóra broyting í streyminum I_D . Ofta plaga vit tí at approssimera karakteristikkinn við eini brotlinju, soleiðis, at streymurin approssimatívt er $I_D = 0$, tá $V_D < V_{D0}$, og annars gongur karakteristikkurin lodrætt upp, tá $V_D > V_{D0}$. Hetta er víst í mynd 6.2 við punkteraðari lodrættari linju.

Stæddin á V_{D0} er fyri

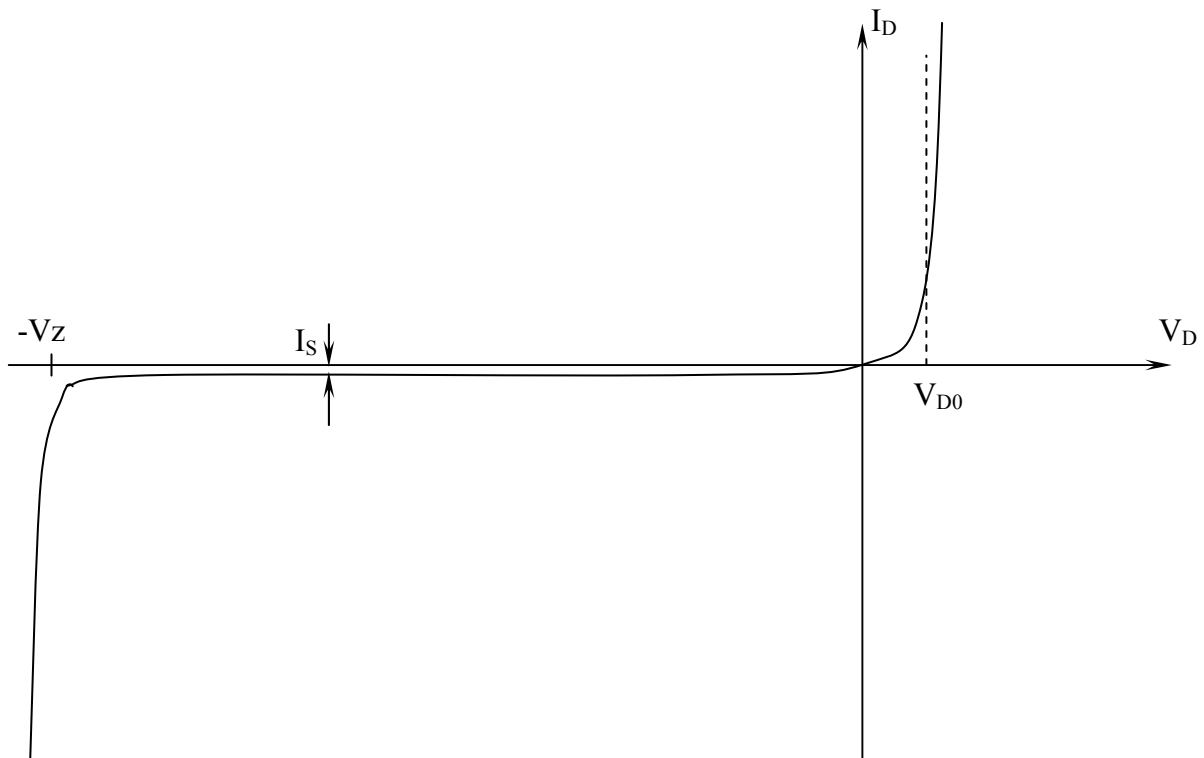
Si 0,6 – 0,7 volt, og

Ge 0,2 – 0,3 volt.

V_{D0} broytist við hitastiginum soleiðis, at

$$(6.2) \quad \frac{dV_{D0}}{dT} = -2\text{mV/K} .$$

Tá $V_D \leq -V_Z$, veksur streymurin brátt til stór negativ virði. V_Z verður vanligi nevndur Zenerspenningur og kann hava virði í økinum $-V_Z \sim -2 - -100$ volt.

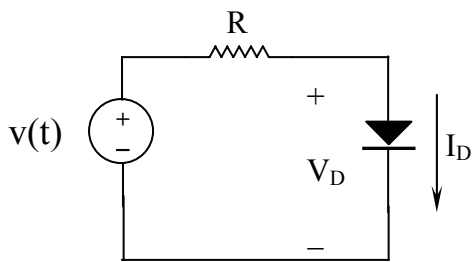


Mynd 6.2 Diodukarakteristikkur, ið myndar diodustreym I sum funkión av dioduspenningi V

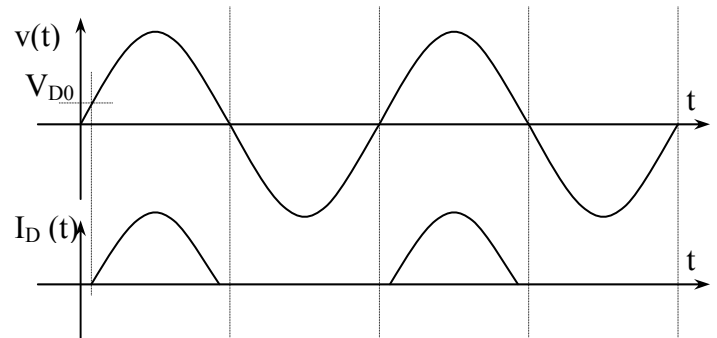
6.3 Brúksendamál við diodum

Diodur verða brúktar til nógv ymisk endamál. Tær verða ofta til hvørt einstakt endamál myndaðar við hvør sínum serstaka tekni, ið víst eru í myndunum niðanfyri. Fyri at vísa breiðu móguleikarnar at brúka diodur, verða í stuttum nevndir ymiskir diodueiginleikar og brúksendamál, men tað er uttan fyri karmarnar av hesum skrivi at far í dýpdina við teimum.

A. Einsrættaradiodan til einsrætting av vendistreymsi,



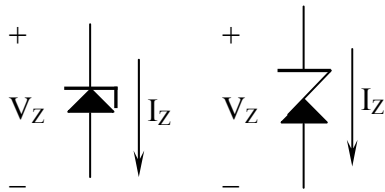
Mynd 6.3 Einsrættaradioda í einfaldari rás



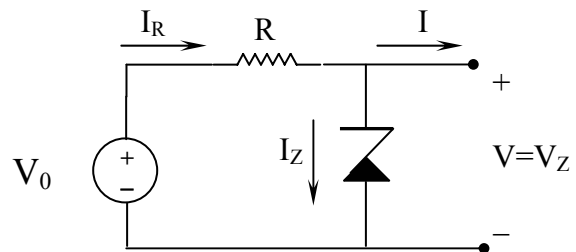
Mynd 6.4 Einsrætting av elektriskum vendistreymsi

Um spenningsgerði gevrur frá sær vendispenning, ið skiftir millum positivan og negativan spenning (t.d. sinusformað), kunnu vit við rásini í mynd 6.3 fáa einsrættaðan streym I_D , sum víst er í mynd 6.4. Teknið fyri einsrættaradioduna er tað áður vísta. Í hesi uppseting rennur streymur bert, tá $v(t) > V_{D0} \approx 0,6$ volt. Sostatt rennur streymurin í minni enn helvtina av tíðini.

B. Zenerdioda til at fæsthalda ein spenning á støðugum stigi,



Mynd 6.5 Tvey vanligu brúkt tekn fyri zenerdioduna



Mynd 6.6 Zenerdiodan í streymrás til at fasthalda spenningin

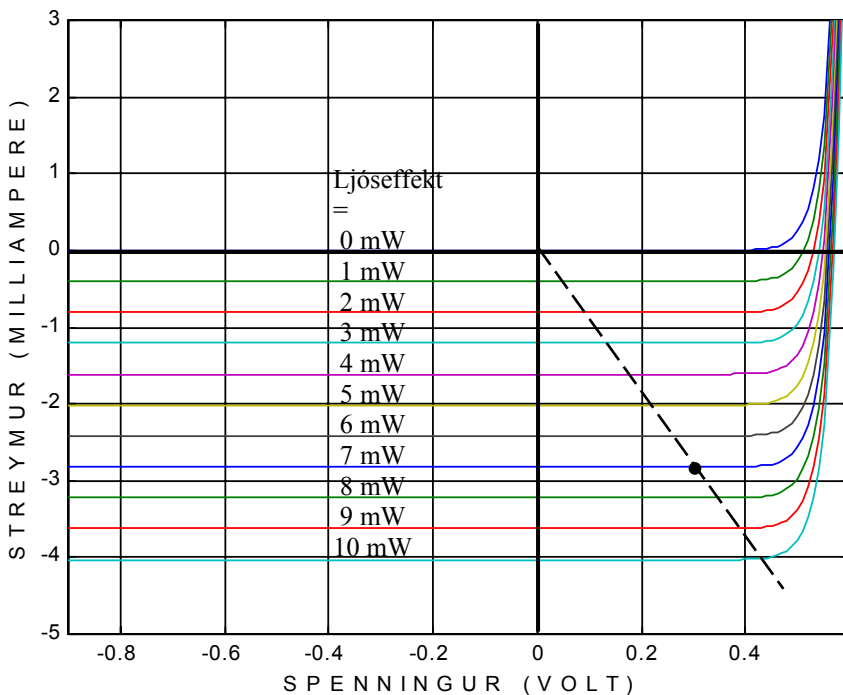
Zenerspenningurin kann verða brúktur til at læsa ein spenning fastan til ávíst virði $V = V_Z$, og verður diodan tá nevnd zenerdioda. Fyri zenerdioduna er vanligt at brúka eitt av teknumunum í mynd 6.5. Ein uppseting í mynd 6.6 vísir, hvussu hetta kann verða gjørt á einfaldan hátt. Meðan spenningsurin verður læstur til at vera $V = V_Z$, skiftir streymurin I_R gjøgnum mótstøðuna R alt eftir støddini á V_0 soleiðis, at

$$(6.3) \quad I_R = \frac{V_0 - V_Z}{R}$$

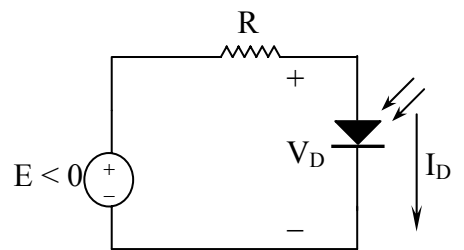
Taka vit nakað av hesum streymi I til eina ytri last, rennur bert streymurin I_Z gjøgnum dioduna, givin við

$$(6.4) \quad I_Z = I_R - I$$

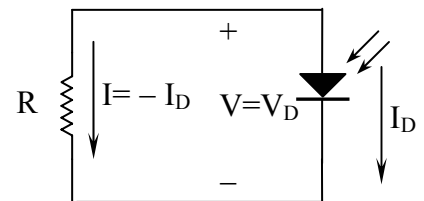
C. Fotodiodur til m \ddot{a} tning av lj \ddot{o} sstyrki, og s \ddot{o} lkyknur til framlei \ddot{o} slu av elorku \ddot{u} r lj \ddot{o} si.



Mynd 6.7 Karakteristikkur av diodu, i \ddot{d} er \ddot{u} tsett fyri lj \ddot{o} si



Mynd 6.8 Fotodioda til m \ddot{a} tning av lj \ddot{o} si



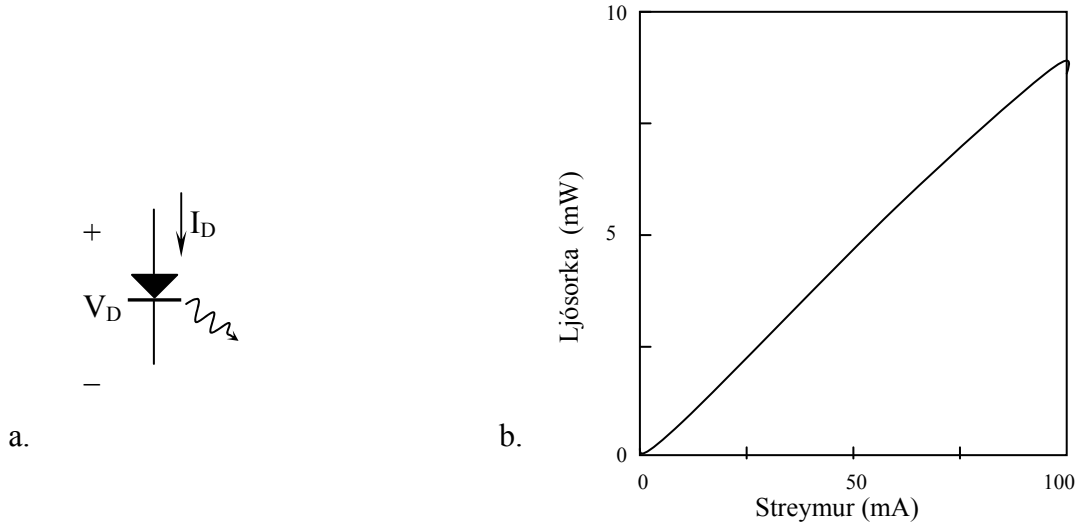
Mynd 6.9 S \ddot{o} lkykna til ger \ddot{o} av elektriskari orku

Diodur eru vi \ddot{d} kv \ddot{e} mar fyri lj \ddot{o} si, i \ddot{d} er f \ddot{o} rt fyri at leysr \ddot{i} va elektronir \ddot{u} r krystallgittarinum og harvi \ddot{d} skapa elektron-holp \ddot{o} r, i \ddot{d} kunnu lei \ddot{d} a elektriskan streym. Hetta ger, at diodukarakteristikkurin ver \ddot{d} ur parallellforskotin solei \ddot{d} is sum mynd 6.7 v \ddot{i} sir. Hetta fyrirbrigdi \ddot{d} kann ver \ddot{d} a n \ddot{y} tt til tvey n \ddot{y} tsluendam \ddot{a} l antin sum fotodioda ella sum s \ddot{o} lkykna. Hesar diodur ver \ddot{d} a ofta avmynda \ddot{d} ar vi \ddot{d} tekningum sum v \ddot{i} st er \ddot{i} myndunum 6.8 og 6.9, har tveir p \ddot{i} lar venda inn m \ddot{o} ti dioduni fyri at \ddot{i} mynda innkomandi lj \ddot{o} si \ddot{d} .

T \ddot{a} diodan er forspent \ddot{i} sperrir \ddot{a} tning sum \ddot{i} mynd 6.8, kann hon ver \ddot{d} a br \ddot{u} kt sum lj \ddot{o} sm \ddot{a} tari og ver \ddot{d} ur t \ddot{a} nevnd fotodioda. Vit s \ddot{i} ggja, at streymstyrkin orsaka \ddot{d} av parallellu karakteristikkunum vi \ddot{d} fjarst \ddot{o} ðu proportionalt vi \ddot{d} lj \ddot{o} sorkuna, ver \ddot{d} ur proportionalur vi \ddot{d} hesa upptiknu lj \ddot{o} sorku, sum mynd 6.7 v \ddot{i} sir.

T \ddot{a} diodan er uttan forspenning sum \ddot{i} mynd 6.9, kann hon framlei \ddot{d} a elektriska orku \ddot{u} r lj \ddot{o} sorkuni. Hon ver \ddot{d} ur t \ddot{a} nevnd s \ddot{o} lkykna. Diodan, sum her bert er bundin til eina m \ddot{o} tst \ddot{o} ðu R, framlei \ddot{d} ir elektriskan streym I_D vi \ddot{d} ta \ddot{d} , at hol og elektronir ver \ddot{d} a drigin m \ddot{o} ti kontaktunum til h \ddot{a} lvlei \ddot{d} aran, sum diodan er uppbygd av, av t \ddot{i} spenningi, sum var \ddot{d} skaptur av diffusi \ddot{o} nsstreyminum \ddot{i} pn-yvirgongdini. Streymurin rennur \ddot{u} t \ddot{u} r positiva endanum \ddot{a} dioduni, t.e. $I_D < 0$. Hetta gevur spenningin $V = V_D$ yvir m \ddot{o} tst \ddot{o} ðuna R solei \ddot{d} is, at orkan $P = RI^2$ ver \ddot{d} ur avsett \ddot{i} henni. Sum d \ddot{o} mi kunnu vit seta $R = 100 \Omega$. Hetta kemur at svara til, at $V = RI = -RI_D$, i \ddot{d} svarar til ta \ddot{d} v \ddot{i} stu r \ddot{o} ttu punktera \ddot{d} u linjuna vi \ddot{d} negativum halli \ddot{i} mynd 6.7. Lat okkum \ddot{i} hesum d \ddot{o} minum siga, at lj \ddot{o} sorkan er $P_{lj \ddot{o} s} = 7 \text{ mW}$, i \ddot{d} svarar til \ddot{a} v \ddot{i} sa striku \ddot{i} mynd 6.7. Av t \ddot{i} at sambandi \ddot{d} millum I_D og V_D b \ddot{a} ði skal uppfylla hesa treytina og treytina at liggja \ddot{a} nevndu punktera \ddot{d} u linju, m \ddot{a} \ddot{u} rsliti \ddot{d} vera, at punkti \ddot{d} (I_D, V_D) j \ddot{u} st er skeringspunkti \ddot{d} millum striku og linju. Hetta punkti \ddot{d} gevur $(I_D, V_D) = (-0,28 \text{ mA}, 0,3 \text{ volt})$. Framleidda elektriska orkan er t \ddot{i} $P_{\text{elektrisk orka}} = VI = 0,28 \cdot 0,3 \text{ mW} = 0,78 \text{ mW}$. Hetta svarar til virknisstigi \ddot{d} $\eta = 0,78/7 = 11\%$. St \ddot{o} rri m \ddot{o} tst \ddot{o} ða vildi givi \ddot{d} st \ddot{o} rri virkni, men vanliga er virknisstigi \ddot{d} \ddot{i} mesta lagi 20-30% fyri diodur.

D. Hálvleiðara lasarar og ljósdiodur til signalgerð í t.d. ljósleiðaraskipanum,

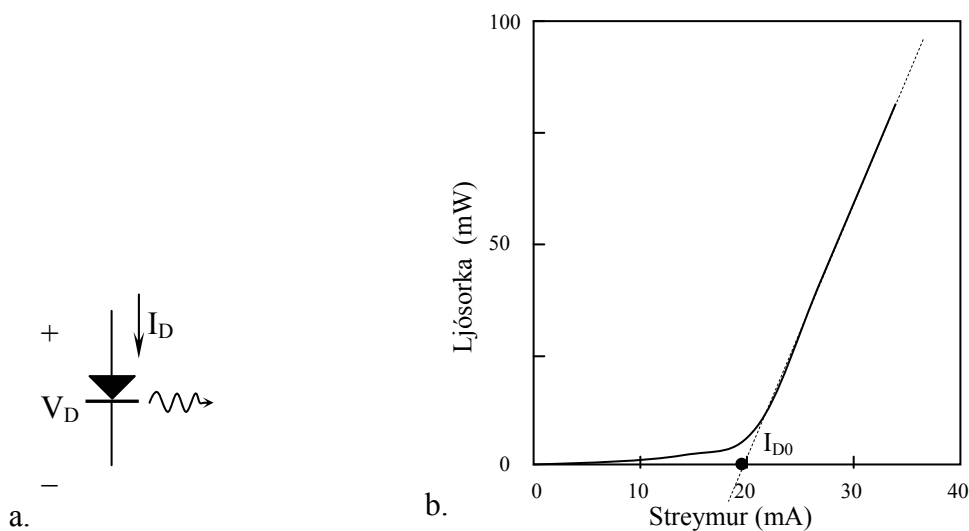


Mynd 6.10 Hálvleiðara ljósdioda, a. tekn fyrir ljósdioduna, b. ljós-streym karakteristikkur

Diodur av summum hálvleiðarum kunnu skapa ljós, tá streymur verður leiddur gjøgnum tær. Hvørki silisium ella germanium eru kortini hóskaði til hetta endamálið, men harafturímóti summir av teimum evnissamansettu hálvleiðarunum, sum t.d. GaAs, GaAlAs, InP, GaAlInP, og nógvir aðrir. Hetta hendir við, at eitt ljóskvant ella ein foton verður útsent hvørja ferð, ein elektron og eitt hol renna saman og neutralisera hvønn annan (rekombinera).

Henda alisfrøðiliga gongdin kann henda spontant, og er diodan tá ein ljósdioda, hvørs útsenda ljósorka er umleið proportional við diodustreymin I_D , sum víst er í mynd 6.10, har eisini teknið fyrir ljósdioduna er víst. Hálvleiðaradiodan er ein rættuliga veik ljóskelda, og kann vanligliga bert geva 1 – 10 mW frá sær.

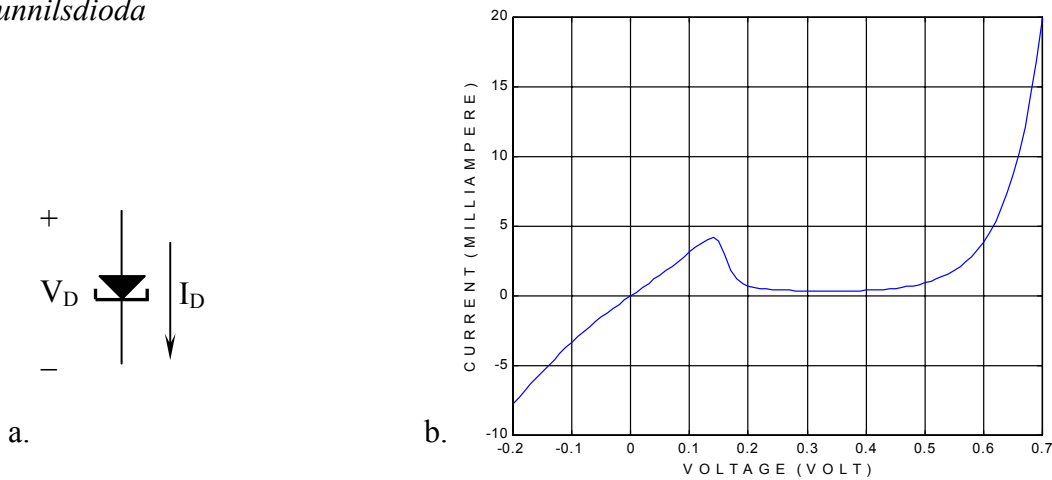
Hálvleiðaralasarin er ein sterkari ljóskelda, uppbygd næstan sum ljósdiodan, men har brúk er gjørt av ljósstyrkjandi eginleikum í pn-yvirgongdini. Verður ein hálvleiðarakrystall, sum er uppbygd sum ein pn-yvirgongd tilevna við tveimum lutvís speglandi parallellum síðum, sum standa vinkulrætt á pn-yvirgongdina, kann nakað av tí spontana ljósinum í ljósdioduni verða afturkastað frá hesum



Mynd 6.11 Hálvleiðara lasari, a. tekn fyrir lasaran, b. ljós-streym karakteristikkur

speglum fleiri ferðir aftur og fram parallelt við pn-yvirgöngdina. Tá so samstundis hálvleiðarartilfarið í pn-yvirgöngdini styrkir ljósorkuna, verður ein nógv stærri ljósorka útsend enn frá vanligu ljósdioduni. Treytin fyri hesi styrking er, at streymstyrkin í dioduni er omanfyri eitt ávíst virði I_{D0} , gáttarstreymurin. Sostatt virkar lasarin sum ljósdioda, um so er, at $0 < I_D < I_{D0}$, og sum lasari, tá $I_D > I_{D0}$ við karakteristikkinum vístur í mynd 6.11. Útsenda ljósorkan frá lasaranum er, sum tað sæst, linjurætt heft at streymstyrkini.

E. Tunnildioda

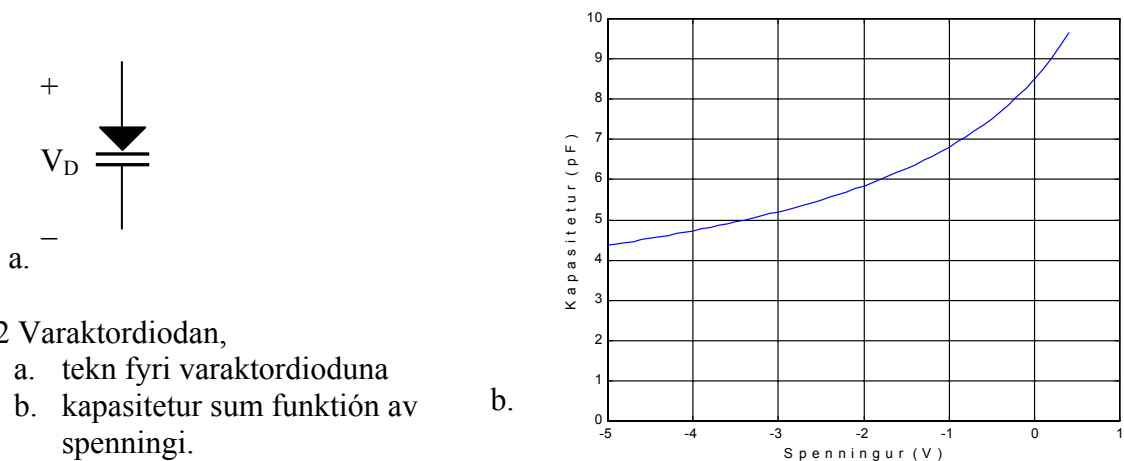


Mynd 6.12 Tunnildioda, a. Tekn, b. Streym-spennings karakteristikkur av tunnildiodu gjørd av InAs/AlSb/GaSb RIT(resonant interband tunnelling).

Tunnildioda myndað við tekninum í 6.12.a. er dioda, har tað aktiva økið rundan um pn-yvirgöngdina er serliga tunt, sum tað t.d. fæst við at brúka serliga stórar doteringskonsentratióinir. Í hesi diodu verður kvantimekaniskur tunnildvirkningur í pn-yvirgöngdini við tí til fylgju, at streym-spennings karakteristikkurin fær útsjóndina, sum vístur er í mynd 6.12 b. Serligi eginleikin, at karakteristikkurin í ávísum øki hevur negativt hall, ger, at hon kann verða og áður varð brúkt til styrkjara, serliga í háfrekvens elektroniskum rásum. Aðrir elektroniskir lutir hava nú tikið yvir til flestu endamál.

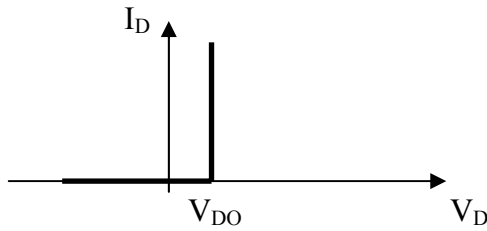
F. Varaktordiodan

Ein dioda, sum verður forspent í sperrirætningin, $V_D < 0$, virkar og kann brúkast sum ein kondensator, har kapasiteturin er heftur av spenninginum. Diodan í hesum brúki verður nevnd varaktordioda og hevur eitt serstakt tekn, sum víst er í mynd 6.12a. Í mynd 6.12b. er dømi um, hvussu kapasiteturin skiftur við spenninginum og er vanliga bert fá pF.

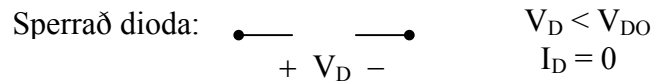
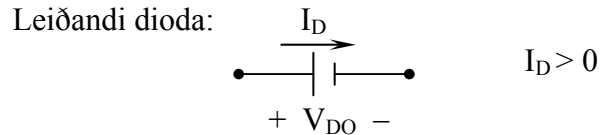


Mynd 6.12 Varaktordiodan,
a. tekn fyri varaktordioduna
b. kapasitetur sum funktiún av spenningi.

6.4 Einfald javnmetisrás fyrir diodur



Mynd 6.14 Einfaldgjörður diodukarakteristikkur

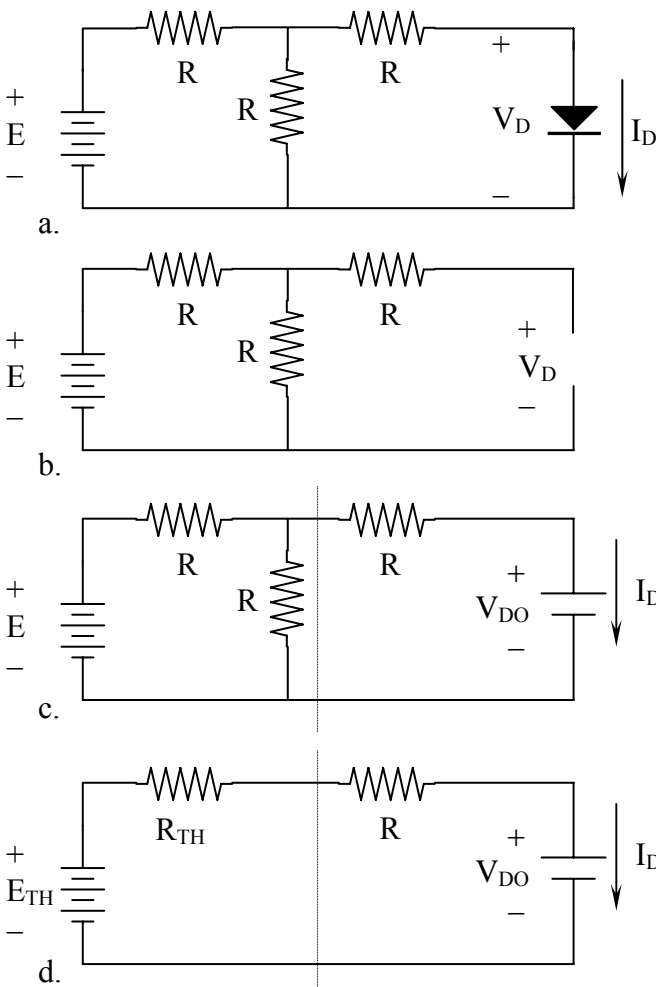


Mynd 6.15 Javnmetisrásir (ekvivalentar rásir) fyrir diodu

Sum nevnt áður, kann diodukarakteristikkurinn verða approksimeraður, sum víst er í mynd 6.14, har $V_{D0} = 0,6 - 0,7$ volt fyrir Si diodur og $0,2 - 0,3$ volt fyrir Ge diodur. Við hesum sum stöði kunnu vit gera javnmetisrásir svarandi til: 1. leiðandi diodu har $I_D > 0$ og $V_D = V_{D0}$, og 2. sperraða diodu, har $I_D = 0$ og $V_D < V_{D0}$ soleiðis, sum víst er í mynd 6.15.

Tá ávís uppgáva skal verða loyst, kunnu hesar javnmetisrásir ofta verða brúktar við at royna at gera tvær útrokningar, hvør við sínari javnmetisrás fyrir dioduna. Hetta verður lýst við einfaldum dæmi.

Dæmi: Í mynd 6.16a er ein rás við spenningsgerða og mótstöðuum við givnum virðum umframt diodu. Vit skulu finna virði av streyminum I_D . Hetta verður gjørt við at brúka javnmetisrásina fyrir dioduna og síðani eftirroyna um úrslitið samsvarar í øllum lutum við alisfrøðiliga veruleikan.



Mynd 6.16 Streymrásdæmi við diodu við $V_{D0} = 0,6$ V

a. Vit seta: $R = 1$ kohm, $E = 2$ volt,

b. *Fyrsta roynd.* Diodan er sett til at vera avbrotin $V_D = R/(R+R) E = \frac{1}{2} E > V_{D0}$. Hetta viðførir, at $I_D > 0$, sum er í andsøgn við, at diodan er sperrað. Henda loysnin kann tí ikki brúkast.

c. *Önnur roynd.* Diodan er sett til at vera leiðandi, og spenningsgerðin $V_{D0} = 0,6$ V verður settur í hennara stað. Vit kunnu nú rokna I_D út við at umforma rásina vinstru megin punkteraðu linjuna til spenningsgerða í seriu við mótstöðu, sum víst í mynd 6.16d.

d. Herved finna vit Thevenin spenningin E_{TH} og mótstöðuna R_{TH} :

$$E_{TH} = R/(R+R) E = \frac{1}{2} E = 1 \text{ V}$$

$$R_{TH} = R \parallel R = \frac{1}{2} R = 0,5 \text{ k}\Omega$$

$$I_D = \frac{E_{TH} - V_{D0}}{R_{TH} + R} = \frac{1 - 0,6}{\frac{1}{2} + 1} \text{ mA} = 0,267 \text{ mA}$$

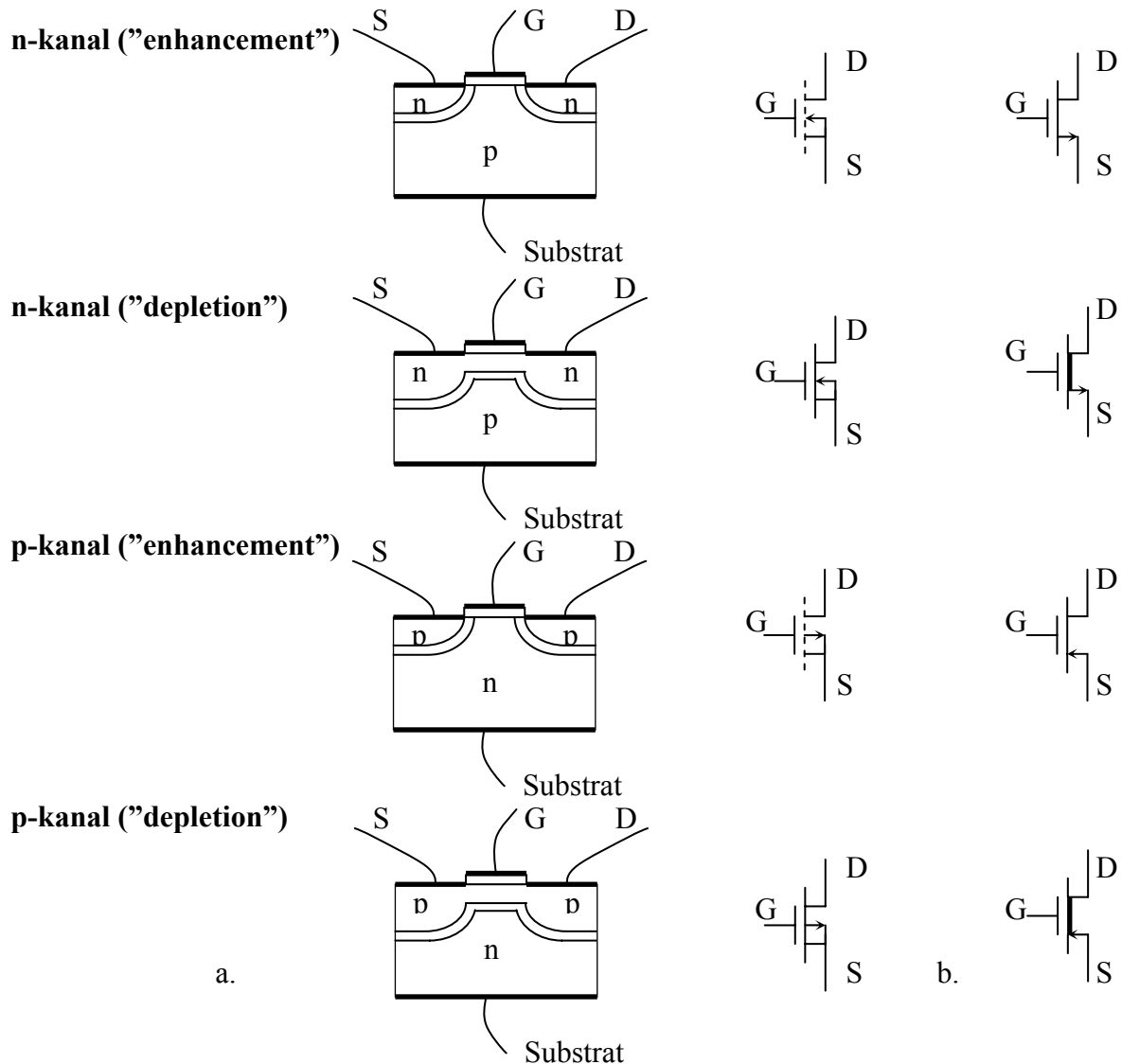
Hesin streymurin gevur júst tann rætta dioduspenningin $V_D = E_{TH} - (R_{TH} + R)I_D = 0,6$ volt = V_{D0} . Henda loysnin er tí tann rætta.

7. Felteffekt transistorar (MOS-FET)

Felt effekt transistorin (FET) er gjörður úr hálvleiðara. Hann hefur navn sítt av, at eitt elektriskt felt skapt av einum spenningi, ið er lagdur á eina elektrodu, nevnd ”gate”, stýrir elektriskum streymi gjøgnum transistorin. Á henda hátt er møguligt at brúka hann sum styrkjara ella avbrótara, alt eftir støddini av tí spenningi, sum nýttur verður. Transistorin, ið vit viðgera her, er sonevndi MOS-FET transistorin. MOS stendur fyri ”metal-oxide-semiconductor”, og vísir til, at stýrandi ”gatin” er úr metali og er isolerað frá hálvleiðaranum við oxidlagi. Nevnast kann, at eitt annað slag av FET transistorum verður eisini brúkt, har ”gatin” er isolerað frá hálvleiðaranum við pn-yvirgongd (”junction”) forspent í sperrirætning, og verður hann nevndur J-FET. Hesin verður ikki brúktur í integreraðum digitalum rásum av CMOS slagnum og verður tí ikki umrøddur meira her. MOS-FET verður brúktur til sokallaða CMOS digitalar IC-rásir, meðan J-FET vanliga ikki verður brúktur til hetta endamál, og tí ikki umrøddur meira her.

7.1 Bygnaður og virknaður

Felteffekt transistorin er gjörður úr tunnari flís av hálvleiðara. Mest brúkt tilfarið er silisium (Si). Til eru fyra sløg, og er einfaldgjörd mynd av teimum vist í mynd 7.1. Greitt verður frá hvørjum sær.



Mynd 7.1 Felteffekt transistorar (MOS-FET).

- Uppbyggingin er vist fyri tey fyra sløgin: n-kanal-“enhancement”, n-kanal-“depletion”, p-kanal-“enhancement”, og p-kanal-“depletion”.
- Tilsvandi eru tvey vanliga brúkt tekn vist fyri hvønn av transistorunum.

n-kanal MOS-FET-”enhancement” transistorin vístur í mynd 7.1a er bygður upp á p-hálvleiðara flís, ið nevnist ”substratið”. Tvey øki eru skift út við n-hálvleiðara. Tey verða nevnd ”source” (S) og ”drain” (D). Millum n- og p-hálvleiðararnar kemur sostatt at vera ein pn-yvirgongd. Í vanligum rakstri av transistorinum verður henda pn-yvirgongdin forspent í sperrirætning við negativum ella null spenningi á substratinum í mun til S og D og virkar tí isolerandi. Ofta, men ikki altíð, er source og substrat beinleiðis bundin saman sum víst í mynd 7.1b. Millum S og D er ein frí yvirflata av p-hálvleiðara. Her verður lagt eitt tunt lag av isolerandi silisiumdioxid (SiO_2) ella øðrum isolerandi tilfari. Oman á tað verður lögð ein metalkontakt við leiðningi til umverðina. Hon verður nevnd ”gate” (G). S og D verða eisini útgjörð við metalkontakt og leiðningi til umverðina.

Um positivur spenningur verður lagdur á D í mun til S, síggja vit, at leiðin millum S og D eru tvær diodur (pn-yvirgongdir), ið báðar eru forspentar í sperrirætning orsakað av substratpotentialinum, sum er lægri enn ella javnstórt við potentialini á S og D.

Lata vit nú G fáa ein positivan spenning í mun til S, vil G verða lødd við positivari løðing, ið hevur lindi til at frástoyta tey positivu holini, sum eru stødd beint undir G og draga elektronir inn frá source og drain. Um gate spenningurin verður nóg stórus verður ein leið skapt undir gatini, ið inniheldur elektronir, ið kunnu leiða streym. Vit siga, at vit hava eina n-kanal undir ”gate”ini, og elektronstreymur rennur gjøgnum hana frá S til D. Tann tilsvarandi elektriski streymurin rennur frá D til S og verður nevndur ”drain” streymurin I_D .

Tað skal sostatt ein positivur ”gate-spenningur” $V_{GS} > V_T > 0$ millum G og S til fyri, at streymurin $I_D > 0$ skal renna í transistorinum. Spenningsvirðið V_T verður nevnt gáttarspenningurin (”threshold” spenningurin) ella ”pinch-off” spenningurin. Tí verður enska heitið ”enhancement” brúkt um henda MOS-FET transistorin.

n-kanal MOS-FET-”depletion” transistorin er líknandi transistor, sum vit júst hava sæð, men har broyting er gjörd, soleiðis, at eitt sera tunt lag av n-hálvleiðara verður lagt undir G. Á henda hátt verður ein n-kanal til staðar sjálvst, um $V_{GS} = 0$ við tað, at í n-hálvleiðaranum eru fríar elektronir til at bera streymin. Um vit nú lata $V_{GS} < 0$ vil ”gate” kontaktin hava negativa løðing, ið skjýtur frá sær fríu elektronirnar undir G, og á tann hátt tømur elektronir úr kanalini og harvið smalkar hana. Tí rennur minni drain streymur I_D gjøgnum transistorin. Av hesi orsök verður enska heiti ”depletion” brúkt um henda MOS-FET transistorin. Lata vit hinvegin $V_{GS} > 0$, vil gate kontaktin hava positiva løðing, ið dregur fleiri elektronir inn í øki undir G og á tann hátt víðkar n-kanalina. Í hesum føri rennur størri streymur I_D gjøgnum transistorin.

Um vit í omanfyri viðgjördu transistorum skifta n-hálvleiðaran um við p-hálvleiðara og p-hálvleiðaran um við n-hálvleiðara, fáa vit tvey nýggj sløg av transistorum.

p-kanal MOSFET “Enhancement” transistorin verður soleiðis gjördur úr n-substrati við p-source og p-drain, har n-substratið røkkur upp undir gate. Við tað, at allir løðingsberarar nú eru umbýttir til mótsætt fortekn, men at transistorin annars fullkomuliga líkist ”enhancement” n-kanal MOSFET, virkar hann eisini á sama hátt, um vit broyta fortekn á øllum spenningum og streymum.

p-kanal MOS-FET-”depletion” transistorin verður tilsvarandi uppbygður av n-substrati við p-source og p-drain, men nú eisini við p-hálvleiðara kanal undir gatini. Hann virkar á sama hátt sum n-kanal depletion MOS-FET, men skulu vit sjálvsagt broyta fortekn fyri allar streymar og spenningar.

Tvey vanliga brúkt tekn fyri hvønn av teimum fyra sløgnum av MOSFET eru víst í mynd 7.1b.

7.2 Karakteristikkar og javnmetisrásir fyri MOS - FET transistorar

Í mynd 7.2 eru spenningar og streymar fyri MOS-FET transistorin lýstir. Í øllum MOS-FET transistorum er gatestreymurin $I_G \cong 0$ av tí, at gate er isolerað frá hálvleiðaranum.

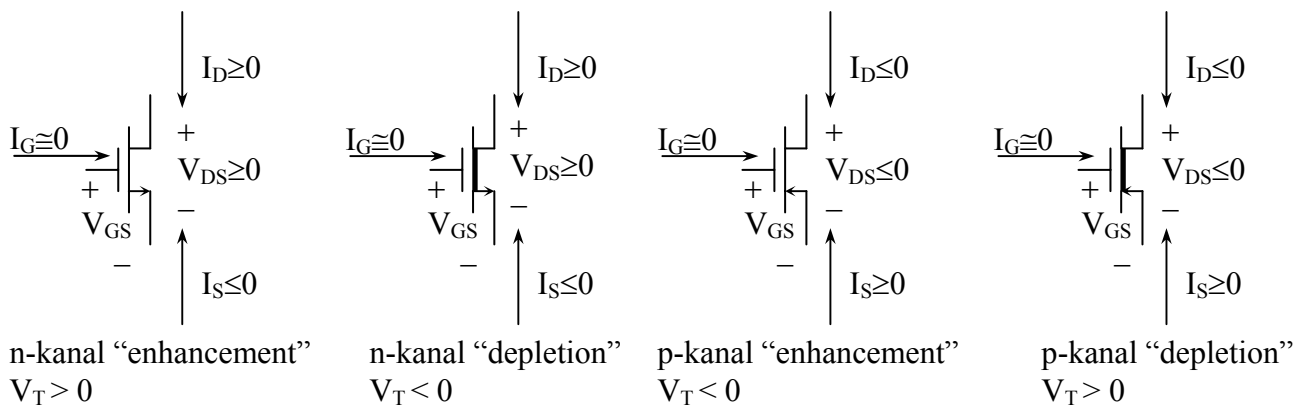
Fyri n-kanal ”enhancement” transistorin er $V_T > 0, V_{DS} \geq 0, I_D \geq 0, I_S = -I_D \leq 0$. Transistorin leiðir streym, t.e. $I_D > 0$, tá $V_{GS} > V_T$.

Fyri n-kanal ”depletion” transistorin er $V_T < 0, V_{DS} \geq 0, I_D \geq 0, I_S = -I_D \leq 0$. Transistorin leiðir streym, t.e. $I_D > 0$, tá $V_{GS} > V_T$.

Fyri p-kanal ”enhancement” transistorin er $V_T < 0, V_{DS} \leq 0, I_D \leq 0, I_S = -I_D \geq 0$. Transistorin leiðir streym, t.e. $I_D < 0$, tá $V_{GS} < V_T$.

Fyri p-kanal ”depletion” transistorin er $V_T > 0, V_{DS} \leq 0, I_D \leq 0, I_S = -I_D \geq 0$. Transistorin leiðir streym, t.e. $I_D < 0$, tá $V_{GS} < V_T$.

Fyri allar MOS-FET er inngangskararakteristikkurin, ið avmyndar ”gate”-streymin I_G sum funktión av ”gate-source” spenninginum V_{GS} ikki viðkomandi við tað, at $I_G \cong 0$ altíð.



Mynd 7.2 Lýsing av spenningum og streymum í MOS-FET transistorum í vanligum rakstri.

Sambandið millum ”drain streym” I_D og ”gate-source spenning” V_{GS} , ofta nevndur yvirføringskararakteristikkurin, er, tá transistorin er *aktivur*, givin við kvadratiska samanhinginum

$$(7.1) \quad I_D = k \cdot (V_{GS} - V_T)^2 \quad \text{tá} \quad V_{GS} \geq V_T$$

har k er konstantur, ið sermerkir transistoruppbygging og –tilfar. Formul (7.1) hevur sum treyt, at $V_{DS} > V_{GS} - V_T$, ið er *aktiva styrkjara øki* ella *metningsøki*¹ hjá MOS-FETinum. I_D er avmyndað fyri øll fyra sløginu av MOS-FET í myndunum 7.3a, 7.4a, 7.5a og 7.6a. Hallið á karakteristikkunum verður ofta nevnt yvirføringskonduktansurin g og hevur støddina

$$(7.2) \quad g = dI_D/dV_{GS} = 2k(V_{GS} - V_T),$$

¹ Týdningurin av orðinum metting í einum MOS-FET, sum tað verður brúkt í bókmentum um transistorar, er ein annar enn fyri bipolera transistorin, sum vit skulu siggja. Fyri MOS-FET er týdningurin, at I_D gongur móti einum (næstan) konstantum virði, tá V_{DS} gongur móti einum stórum virði. Fyri bipolera transistorin merkir metting, at tá inngangsstreymurin (basisstreymurin) gongur móti einum stórum virði gongur útgangsstreymurin (colloktorstreymurin) móti einum konstantum virði, og sambandið millum útgangsstreym og útgangsspenning er proportionalitetur sí kapitull 8).

Útgangskararakteristikkurinn er lýstur við samanhuginum millum “drain”streyminn I_D og “drain-source” spenninginn V_{DS} . Hann er vístur í mynd 7.3b, 7.4b, 7.5b og 7.6b. fyri tey fyra MOS-FET sløgini. Vit síggja, at karakteristikkarnir fyri allar transistorarnar líkjast nógv. Munurin á p-kanal og n-kanal transistorunum er, at spenningar og streymar hava øvugt fortækn. Á hvørjari kurvu er skrivað eitt virði fyri “gate-source spenningin” V_{GS} , ið merkir, at henda kurvan er galdandi fyri hetta virðið av V_{GS} .

Í hesum myndum síggja vit, at, tá $V_{DS} > V_{GS} - V_T$, er I_D nærum konstant. Hetta er júst tann treytin, sum var fyri, at (7.1) var galdandi, t.e. í virkna (aktiva) ella metnings økinum hjá transistorinum.

Munurin á “enhancement” og “depletion” transistorunum er, at karakteristikkarnir eru sermerktir soleiðis, at fyri teir fyrru átekur V_{GS} sama fortækn fyri allar kurvarnar, meðan fyri tann seinna fyrrikoma bæði fortækn og nul sum áskriftir fyri V_{GS} .

Fyri virði $V_{DS} < V_{GS} - V_T$ í útgangskararakteristikkunum síggja vit, at kurvarnar bendast niður og enda í nullpunktinum. Hetta øki verður í fakligum bókmentum ofta nevnt “trioduøki”. Navnið hevur søguligan uppruna frá karakteristikkunum fyri elektronrørið “trioda”, hvørs karakteristikkur líkjast.

Einfaldar “javnmetisrásir” kunnu verða gjørdar fyri MOS-FETin. Í karakteristikkunum eru trý sermerkt øki, har transistorin er ávikavist: 1. avbrotin, t.e. $I_D \approx 0$; 2. virkin (“aktivur”) sum styrkjarni, ofta nevnt “mettingsøki”; 3. leiðandi (“trioduøki”):

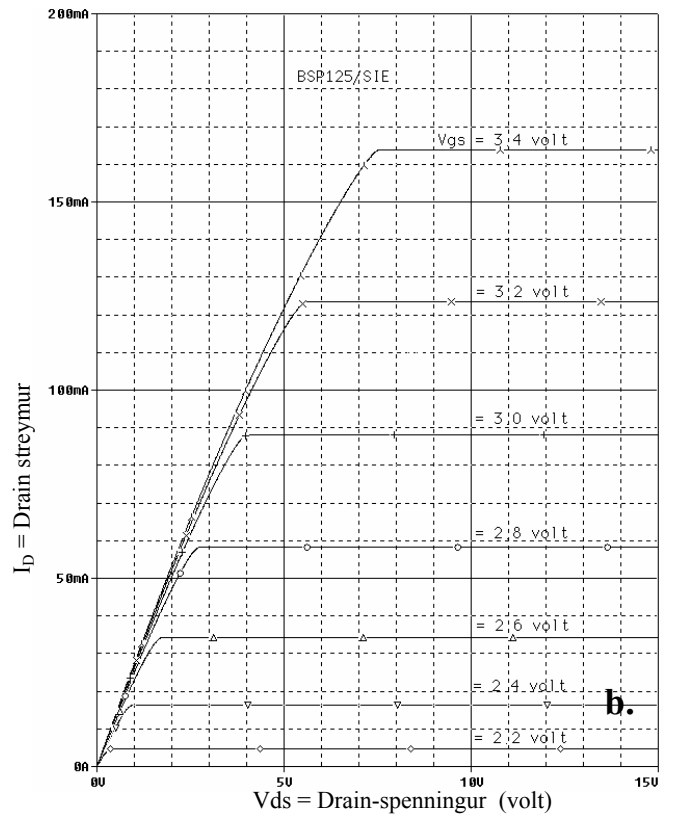
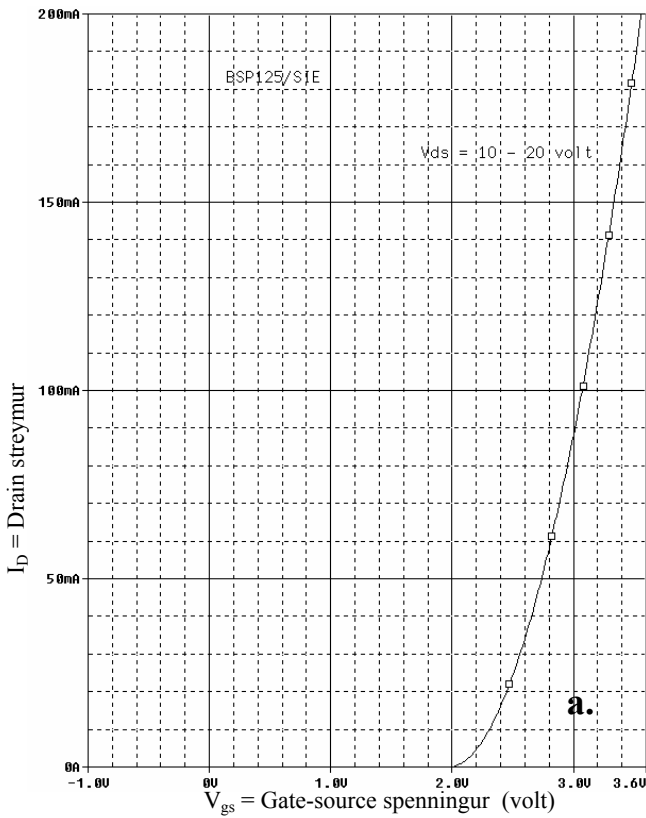
Avbrotin transistor fæst tá $V_{GS} < V_T$ fyri n – MOS-FET og $V_{GS} > V_T$ fyri p – MOS-FET, og svarar til kurvuna $I_D = 0$ í útgangskararakteristikkunum. Samsvarandi hesum, kunnu vit seta javnmetisrásina mynd 7.7a upp har inngangsportrið myndar eitt avbrot, og útgangsportri, ið bert inniheldur eina stóra móttæðu $r_{DS,off}$ (enska heiti er brúkt fyri at skapa samanhag við aðrar lærubøkur), ið hevur stødd í $M\Omega$ økinum og ofta kann setast til at vera eitt fullkomið avbrot, t.e. $r_{DS(off)} = \infty$.

Virkin (aktivur) transistor fæst í økinum $V_{GS} > V_T$, $V_{DS} > V_{GS} - V_T$ fyri n – MOS-FET, og $V_{GS} < V_T$, $V_{DS} < V_{GS} - V_T$ fyri p – MOS-FET. Hetta svarar til tað økið, har I_D er næstan konstant við skiftandi V_{DS} .

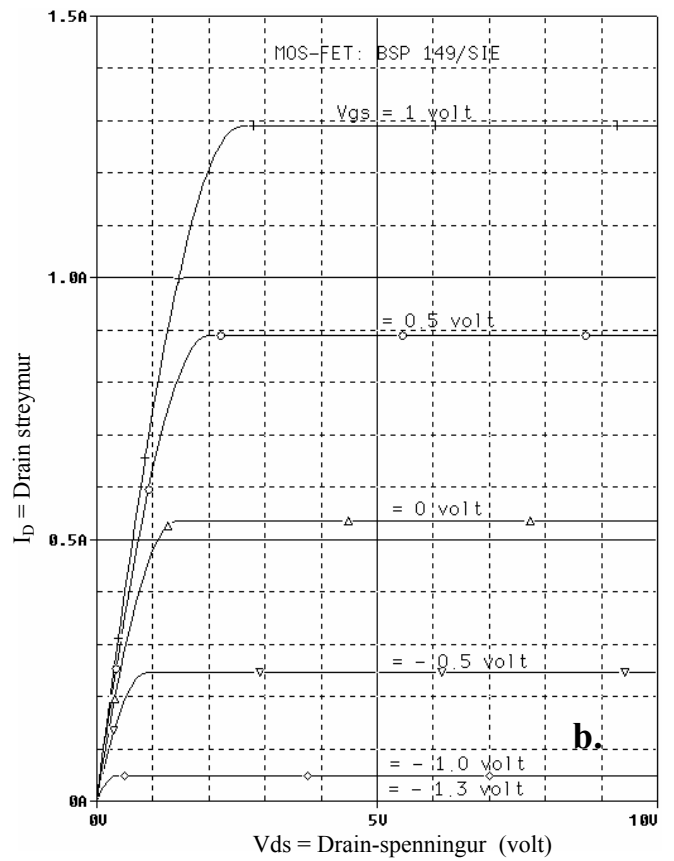
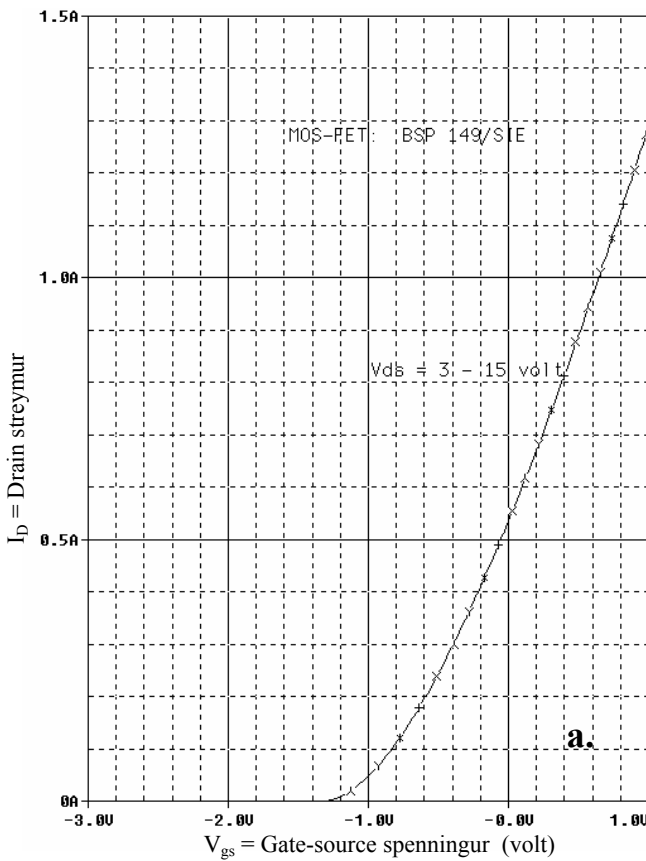
Svarandi til hetta, kunnu vit seta javnmetisrásina í mynd 7.7b upp, ið hevur avbrot á innganginum og ein bundnan streymgerða $I_D = k \cdot (V_{GS} - V_T)^2$ í útganginum, teknaður við serligum tekni fyri bundnar streymgerðar. Henda rásin verður vanligar brúkt í viðgerð av styrkjarum, men er ikki viðkomandi fyri digitalan elektronikk.

Leiðandi (kortslyttaður) transistor fæst í økinum $V_{GS} > V_T$, $V_{DS} < V_{GS} - V_T$ fyri n – MOS-FET, $V_{GS} < V_T$, $V_{DS} > V_{GS} - V_T$ fyri p – MOS-FET. Hetta er øki, har I_D broytist nærum linjurætt fyri smá virði av $|V_{DS}|$. Hetta øki verður ofta nevnt “trioduøki”. Hesa triðju støðuna kunnu vit gera javnmetisrásina 7.7c fyri. Hon myndar eitt avbrot í innganginum og eina lítla móttæðu $r_{DS,on}$ í útganginum. Móttæðan $r_{DS,on}$ hevur støddina í økinum minni enn 10-500 Ω , og kann ofta approksimatívt verða sett til ein kortslytning, t.e. $r_{DS,on} \approx 0$. Soleiðis nevna vit ofta transistorin sum kortslyttaðan í hesum øki.

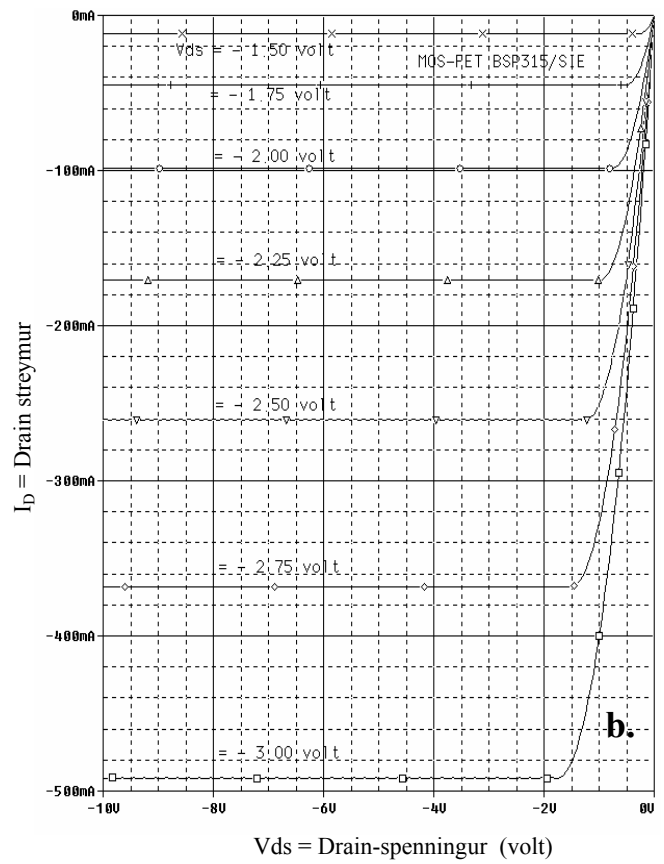
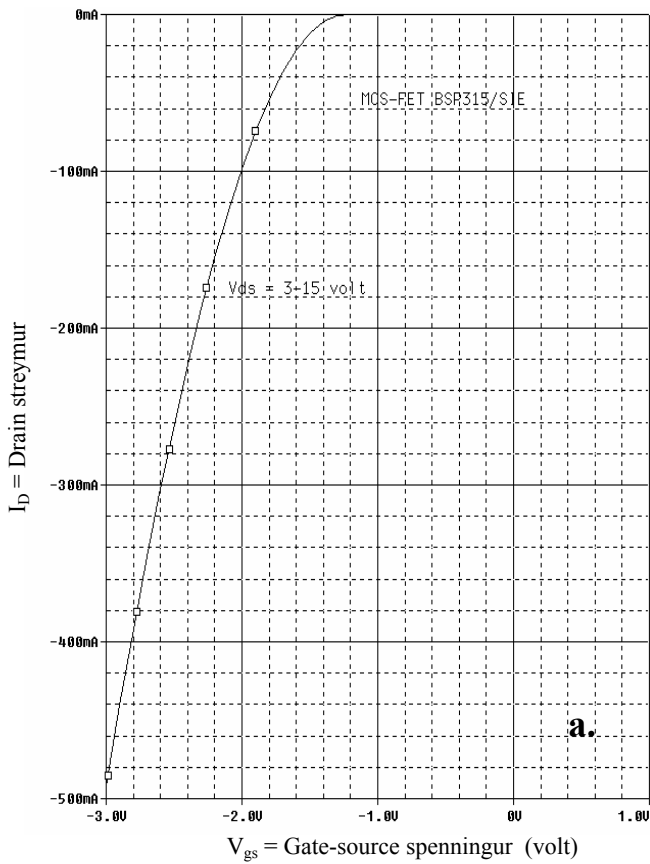
Tað eru støðurnar hjá transistorinum í avbrotarni og leiðandi (kortslyttaðari) støðu, ið ger MOS-FETin væl hóskandi til digitalar rásir, við tað, at hann kann virka sum ein stýrdur avbrótari, ið verður stýrdur av V_{GS} . Tað er eisini hesin eginleikin, ið ger hann væl eignaðan til sonevndu CMOS “gate”ina, sum vit skulu síggja.



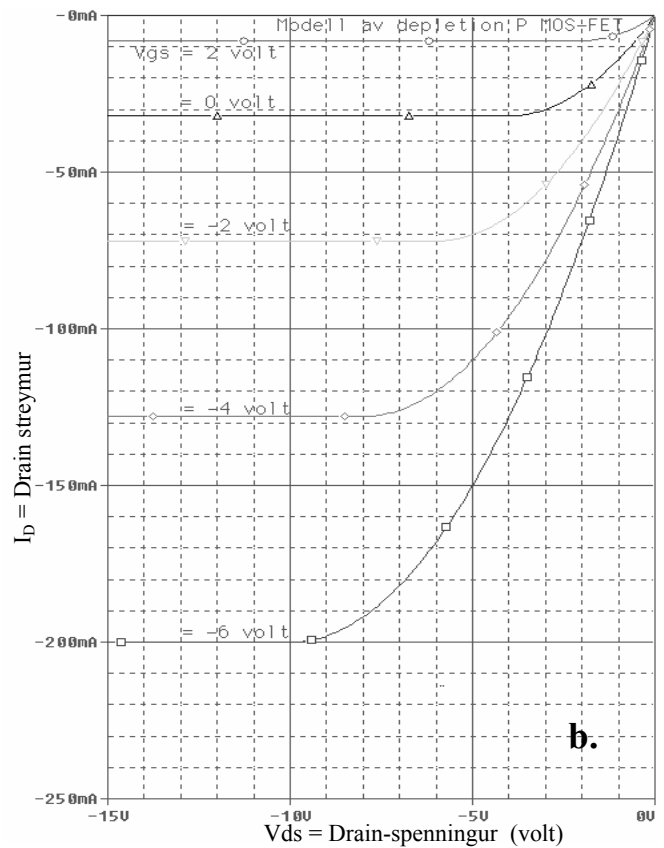
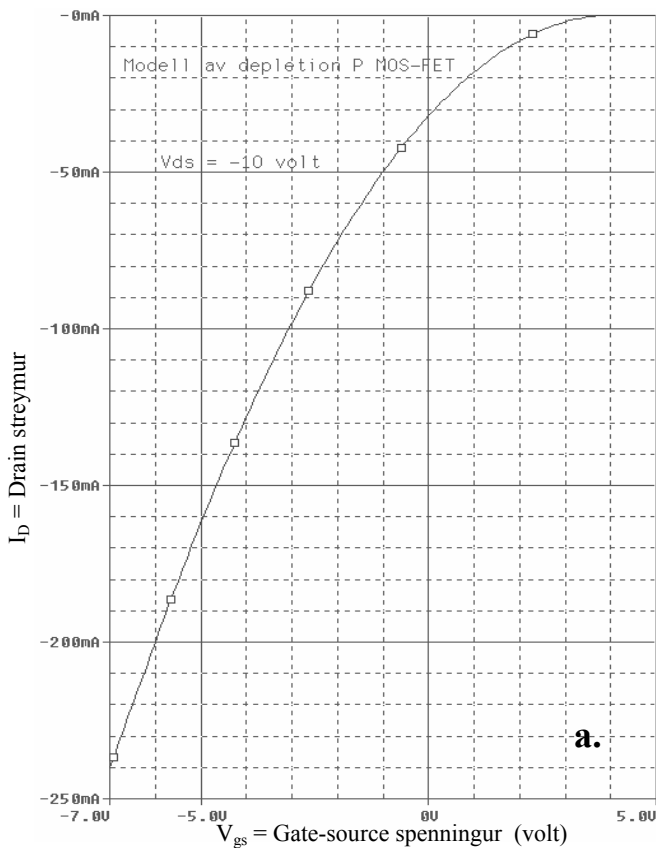
Mynd 7.3 MOS – FET, n-kanal “enhancement”, a.inngangskaracteristikkur, b.útgangskaracteristikkur



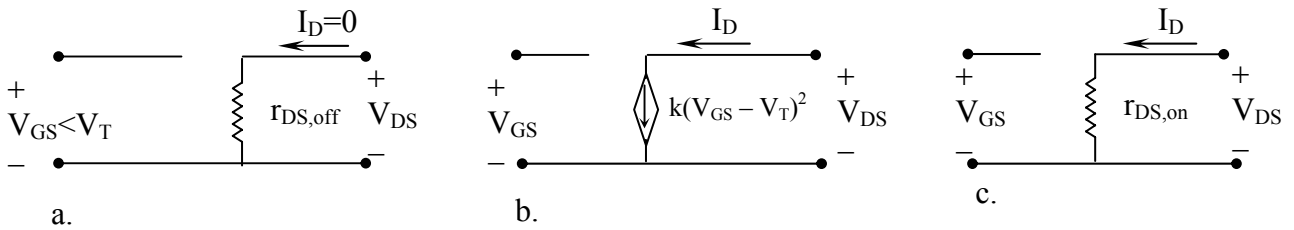
Mynd 7.4 MOS – FET, n-kanal “depletion”, a. inngangskaracteristikkur, b. útgangskaracteristikkur



Mynd 7.5 MOS – FET, p-kanal “enhancement”, a.inngangskaracteristikkur, b.útgangskaracteristikkur



Mynd 7.6 MOS – FET, p-kanal “depletion”, a.inngangskaracteristikkur, b.útgangskaracteristikkur

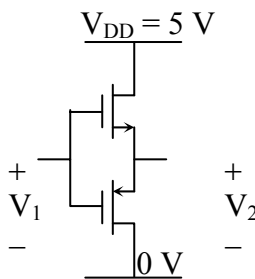


Mynd 7.7 Javnmettar rásir fyrir ein n-MOS-FET:

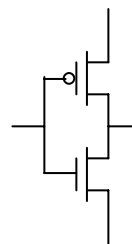
- a. Avskorin MOS-FET (“OFF”), galdandi tá $V_{GS} < V_T$
- b. Virkin (aktivur) MOS-FET, galdandi tá $V_{GS} > V_T$ og $V_{DS} > V_{GS} - V_T$
- c. Leiðandi MOS-FET (“ON”), galdandi tá $V_{GS} > V_T$ og $V_{DS} < V_{GS} - V_T$

Í einum p-MOS-FET transistori eru fortæknini ðvugt, men myndirnar av javnmetisrásunum eins og fyrri n-MOS-FET.

7.3 CMOS – rásir



Mynd 7.8 Uppbygging av CMOS – rás av n- og p-kanal transistorum av ”enhancement” slagnum



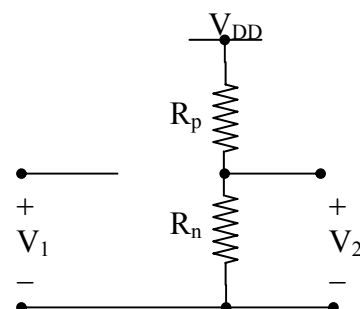
Mynd 7.9 Einfaldgjørð tekning av rás fyrri CMOS

Seta vit sum víst í mynd 7.8 ein n – MOS-FET (tann niðara í myndini) og ein p – MOS-FET (tann ovara í myndini) í seriu, báðir av “enhancement” slagnum, og stýra teir báðar við sama “gate” spenningi V_1 , síggja vit, at tá V_1 er nóg høgur verður n – MOS-FET leiðandi, og p – MOS-FET avbrotin soleiðis, at V_2 verður nærum null. Er harafturímóti V_1 nóg lágur, verður n – MOS-FET avbrotin, og p – MOS-FET leiðandi. Approksimativt verður tá $V_2 \approx V_{DD} = 5\text{ V}$. Sostatt vil CMOS rásin í eini digitalari rás virka sum ein invertari, ið gevur høgan útgangsspenning, tá inngangurin er lágur, og lágan útgangsspenning, tá inngangurin er høgur.

Ofta verður CMOS teknað einfaldari sum í mynd 7.9, har pílarin á source eru tiknir burtur, meðan p – MOS-FET hevur fingið ein sirkul á inngangin til at vísa, at hann virkar mótsætt av n – MOS-FET, ið ongan sirkul hevur. Í viðgerð av streymrásum við CMOS, verður javnmetisrásin í mynd 7.10 fyrri CMOSin ofta brúkt. V_1 er tann felags gate spenningurin, sum stýrir støðuni hjá transistorinum. R_n er mótstøðan millum drain og source í n – MOS-FETinum, meðan R_p er mótstøðan millum source og drain í p – MOS-FETinum. Hesar mótstøður hava ymisk virði heft av inngangsspenningurin V_1 . Er V_1 lágur verður $R_n = R_{n,off}$ stórur, og $R_p = R_{p,on}$ lítil. Er hinvegin V_1 høgur verður $R_n = R_{n,on}$ lítil, og $R_p = R_{p,off}$ stórur. Í talvuni er støddarlagið fyrri mótstøðurnar sett upp í skiftandi støðum fyrri V_1 .

Inngangsspenningur V_1	R_n	R_p
0 V	$R_{n,off} = 1 - 10\text{ M}\Omega$	$R_{p,on} = 20 - 200\ \Omega$
5 V	$R_{n,on} = 10 - 100\ \Omega$	$R_{p,off} = 1 - 10\text{ M}\Omega$

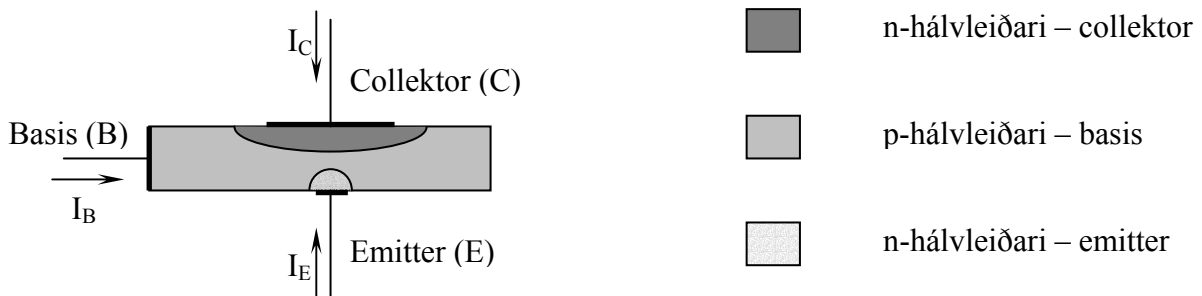
Mynd 7.10 Javnmetisrás fyrri CMOS.



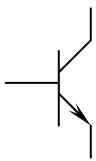
8 Bipolerir transistorar

Bipolerir transistorar – ofta bert nefndir transistorar – eru elektrískir lutir, sum kunnu styrkja streym. Teir verða brúktir í TTL og eru eins og felteffekt transistorum týðningarmiklir elektrískir lutir í digitalum elektronikki og innganga sum partar av integreraðum streymrásum (IC). Utanfrá síggja vit ikki so nógv til teir, men fyri at skilja og rationelt at kunna brúka hesar IC'arar til fulnar, hevur tað týðning eisini at skilja, hvussu transistorarnir virka. Umframt verða teir eisini brúktir sum stakir transistorar í øðrum elektronikki, t.d í signalstyrkjarum, filtrum o.ø.

8.1 Bygnaður og virknaður



Mynd 8.1a Uppbygging av npn transistori



Mynd 8.1b Tekn fyri npn transistor



Mynd 8.1c Nøkur dømi um transistor í húsa

Transistorin er gjørdur av tunnari flís av hálvleiðara, ið oftast er úr silisium (Si) víst í mynd 8.1a. Henda flísin skal vera doterað, t.d. sum p-hálvleiðari. Eitt lítið øki hvørju megin við verður doterað sum n-hálvleiðari. Til hvørt av hesum økjum verður bundin ein kontakt við klønum metaltráði, aloftast úr gulli. Hálvleiðara-økini og tilknýttu leiðarar verða navngivin soleiðis, at miðlagið verður nevnt basis, niðasta lagið emitter og ovasta lagið collektor. Teknið fyri henda elektroniska lutin sum er víst í mynd 8.1b. Dømi um transistor í húsa er víst í mynd 8.1c. Transistorin, vit her hava viðgjørt, nevna vit npn-transistor, har npn vísir á raðfylgjuna av hálvleiðaraløgunum.

Vit síggja í mynd 8.1a, at emitter-basis strekki er ein pn-yvirgongd og tí líkt eini diodu við leiðirætningi frá basis til emitter. Seta vit sostatt ein positivan spenning V_{BE} millum basis og emitter rennur ein streymur I_B , og eru heft á sama hátt sum í eini vanligari diodu. Karakteristikkurin er vístur í mynd 8.4

Somuleiðis síggja vit, at basis – collektor strekki myndar eina diodu ella pn-yvirgongd. Leggja vit ein positivan spenning V_{CE} á collektor í mun til emitter verður collektor – basisdiodan forspent í sperrirætning og basis – emitterdiodan í leiðirætning, og kunnu vit tí halda, at eingin streymur rennur gjøgnum dioduna frá collektor til emitter. Hetta er eisini so, um basisstreymurin I_B er null.

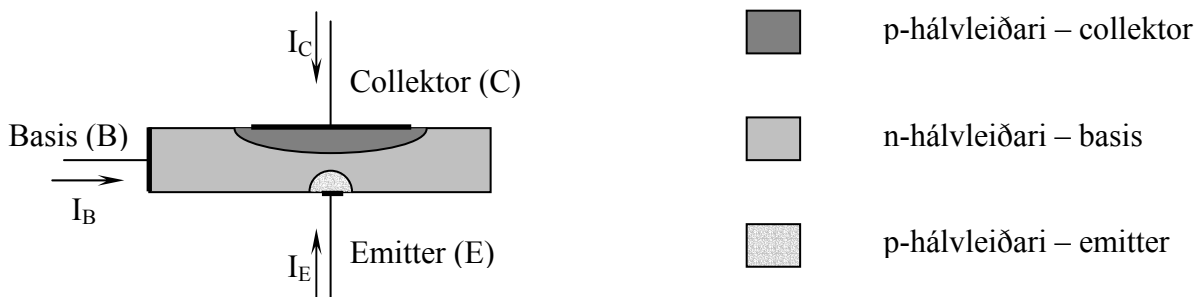
Lata vit harafurímóti ein basisstreym $I_B > 0$ renna inn í basislagið, kemur ein streymur av elektronum at renna úr emitterlagnum inn í basislagið. Hesar elektronirnar diffundera runt í

basislagnum tilvildarligt í allar rætningar, men av tí at collektorlagið er so tætt við og yvirflatan er nógv størri enn emitterlagið, verða elektronirnar uppfangaðar av collektor og skapa ein elektronstreym út gjøgnum collektor. Hetta svarar til ein elektriskan streym inn í collektorleiðaran.

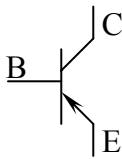
Tann hervið skaptið collektorstreymur I_C og tilsvarandi basisstreymur I_B kunnu vístast at vera proportionalir

$$(8.1) \quad I_C = \beta \cdot I_B$$

har β er ein konstantur, sum fyri góðar transistorar kann hava støddina 50 – 1000. Soleiðis virkar transistorurin sum ein streymstyrkjari við streymstyrkingini β . Emitterstreymurin er $I_E = -(I_C + I_B)$



Mynd 8.2a uppbygging av pnp transistori



Mynd 8.2b Tekn fyri pnp transistor

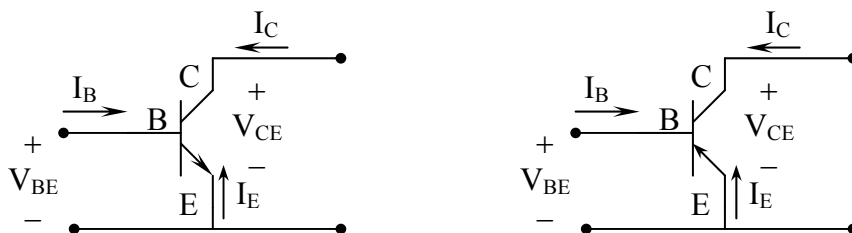
Velja vit at uppbyggja ein transistor, sum víst í mynd 8.2a, av n-halvleiðara í basis og p-halvleiðara í emitter og collektor, hava vit ein npn-transistor. Hann virkar á heilt tilsvarandi hátt. Bert hava vit her, at løðingsberarar hol og elektronir eru umbýttir, og allir streymar og spenningar tí hava mótsætt fortækn. Teknið fyri npn-transistorin er víst í mynd 8.2b.

8.2 Karakteristikkar og javnmetisrásir fyri bipolarar transistorar

Í mynd 8.3 eru spenningar og streymar fyri transistorarnar lýstir.

Fyri npn transistorin eru $V_{BE} \geq 0$, $V_{CE} \geq 0$, $I_B \geq 0$ og $I_C \geq 0$, $I_E = -(I_B + I_C) \leq 0$.

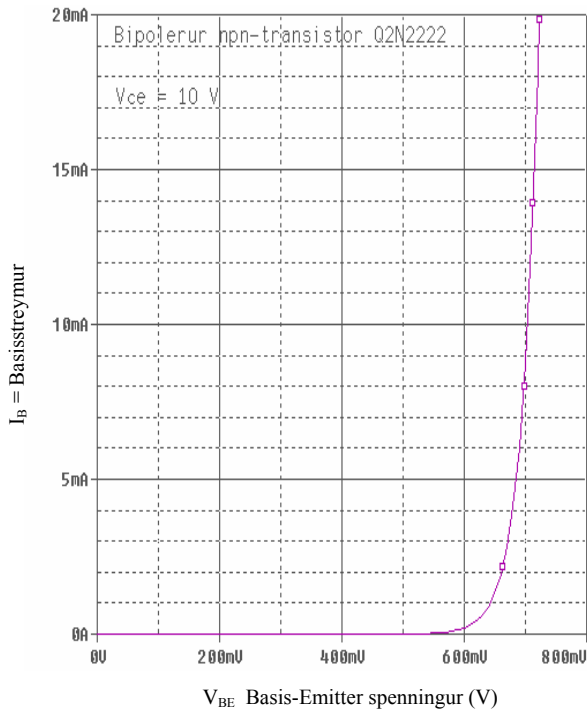
Fyri pnp transistorin eru $V_{BE} \leq 0$, $V_{CE} \leq 0$, $I_B \leq 0$ og $I_C \leq 0$, $I_E = -(I_B + I_C) \geq 0$.



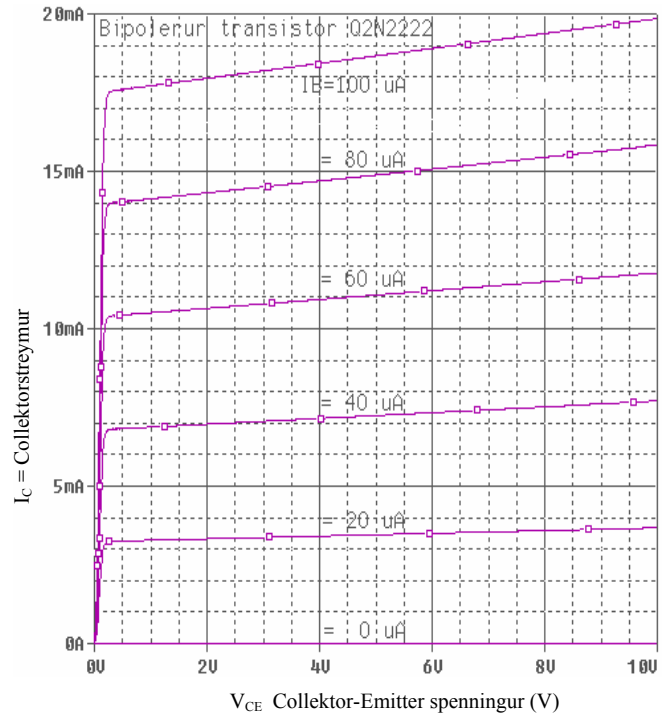
Mynd 8.3 Lýsing av streymum og spenningum í bipolerum transistori: a. npn transistor, b. pnp transistor

Fyri transistorar er galdandi, at samanhangið millum I_B og V_{BE} , ið verður nevnt inngangskararakteristikkurin, er sum streym-spenningkararakteristikkurin fyri dioduna. Hesin karakteristikkur er vístur fyri ein npn-transistor í mynd 8.4. Hann er óheftur av V_{CE} , tá hesin er størri enn 1 volt.

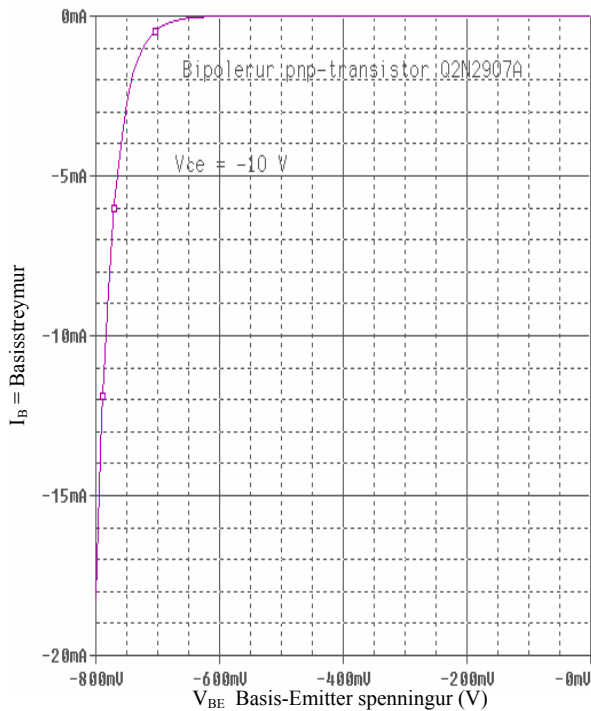
Tilsvarandi er galdandi fyri pnp-transistonin, har øll fortekningu eru vend, sum víst í mynd 8.6.



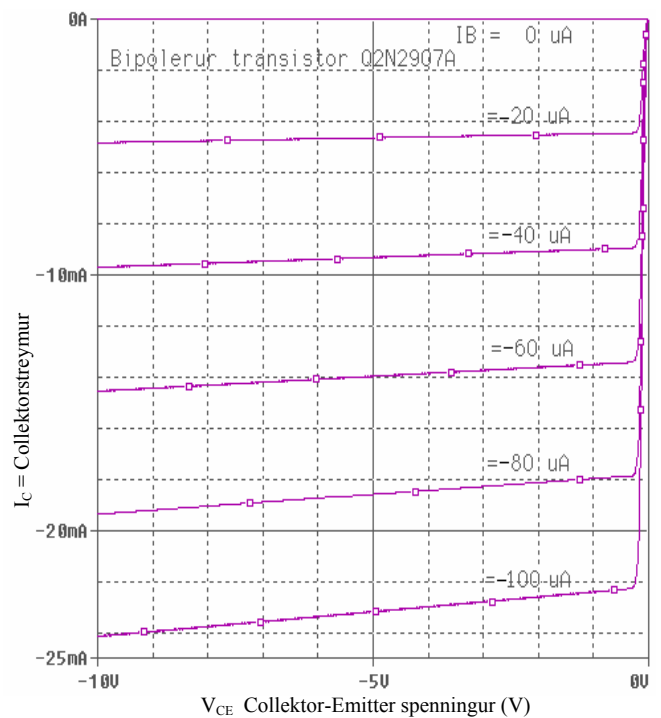
Mynd 8.4 Inngangskararakteristikkur fyri npn transistor



Mynd 8.5 Útgangskararakteristikkur fyri npn transistor



Mynd 8.6 Inngangskararakteristikkur fyri pnp transistor



Mynd 8.7 Útgangskararakteristikkur fyri pnp transistor

Samanhangið millum I_C og V_{CE} , ið verður nevnt útgangskaracteristikkurinn, er fyrir npn-transistorinn víst í mynd 8.5. Sermerkt er, at kurvarnar, sum hvør sær svarar til eina ávísa stødd av basisstreyminum I_B , stórt sæð eru samansettar av tveimum linjum, onnur gongur gjøgnum $(I_C, V_{CE}) = (0, 0)$ og gevur ein proportionalitet millum I_C og V_{CE}

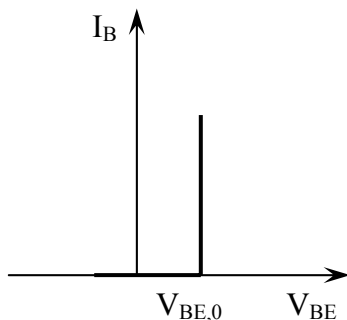
$$(8.2) \quad V_{CE} = r_{c,sat} I_C$$

har $r_{c,sat}$ er sonevnda metningsmótstöðan fyri transistorin (“sat” stendur fyri “saturation” = metting). Hin linjan er ein næstan vatnrøtt linja. Skeringspunktið ella brotpunktið millum hesar linjurnar myndar punktið, har transistorurinn ikki kann leiða meira streym enn metningsstreymin $I_{C,sat}$ svarandi til tann brúka spenningin V_{CE} uttan mun til støddina av I_B , og verður tí nevnt metningspunktið.

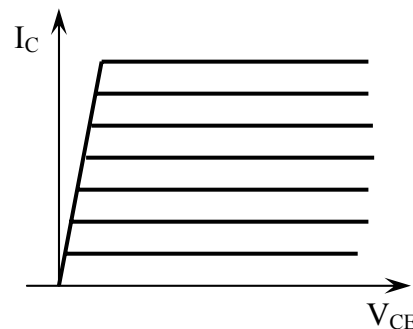
Tað sæst av teimum vatnrøttu linjunum, at við konstantum V_{CE} eru I_C og I_B proportional sambært líkning (8.1) sum áður nevnt.

Heilt tilsvarandi karakteristikkar eru galdandi fyri pnp-transistorar, bert skulu øll forteknini vera øvugt sum víst mynd 8.7.

Til tess at gera karakteristikkarnar einfaldari, verða ofta myndirnar 8.8 og 8.9 við approximeraðu karakteristikkunum nýttar fyri npn transistorin.



Mynd 8.8 Einfaldur inngangskaracteristikkur fyri npn-transistor

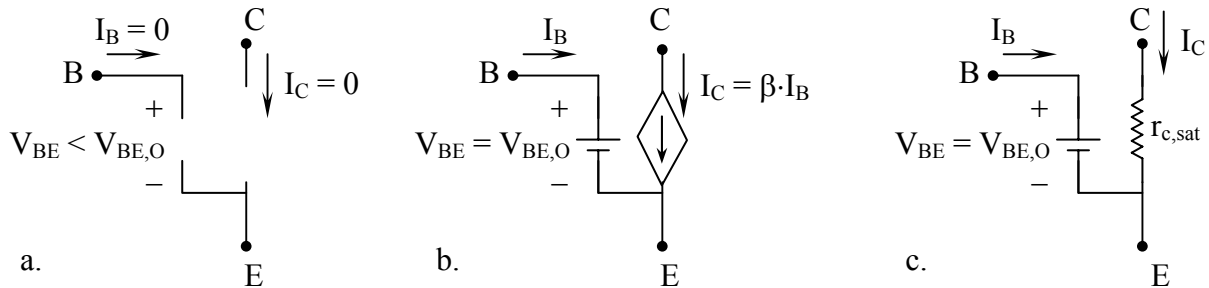


Mynd 8.9 Einfaldur útgangskaracteristikkur fyri npn-transistor

Svarandi til eginleikarnar hjá hesum karakteristikkum kann transistorurinn sigast at vera í einari av trimum ymiskum støðum, ið javnmetisrásir kunnu gerast fyri, sum víst í mynd 8.10:

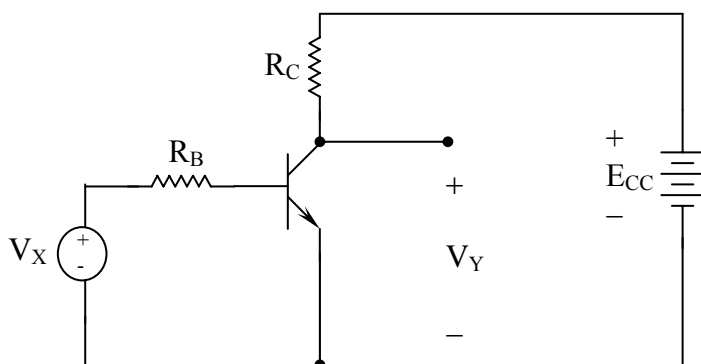
1. Ikki leiðandi ella avskorin transistor er sermerkur av, at $I_B = I_C = 0$, og $V_{BE} < V_{BE,0}$. Hetta svarar til V_{CE} – ásin í útgangskaracteristikkinum fyri transistorin.
2. Aktivur transistor er sermerktur av, at $V_{BE} = V_{BE,0}$, $I_B > 0$ og $I_C = \beta \cdot I_B$ umframt at $V_{CE} > r_{c,sat} \cdot I_C$. Hetta svarar til teir vatnrøttu partarnar av útgangskaracteristikkinum.
3. Mettaður transistor er sermerktur av, at $V_{BE} = V_{BE,0}$, $I_B > 0$ og $I_C < \beta \cdot I_B$ umframt at $V_{CE} = r_{c,sat} \cdot I_C$. Hetta svarar til ta røttu linjuna í útgangskaracteristikkinum gjøgnum $(0,0)$ og hevur hallið $1/r_{c,sat}$.

Fyri hvørja av hesum støðum kunnu vit tekna eina javnmetisrás, sum víst er í mynd 8.10a-c. Heilt á sama hátt kann pnp transistorurin verða viðgjørdur. Bert skulu fortekningini á streymum og spenningum vera øvugt.



Mynd 8.10 Javnmetisrás fyri npn-transistor, a. Avskorin transistor, b. aktivur transistor, c. mettaður transistor.

8.3 Invertarauppsetingin



Taldømi:

$$\begin{aligned}\beta &= 100 \\ r_{C,sat} &= 25 \Omega \\ V_{BE,0} &= 0,6 \text{ V} \\ R_C &= 500 \Omega \\ R_B &= 10 \text{ k}\Omega \\ E_{CC} &= 5 \text{ volt}\end{aligned}$$

Mynd 8.11 Invertarauppseting við npn-transistori

Ein transistor kann verða brúktur sum digitalur invertari ella NOT-gate við at verða settur upp í streymrás sum í mynd 8.11. Transistorparametrarnir β og $r_{C,sat}$ umframt spenningsveitingin E_{CC} og mótstøðurnar R_C og R_B eru givnar støddir. Fyri hesa uppseting kunnu vit útrokna, at útgangsspenningurin V_Y er høgur, tá inngangsspenningurin V_X er lágur, og at útgangsspenningurin V_Y er lágur, tá inngangsspenningurin V_X er høgur. Lat okkum lýsa hetta við einum taldømi.

Lágur inngangur $V_X = V_{XL}$:

$$V_{XL} = 0 \Rightarrow I_B = 0 \Rightarrow I_C = 0 \Rightarrow V_Y = E_{CC} = 5 \text{ volt}$$

Mesti inngangsspenningur fyri, at útgangurin skal vera høgur er $V_{XL,max} = V_{BE,0} = 0,6$ volt, ið júst er tann spenningurin, sum skal til fyri, at basisstreymur skal kunna renna í transistorinum.

Høgur inngangur $V_X = V_{XH}$:

$$V_{XH} = 5 \text{ volt} \Rightarrow I_B = \frac{V_{XH} - 0,6}{R_B} = 0,44 \text{ mA} \quad \text{og} \quad \beta I_B = 44 \text{ mA}$$

$$\Rightarrow I_{C,sat} = \frac{E_{CC}}{R_C + r_{C,sat}} = 9,26 \text{ mA} < \beta I_B \quad \text{Tí er transistorin mettaður og}$$

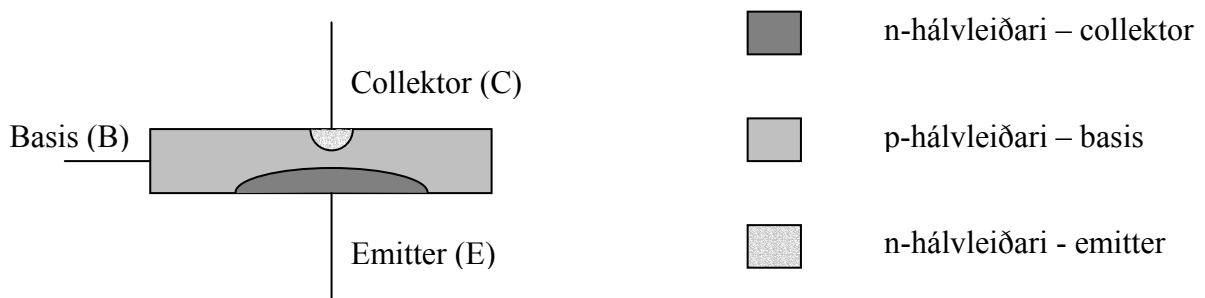
$$\Rightarrow V_Y = r_{C\text{sat}} \cdot I_{C\text{sat}} = 0,37 \text{ volt}$$

Minsti inngangsspenningur fyri, at transistorin skal vera mettaður og útgangurinn lágur, verður funnin við at seta $I_B = \beta \cdot I_C$, har I_C verður sett til virðið $I_{C,\text{sat}}$ á markinum millum aktivan og mettaðan transistor. Sostatt er

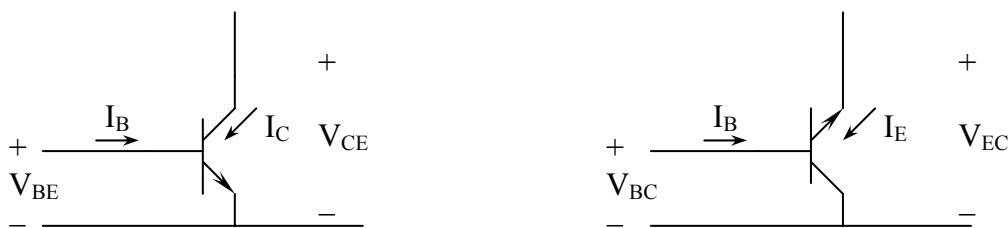
$$V_{XH,\text{min}} = V_{BE,0} + R_B I_B = V_{BE,0} + R_B \frac{I_{C\text{sat}}}{\beta} = V_{BE,0} + \frac{R_B}{\beta} \frac{E_{CC}}{R_C + r_{C\text{sat}}} \cong 1,6 \text{ volt}$$

8.4 Normalir og inverteraðir transistorar

Higartil er tann normali transistorin viðgjörður, har streymstyrkingin er stór. Sum vit sóu, stóðst hetta av, at collektor í transistorinum er nógv størri enn emitterøkið, sum víst í mynd 8.1a. Gera vit harafturímóti collektorøki nógv minni enn emitterøki sum í mynd 8.10, verður streymstyrkingin $\beta \ll 1$. Hesir transistorar verða brúktir í TTL-rásam, sum vit skulu síggja. Ikki er neyðugt, at byggja nýggjan transistor til hetta brúk. Ein normalur transistor, sum verður settur upp í streymrás sum víst í mynd 8.11a virkar sum normalur transistor og hevur streymstyrkingina $\beta = \beta_N \gg 1$. Vit siga, at hann er í vanligum rakstri. Verður sami transistor settur upp í streymrás við emitter bundnum til positivan spenning og collektor til negativan spenning sum í mynd 8.11b, virkar hann sum ein inverteraður transistor, og vit siga, at transistorin er í inverteraðum rakstri. Í hesi uppseting kunnu vit lýsa streymstyrkingina sum proportionalitetsfaktorin millum emitterstreym I_E og basisstreym I_B , har $I_E = \beta_I \cdot I_B$, og $\beta_I \ll 1$.



Mynd 8.10 Uppbygging av “inverteraðum” bipolerum npn transistori

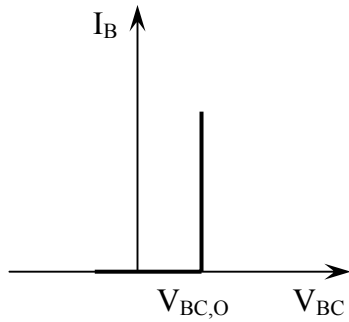


a) Transistor í vanligum rakstri : $I_C = \beta_N \cdot I_B$

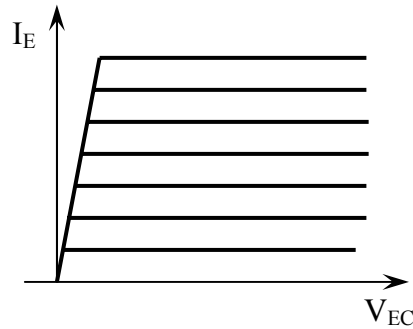
b) Transistor í inverteraðum rakstri: $I_E = \beta_I \cdot I_B$

Mynd 8.11 Transistor í a) vanligum rakstri, og b) inverteraðum rakstri

Approksimeraði inngangskararakteristikkurin hjá transistorinum í inverteraðum rakstri, I_B sum funktión av V_{BC} sum víst í mynd 8.12, har $V_{BC,0} \approx 0,6-0,7$ volt, er meinlíkur honum fyri transistorin í vanligum rakstri. Tilsvarandi líkist útgangskararakteristikkurin, emitterstreymurin I_E sum funktión av emitter-collektorspenninginum V_{EC} , eisini honum fyri transistorinum í vanligum rakstri. Bert eru virðini av basisstreymi, svarandi til hvørja kurvu nógv størri enn í vanliga transistorinum.

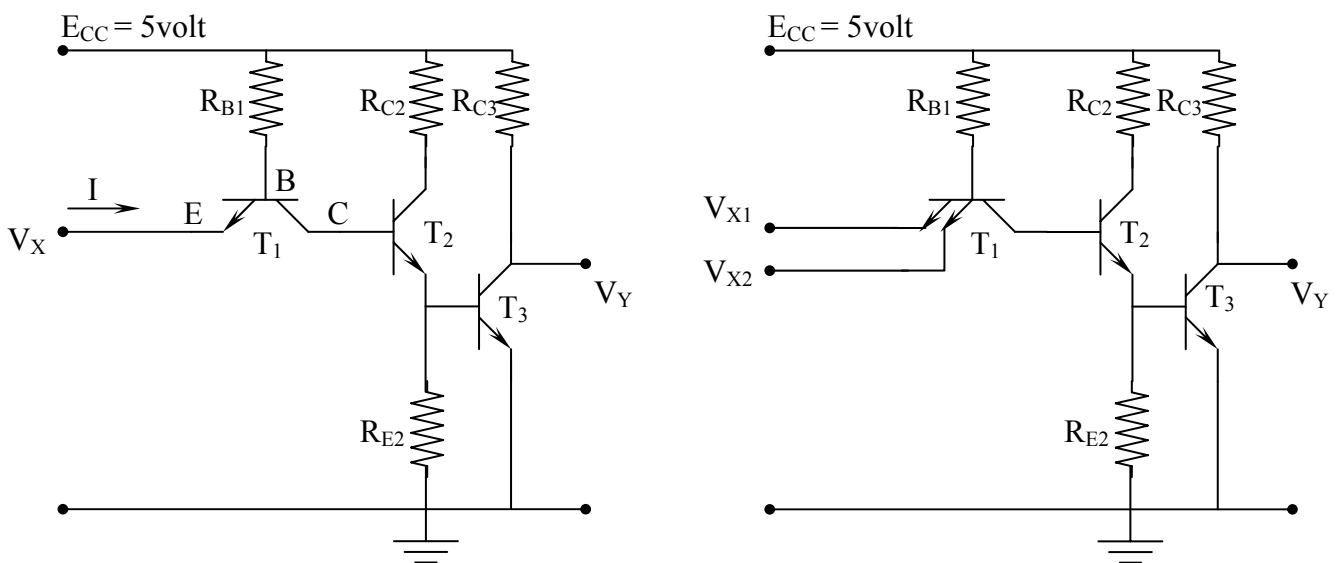


Mynd 8.12 Inngangskaracteristikkur fyrir transistor í inverteraðum rakstri



Mynd 8.13 Útgangskaracteristikkur fyrir transistor í inverteraðum rakstri

8.5 TTL rásir



a) NOT – gate : $Y = X'$

b) NAND – gate : $Y = (X1 \bullet X2)'$

Mynd 8.14 TTL rásir: a) NOT – gate, b) NAND – gate.

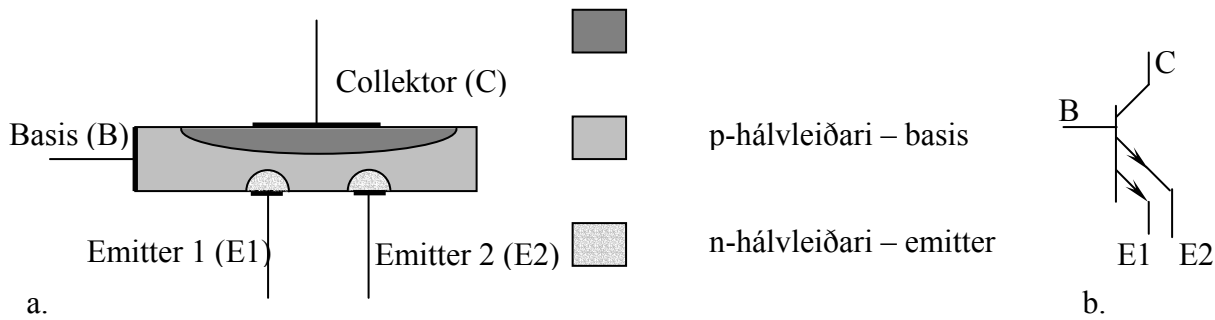
Ein av teimum elstu familjunum av integreraðum rásum (IC) er TTL, ið stendur fyri ”Transistor-Transistor-Logikk” rásir. Í TTL verða bipolarir transistorar nýttir, har inngangstransistorarnir stundum eru inverteraðir til tess at gera neyðugu streymini innganginum til rásina minst møguligan. Í mynd 8.14a er ein TTL invertari ella NOT-gate víst uppbygd av trimum transistorum T_1 , T_2 og T_3 .

Tá inngangsstreymurin V_X er høgur, t.d. 5 volt, er inngangstransistorin T_1 í inverteraðum rakstri, við tað at $V_{EC} > 0$. Tilsvarandi er basis-collektorspenningurin í T_1 $V_{BC} = V_{BC0} \approx 0,6$ V, og basis-emitterspenningarnir $V_{BE} = V_{BE0} = 0,6$ V í bæði T_2 og T_3 . Sostatt verður spenningurin á basis á T_1 $3 \times 0,6$ volt = 1,8 volt. Basisstreymurin í T_1 verður tí $I_{B1} = (E_{CC} - 1,8)/R_B$. Hetta gevur inngangsstreymin $I = \beta_I \cdot I_{B1} = \beta_I \cdot (E_{CC} - 1,8)/R_B$, ið kann gerast sera lítil við tað at β_I er ein lítil stødd. Útgangsspenningurin V_Y er lágur, av tí at basispenningurin á T_3 er 0,6 volt, og T_3 er mettaður. Hetta krevur sjálvsagt, at mótstøðurnar hava ávisar støddir, sum vit tó ikki her skulu fara í smálutir við.

Tá inngangsstreymurin V_X er lágur, t.d. 0 volt, er inngangstransistorin T_1 í normalum rakstri, við tað, at $V_{CE} > 0$. Tilsvarandi er $V_{BE} = V_{BE0} \approx 0,6$ V, og skuldi givið ein positivan collektorstreym I_C í T_1 , men av tí at collektor er bundin til basis T_2 , og at basisstreymur ikki kann renna út úr transistorinum

verður collektorstreymurinn null í T_1 og emitterstreymurinn $I_E = I_B$ í hesum transistorinum. Hetta gevur tí eisini ein sera lítlan streym I í innganginum. Kollektorstreymarnir í T_2 og T_3 verða eisini null og útgangsspenningurinn verður høgur og hevur virði $V_Y = E_{CC} = 5 \text{ V}$.

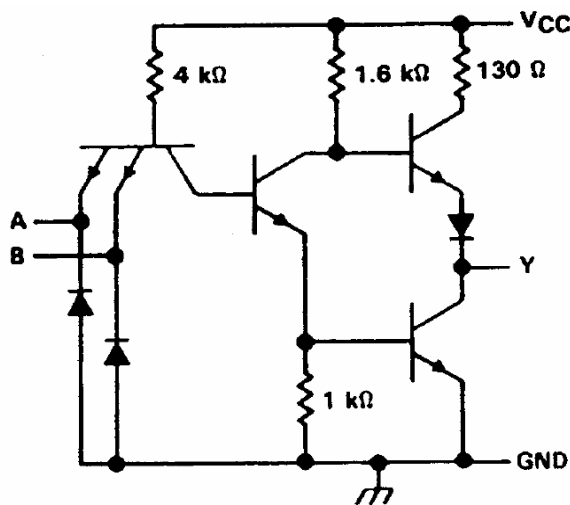
Í mynd 8.14b er ein TTL NAND-gate víst. Hon er uppbygd á sama hátt sum invertarin, bert hevur inngangstransistorin í hesi rás tveir emitterar, sum víst er í mynd 8.15 soleiðis, at hann kemur at virka sum tveir transistorar, har samanbinding er gjørd ávikavist av báðum basis og av báðum collektorunum. Emitter spenningarnir V_{X1} og V_{X2} eru óheftir av hvørjum øðrum. Henda rásin gevur lágan útgangsspenning bert, tá báðir inngangsspenningar eru høgir, ella við øðrum orðum virkar hon sum ein NAND – gate.



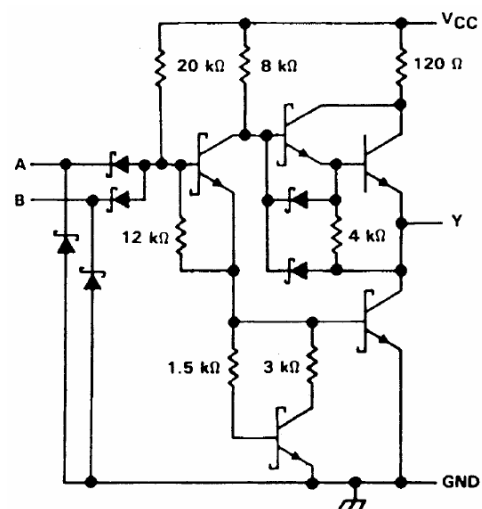
Mynd 8.15 a Bipolarur npn transistor við tveimum emitterum til at brúka í innganginum av TTL – NAND gate
b Tekn fyri npn transistor við tveimum emitterum

Í mynd 8.16 er víst dømi um TTL – NAND gate, sum hon er í datablaði frá Texas Instrument. Utan at fara í dýpdina, skal verða nevnt, at í databløðunum finnast eisini TTL – rásir, sum í innganginum ikki hava transistorar, men diodurás sum víst í mynd 8.17. Hóast hesar rásir eru nevndar TTL í databløðunum og fakkbókmentum er hetta í veruleikanum diodu-transistor logikkrás ella DTL – rás, sum í grundini er ein eldri útgáva av hesum rásam.

Diodurnar í innganginum, sum eru bundnar til jørð, eru Zenerdiodur við zenerspenningi $\approx 5 - 6 \text{ V}$ og eru settar inn fyri at verja inngangirnar móti ov høgum spenningum. Diodur og transistorar í mynd 8.17, ið hava serstakt tekn, eru av schottky slagnum, ið ger rásina serliga skjóta.



Mynd 8.16 SN7400: TTL – NAND gate streymrás við vanligum TTL inngangi.

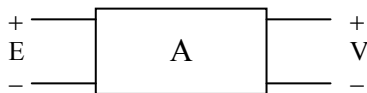


Mynd 8.17 SN74LS00: TTL – NAND gate streymrás við dioduinngangi, eisini nevnd DTL = diodu – transistor – logikkur.

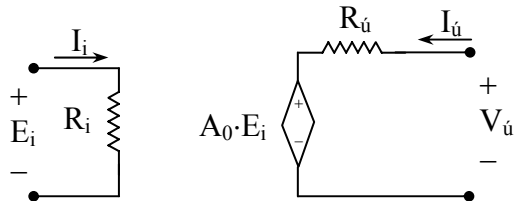
9. Operatíónsstyrkjarar

9.1 Operatíónsstyrkjarahugtakið

Í elektriskum skipanum er styrkjarin til styrking av spenningi ella streymi ein týðningarmikil elektriskur lutur. Ein ideellur spenningsstyrkjarari kann í stuttum lýsast sum elektriskur lutur við tveimum inngangssleiðarum, ið inngangsspenningur E verður lagdur ímillum, og tveimum útgangssleiðarum, hvarímillum útgangsspenningurin $V = A \cdot E$, t.e. proportionalur við inngangsspenningin E , verður skaptur, sum víst er í mynd 9.1.



Mynd 9.1 Ideellur spenningsstyrkjarari við styrking $A=V/E$



Mynd 9.2 Javnmetisrás av ikki ideellum spenningsstyrkjarara

Í veruligum ikki ideellum styrkjara eru eginleikarnir eitt sindur meira samansettir, og verður javnmetisrásin í mynd 9.2 ofta nýtt til at lýsa hann. Soleiðis má verða tikið við, at í innganginum og útganginum renna streymar I_i og I_u . Inngangurin kann vanliga verða javnmettur við mótstöðu

$$(9.1) \quad R_i = \frac{E_i}{I_i}$$

ið verður nevnd inngangsmótstöðan. Útgangsrásin inniheldur ein heftan spenningsgerða $A_0 \cdot E_i$, har A_0 er sonevnda innara styrkingin, umframt útgangsmótstöðuna R_u . Úrslitið er, at útgangsspenningurin verður

$$(9.2) \quad V_u = A_0 E_i + R_u I_u$$

Styrkingin verður tí, um útgangurin hevur last við streyminum I_u (legg til merkis, at um lastin er ein mótstöða verður útgangsstreymurin I_u negativur),

$$(9.3) \quad A = \frac{V_u}{E_i} = A_0 + R_u \frac{I_u}{E_i}$$

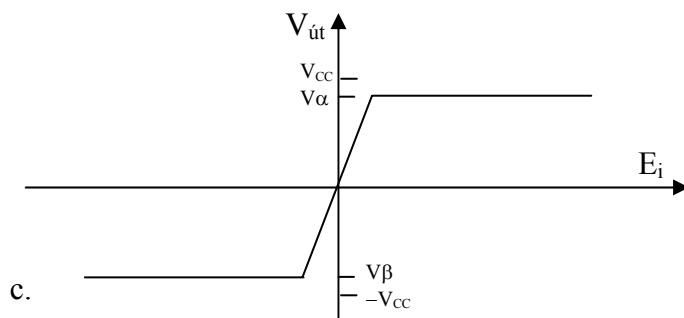
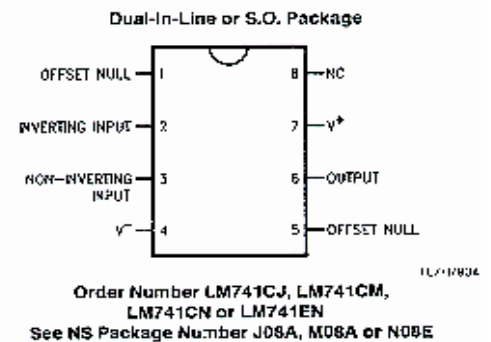
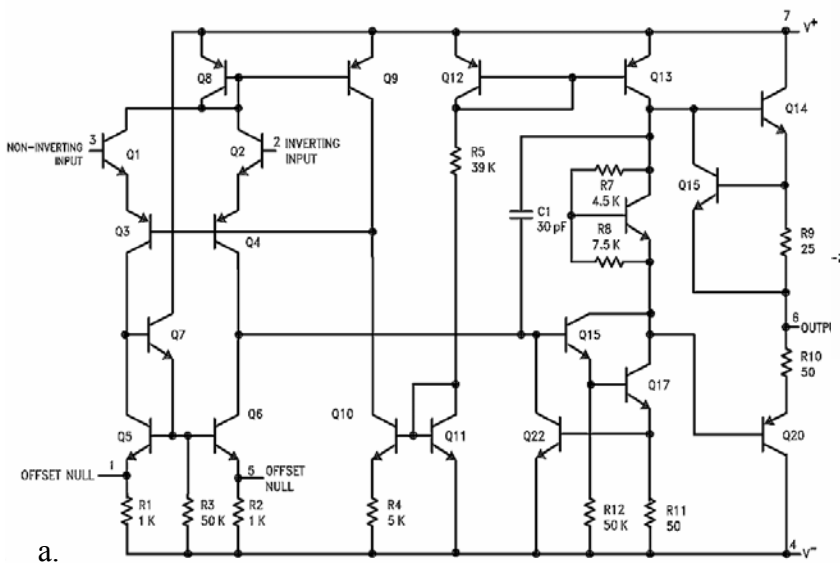
Hetta merkir, at spenningsstyrkingin A er heft av útgangsstreyminum I_u og útgangsmótstöðuni R_u .

Fyri at kunna gera ein ideellan spenningsstyrkjarara er tí umráðandi, at gera R_i so stóran sum gjørligt og R_u so lítlan sum gjørligt samstundis við, at innara styrkingin A_0 skal vera stór. Til hetta endamál er sonevndi operatíónsstyrkjarin gjørdur. Í operatíónsstyrkjaranum eru støddirnar ofta á leið hesar:

Innara styrkingin	$A_0 = 10^4 - 10^6$
Inngangsmótstöða	$R_i = 10^6 - 10^{12}$ ohm
Útgangsmótstöða	$R_u = 10 - 100$ ohm

Operatíónsstyrkjarar eru ofta uppbygdur av hópinum av bipolerum og ofta eisini MOS-FET transistorum umframt mótstöðum. Í handlinum fáast teir til keyps sum integreraðar rásir (IC). Tað er

uttanfyrri rammurnar av hesi bók at fara í dýpdina við streymrásunum í operatiónsstyrkjaram; bert skal dømi uppá veruligan operatiónsstyrkjara verða víst í mynd 9.3. Operatiónsstyrkjari hevur so bert samband við umverðina gjøgnum leiðarar, ofta nevndir bein, til spenningsforsýning, inngangssignal, útgangssignal og til stilling av nulljavnvág á útganginum (offset null í mynd 9.3).



Mynd 9.3 Operatiónsstyrkjari. a. og b. er partur av datablaði frá National Semiconductor:

- Streymrás fyri operatiónsstyrkjaran LM741 (u741),
- Mynd av leiðarum (beinum) til integreraðu rásini við LM741
- Útgangsspenningur $V_{út}$ sum funktión av inngangsspenningi E_i .

Operatiónsstyrkjari tøvur vanligu tveir forsýningsspenningar $+V_{CC}$ og $-V_{CC}$, men vanligu ikki null ella jørð. Jørðpunktíð verður definera av forsýningsspenningunum og ytru rásini, sum operatiónsstyrkjari er settur í. Avmynda vit útgangsspenningin $V_{út}$ sum funktión av inngangsspenninginum E_i sum víst í Mynd 9.3c, vilja teir verða proportionalir so leingi, teir eru nógv smáir. Tað er kortini greitt, at útgangsspenningurin numeriskt ikki kann vera størri enn teir forsýningsspenningar, sum nýttir verða. Tí vil hann fyrri inngangsspenning oman fyrri ávíst mark gerast konstantur, ella vil metta, sum vit málbera okkum. Mettingsvirðini av útgangsspenninginum eru vanligu $V_{\alpha} \approx V_{CC} - 0,5$ volt og $V_{\beta} \approx -V_{CC} + 0,5$ volt.

9.2 Ideellur operatíónsstyrkjari



Mynd 9.4 Ideellur operationsstyrkjari

- teknadur við forsýningsspenningum
- teknadur utan forsýningsspenningar

Operatíónsstyrkjari verður brúktur í einum hópi av elektroniskum funktiónum og uppsetingum, bæði í digitalum og analogum rásum. Til hetta endamál er hann gjørdur so einsháttaður í eginleikum, at hann skal kunna verða settur inn í streymrásir soleiðis, at samlaða rásin kann verða greinað og samansett til at virka til ynshta endamálið utan, at tað skal vera neyðugt at kenna innaru uppbyggingina av styrkjaranum í æsir. Ein slíkur operatíónsstyrkjari er nevndur ideellur og verður avmyndaður sum í mynd 9.4. Hann hevur approksimatívt hesar eginleikar

Innara styrking	$A_0 \approx \infty$
Inngangsmótstøða	$R_i \approx \infty \text{ ohm}$
Útgangsmótstøða	$R_u \approx 0 \text{ ohm}$

Tað kann undra, at $A_0 \approx \infty$, men sum vit skulu síggja, verður A_0 bert brúkt í samband við at tryggja, at styrkingin verður so stór, at vit kunnu siga, at spenningsmunurin millum inngangssleiðararnar verður sera lítil ofta í støddarøkinum minni enn mikrovolt (μV), sum tað sæst av

$$(9.4) \quad E_i = V_+ - V_- = \frac{V_{\text{út}}}{A_0}$$

har V_+ og V_- eru potentialini á sonevnda ”positiva” og ”negativa” inngangssleiðaranum. Approksimatívt gongur E_i móti null, tá $A_0 \rightarrow \infty$. Vit kunnu tí staðfesta lógina um sonevnda virtuella kortslutningin av innganginum, sum sigur, at

$$(9.5) \quad V_+ \approx V_-$$

Er annað av hesum potentialunum, t.d. V_+ null, t.e. jørðbundin, verður hin V_- approksimatívt eisini null. Vit tosa tá um, at V_- er virtuelt jørðbundin. Orðið ekvipotentiallógina ella javnpotentiallógina verður eisini brúkt um hetta fyribrigdi. Lagt skal verða aftrat, at henda lógina er bert galdandi, tá operatíónsstyrkjari er virkin (aktivur) sum styrkjari og ikki, tá hann er mettaður. Tá kunnu inngangsspenningarnir væl víkja nógv frá hvørjum øðrum.

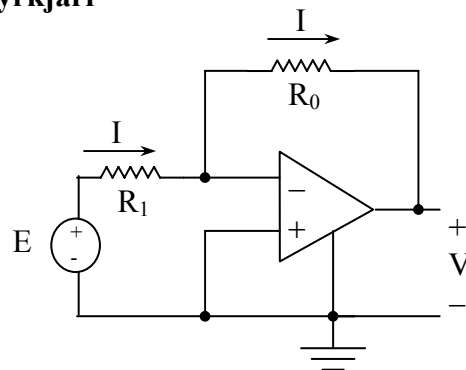
Sum fylgja av, at $R_i \approx \infty$, er galdandi fyri elektrisku streymarnar I_+ og I_- í inngangssleiðningunum, at

$$(9.6) \quad I_+ \cong I_- \cong 0$$

Viðhvört verður operatíonsstyrkjarin teknaður soleiðis, at forsýningsspennningar eru vístir sum í mynd 9.4a, men av tí at ideellu operatíonsstyrkjaraeginleikarnir bert verða brúktir, tá styrkjarin ikki er mettaður, verða leiðararnir til forsýningsspenningarnar ofta ikki tiknir við í tekningina sum í 9.4b. Tá er avgerandi, at null leiðarin verður teknaður og bundin til jørðpunktið soleiðis, at returstræymurin frá einari last á styrkjaraútganginum fer inn í styrkjarin aftur, og Kirchhoffs lógir skulu kunna verða brúktar, hóast hann í flestu tøkum IC-rásam bert er ein virtuellur leiðari og ikki er veruligur. Null leiðarin umboðar tí í veruleikanum spenningsforsýningsleiðararnar, sum í veruleikanum ber returstræymin aftur til styrkjaran.

Í teimum komandi pørtunum í hesum kapitlinum verður operatíonsstyrkjarin vístur í ymskum funktiónum, lutvís sum ideellur styrkjari í parti 9.3 – 9.8, lutvís í mettaðum líki í parti 9.9 – 9.12. Í parti 9.13 og 9.14 er operatíonsstyrkjarin brúktur í sambandi við umseting av digitalum signali til analogt signal (D/A - umsetari) og av analogum signali til digitalt signal (A/D - umsetari).

9.3 Inverterandi styrkjari



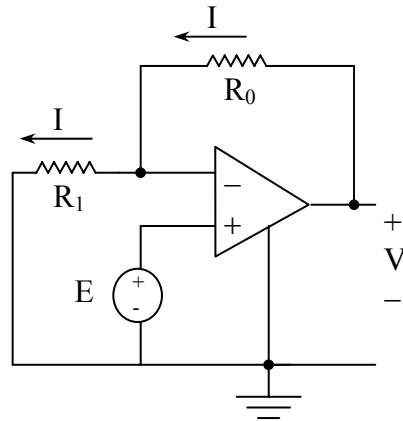
Mynd 9.5 Inverterandi styrkjari

Verður ideellur operatíonsstyrkjari settur upp í streymrás sum í mynd 9.5 við streymgerða E sum inngangsspenningi, og er E nóg lítil, er operationsstyrkjarin virkin. Tá verður potentialið á –innganginum $V_- \approx 0$ orsakað av virtueli jørðlógini. Av tí, at stræymurin inn í operatíonsstyrkjaran er null, hava stræymarnir í R_1 og R_0 somu stødd I.

Vit kunnu tá rokna spenningsstyrkingina A út sum lutfallið millum útgangsspenning V og inngangsspenning E til at vera

$$(9.7) \quad \text{Spenningsstyrking:} \quad A = \frac{V}{E} = \frac{-R_0 I}{R_1 I} = -\frac{R_0}{R_1}$$

9.4 Ikki – inverterandi styrkjari

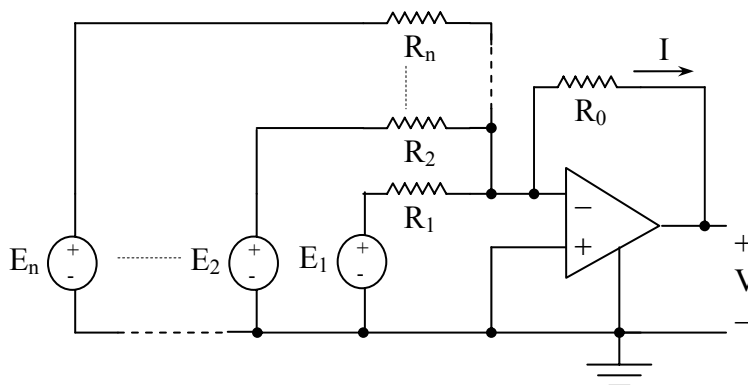


Mynd 9.6 Ikki inverterandi styrkjari

Í mynd 9.6 er ein onnur styrkjarauppseting, har endaliga styrkingin verður positiv. Við at brúka virtuelt kortslutningslógina t.e. $V_- \cong V_+$, og at $I_- \cong 0$ verður styrkingin í hesum fòrinum

$$(9.8) \quad \text{Spenningsstyrking:} \quad A = \frac{V}{E} = \frac{R_1 I + R_0 I}{R_1 I} = \frac{R_1 + R_0}{R_1} = 1 + \frac{R_0}{R_1}$$

9.5 Summatións styrkjari



Mynd 9.7 Summatións styrkjari

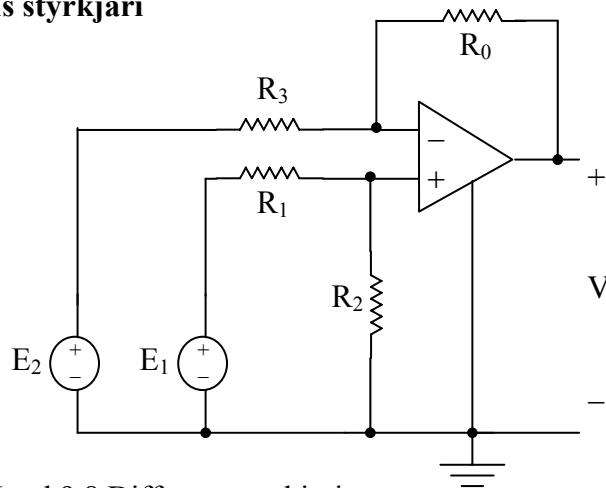
Summatións styrkjari er styrkjari, ið m.a. verður brúktur í umgerð av digitalum signali til analogt signal, sum vit vilja viðgera í parti 9.13. Støðið undir honum skal viðgerast her.

Summatións styrkjarin í mynd 9.7 er streymrásuppseting, har fleiri spenningsgerðar eru í innganginum, ið á operatiónsstyrkjaraútgongdini gera ein útgangsspenning V , sum er ein linearkombinatión av inngangsspenningunum. Eisini her brúka vit virtuelt jørð lógina, t.e. $V_- \cong 0$, og at $I_- \cong 0$. Harvið verður streymurin frá tí i 'ta spenningsgerðanum sambært ohms lóg E_i/R_i . Summin I av hesum streymum verður leiddur til inngangin á operatiónsstyrkjaranum og heldur fram í R_0 soleiðis, at úrslitið verður ein

$$(9.9) \quad \text{Útgangsspenningur:} \quad V = -R_0 I = -R_0 \left(\frac{E_1}{R_1} + \frac{E_2}{R_2} + \dots + \frac{E_n}{R_n} \right) = -\frac{R_0}{R} (E_1 + E_2 + \dots + E_n)$$

har síðsti partur av formlinum er galdandi, um allar mótstøðurnar $R_i = R$, har $i = 1, 2, \dots, n$, eru eins stórar. Tá verður spenningurin V proportionalur við summin av øllum inngangsspenningunum. Vit hava við øðrum orðum gjørt ein summatiónsstyrkjara, við móguleika fyri at "vekta" liðini ymiskt ella eins eftir ynski. Um vit ynskja positivt fortekn fyri útgangsspenningin, kunnu vit seta ein inverterandi styrkjara við styrkingini -1 aftaná.

9.6 Differens styrkjari



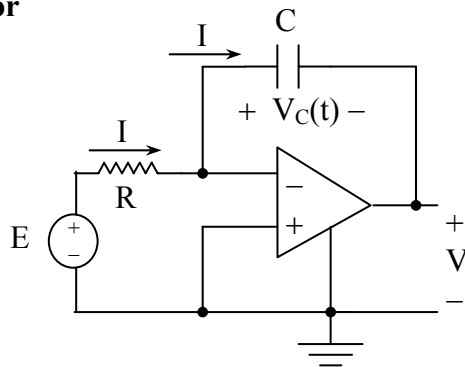
Mynd 9.8 Differens styrkjari

Differensstyrkjari kann gerast við einföldu streymrásini í mynd 9.8. Við t.d. at brúka superpositiðnsrokniháttin kunnu vit finna, at

$$(9.10) \quad \text{Útgangsspenninur} \quad V = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{R_3 + R_0}{R_3} \cdot E_1 - \frac{R_0}{R_3} \cdot E_2 = \frac{R_0}{R} \cdot (E_1 - E_2)$$

har seinasti partur í formlinum er galdandi, um vit seta $R_1 = R_3 = R$ og $R_2 = R_0$. Hetta merkir, at við hesum mótstøðum verður útgangsspenninur proportionalur við munin millum inngangsspenninarnar.

9.7 Integrator



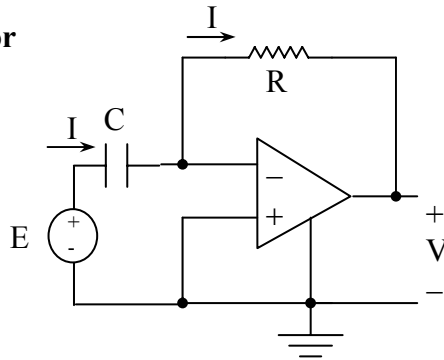
Mynd 9.9 Integrator styrkjari

Integratiðn við tíðini t av einum spennin $E = E(t)$ kunnu vit gera í rásini í mynd 9.9. Kondensator er settur inn í leiðina fra útgangi til -inngang á operatiðnsstyrkjaranum. Streymurin í C hevur somu stødd sum streymurin í R og er sambært ohms lóg $I = E/R$. Innseta vit I í integralformlinum fyri kondensatorspenningin, og brúka, at byrjannarvirðið av kondensatorspenninginum $V_C(0) = 0$, kunnu vit útleiða, at úrslitið er proportionalt við integralið av inngangsspennin E við proportionalitetskonstantinum $-1/(RC)$, soleiðis, at

$$(9.11) \quad \text{Útgangsspenninur} \quad V = - \left[\int_0^t \frac{I(t')}{C} dt' + V_C(0) \right] = - \frac{1}{RC} \int_0^t E(t') dt'$$

Hann er negativur, sum vit síggja. Vilja vit hava hann positivan, kunnu vit seta inverterandi styrkjara við styrkingini -1 aftaná. RC er ein tíðarkonstantur og verður nevndur integratiðnstíðarkonstanturin.

9.8 Differentiator



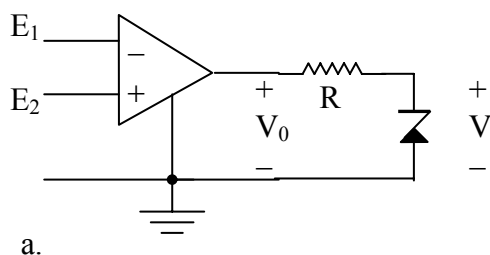
Mynd 9.10 Differentiator styrkjari

Differentiatióin við tíðini t av einum spenningi $E = E(t)$ kunnu vit gera í rásini í mynd 9.10. Seta vit kondensator C inn í styrkjararásina millum $-$ inngangin og spenningsgerðan E og R millum sama inngang og útgangin, verður spenningurinn $E = E(t)$ differentieraður. Streymurinn er I bæði í C og R . Brúka vit ohms lóg og líkningina fyri streym í kondensatori verður

$$(9.12) \quad \text{Útgangsspenningur} \quad V = -R \cdot I(t) = -RC \frac{dE(t)}{dt}$$

RC er sonevndi differentiatiónstíðarkonstanturinn. Forteknið er negativt. Vilja vit hava positivt fortekn, kunnu vit seta ein styrkjara við styrkingini -1 aftan á differentiator styrkjaran.

9.9 Komparator



a.

b.

Mynd 9.11 Komparator.

- Uppseting við operatiónsstyrkjara
- Tvey ymisk tekn fyri komparator

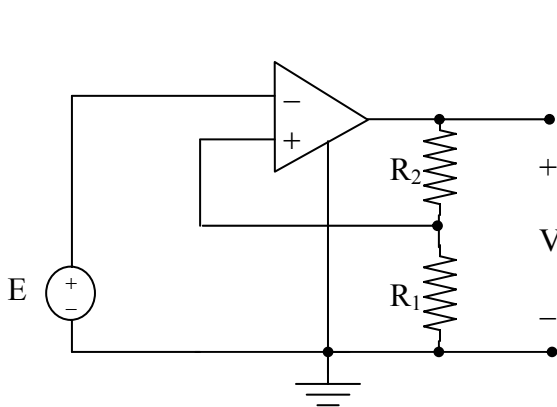
Ein komparator er ein eind, ið kann samanbera tveir spenningar og avgera, hvør av teimum er tann størri. Operatiónsstyrkjarin í uppsetingini í mynd 9.11 hóskar sera væl til hetta endamál. Styrkjarin er aktivur í sera lítlum øki av muninum millum inngangsspenningarnar E_1 og E_2 (sí mynd 9.3c). Styrkingin í aktiva økinum er, sum áður nevnt, ofta størri enn 10^6 , og mettar styrkjarin tá, um $|E_2 - E_1|$ bert er størri enn eina $10 - 15$ mikrovolt. Sostatt vil útgangsspenningurinn á operatiónsstyrkjara-num $|V_0|$ hava virði av øðrum av metningsspenningunum V_α ella V_β , sum numeriskt er bert lítið vet ($0,5$ V) minni enn forsyningsspenningurinn V_{CC} .

Komparatorin verður ofta brúktur til at stýra digitalum rásum. Inngangsspenningurinn til eina digitala rás skal vanligja vera minni enn 5 volt, tá hann er høgur, og nær 0 volt, tá hann er lágur. V_{CC} hevur vanligja støddina $10 - 15$ volt. Til at avmarka spenningin V á útganginum á komparatorinum kunnu vit brúka eina zenerdiodu við zenerspenninginum $V_Z = 5$ volt. Við rásini í mynd 9.11 verður sostatt

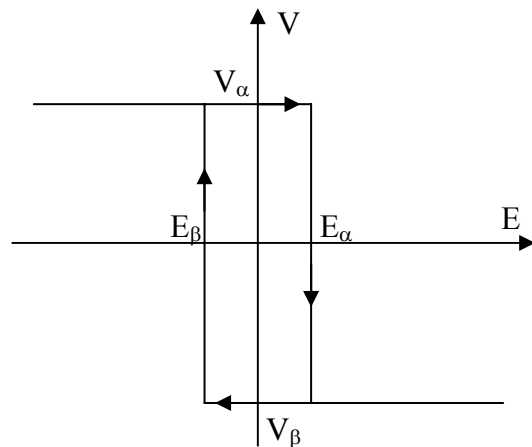
$$(9.13) \quad \begin{array}{llll} \text{tá} & E_2 > E_1 & \text{er} & V_0 = V_\beta \cong -V_{CC} & \text{og} & V \approx V_{D0} \cong -0,6 \text{ volt} & \text{og} \\ \text{tá} & E_2 < E_1 & \text{er} & V_0 = V_\alpha \cong +V_{CC} & \text{og} & V \approx V_Z \cong 5 \text{ volt} \end{array}$$

9.10 Schmitt triggari

Sum vit súa, var komparatorin væl skikkaður til at avgera, um ein spenningur er størri ella minni enn ein annar. Hetta kann vera ein avgerandi funktiión, tá ræður um t.d. at tendra og sløkkja eitt tól í tráð við, um spenningsmunurin er positivur ella negativur. Trupuleikin er bara tann, at, um tann stýrandi spenningsmunurin á innganginum liggur nær nul, vil operatiónsstyrkjarin vera í ella nær aktiva økinum og skifta útgangsspenningin í heilum í tráð við sera smáar broytingar í inngangsspenninginum. Hetta kann vera óheppi fyri tað tólið, sum skal stýrast soleiðis at verða tendrað og sløkt í heilum. Betri hevði tí verið, um inngangsspenningurin til tólið, t.e. útgangsspenningurin hjá komparatorinum, varð læstur fastur til sama virði, inntil spenningsmunurin á innganginum á komparatorinum er farin upp um eitt ávíst positivt virði, og at skifti hinvegin ikki fer fram fyrr enn, spenningsmunurin er farin niður um eitt ávíst negativt virði. Á henda hátt fáa vit eina sokallaða *hysteresu*. Hesi viðurskifti skulu verða viðgjørd nærmari niðanfyri í samband við Schmitt triggaran, sum er elektronisk rás, ið júst virkar á henda hátt og kann geva eina hysteresu í útgangssignalinum sum funktiión av inngangssignalinum. Hann kann verða uppbygður av operatiónsstyrkjara, men í digitalum komponentum er hann viðhvørt innbygður í inngangin í integreraðu rásini og er tá uppbygður beinleiðis sum partur av digitalu funktiiónunum.



Mynd 9.12 Inverterandi Schmitt triggari



Mynd 9.13 Útgangsspenningur V sum funktiión av inngangsspenningi E fyri inverterandi Schmitt triggara

Vit skulu her viðgera Schmitt triggaran, ið er uppbygður av operatiónsstyrkjara og tveimum mótstöðum sum í mynd 9.12. Operatiónsstyrkjarin fær her ein spenning V_+ inn á +inngangsleiðaran, sum verður tikin frá spenningsbýtaranum samansettur av mótstöðunum R_1 og R_2 . Hann fær tí støddina

$$(9.14) \quad V_+ = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V$$

Á –inngangsleiðaran er ein spenningur E settur til. Um E er negativur og hevur eitt stórt numeriskt virði, vil útgangsspenningurin V á operatiónsstyrkjaranum verða positivur og hava metningsvirðið V_α , sum víst er í mynd 9.13. Spenningurin á +inngangsleiðaran verður tí

$$V_+ = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_\alpha = E_\alpha. \text{ Økja vit nú E, hendir einki fyrr enn E fer upp um } V_+. \text{ Tá skiftir}$$

útgangsspenningurin til negativt metningsvirði V_β . Hetta virði av E svarandi til skifti er nevnt

$$(9.15) \quad \text{Ovari skiftispenningur} \quad E_{\alpha} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_{\alpha}$$

Um E nú verður settur at vera positívur við stórum numeriskum virði, vil útgangsspenningurinn V á operatíonsstyrkjaranum verða negativur og hava metningsvirðið V_{β} , sum víst er í mynd 9.13.

$$\text{Spennungurinn á + inngangsleiðaran verður tí nú } V_{+} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_{\beta} = E_{\beta}.$$

Lata vit nú við hesi útgangsstøðu E minka, hendir einki fyrr enn E fer niður um V_{+} . Tá skiftir útgangsspenningurinn til positivt metningsvirði V_{α} . Hetta virði av E er nevnt

$$(9.16) \quad \text{Niðari skiftispenningur} \quad E_{\beta} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_{\beta}$$

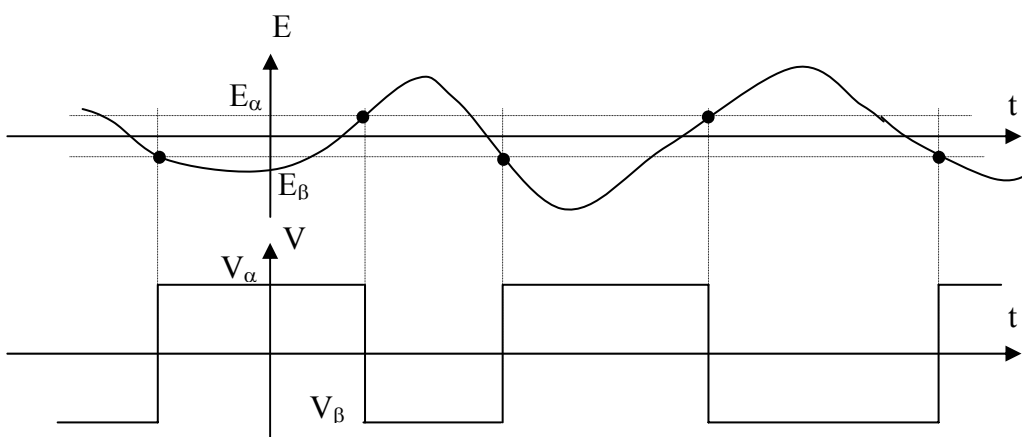
Tað sæst av hesum, at skiftið hendir svarandi til ymiskar inngangsspenningar alt eftir, um hann er vaksandi ella minkandi. Munurin millum hesar skiftispenningarnar verður navngivið

$$(9.17) \quad \text{Hysteresesa} \quad H = E_{\alpha} - E_{\beta} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot (V_{\alpha} - V_{\beta})$$

Brúka vit Schmitt triggara í streymrás, har inngangsspenningurinn $E = E(t)$ skiftir við tíðini, sum í døminum í mynd 9.14, verður úrslitið av útgangsspenninginum ein fýrkantspenningur V , ið skiftir til høgán spenning V_{α} , tá E fer niður um E_{β} , og V skiftir til lágán spenning V_{β} , tá E fer upp um E_{α} .

Í hesum døminum av Schmitt triggara uppbygður av operatíonsstyrkjara eru skiftispenningarnir numeriskt eins stórir, men til ber at gera teir ymiskar við at seta spenningsgerða í seriu við R_1 . Í Schmitt triggara innbygdir í digitalar IC rásir eru skiftispenningarnir eisini numeriskt ymiskir, og eru teir og hysteresuspennungurinn fastlagdir sum partur av eginleikanum av IC rásini.

Schmitt triggarin, ið er viðgjørdur her, er nevndur inverterandi Schmitt triggari við tað, at hann virkar sum ein invertari uttan fyri hysteresuøki. Til ber eisini at gera ikki inverterandi Schmitt triggara, men verður ikki viðgjørt her.



Mynd 9.14 Útgangsspenningur $V = V(t)$ frá Schmitt triggara við skiftandi spenningi $E(t)$ á innganginum.

9.11 Astabilur multivibrator

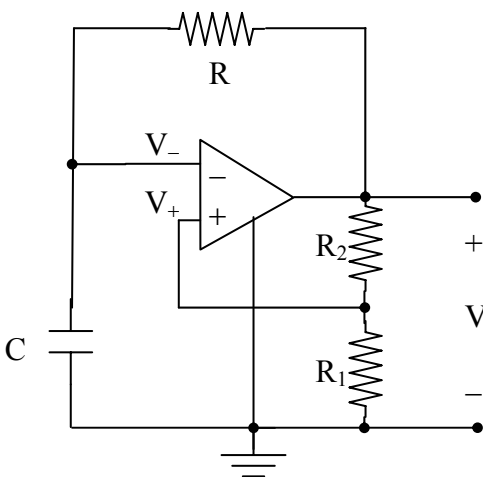
Í samband við sekventiellar digitalar rásir er vanliga brúk fyri einum spenningsgerða, ið gevur ein fyrkantspenning við ávísnum fastløgðum frekvensi frá sær, til brúk sum klokka at stýra øllum teimum sekventiellu digitalu maskinunum í rásini. Hesir týðningarmiklu pulsspenningsgerðar kunnu verða gjørdir sum sonevndir astabilir multivibratorar. Sum støði undir slíkum pulssgerða kunnu vit brúka Schmitt triggara. Seta vit sum í mynd 9.15 ein kondensator C millum –inngangin á operatiónsstyrkjaranum í Schmitt triggaranum og jørð, umframt eina mótstöðu R millum útgangin og sama –inngang, vil streymur renna til kondensatorin gjøgnum R frá útganginum, og spenningurin kemur at broytast sambært mynd 9.16, sum vit skulu síggja.

Lat okkum sum byrjan siga, at útgangsspenningurin $V = V_\alpha$ og $V_- = 0$. Styrkjarin er mettaður í hesi støðu, og $V_+ = E_\alpha$. Kondensatorin uppløðist nú við streymi gjøgnum R, hvørs stødd er $(V - V_-)/R$ soleiðis, at kondensatorspenningurin V_- veksur við tíðarkonstantinum

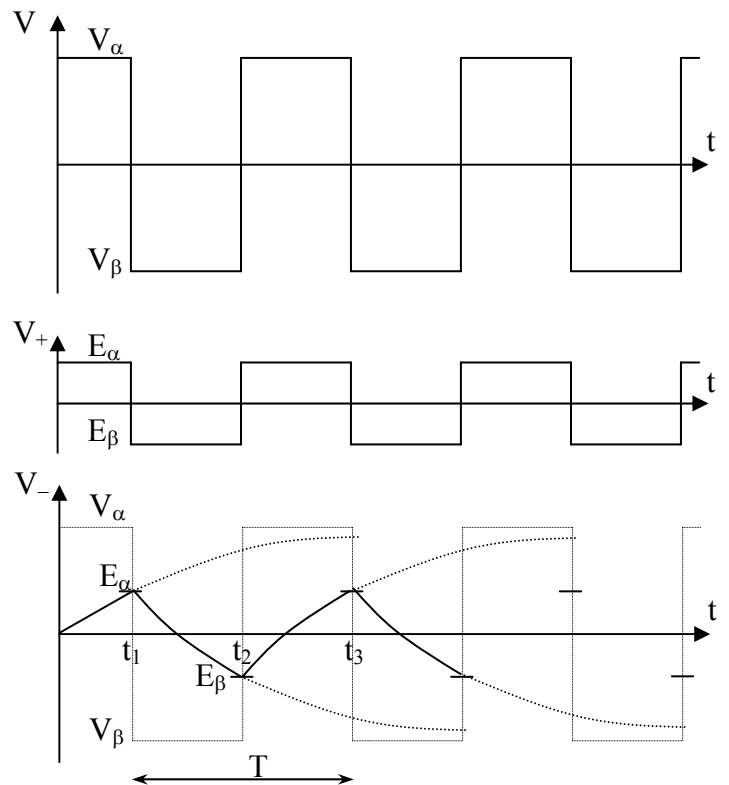
$$(9.18) \quad \tau = RC$$

upp móti asymptotiska spenningsvirðinum

$$(9.19) \quad V_-(\infty) = V_\alpha$$



Mynd 9.15 Astabilur multivibrator gjørdur við Schmitt triggara



Mynd 9.16 Útgangsspenningur V, umframt inngangsspenningar V_+ og V_- hjá operatiónsstyrkjaranum í einum astabilum multivibrator sum funktión av tíðini t.

Men tá kondensatorspenningurin er vaxin upp til $V_- = E_\alpha$, skiftir útgangsspenningurin eins og fyrr frágreitt fyri Schmitt triggaran frá $V = V_\alpha$ til $V = V_\beta$, og nú verður tilsvarendi $V_+ = E_\beta$. Gongdin er nú, at kondensatorstreymurin vendur orsakað av broyttum virði fyri V. Kondensatorin avløðist móti negativa spenningsvirðinum V_β sum asymptota og við sama tíðarkonstanti τ .

Tá kondensatorsþenningurinn er fallinn niður á $V_- = E_\beta$, skiftir stöðan aftur og heldur soleiðis fram periodískt við tíðini. Um $V_\alpha = -V_\beta$ og $E_\alpha = -E_\beta$, kann periodan T orsakað af symmetriinni verða roknað sum tann dupulta tíðin, ið gongur millum tíðarvirðini t_1 og t_2 , tá þenningurinn $V_-(t_1) = E_\alpha$ og $V_-(t_2) = E_\beta$. Í hesum tíðarbilinum er

$$(9.20) \quad V_-(t) = V_\beta + (E_\alpha - V_\beta)e^{-\frac{t-t_1}{\tau}} \quad \text{fyri} \quad t_1 < t < t_2$$

har lagt er upp fyri við stöðdinni $t - t_1$ í eksponentinum, at útgangspunktið av kurvuni er $t = t_1$ og ikki $t = 0$, t.e. nullpunktið er forskotið. Seta vit $t = t_2$ í henda formulin verður $V_- = V_-(t_2) = E_\beta$ og vit kunnu útrokna periodutíðina til

$$(9.21) \quad T = 2(t_2 - t_1) = 2\tau \cdot \ln \frac{V_\beta - E_\alpha}{V_\beta - E_\beta} = 2\tau \cdot \ln \frac{V_\alpha + E_\alpha}{V_\alpha - E_\alpha}$$

har vit í seinasta parti av formlinum hava brúkt $V_\beta = -V_\alpha$ og $E_\beta = -E_\alpha$. V vil tískil skifta periodískt sum ein fýrkantþenningur millum stöðirnar $V = V_\alpha$ og $V = V_\beta (= -V_\alpha)$ við hesari perioduni.

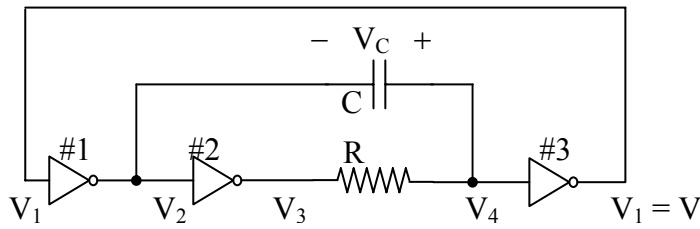
Um E_α er væl minni enn V_α vil kondensatorsþenningurinn V_- skifta approksimatívt sum ein trýkantþenningur millum virðini E_α og $E_\beta = -E_\alpha$ við somu periodu.

Tað skal viðmerkjast, at um $V_\alpha \neq -V_\beta$ vil omanfyri brúktá symmetriin millum partperiodurnar við vaksandi og avtakandi V_- ikki verða til staðar, og hvør partsperiodan má verða roknað út fyri seg og síðan lagdar saman fyri at finna samlaðu periodutíðina.

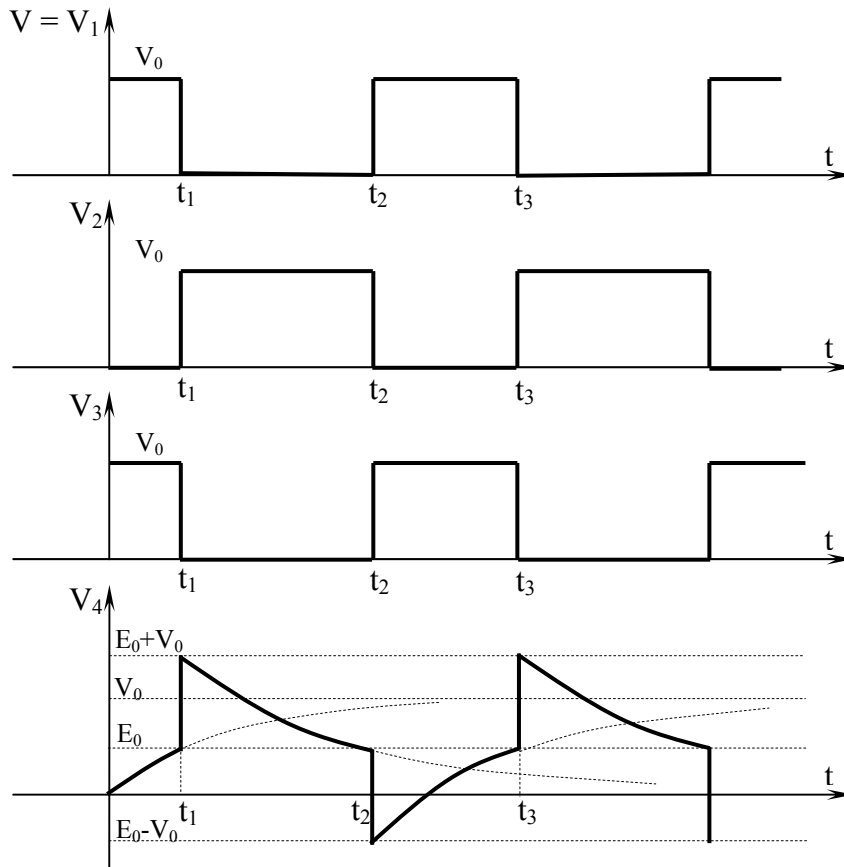
Avmarking er fyri, hvussu skjótt skifti á útgangssþenninginum kann fara fram. Ideelt er skifti diskontinuert, men operatíonsstyrkjarin setur eitt mark, sum í databløðunum verður nevnt "slew rate". Sum dømi kann nevast, at fyri operatíonsstyrkjaran u741 er "slew rate" = 0,5 V/ μ s, meðan CA3140 er nógv skjótari við "slew rate" = 9 V/ μ s

Astabilur multivibrator kann eisini verða gjørdur við uppseting av digitalum IC rásum, t.d. av trimum invertarum #1, #2 og #3 sum í mynd 9.17. Invertarainngangur #1 og invertaraútgangur #3 eru samanbundnir og hava tí sama potential V_1 . Invertaraútgangur #2 við potentialinum V_3 er gjøgnum eina mótstöðu R bundin til invertarainngang #3, sum hevur potentið V_4 . Invertaraútgangur #1 og invertarainngangur #2 eru samanbundnir og hava potenti V_2 , og eru hesir bundnir gjøgnum ein kondensator til invertarainngang #3.

Vit velja her at einfaldgera viðgerðina av streymrásini við at brúka ideellar invertarar, t.e. útgangssþenningurinn er neyvt 0 ella V_0 svarandi til lága ella høga stöðu, og streymurin í innganginum er altíð null. Hvør av invertarunum skifta útgangssþenning diskontinuert millum 0 og V_0 , tá inngangssþenningurinn broytir virði frá størri enn E_0 til minni enn E_0 ella øvugt. Henda rásin vil tá av sær sjálvum gera ein útgangssþenning $V = V_1$, ið skiftir periodískt við tíðini millum $V = 0$ og $V = V_0$ sum víst í mynd 9.18



Mynd 9.17 Astabilur multivibrator uppbyggður av trimum invertarum, einari mótstöðu og einum kondensatori.



Mynd 9.18 Spenningsvirði í astabilum multivibrator gjørdur av invertarum. Útgangsspenningar V_1 , V_2 og V_3 , umframt inngangsspenningur til invertara #3 eru myndaðir sum funkión av tíðini t .

Vit kunnu nú greina gongdina við byrjan í tíðini $t = 0$, tá vit seta $V_4 = 0$. Hetta gevur útgangsspenningar $V_1 = V_0$, $V_2 = 0$ og $V_3 = V_0$.

V_3 vil nú uppløða kondensatorin C gjøgnum mótstöðuna R soleiðis, at V_4 gongur móti asymptotiska virðinum V_0 við tíðarkonstantinum

$$(9.22) \quad \tau = RC$$

og kann á henda hátt skrivast

$$(9.23) \quad V_4 = V_0 - V_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{fyri} \quad 0 < t < t_1$$

Til tíðina $t = t_1$ er $V_4 = E_0$ og útgangsspenningarnir skifta virði við stöddini $-V_0$ ella $+V_0$ til $V_1 = 0$, $V_2 = V_0$ og $V_3 = 0$. Av tí at spenningurinn V_C yvir kondensatorin C ikki kann broytast diskontinuert vil $V_4 = V_2 + V_C$ skifta diskontinuert eins nógv og V_2 , t.e. hækka diskontinuert til virði $V_4 = E_0 + V_0$.

Nú er ein nýggj byrjannarstöða skapt í $t = t_1$ við byrjannarspenningunum $V_4 = E_0 + V_0$, umframt $V_3 = 0$ og $V_1 = V_0$. Tessvegna vil kondensatorin nú umlæðast soleiðis, at $V_4(t)$ gongur móti asymptotuni $V_4(\infty) = 0$ og við sama tíðarkonstanti $\tau = RC$. Vit kunnu tí skriva

$$(9.24) \quad V_4 = (E_0 + V_0)e^{-\frac{t-t_1}{\tau}} \quad \text{fyri} \quad t_1 < t < t_2$$

Til tíðina $t = t_2$ verður aftur $V_4 = E_0$ og útgangsspenningarnir skifta virði við stöddini $-V_0$ ella $+V_0$ nú soleiðis, at $V_1 = V_0$, $V_2 = 0$ og $V_3 = V_0$. Av tí at spenningur V_C yvir C heldur ikki hesa ferð kann broytast diskontinuert vil $V_4 = V_2 + V_C$ eisini broyta virði eins nógv og V_2 , t.e. lækka diskontinuert til virði $V_4 = E_0 - V_0$.

Nú er nýggj byrjannarstöða skapt í $t = t_2$ við byrjannarvirðum $V_4 = E_0 - V_0$, umframt $V_3 = V_0$ og $V_1 = 0$. Tessvegna vil kondensatorin nú umlæðast soleiðis, at V_4 gongur móti asymptotiska virðinum $V_4(\infty) = V_0$ við tíðarkonstantinum $\tau = RC$. Vit kunnu tí skriva

$$(9.25) \quad V_4 = V_0 + (E_0 - 2V_0)e^{-\frac{t-t_2}{\tau}} \quad \text{fyri} \quad t_2 < t < t_3$$

Henda gongdin endurtekur seg nú periodiskt. Periodutíðin T er summin av $t_2 - t_1$ og $t_3 - t_2$. Fyrra intervallið verður funnið við at innseta $V_4 = E_0$ og $t = t_2$ í formúl (9.24)

$$(9.26) \quad t_2 - t_1 = \tau \cdot \ln \frac{E_0 + V_0}{E_0}$$

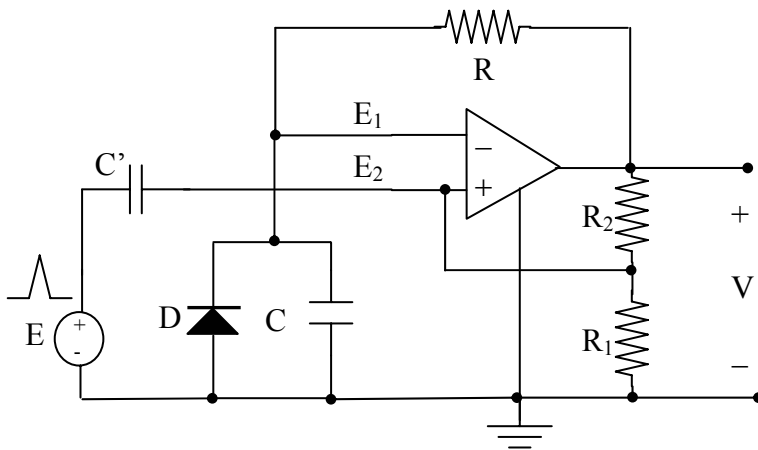
Seinna intervallið verður funnið við at innseta $V_4 = E_0$ og $t = t_3$ í formúl (9.25)

$$(9.27) \quad t_3 - t_2 = \tau \cdot \ln \frac{2V_0 - E_0}{V_0 - E_0}$$

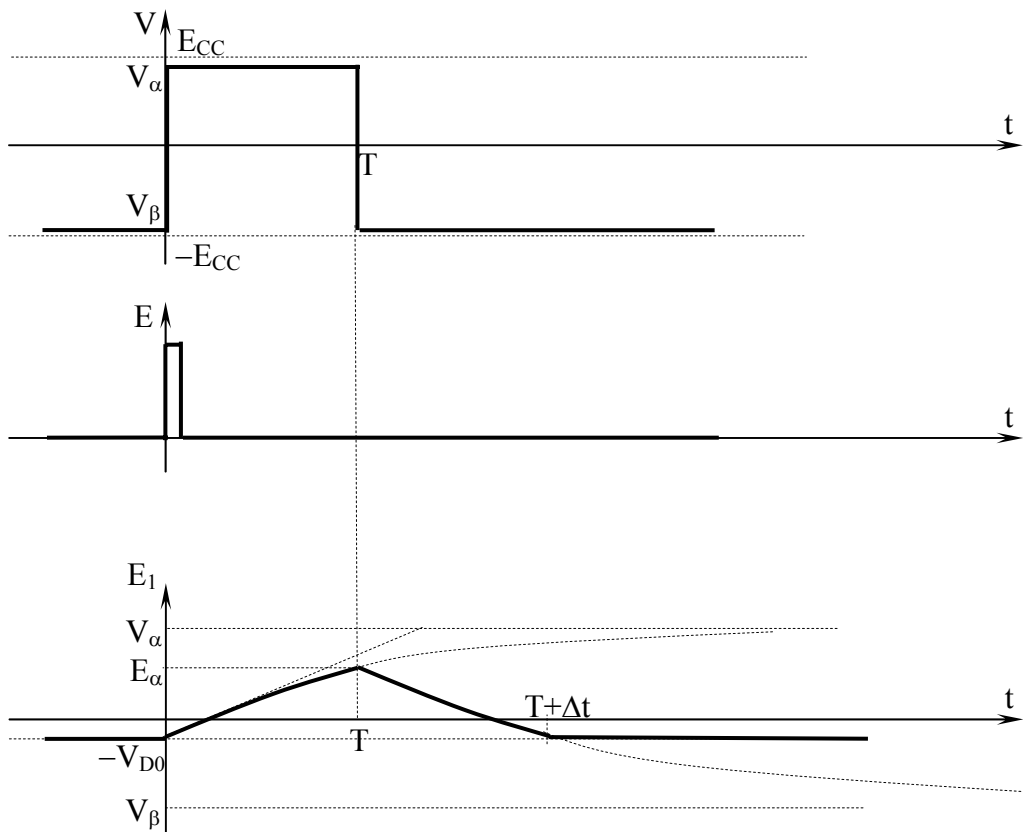
Samanlagt gevur hetta periodutíðina

$$(9.28) \quad T = (t_2 - t_1) + (t_3 - t_2) = \tau \cdot \ln \frac{E_0 + V_0}{E_0} + \tau \cdot \ln \frac{2V_0 - E_0}{V_0 - E_0} = \tau \cdot \ln \frac{(E_0 + V_0) \cdot (2V_0 - E_0)}{E_0 \cdot (V_0 - E_0)}$$

9.12 Monostabilur multivibrator



Mynd 9.19 Monostabilur multivibrator uppbyggdur av Schmitt triggara við operatiónsstyrkjara.



Mynd 9.20 Spenningsvirði í monostabilum multivibrator gjörður av operatiónsstyrkjara. Útgangsspenninir V , triggara pulsspenningur E og kondensatorspenningurin E_1 eru myndaðir sum funkióin av tíðini t .

Monostabilur multivibrator er streymrásuppseting, ið gevur bert ein einstakan væl defineraðan signalpuls, ið er fýrkantaður, frá sær við givnari stødd og tíðarbreidd. Pulsurin verður útsendur, tá eitt inngangssignal verður givið til inngangin. Hetta inngangssignalið er spenningspulsur, ið skal vera stuttur og áseta byrjannartíðina fyri útgangspulsin nágreiniliga.

Dæmi um monostabilan multivibrator er vístur í mynd 9.19, har byggt er víðari uppá astabila multivibratorin í mynd 9.15. Munurin á hesum báðum er, at ein dioda D er lögð parallelt við kondensatorin C og læsur tí kondensatorspenningin til ikki at fara undir $V_{D0} = -0,6$ V. Hervið er í útgangsstøðuni útgangsspenningurin V læstur fastur til at vera stöðugur við stödd V_β , $E_1 = 0,6$ V og $E_2 = E_\beta$ og harvið $E_1 - E_2 < 0$.

Frá einum spenningsgerða E fáa vit nú gjøgnum kondensatorin C' ein spenningspuls við sera stuttari tíðarlongd, sum gevur spenninginum E_2 á operatiónsstyrkjaranum ein spenningsvøkstur soleiðis, at $E_2 - E_1 > 0$. Hervið vil styrkjaraútgangurin broyta spenning frá at vera $V = V_\beta$ til at vera $V = V_\alpha$. Nú byrjar umløðing av kondensatorinum C, hvørs spenningur verður positivur og forspennir dioduna D í sperrurætning (avbrýtur dioduna). Gongdin sæst í mynd 9.20. Viðmerkjast skal, at kondensatorin C' skal vera sera lítil so, at tíðarkonstanturin svarandi til hann ger, at spenningsbroytingin á +innganginum á operatiónsstyrkjaranum orsakað av E bert varar sera stutta tíð, t.e. bert gevur E_2 ein stuttan hvøkk.

Kondensatorspenningurin E_1 veksur móti asymptotiska virðinum V_α við tíðarkonstantinum $\tau = RC$. Byrjannarvirðið er $-V_{D0}$. Tæssvegna verður

$$(9.29) \quad E_1 = V_\alpha + (-V_{D0} - V_\alpha)e^{-\frac{t}{\tau}}$$

V heldur virðið V_α inntil kondensatorspenningurin verður

$$(9.30) \quad E_1 = E_\alpha = V_\alpha \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Innseta vit tí $E_1 = E_\alpha$ og $t = T$ í (9.29) og loysa líkningina, finst pulslongdin T á útgangspulsinum V at vera

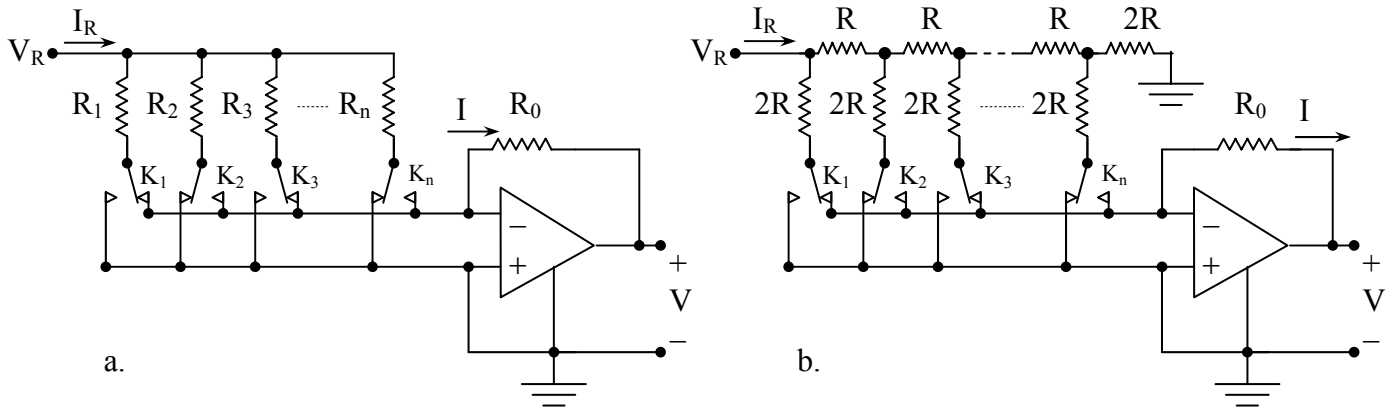
$$(9.31) \quad T = \tau \cdot \ln \frac{V_\alpha + V_{D0}}{V_\alpha - E_\alpha}$$

Tilsvarandi kunnu vit útrokna tíðarintervallið Δt til E_1 hevur fingið sama virði $-V_{D0}$ aftur

$$(9.32) \quad \Delta t = \tau \cdot \ln \frac{E_\alpha - V_\beta}{-V_{D0} - V_\beta} = \tau \cdot \ln \frac{V_\beta - E_\alpha}{V_\beta + V_{D0}}$$

Eftir hetta er $E_1 = -V_{D0}$ konstant. Δt verður nevnd "deyðtíðin" av tí, at henda tíðin má ganga, áðrenn monostabili multivibratorin er klárur til at endurtaka gongdina at útsenda ein nýggjan puls.

9.13 Digital – analog (D/A) umsetarar



Mynd 9.21 Digital – analog umsetarar (D/A) við
 a. binert vektadum mótstöðum í summationsrás
 b. ketuleiðara

Í tí fysisku verðini, vit liva í, eru flestu stöddir kontinuert skiftandi við tíðini, so sum hitastig, luftrýst, elektriskir spenningar og streymar, stað, ferð og dik (acceleración). Tí verða tær mátistöddir, sum skulu umboða hesar fysisku stöddirnar eisini aloftast kontinuertir spenningar ella streymar. Oftast brúka vit í hesum týðningi orðið analogt fyri kontinuert og tosa um analog signal, streymar og spenningar.

Tey telduriknu amboð, ið vit í nútímans samfelagnum hava fingið til taks til at viðgera mátiúrslit av øllum slagi, taka hinvegin stöði í eini kvantiseraðari og diskontinuertari verð við tað, at stöddirnar verða umboðaðar av tølum við endaligum uppløysingi, t.e. talstöddum við endaligum tali av desimalum ella bittum. Umframt umboða mátistöddirnar bert tær fysisku stöddirnar til ávísar tíðir vanligu við jøvnum tíðarmillumbilum. Sagt verður at analoga signalið er ”samplað”.

Ein mátistödd, sum á henda hátt er umboðað av eini røð av kvantiseraðum stöddum ella talvirðum heft at ávísam tíðum nevna vit eitt digitalt signal. Fyri at umgera eitt analogt signal, lat okkum siga ein spenning, til digitalt signal krevst ein analog – digital umsetari (A/D umsetari).

Umvent er, um vit hava eitt digitalt signal, t.e. eina talumboðan av einum signali, og vilja hava tað at verða ein spenning, ið er proportionalur við stöddina á digitala signalinum. Tá krevst ein digital – analog umsetari (D/A umsetari). Vit vilja í hesum partinum viðgera digital – analog umsetara og í parti 9.14 taka analog – digital umsetaran upp.

Í mynd 9.21 eru tveir digital – analog umsetarar (D/A) myndaðir, báðir bygdir upp við operatións-styrkjara. Lat okkum greina 9.21a fyrst. Vit síggja, at uppsetingin virkar sum ein summationsstyrkjari. Ein spenningur, referensuspenninur V_R , letur streym gjøgnum eina røð av mótstöðum R_1, R_2, \dots, R_n inn í inngangin á styrkjaranum, men tó so, at streymurin gjøgnum nakrar av teimum verður leiddur til jørð, meðan streymurin gjøgnum aðrar verður leiddur til –styrkjarainngangin. Stýringin av, hvørjar streymar styrkjarin fær inn, fer fram við elektroniskt stýrdum umskiftarum K_1, K_2, \dots, K_n , t.d. uppbygður av MOS-FET ella bipolerum transistorum.

Lata vit tann i’ta umskiftaran umboða eitt bit K_i soleiðis, at $K_i = 0$, tá umskiftarin bindur tilsvarandi mótstöðu R_i til jørð, og $K_i = 1$, tá umskiftarin bindur R_i til inngangin á operatiónsstyrkjaranum, síggja vit, at útgangsspenningurin kann verða skrivaður sum fyrri partur av formli (9.33):

(9.33) Útgangsspenningur:

$$V = -R_0 I = -R_0 \left(K_1 \frac{V_R}{R_1} + K_2 \frac{V_R}{R_2} + K_3 \frac{V_R}{R_3} + \dots + K_n \frac{V_R}{R_n} \right)$$

$$= -\frac{2R_0 \cdot V_R}{R} \left(K_1 \frac{1}{2^1} + K_2 \frac{1}{2^2} + K_3 \frac{1}{2^3} + \dots + K_n \frac{1}{2^n} \right)$$

Lata vit mótstöðurnar verða ymiskar og vektaðar sum eitt binert tal

$$(9.34) \quad R_i = R \cdot 2^i$$

fáa vit seinna partin av formlu (9.33) sum úrslit. Av hesum síggja vit eisini, at spenningurin V verður proportionalur við binera talið

$$(9.35) \quad K = 0.K_1 K_2 K_3 \dots K_n$$

og hervið umboðar analoga signalið (spenningurin) V tað binera talið ella digitala signalið K .

Ein trupulleiki er kortini við at gera D/A umsetarar á henda hátt. Vit síggja, at lutfallið millum fyrstu og seinastu mótstöðuna hevur støddina $R_n/R_1 = 2^{n-1}$, ið er ein stór stødd, um bittini (n) eru mong. Hetta ger, at, um R_1 hevur lítlan prosentiskan feil $x\%$ vil streymurin í R_1 hava feilin $\Delta I_1 = (V_R/R_1)(x/100)$.

Hinvegin hevur streymurin í R_n støddina $I_n = V_R/R_n = (V_R/R_1)(1/2^{n-1})$. Vit síggja, at, um feilurin ΔI_1 skal vera væl minni enn I_n , má $x \ll 100/2^{n-1} \%$. Er n stórt tal, t.d. 16 bit, ið ikki er óvanligt, skal mótstöðan R_1 tí hava sera neyvt virði. Hetta er torført at gera, tá tað snýr seg um integreraðar rásir (IC).

Til tess at gera D/A umsetaran við IC rásur við størri neyvleika, verður ein onnur streymrás í mynd 9.21b nýtt. Her letur referensuspennningurin V_R streym I_R inn í ein sokallaðan ketuleiðara, ið er mótstöðunetverk, ið er uppbyggt av "parallellmótstöðum" $2R$ og "seriumótstöðum" R sum víst í myndini. Vísast kann, at í hvørjum knútapunkti verður streymurin býttur í tveir eins stórar streymar, t.e. støddin av streyminum í i 'tu mótstöðugrein hevur virði

$$(9.36) \quad I_i = \frac{I_R}{2^n} = \frac{V_R}{R} \frac{1}{2^n}$$

Hetta úrslit verður útroknað við at brúka streymbýtaralógina fyri sundurbýting í hvørjum knútapunkti sær. Úrslitið av streyminum I í R_0 og útgangsspenninginum V er tí

$$(9.37) \quad I = \sum_i K_i I_i$$

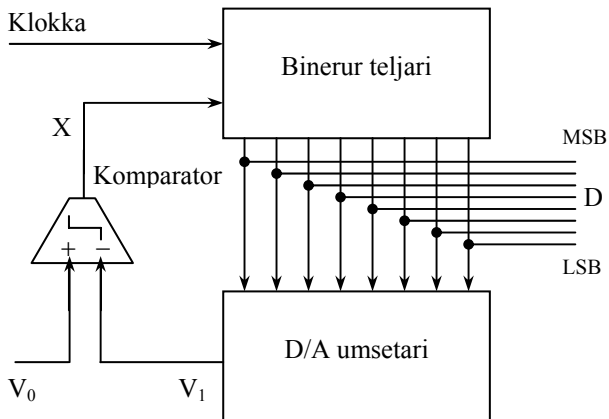
(9.38) Útgangsspenningurin:

$$V = -R_0 I = -R_0 \left(K_1 \frac{V_R}{2^1 R} + K_2 \frac{V_R}{2^2 R} + K_3 \frac{V_R}{2^3 R} + \dots + K_n \frac{V_R}{2^n R} \right)$$

$$= -\frac{R_0 \cdot V_R}{R} \left(K_1 \frac{1}{2^1} + K_2 \frac{1}{2^2} + K_3 \frac{1}{2^3} + \dots + K_n \frac{1}{2^n} \right)$$

Hetta gevur ein nógv minni mun á ymisku inngangandi mótstöðunum, og tí er móguleiki fyri nógv størri neyvleika í digital – analog umsetingini.

9.14 Analog – digital (A/D) umsettarar



Mynd 9.22 Analog-digital (A/D) umsetari (8 bit) uppbygður av D/A umsetara, binerum teljara og einum komparatori.

Ein analog – digital umsetari (A/D) umsetur eitt spenningsvirði V_0 til eitt vanligt binert tal D , ið er proportionalt við V_0 , undantikið ein av-rundingsfeil, sum ikki slepst undan. Til eru nógv sløg av A/D umsetarum. Her verða tvey sløg, avmyndað í mynd 9.22 og 9.23, viðgjörd.

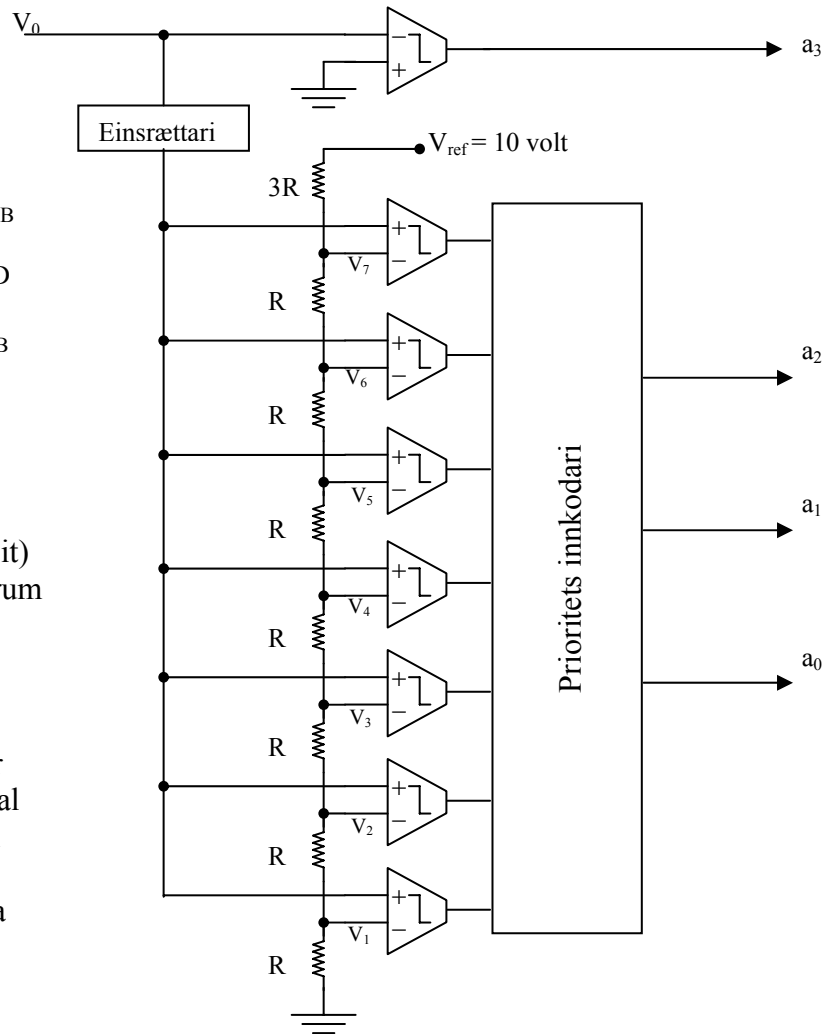
A/D umsetarin í mynd 9.22 umsetur ein positivan spenning V_0 til binert tal, meðan A/D umsetarin í mynd 9.23 er útbygður til at taka fortetnið av V_0 við.

A/D umsetari við støði í teljararás víst í mynd 9.22 er samansettur av einum D/A umsetara, einum binerum teljara og einum komparatori. Inngangssignalið er spenningurin V_0 , ið ynskt umsett til eitt binert tal. Hetta verður gjørt við at lata tann binera teljara telja pulsar frá einum klökkusignalgerða upp til virðið D . Teljarin verður steðgaður av at senda eitt logiskt stýrisignal X inn í ein sokallaðan ”enable” inngang í teljaranum, tá virðið av D kemur upp á spenningsvirðið V .

X umboðar spenningin á útganginum á komparatorinum. Lágur spenningur svarandi til $X = 0$ ger, at teljarin telur upp, og høgur spenningur svarandi til $X = 1$ ger, at hann heldur uppat við at telja upp. Virðið av stýrisignalinum frá komparatorinum verður avgjørt av inngangssignalunum V_0 og V_1 til komparatorin. V_0 er spenningurin, sum skal umgerast til binert tal. V_1 er ein spenningur, sum er gjördur av A/D umsetaranum og er proportionalur við tað aktuella binera talið D , ið teljarin vísir. V_1 veksur sostatt so leingi, teljarin telur upp, t.e. tá $X = 0$.

Sostatt vil $V_1 < V_0$ geva $X = 0$, ið fær teljara at telja upp. Tilsvarandi vil $V_1 > V_0$ geva $X = 1$, ið fær teljara at steðga at telja upp.

”Enable” inngangurin í teljaranum kann antin vera innbygður í teljara IC-rásina, ella má uppbyggjast við eyka rás (ofta bert ein eyka AND gate), men er ikki víst her. Hesin hátturin at lata



Mynd 9.23 Analog-digital (A/D) umsetari (4 bit íroknað fortetnið) uppbygður av einsrættara, fleiri komparatorum og ”prioritets innkodara”.

X steðga teljingini, tá V_1 fer upp um V_0 , hefur tann vansa, at hvørja ferð V_0 minkar, má teljingin byrja av nýggjum. Hetta ger eina stóra tíðarseinking í A/D umsetingini.

Hetta slepst undan við at lata teljaran telja upp, tá $V_1 < V_0$ og telja niður, tá $V_1 > V_0$. Tað er gjørligt við summum teljarum, sum hava ein stýriinngang, sum X kann stýra til uppteljing ella niðurteljing. Hetta hefur til fylgju, at D javnt fylgir V_0 við stuttari tíðarseinking.

A/D umsetari við støði í komparatorrás er víst í mynd 9.23, her við 4 bittum sum dømi. Hann er nógv skjótari enn omanfyri viðgjørði umsetarin við tað, at eingin teljari er í rásini, og tí eingin bíðing eftir teljara-funktiónum soleiðis, at digitala útgangssignalið $D = a_3 a_2 a_1 a_0$, har $a_3 a_2 a_1$ og a_0 eru bittini (sifrini), ið mynda talið D, verður gjørt nærum í somu løtu inngangsspenningurin V_0 er til staðar á innganginum. D vil tí skjótt og javnt fylgja V_0 . Fyri n-bit rás er uppbyggingin av rásini gjørd av 2^{n-1} komparatorum, um ynskt er at fáa n bit á útgangin íroknað forteknsbit. Hetta ger sjálvsagt tað, at tað verður tørvur á eini sera stórum tali av elektriskum lutum – transistorum, mótstøðum o.ø. – í uppsetingini, men í IC rásur er hetta eingin trupulleiki við tað, at nógvar milliónir lutir kunnu integrerast niður á lítla flís av silisium.

Í døminum við 4-bit A/D umsetaranum í mynd 9.23 er víst, at inngangsspenningurin V_0 fyrst verður samanborin við spenningin 0 við fyrsta komparatorinum, ið gevur okkum forteknsbittið a_3 . Síðan verður V_0 einsrættaður soleiðis, at tað verður møguligt at avgera numeriska virðið $|V_0|$ av honum. $|V_0|$ verður samanborin við eina røð av spenningsvirðum, ið mynda tær kvantiseraðu spenningsstøddirnar $V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6$ og V_7 , gjørdur av referensuspenningsi V_R og spenningsbýtara við eins nógvum úttøkum sum talið av kvantiseringstigum, sum vit ynskja. Sum dømi eru vald 7 stig og nul, ið svarar til 3 bit í endaliga úrslitinum av $|V_0|$. V_R og tann ovasta mótstøðan $3R$ eru tillagað í døminum soleiðis, at tey einstøku spenningsstigini V_i fáa ynsktu virðini (her er $V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6, V_7 = 1,2,3,4,5,6,7$ volt).

Samanberingin av $|V_0|$ við spenningsstigini V_i í spenningsbýtaranum fer fram við at brúka 7 komparatorar. Útgangirnir á komparatorunum hava logiska virði 1, um $|V_0| > V_i$, og 0, um $|V_0| < V_i$, t.e. komparatorarnir í myndini hava allir virði 1 á útganginum upp til ávíst stig, avgjørt av, at $|V_0| > V_i$, og allir útgangirnir eru 0 omanfyri hetta stig, t.e. tá $|V_0| < V_i$.

Henda máting av spenningsstiginum verður tulkað av prioritetskodara, og er binera talið $a_2 a_1 a_0$ mótstøðan 3R er tillagað í døminum soleiðis, at tey einstøku spenningsstigini V_i fáa ynsktu virðini (her er $V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6, V_7 = 1,2,3,4,5,6,7$ volt).

Tískil er $D = a_3 a_2 a_1 a_0$ digitala mátið fyri analoga spenninginum V_0 , har a_3 er forteknsbit í "sign magnitude forteknsrokningini" fyri biner tøl. Tilsvarandi A/D umsetari kann sjálvsagt eisini verða settur upp fyri tveykompement forteknsrokning o.ø.

Skoytast skal uppí, at tað er sjáldan, at bert 4 bit verða brúkt. Í telefonskipanini verða oftast brúkt 8 bit, og í hágóðsku tónleikaútgerð verða ofta 14 – 16 bit brúkt.

10 PSpice simuleringsforrit, stutt leiðbeining

10.1 Inngangur

PSpice er eitt teldusimuleringsforrit til simulering av bæði analogum og digitalum streymrásum. Hevur tú eitt hugskot til at byggja eina elektroniska skipan til eitthvørt endamál, tað kann vera innan musikkstyrkjarar, sjónvarps- og útvarpstól, telefon og fjarskiftisútgerð annars, máttitól og instrumentering, medisinska elektroniska útgerð og so framvegis, er tað hent at brúka eina teldusimuleringsskipan at royna, um hugskotið kann føra til eina skipan, sum virkar, áðrenn elektronisku lutirnir verða tiknir fram ella keyptir, og áðrenn tú brúkar alt ov langa tíð og ov nógvan pening til at seta lutirnar saman.

PSpice er ein slík simuleringsskipan. Hon er í fullari útbygging ein sera fleksibul skipan, ið ger tað møguligt at uppbyggja eina elektroniska streymrás til at røkka tínnum endamáli. Henda fulla útbyggingin er eitt telduforrit, sum kostar meira enn studentar vanliga vilja brúka til slíkt. Men tað finst ein studentaversión av PSpice, sum er ókeypis og kann takast heim av internetinum m.a. frá adressuni

<http://www.electronics-lab.com/downloads/schematic/013/>

Studentaversiónin hevur allar funktiónirnar, sum fult útbygda versiónin eisini hevur, men er avmarkað av, hvussu nógv elektroniskar lutir, tú hevur loyvi til at brúka í somu rás, og hvussu nógv útrokningsstig, tú hevur loyvi at gera í eini simulering. Henda avmarking er kortini so víð, at tað er møguligt at konstruera nærum allar smærri streymrásir, sum fyrikoma í innleiðandi elektronikkskeiðum, og verður eisini brúkt av verkfrøðingum til rásir at royna partar av eini størri elektroniskari skipan.

Einfalt kann PSpice skipanin sigast at innihalda hesar partar av týðningi í samband við einfaldar simuleringsuppgávur:

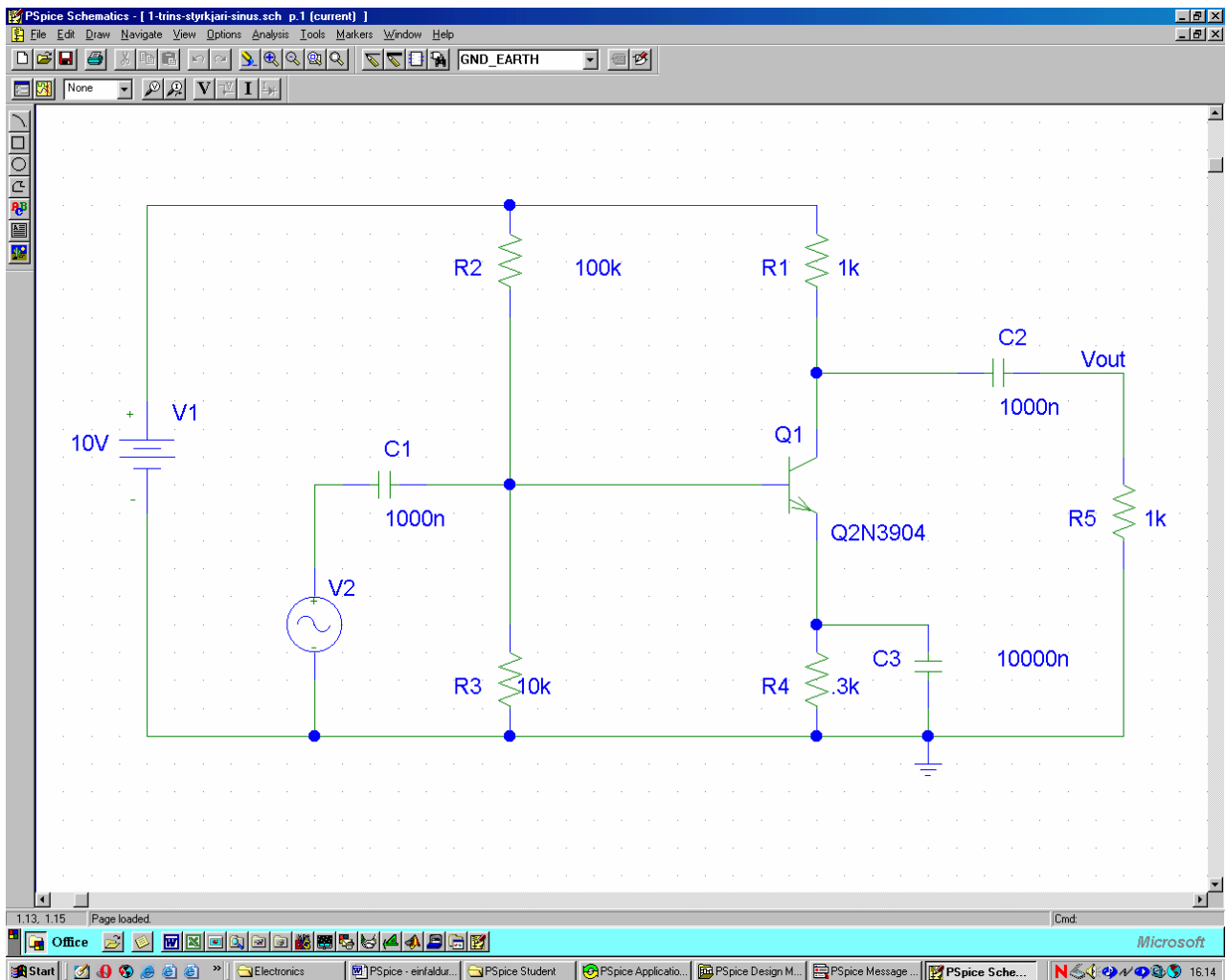
- | | |
|-----------------------|---|
| 1. Schematics: | til uppseting av streymrás |
| 2. PSpice ella Probe: | til simulering av streymrás |
| 3. Optimize: | til optimering av streymrás |
| 4. Model editor: | til modeluppbygging |
| 5. Stimulus editor: | til at uppseta signalgerða við ynsktum útgangssignali |
| 6. Text editor | til at skriva forrit til eina streymrás |

Í hesum stutta inngangi til PSpice verða bert tey bæði fyrstu punktini 1. og 2. viðgjørd við tað at pkt.3. - 6. eru til meira framkomin arbeiði.

10.2 Uppseting av elektroniskari streymrás við “Schematics”.

Schematics er eitt forrit, sum ger tað møguligt á telduskerminum at seta streymrásina saman uttan at fara í smálutir við at skriva forrit. Fyri at vísa í stuttum, hvussu PSpice við Schematics kann verða brúkt, er ein einfaldur styrkjari, uppbygður í mynd 10.1, tikin sum dømi. Hann inniheldur ein transistor, 5 mótstøður, 3 kondensatorar, ein forsýningsspenningsgerða og ein signalspenningsgerða, ið hevur sinusformaðan spenning.

Schematics er eitt forrit, sum ger tað møguligt á telduskerminum at seta streymrásina saman. Mynd 10.1 vísir hvussu Schematics sær út. Við hesum forritinum ber til beinleiðis at fara inn í ein grunn



Mynd 10.1

merktur við “get new parts” undir t.d. “draw” í atferðarskránni (“menu”) ella við ikoninum við kykaramynd, eftir teimum elektronisku lutunum, t.d. mótstöðum, kondensatorum, sjálvinduktíónum, transistorum, diodum, operatíónsstyrkjjarum, digitalum “AND-, OR- og, NOT-gatum” umframt øðrum digitalum lutum, so sum flip-floppum, teljarum, multipleksarum o.t. Eisini spenningsgerðar, streymgerðar umframt digitalir signalgerðar eru í hesum grunninum. Tú tekur tá hvønn lutin sær og dregur hann á telduskerminum til tað stað, har tú vilt, at hann skal verða í streymrásini. Fært tú ikki sett hann rætt í fyrstu syftu, kanst tú seinni taka í hann við “músini” og toga hann til eitt annað stað á skerminum. Tú kanst sjálvsagt eisini taka fleiri lutir fram seinni, um tú uppdagar, at tær manglar onkran fyri at fáa streymrásina at virka eftir vilja tínum.

Í streymrásum, har analogar stöddir streymar og spenningar eru, er tað týðningarmikið fyri at fáa telduforritið at virka, at eitt punkt í rásini verður definerað sum jørðpunkt við potentialinum null. Hetta gerst einfalt við at finna teknið fyri jørðsambandið sum ein lut í grunninum við elektroniskan lutum og draga tað inn á telduskermin. Í reint digitalum rásum er ikki neyðugt at definera eitt jørðpunkt.

Tá tú hevur tikið allar lutirnar, sum tú hevur brúk fyri, ert tú klárur at binda teir saman. Til hetta endamál fert tú eftir leiðararáðnum (íkonur við blýantsmynd við klænari striku) og bindir lutirnar saman á skerminum við at peika við “músini” og tekna tráðin upp. Tá tú nú hevur fingið teknað streymrásina upp, skal hon verða goymd í einum grunni undir einum navni, sum tú sjálvur velur.

Nú er eftir at áseta virðini á elektronisku lutunum, t.d. mótstöðuvirði fyrir mótstöður, kapasitetsvirði og byrjannarspenning fyrir kondensatorar (er settur til null um einki verður skrivað) o.s.v. Eisini skulu virðini á spenningsgerðum og streymgerðum og øðrum signalgerðum ásetast. Hetta verður gjørt við at “dupult-klikkja” á lutin, og síðan skriva virðini inn í tann rútin, sum tá kemur upp.

Áðrenn farið verður víðari, vil tað vera rætt at greina út, um rásin er rætt uppsett. Til hetta endamálið kann farast inn í atferðarskránna “analysis” og trýsta á fyrst “electrical rule check” fyrir at royna um samansetingarnar, ið gjørdar eru, eru elektriskt í lagi, og síðan trýsta á “create netlist” fyrir at teldan automatiskt skal gera tað ynska forritið svarandi til streymrásina, sum er sett upp.

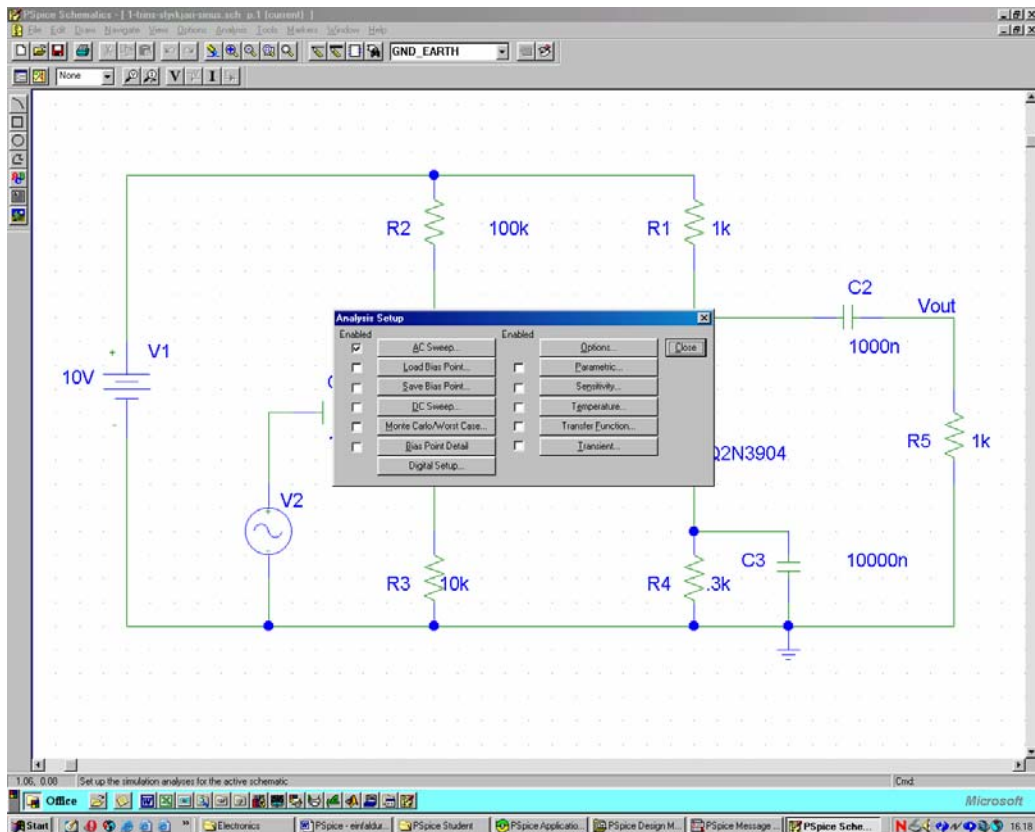
Fyri at fáa simuleringina at virka skal uppsetingin verða goymd undir frítt valdum filanavnið.

10.3 Simuleringsuppseting við “Probe”

Nú er klárt til at seta upp til at simulera, t.e. at fáa eitt útsignal á einum ynsktum stað í streymrásini, t.d. ein spenning ella streym. Ymsir mátar eru at simulera uppá, og skulu teir stillast við at fara inn á atferðarskránna “analysis,setup”, har hesir móguleikar eru at finna, sum víst í mynd 10.2. Teir við **feitum stavum** skrivaðu móguleikarnir eru teir týðningarmestu fyri ein, ið byrjar:

1. **AC Sweep:** Avmyndar signal sum funktiún av frekvensi. Set her byrjannar og endafrekvens umframt, hvussu tætt útrokningarnar skulu gerast.
2. Load Bias Point:
3. Save Bias Point:
4. **DC Sweep:** Avmyndar signal (t.d. spenning ella streym) sum funktiún av einum øðrum signali(t.d.spenningi). Set her byrjannar og endavirðini av óhefta signalinum umframt, hvussu tætt útrokningarnar skulu gerast.
5. Monte Carlo/Worst Case: Variatiónsútrokningar við Monte Carlo roknihátti kunnu gerast
6. **Bias Point Detail:** Forspenningar og –streymar verða sýnd.
7. **Digital Setup:** Her ber til at seta eginleikarnar hjá teimum digitalu elektronisku lutunum.
8. Options:
9. **Parametric:** Avmyndar fleiri farmyndir av einum signali sum funktiún av øðrum signali, hvar eitt triðja signal kann broytast í stigum. Er t.d. hóskandi til avmynding av transistorkaraktistikkum.
10. Sensitivity : Her ber til at fáa telduforritið at rokna følsesemi av einum spennungi, tá onkur parameter broytist.
11. Temperature: Vanliga verður hitastigið á elektronisku lutunum sett til 27°C, men her ber til at broyta tað.
12. **Transfer Function:** Avmyndar lutfallið millum eitt útgangssignal og eitt inngangssignal sum funktiún av frekvensinum
13. **Transient:** Avmyndar eitt signal sum funktiún av tíðini

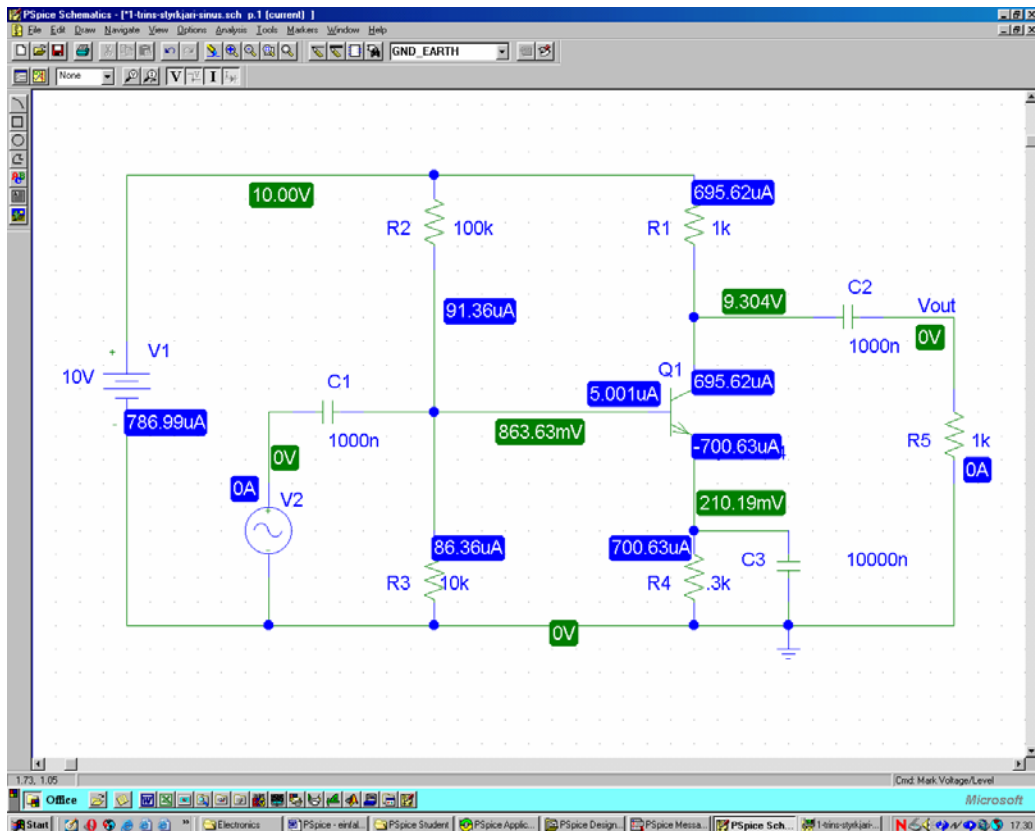
Sjálvt simuleringforritið “Probe” skal eisini stillast við at fara inn á atferðarskránna “analysis,probe-setup options”. Her kann vera hent at velja “Automatically run Probe after simulation” og “Restore last Probe session”. Hetta viðførir, at úrlitið kemur beinanvegin á skermin aftaná eina simulering, og at uppsetingin, t.e. val av signali, ið avmyndað verður, er tað sama sum í síðstu simulering.



Mynd 10.2

“Bias Point”

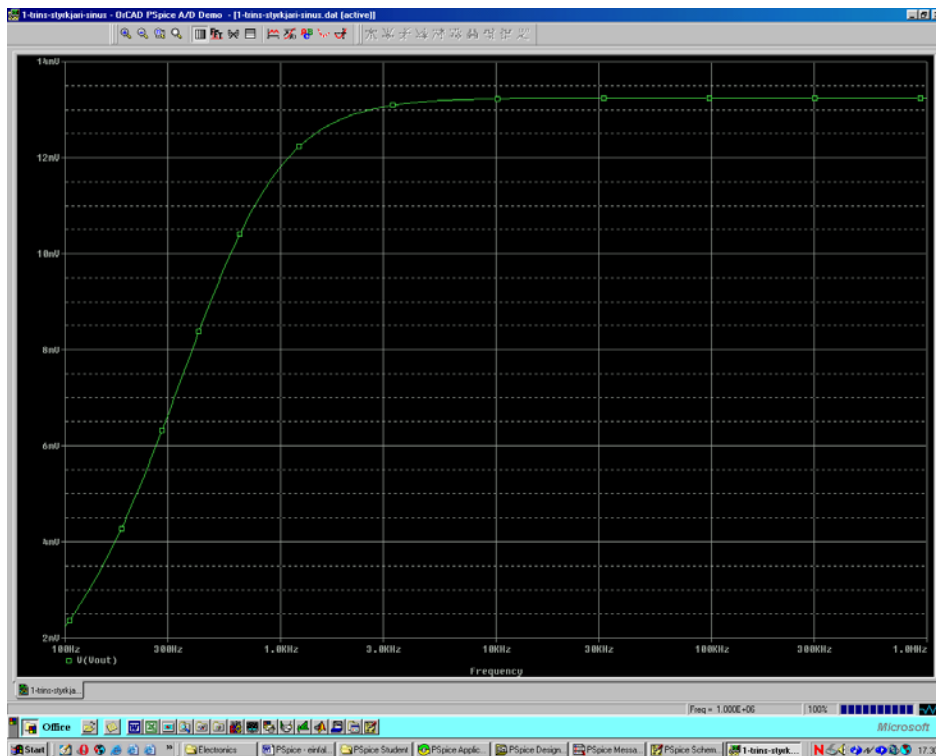
Vit kunnu byrja við bert at útrokna javnspenningar og streymar í rásini. Tá skulu vit aftan á at hava simulerað hyggja at streymrásini í schematics. Trýst á knöttarnar V og I, sum víst í mynd 10.3, og tú færst tá allar streymar og spenningar skrivaðar inn í streymrásina.



Mynd 10.3

“AC-sweep”

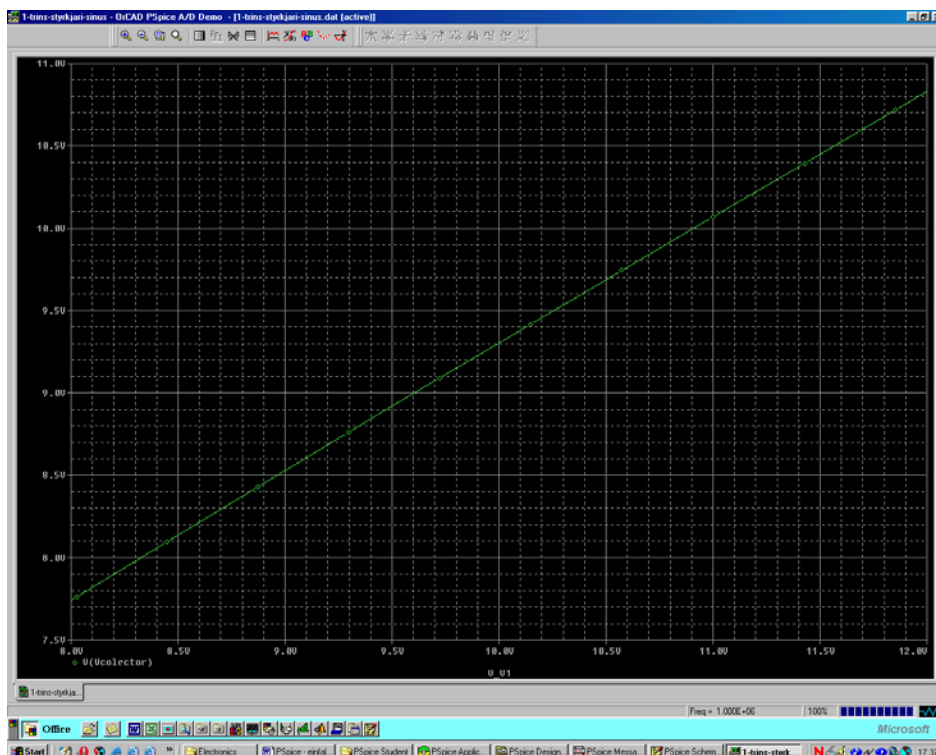
Um tú velur “AC-sweep” uppseting í “analysis setup”, setur byrjannar- og endafrekvens og simulerar, færst tú mynd 10.4 av amplituduni av útgangsspenninginum V_{out} sum funktión av frekvensinum av inngangsspenninginum V_2 . Til ber at stilla frekvensásin at vera linjurættan ella logaritmiskan eftir ynski. Til ber eisini at brúka logaritmiskan ás fyri útgangsspenningin.



Mynd 10.4

“DC – sweep”

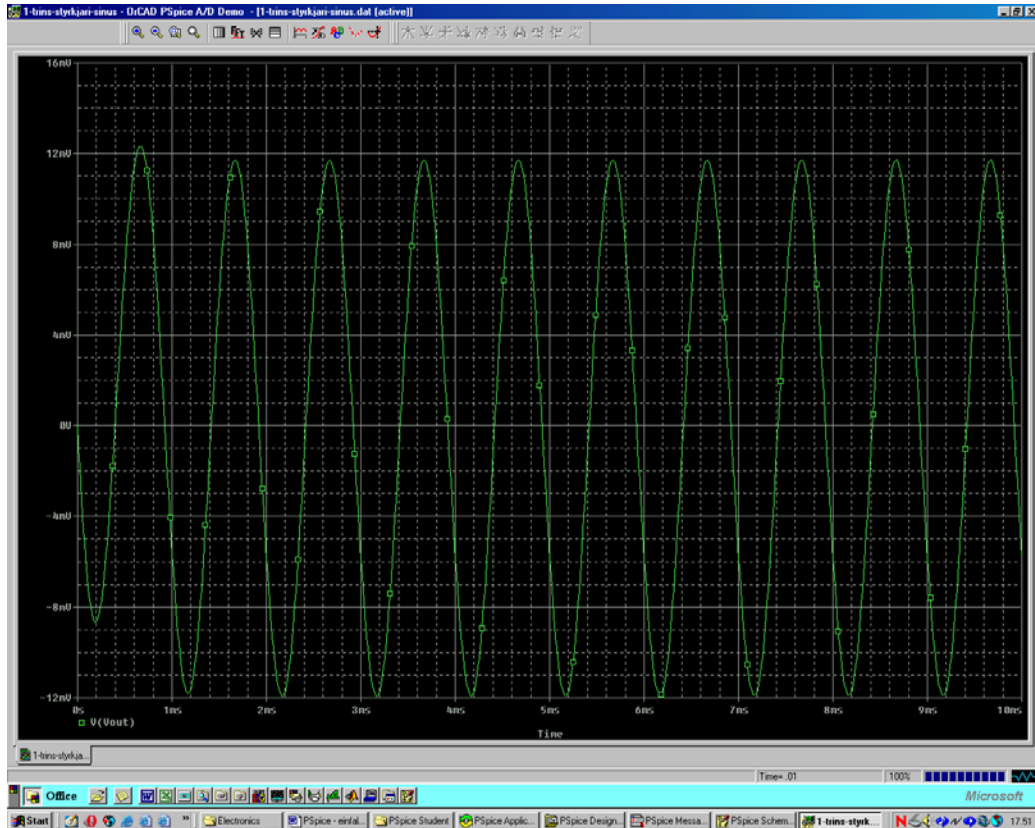
Í hesum døminum velja vit “DC – sweep” uppseting í “analysis setup”, lata forsyningsspenningin broytast í økinum $8 \text{ volt} < V_1 < 12 \text{ volt}$ og síðani hyggja at, hvussu kollektorspenningin $V_{collector}$ á transistorinum broytist. Á mynd 10.5 síggja vit, at broytingin er millum 7,75 volt og 10,83 volt.



Mynd 10.5

“Transient”

Um tú velur uppsetingina “Transient” í “analysis setup”, og simulerar, fært tú sum víst í mynd 10.6 útgangsspenningin V_{out} sum funktión av tíðini. Av tí at inngangsspennin V_2 er ein sinusspenningur verður útgangsspennin tað eisini. Tó er tann munur, at V_{out} í byrjannini víkir nakað frá reinum sinusformi. Hetta kemst av tí, at, tá simuleringin byrjar, verður “tendrað” fyri bæði forsynings-spenninginum V_1 og sinusspenninginum V_2 soleiðis, at streymrásin má brúka eitt sindur av tíð til at stilla seg til eina javna gongd. Hetta er simuleringsskipanin tað eisini ført fyri at rokna út, sum tað sæst.



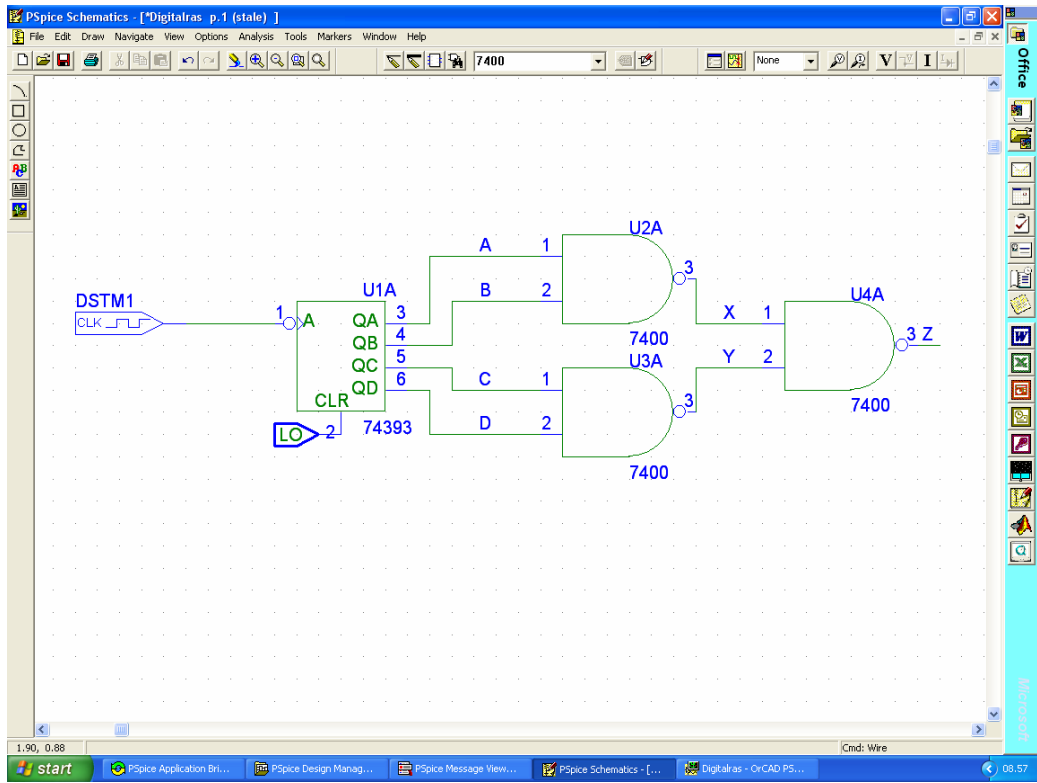
Mynd 10.6

Digital rás

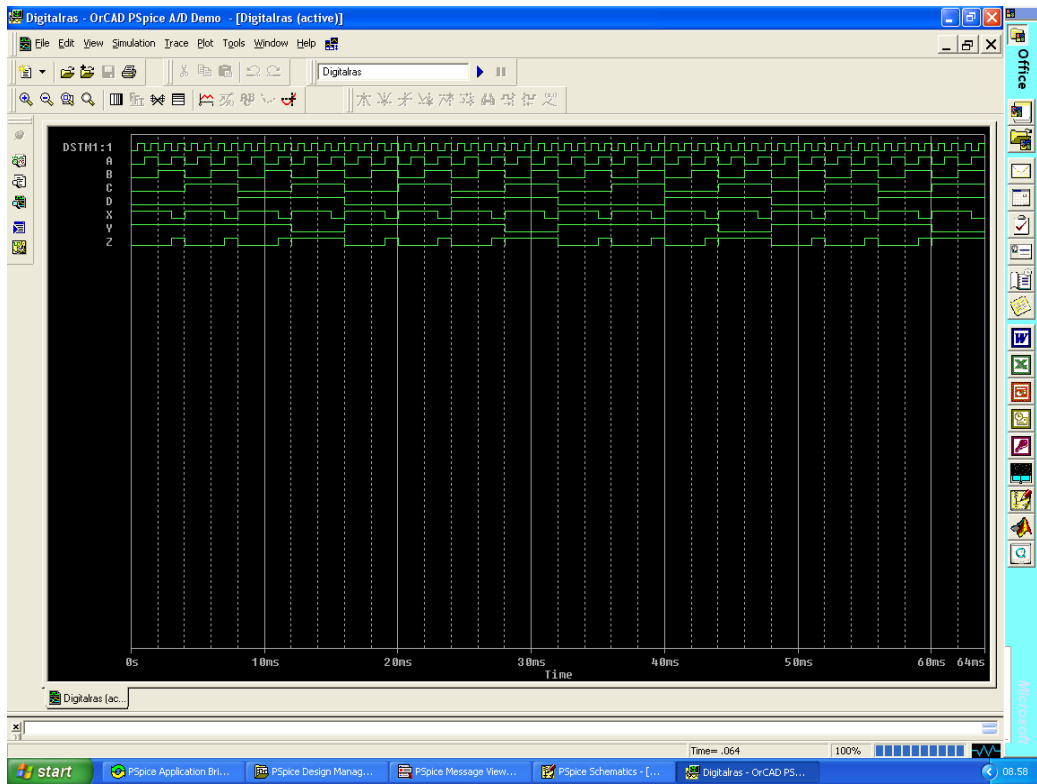
Vit seta einfalda digitala rás upp við ”schematics”. Sum víst í døminum í mynd 10.7. Vit lata her ein klokkupulsgera DGSTM1 senda pulsar inn í bineran teljara. Útgangssignalini á honum DCBA mynda eitt binert tal, ið telur frá 0 til 15, t.e. DCBA útgangirnir átaka allar samansettingar periodiskt við tíðini. Vit lata so DCBA vera inngang í kombinatoriska rás. Á útganginum Y fáa vit so eitt funktiónsúrslit.

Tað er sermerkt við reit digitalari rásuppseting, at ongir spenningsforsýningar og einki jørðpunkt verða brúkt í PSpice, hóast í veruligu fysisku rásini er neyðugt við hesum.

Velja vit at hyggja at tíðargongdini, avmyndað í mynd 10.8, av Z, kunnu vit nú avlesa alla sannleikatalvuna svarandi til ymisku virðini av DCBA. Hetta verður gjørt eins og omanfyri við at velja “transient” í “analysis setup”, og velja variablarnar DCBA og Z. Umframt velja vit eisini at avmynda útgangsvirði frá klokkusignalgerðanum DSTM1 og millumsignalunum X og Y.



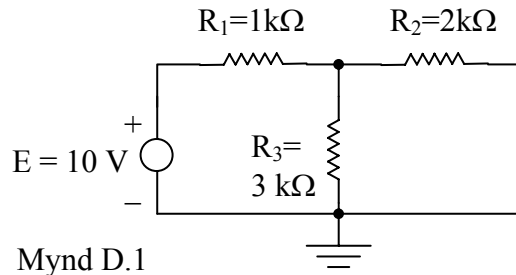
Mynd 10.7



Mynd 10.8

10.4 Dæmi til simulering á PSpice

Dæmi 1: Resistiv streymrás við mótstöðum



Spurningur 1:

Set $E = 10V$, og finnst allar streymar og spenningar: I_E , I_{R1} , I_{R2} , I_{R3} , V_{R1} , V_{R2} og V_{R3} .

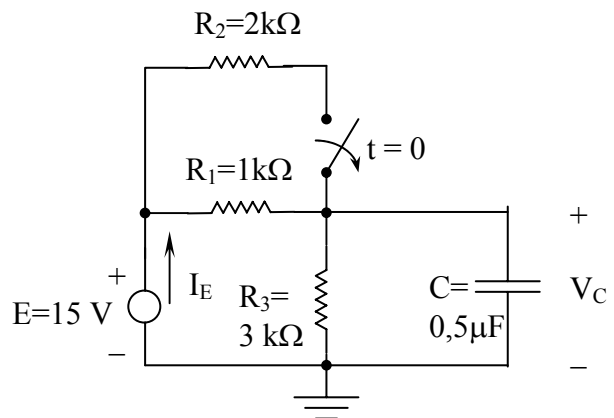
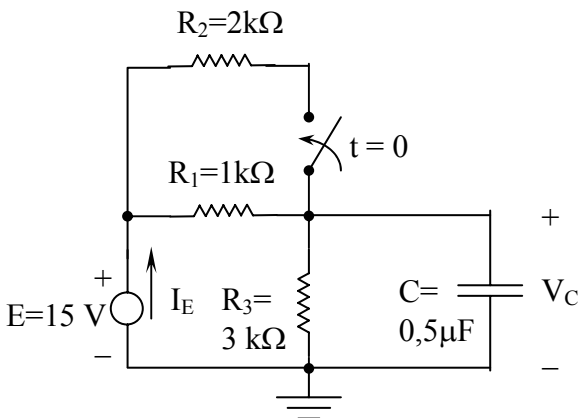
Spurningur 2:

Lat E broytast í í intervallinum $-10 \text{ volt} < E < +10 \text{ volt}$

Ger mynd av V_{R1} , V_{R2} og V_{R3} sum funktión av E .

Ger mynd av I_E , I_{R1} , I_{R2} , og I_{R3} sum funktión av E .

Dæmi 2: Tíðarsvar í RC rás



Spurningur 1:

Hesin spurningur er knýttur at mynd D.2a

Finn og ger mynd av V_C sum funktión av tíðini t . Samanber við analytiskt útroknaða mynd.

Finn og ger mynd av I_E sum funktión av tíðini t . Samanber við analytiskt útroknaða mynd.

Finn tíðarkonstantin τ av myndunum av V_C og I_E .

Samantætt funnað tíðarkonstantin τ við útroknaðan tíðarkonstant.

Spurningur 2:

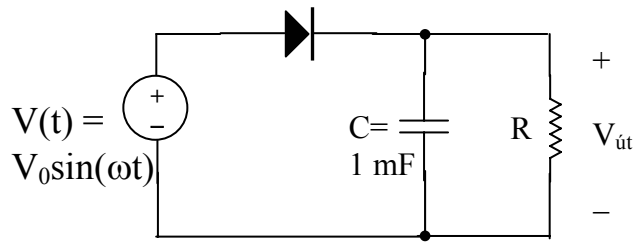
Hesin spurningur er knýttur at mynd D.2 b

Finn og ger mynd av V_C sum funktión av tíðini t . Samanber við analytiskt útroknaða mynd.

Finn og ger mynd av I_E sum funktión av tíðini t . Samanber við analytiskt útroknaða mynd.

Finn tíðarkonstantin τ av myndunum av V_C og I_E .

Samantætt funnað tíðarkonstantin τ við útroknaðan tíðarkonstant.

Dæmi 3: Einsrættararás

Mynd D.3 Einsrættararás

Spenningsgerðin í mynd D.3 gefur vendispenning frá sær við amplituduni $V_0 = 10 \text{ V}$ og súkliska frekvensinum $\omega = 2\pi \cdot 50 \text{ rad/s}$ (frekvensurin er 50 Hz)

Spurningur 1:

Set $R = 100 \Omega$.

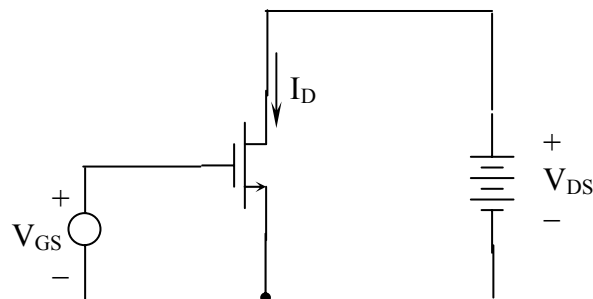
Finn og ger mynd av $V(t)$ og $V_{\text{út}}$ sum funktiún av tíðini t .

Avles á myndini, hvussu stórir rippulspenningurin er (t.e. størsta skifti av útgangsspenninginum $V_{\text{út}}$)

Spurningur 2:

Set $R = 500 \Omega$.

Avles á myndini, hvussu stórir rippulspenningurin er (t.e. størsta skifti av útgangsspenninginum $V_{\text{út}}$)

Dæmi 4: Streymrás við MOS-FET (karakteristikkar)

Mynd D.4

MOSFET í myndini er av slagnum IRF 150.

Spurningur 1:

Lat V_{GS} broytast í økinum $-2 \text{ V} < V_{GS} < 6 \text{ V}$

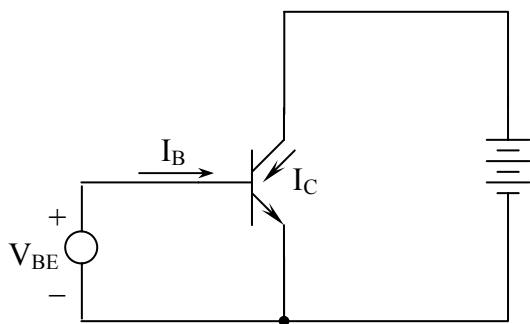
Finn og ger mynd I_D sum funktiún V_{GS} við virðum fyri drain – source spenningi $V_{DS} = 1, 2, 3, 4, \dots, 10 \text{ volt}$. Kurvarnar skulu vera á somu mynd (gjørdar við ”dc-sweep” ”nested sweep”).

Spurningur 2:

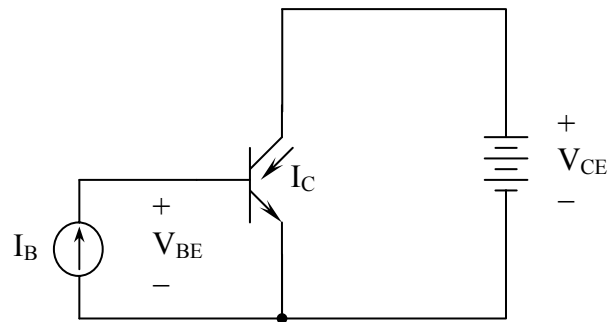
Lat nú V_{DS} broytast í økinum $0 \text{ V} < V_{DS} < 10 \text{ V}$.

Finn og ger mynd I_D sum funktiún V_{DS} við virðunum fyri gate – source spenningi $V_{GS} = 3,0; 3,5; 4,0; 4,5; \text{ og } 5,0 \text{ volt}$. Kurvarnar skulu vera á somu mynd (gjørdar við ”dc-sweep” ”nested sweep”).

Dæmi 5: Streymrás við bipolerum transistori (karakteristikkar)



Mynd D.5a



Mynd D.5b

Bipoleri transistorin í mynd D.5a og D.5b er av slagnum Q2N2222. Mynd D.5a verður brúkt til at máta inngangskararakteristikkin, meðan mynd D.5b verður brúkt til at máta útgangskararakteristikkin.

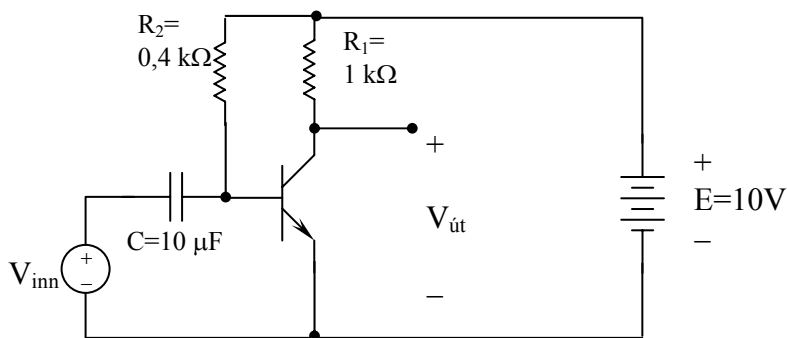
Spurningur 1: Lat V_{BE} broytast í økinum $0\text{ V} < I_B < 0,8\text{ V}$.

Finn inngangskararakteristikkin við at gera mynd I_B sum funktión V_{BE} við virðum fyri collector – emitterspenningi $V_{CE} = 1, 4, 7$ og 10 volt. Kurvarnar skulu vera á somu mynd (gjørðar ”dc-sweep” ”nested sweep”).

Spurningur 2: Lat nú V_{CE} broytast í økinum $0\text{ V} < V_{CE} < 10\text{ V}$.

Finn og ger mynd I_D sum funktión V_{CE} við virðunum fyri basisstreymi $I_B = 0, 10, \dots, 100\ \mu\text{A}$. Kurvarnar skulu vera á somu mynd (gjørðar við ”dc-sweep” ”nested sweep”).

Dæmi 6: Styrkjari við bipolerum transistori



Mynd D6

Uppsetingin í mynd D6 er ein styrkjari gjørður við npn transistorinum Q2N2222. Set hann upp í Schematics og simulera styrkingina av honum sum funktión av frekvensinum.

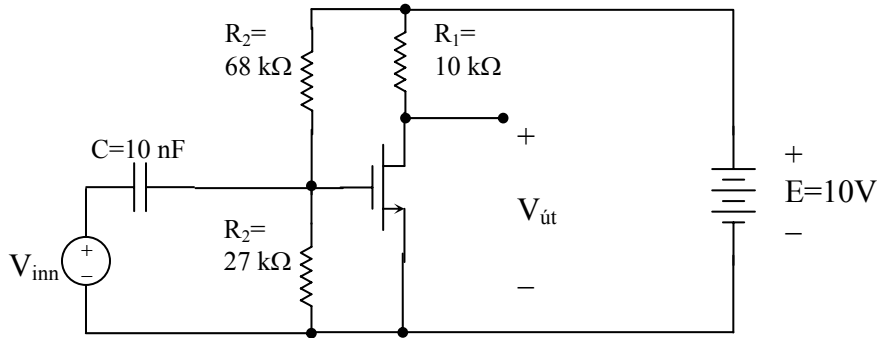
Spurningur 1:

Finn styrkingina $A = V_{út}/V_{in}$ í dB fyri styrkjaran í frekvensøkinum $10\text{ Hz} - 20\text{ MHz}$. Brúka logaritmiskan frekvensás.

Spurningur 2:

Finn 3dB niðara og ovara markfrekvens av myndini.

(Viðmerking: Styrking í decibel (dB) er definerað við $20 \log(V_{út}/V_{inn})$)

Dæmi 7: Styrkjari við MOS-FET

Mynd D7

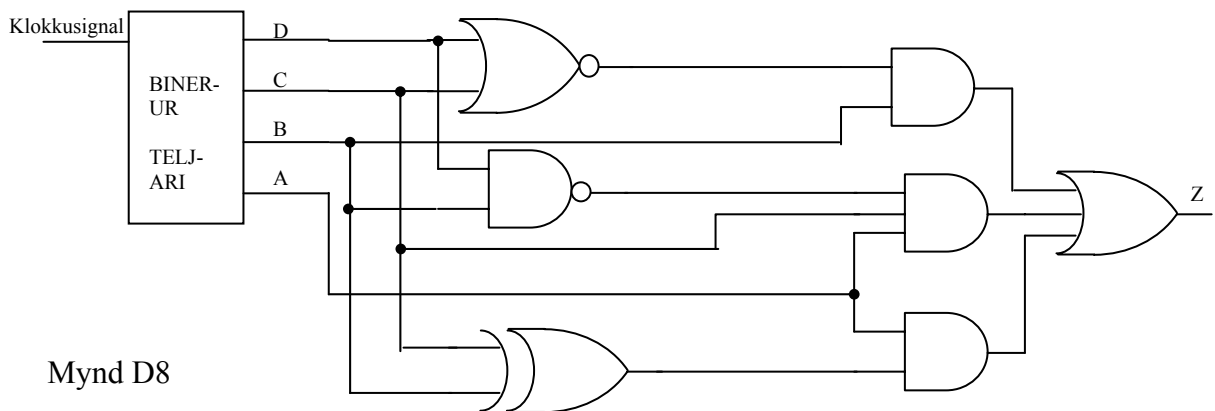
Uppsetingin í mynd D7 er ein styrkjari gjörður við n-MOSFET IRF 150. Set hann upp í Schematics og simulera styrkingina av honum sum funktiún av frekvensinum.

Spurningur 1:

Finn styrkingina $A=V_{út}/V_{in}$ í dB fyri styrkjaran í frekvensøkinum 10 Hz – 1 MHz. Brúka logaritmiskan frekvensás.

Spurningur 2:

Finn 3dB niðara og ovara markfrekvens av myndini.

Dæmi 8: Digital rás við teljara og kombinatoriskum logikki

Mynd D8

Kombinatoriska rásin í mynd D8 hevur fýra inngangir D, C, B, A og ein útgang Z, har DCBA umboðar eitt binert tal 0 - 15. Vísast skal í hesum døminum, at uppsetingin er ein primtalsdetektor.

Spurningur 1:

Lat ein bineran teljara stýra DCBA inngangunum til at átaka øll mógulig virði.

Gerð eina tíðarmynd av DCBA og Z, umframt øllum útgangunum frá teimum ymisku "gate"unum. Set upp eina sannleikatalvu við hesum sum grundarlagi av Z sum funktiún av DCBA.

Spurningur 2:

Vís at úrslitið $Z = 1$ fyri øll primtalsvirði av DCBA (ikki íroknað 1).

Leitiorð

- β, 49
- β_I, 53
- β_N, 53
- 1. ordans rás, 18
- 1. ordans RC-rás, 22
- A/D umsetari, 71
- A/D - umsetari, 59
- A/D umsetari við stöði í komparatorrás, 74
- A/D umsetari við stöði í teljararás, 73
- AC Sweep, 77
- acceptordoteraðan hálvleiðara, 30
- AC-sweep, 79
- aktiva styrkjara øki, 43
- aktivur, 44
- Aktivur transistor, 51
- AIAs, 29
- alleiðarar, 28
- almenn loysn, 18
- Almenn loysn, 22
- Analog – digital (A/D) umsetarar, 73
- analog – digital umsetari (A/D umsetari), 71
- approksimera karakteristikkinn, 34
- astabilir multivibratorar, 65
- asymptota, 65
- asymptotískt spenningsvirði, 65
- asymptotískt virði $X(\infty)$, 22
- atom, 27
- avalanche effekt, 34
- avbrotin, 44
- Avbrotin transistor, 44
- avskorin transistor, 51
- basis, 48
- basis – collektor strekki, 48
- basis – emitterdiodan, 48
- basisstreymurinn I_B , 48
- bein, 57
- Bias Point, 78
- Bias Point Detail, 77
- binert tal, 72
- Bipolerir transistorar, 48
- blýggj, 28
- Boltzmanns konstantur, 30, 34
- bor (B), 30
- brúkarafortechn, 7
- byrjanarvirði $X(0_+)$, 22
- byrjannarstöða, 68
- CA3140, 66
- CMOS, 41
- CMOS – rásir, 47
- collektor, 48
- collektor – basisdiodan, 48
- collektorstreymur I_C , 49
- Coulomb, 29
- D/A - umsetari, 59
- D/A umsetari, 71
- DC – sweep, 79
- DC Sweep, 77
- depletion, 42, 43
- deyðtíðin, 70
- diagonalelement, 10, 12
- diamantur, 28
- dielektrisitetskonstanturinn, 15
- Differens styrkjari, 61
- differentiátiónstíðarkonstanturinn, 62
- Differentiator, 62
- diffusiónsstreymur, 30, 33
- Digital – analog (D/A) umsetarar, 71
- digital – analog umsetari (D/A umsetari), 71
- Digital rás, 80
- Digital rás við teljara og kombinatoriskum logikki, 85
- Digital Setup, 77
- digitalir signalgerðar, 76
- digitalt signal, 71
- dioda, 33
- Diodukarakteristikkurinn, 34
- diodukarakteristikkurinn verður parallellforskotin, 37
- Diodur, 33
- diskontinuert, 71
- donordoteraðan hálvleiðara, 29
- doting, 29
- drain, 42
- drain streym, 43
- drain-source spenningin, 44
- driftsstreymur, 33
- E_α , 65
- Effekt, 7
- E_g , 28
- eind, 5
- Einfalt dæmi við RC rás, 18
- Einsrættaradiodan, 36
- einsrættarar, 33
- Einsrættararás, 83
- einsrætting, 36
- ekvipotentiallógin, 58
- elektrisk lóðing, 15
- elektrisk orkunøgd, 16
- elektriski permitiviteturinn, 15

- elektriskir ventilar, 33
- elektrískt felt, 15, 41
- Elektriskur streymur í hálvleiðarum, 30
- Elektronir, 27
- elektronískt stýrdum umskiftarum K_1, K_2, \dots, K_n , 71
- elektronkonsentratióin, 30, 31
- elektronvolt, 28
- Elektronvolt, 29
- elektrooptik, 27
- elementarløðing, 29, 34
- elorku úr ljósi, 37
- emitter, 48
- emitter-basis strekki, 48
- Emitterstreymurinn I_E , 49
- Enable, 73
- enhancement, 42, 43
- eV, 30
- Farad, 15
- Felt effekt transistorin (FET), 41
- felteffekttransistor, 33
- flip-flopp, 76
- forsýningsspenningar, 57
- fortekn, 5
- fosfor (P), 29
- fotodetektorar, 27
- Fotodiodur, 37
- fýrkantspenningur, 66
- $Ga_{1-x}In_xAs$, 29
- GaAlAs, 38
- GaAlInP, 38
- GaAs, 29, 38
- gallium aluminium arsenid (GaAlAs), 27
- gallium-aluminium-indium-fofsfid (GaAlInP), 27
- galliumarsenid (GaAs), 27
- gate, 42
- gate-source spenning, 43
- gate-source spenningin, 44
- gate-spenningur, 42
- gatestreymur, 43
- gáttarspenningurinn, 42
- gáttarstreymur, 39
- $Ga_xAl_{1-x}As$, 29
- Ge, 29
- Ge diodur, 40
- Ge-diodur, 34
- gerðafortekn, 7
- germanium (Ge), 27
- Germanium (Ge), 28
- gjøgnumgangsrætning, 33, 34
- Hálvleiðara lasarar, 38
- hálvleiðarakrystall, 28
- hálvleiðaralasarar, 27
- hálvleiðarar, 27
- Hálvleiðarar, 27
- hitastiginum T í Kelvin, 27
- hol, 29, 30
- holkonsentratióin, 30, 31
- homogen 1.ordans differentiallíkning, 19
- hysteresis, 63
- Hysteresis, 64
- I_B , 48, 49
- I_C , 49
- IC = integrated circuits, 33
- $I_{C,sat}$, 51
- I_D , 43
- Ideallur operatíonsstyrkjari, 58
- ideallur spenningsgerði, 6
- ideallur streymgerði, 6
- I_E , 49
- Ikki – inverterandi styrkjari, 60
- ikki inverterandi Schmitt triggara, 64
- ikki-diagonalelement, 10, 12
- Indiumfosfid (InP), 27
- inhomogen 1. ordans differentiallíkning, 20
- Innara styrking, 58
- Innara styrkingin, 56
- inngangskararakteristikkur, 43, 53
- inngangs-karakteristikkurinn, 50
- inngangsmótstöða, 56
- Inngangsmótstöða, 56, 58
- inngangssignal, 57
- inngangsspenningur, 56
- InP, 29, 38
- integratióntíðarkonstanturinn, 61
- Integrator, 61
- integreraðar rásir, 56
- integreraðar streymrásir, 28
- integreraðum optískum rásum, 27
- International System of Units, 5
- intrinsik hálvleiðara, 29
- inverteraður transistor, 53
- inverterandi Schmitt triggari, 64
- Inverterandi styrkjari, 59
- isolatorar, 27
- javnmetisrás, 22, 23, 40
- javnmetisrásir, 43, 44, 49
- javnmett (ekvivalent) positiv løðing, 29
- javnpotentiallógin, 58
- J-FET, 41
- jørðpunkt, 76
- Jørðpunktið, 57
- Joule, 29, 30

- kapasitetur, 15
- kapasiteturinn skiftur við spennningunum, 39
- karakteristikkar, 83, 84
- Karakteristikkar, 43, 49
- Kelvin, 27
- Kirchhoffs lógir, 59
- Kirchhoffs spenningslóg, 11
- Kirchhoffs streymlóg, 9
- klokka, 65
- klokkupulsgeri DGSTM1, 80
- knútapunktur, 9
- knútapunktslíkningar, 9
- knútapunktpotential, 9
- komparator, 62, 73, 74
- Komparator, 62
- kondensator, 15
- kondensatorlíkning, 16
- konduktansur, 7
- Konsentratióin, 29
- kopar (Cu), 27
- kortslutningsstreymur, 10
- kovalent, 29
- kovalentar bindingar, 30
- kovalentum bindingum, 28
- kritiska hitastigið, 28
- kvantimekaniskur tunnillsvirkningur, 39
- kvantiserað, 71
- kvantiseraðum stöddum, 71
- kvantiseringsstig, 74
- kvartsglas SiO₂, 27
- kyksilvur, 28
- leiðandi, 44
- Leiðandi (kortsluttaður) transistor, 44
- leiðandi dioda, 40
- leiðaraevni, 7
- leiðirætning, 33, 34
- ljósdiodur, 27, 38
- ljóskelda, 38
- ljósleiðarafjarskifti, 27
- ljósleiðaraskipan, 38
- ljósorka, 38
- ljósstyrkjandi eginleikum, 38
- Load Bias Point, 77
- logískt stýrisignal X, 73
- lutvís speglandi parallellum síðum, 38
- matrikslíkning, 10, 12
- Mayer-Nortons lóg, 13
- mekanískt arbeiði, 16
- meskalíkningar, 11
- meskastreymar, 11
- Meskastreymar, 12
- meski, 11
- metal, 27
- metalkontakt, 33, 42
- metal-oxide-semiconductor, 41
- metningsmótstöðan, 51
- metningsóki hjá MOS-FETinum, 43
- metningspunktið, 51
- metningsspenningur, 62
- metningsstreyming, 51
- metningsstreymurinn, 34
- Mettaður transistor, 51
- mettingsóki, 44
- Mettingsvirðini av útgangsspenningunum, 57
- meV, 30
- Model editor, 75
- Monostabilur multivibrator, 69
- Monte Carlo/Worst Case, 77
- MOS-FET, 41
- mótstöða, 7
- multipleksari, 76
- n – MOS-FET, 47
- NAND – gate, 55
- n-hálfleiðara, 29
- n-hálfleiðari, 49
- n-hálfleiðari, 33, 48
- n_i, 29
- Niðari skiftispenningur, 64
- niðurteljing, 74
- niobium, 28
- n-kanal MOS-FET-”depletion”, 42
- n-kanal MOS-FET-”enhancement”, 42
- n-lag, 33
- normali transistorin, 53
- NOT-gate, 54
- npn-transistor, 48
- nulljavnvág, 57
- nullpunktið er forskotið, 66
- óheftir spenningsgerði, 6
- óheftur streymgerði, 6
- Ohms lóg, 27
- Operatíonsstyrkjaraugtakið, 56
- Operatíonsstyrkjarar, 56
- operatíonsstyrkjarinn er virkin (aktivur), 58
- Optimize, 75
- Orka, 7
- orkugapið, 28
- Ovari skiftispenningur, 64
- p – MOS-FET, 47
- Parallellbinding av kondensatorum, 16
- parallellmótstöðum, 72
- Parametric, 77
- pentavalent, 29
- periodan T, 66

- Periodutíðin T , 68
 p-hálvleiðara, 30
 p-halvleiðari, 49
 p-hálvleiðari, 33, 48
 p_i , 29
 pinch-off, 42
 p-kanal MOSFET "Enhancement", 42
 p-kanal MOS-FET-"depletion", 42
 p-lag, 33
 plastikk, 27
 pnp-transistor, 49
 pnp-transistorar, 51
 pn-yvirgongd, 33, 38, 48
 pn-yvirgongdina, 34
 Potentiali, 5
 priorítetskodari, 74
 Probe, 75, 77
 prosentískan feil, 72
 PSpice, 75
 pulslongdin T , 70
 pulsspenningsgerðar, 65
 RC rásir, 15
 $r_{C,sat}$, 51
 r_{DS} , 44
 $r_{DS,off}$, 44
 $r_{DS,on}$, 44
 referensuspennungur V_R , 74
 referensuspennungurinn V_R , 71
 Reinir hálvleiðarar, 28
 rekombinera, 38
 relativ dielektrísitetskonstanturinn, 15
 relativ elektríski permitiviteturinn, 15
 resistansur, 7
 Resistiv streymrás við mótstöðum, 82
 R_n , 47
 $R_{n,off}$, 47
 $R_{n,on}$, 47
 R_p , 47
 $R_{p,off}$, 47
 $R_{p,on}$, 47
 Samansett dæmi við RC-rás, 24
 samplað, 71
 saturation current, 34
 Save Bias Point, 77
 Schematics, 75
 Schmitt triggari, 63
 schottky, 55
 sekventiellar digitalar rásir, 65
 Sensitivity, 77
 Seriu- og parallellbinding av mótstöðum, 8
 Serubinding av kondensatorum, 17
 seriumótstöðum, 72
 Si, 29
 Si diodur, 40
 SI eindarskipanin, 5
 Si-diodur, 34
 sign magnitude fortteknsrokningini, 74
 silisium (Si), 27, 41, 48
 Silisium (Si), 28
 silisiumdioxid (SiO_2), 42
 Silvur (Ag), 27
 simuleringsforrit, 75
 simuleringssskipan, 75
 skalvalopsvirknaðurinn, 34
 slew rate, 66
 sólkyknur, 37
 source, 42
 Spennings- og streymbýting, 8
 spenningsbýtari, 8, 74
 spenningsforsýning, 57
 spenningsgerðar, 76
 spenningslóg Kirchhoffs, 11
 spenningsmunur, 5
 Spenningsmunur, 6
 Spenningsstyrking, 59, 60
 sperrað dioda, 40
 sperrirætning, 34
 spesifikka leiðaraevni, 27
 spesifikka mótstöðan, 27
 Stimulus editor, 75
 streymbýtari, 8
 streymgerðar, 76
 streymlóg Kirchhoffs, 9
 Streymrás við bipolerum transistori, 84
 Streymrás við MOS-FET, 83
 streymstyrkingini β , 49
 streymur, 6
 Studentaversiónin, 75
 styrking, 56
 styrkjari, 56
 Styrkjari við bipolerum transistori, 84
 Styrkjari við MOS-FET, 85
 substrat, 42
 Summatións styrkjari, 60
 superleiðarar, 28
 Superpositiónslógin, 14
 Système International d'unités, 5
 $t = 0_-$, 19
 $t = 0_+$, 19
 teldusimuleringsforrit, 75
 teljara IC-rás, 73
 teljari, 76
 Temperature, 77
 tetravalent, 29

Text editor, 75
 Thevenins javnmetisrás, 22
 Thevenins lóg, 13
 threshold, 42
 tíðarkonstant τ , 22
 tíðarkonstantur, 19, 65
 Tíðarkonstantur, 25
 Tíðarsvar í RC rás, 82
 tin, 28
 Transfer Function, 77
 Transient, 77, 80
 transistor, 33
 transistor í húsa, 48
 Transistor-Transistor-Logikk, 54
 trioduøki, 44
 trykantspenningur, 66
 TTL, 48, 53, 54
 TTL invertari, 54
 TTL NAND-gate, 55
 Tunnildioda, 39
 tunnildsvirkningur, 39
 tveykomplement forteknsrokning, 74
 u741, 66
 Umløðingar av kondensatorum, 18
 uppteljing, 74
 útgangskarakeristikkur, 53
 Útgangskarakeristikkur, 44
 útgangskarakeristikkurin, 51
 útgangsmótstöða, 56
 Útgangsmótstöða, 56, 58
 útgangssignal, 57
 útgangsspenningurin, 56
 V_{α} , 57, 62, 65
 Vakuum, 15
 valenselektronir, 28
 vanligt glas, 27
 Varaktordiodan, 39
 V_{BC} , 53
 $V_{BC,0}$, 53
 V_{BE} , 49, 54
 V_{BE0} , 54
 V_{CE} , 49
 V_{D0} , 40
 V_{DS} , 44
 vendispenning, 36
 vendistreym, 36
 V_{GS} , 42, 44
 virkin, 44
 Virkin (aktivur) transistor, 44
 virtuella kortslutningin, 58
 virtuelt jørðbundin, 58
 yvurførings-karakteristikkur, 43
 yvurføringskonduktansurin, 43
 zener effekt, 34
 Zenerdioda, 36
 Zenerdiodur, 55
 Zenerspenningur, 36
 Zenerspenningurin, 35
 zenervirknaðurin, 34