

Elektroonika

Loengute materjalid:
skeemid, diagrammid, teesid.

Sisukord

| | |
|--|-----|
| 1. Elektronika ajaloost (arengu etapid, elektronika osad, elektronlambid, elektronkiiretoru, elektronseadmete montaaži tüübidi)..... | 3 |
| 2. Elektronika passiivsed komponendid..... | 14 |
| 3. Pooljuhtseadised (dioodid, bipolaartransistorid, väljatransistorid, türistorid)..... | 23 |
| 4. Optoelektronika elemendid, infoesitusseadmed..... | 42 |
| 5. Analoogelektronika lülitused..... | 60 |
| 5.1. Elektrisiaali võimendamine. Transistor kui pidevatoimeline võimenduselement..... | 60 |
| 5.2. Võimendusastmed bipolaartransistori baasil..... | 62 |
| 5.3. Võimendusastmed väljatransistoride baasil..... | 73 |
| 5.4. Tagasiside võimendites..... | 77 |
| 5.5. Bipolaartransistori töö lülitri režiimis..... | 83 |
| 5.6. Stabiilse voolu generaatorid..... | 85 |
| 5.7. Võimsusvõimendid..... | 86 |
| 5.8. Alalisvooluvõimendid (AVV) (AVV iseärasus, otsesidestuses AVV, tasakaalustusskeemid, diferentsvõimendi)..... | 91 |
| 5.9. Operatsioonvõimendi (struktuur, tunnussuurused)..... | 97 |
| 5.10. Idealisieritud operatsioonvõimendiga põhilülitused..... | 100 |
| 5.10.1. Lineaarsed skeemid operatsioonvõimendi baasil..... | 100 |
| 5.10.2. Operatsioonvõimendi töö impulsrežiimis (komparaator, multivibraator, monovibraator)..... | 107 |
| 5.11. Saehammaspingegeneraator..... | 113 |
| 5.12. Selektiivvõimendid..... | 115 |
| 5.13. Siinusvõnkumise generaatorid..... | 118 |
| 5.14. Elektronaparatuuri toide (alaldid, silufiltrid, pingekordistid, pingestabilisaatorid)..... | 122 |
| 5.15. Fitrid (liigitus, ideaal- ja reaalfiltrid, aktiivfiltrid)..... | 134 |
| 6. Digmaalelektronika põhilülitused..... | 138 |
| 6.1. Nulli ja ühe esitamine..... | 138 |
| 6.2. Loogika baaselementid..... | 141 |
| 6.3. Loogikaelementide süsteemid (DTL, TTL, KMOP, ESL)..... | 144 |
| 6.4. Kombinatsioon- ja jadaloogika..... | 156 |
| 6.5. Kombinatsioonloogika tüüplülitused..... | 158 |
| 6.5.1. Multiplekser..... | 158 |
| 6.5.2. Demultiplekser..... | 159 |
| 6.5.3. Dekooder..... | 161 |
| 6.5.4. Koodimuundur..... | 161 |
| 6.5.5. Koorder..... | 163 |
| 6.6. Jadaloogika tüüplülitused..... | 164 |
| 6.6.1. Trigerid..... | 164 |
| 6.6.2. Registrid..... | 174 |
| 6.6.3. Loendurid..... | 178 |
| 6.7. Mälud..... | 185 |
| 6.7.1. Püsimälu..... | 185 |
| 6.7.2. Muutmälu..... | 188 |
| 6.8. Digitaal-analoogmuundurid (DAM) ja analoog- digitaalmuundurid (ADM)..... | 190 |
| 6.8.1. Digitaal – analoog muundur (DAM)..... | 190 |
| 6.8.2. Analoog – digitaal muundur (ADM)..... | 192 |
| Kirjandus..... | 195 |

Lab1

1. Elektroonika ajaloost

Elektroonika osad

Elektroonika on teaduse ja tehnika haru, mis uurib:

1) füüsikalisi nähtusi seadistes, mille töötamine põhineb laetud osakeste kontsentratsiooni muutumisel ja liikumisel vaakumis, gaasis või tahkes kristallilises kehas;

2) nende seadiste elektrilisi omadusi, karakteristikuid ja parameetreid ning neid seadiseid sisaldavate elektriahelate töorežiime;

3) komplekssete elektronsüsteemide omadusi.

Füüsikaliste nähtustega tegelev elektroonika on füüsikaline elektroonika.

Seadiste ja nende rakendusaladega tegelev elektroonika on rakenduselektronika.

Et kõikides juhtivates keskkondades (peale elektrolüütide) on voolukandjaks elektronid või peamiselt elektronid, siis võib kõiki märgitud seadiseid nimetada elektronseadisteks. Ent seoses eri keskkondadega, milles elektronid liiguvad, ja nende keskkondade mõjuga elektronide liikumisele eristatakse järgmisi seadiste põhiklasse: *kõrgvaakum-* (elektron-), *ion-* (gaaslahendus-) ja *pooljuhtseadised*.

Kõrgvaakumseadistes on laengukandjateks ainult vaakumi läbivad elektronid; teised laetud osakesed puuduvad elektroodivahemikus peaaegu täielikult. Selliste seadiste suure rühma moodustavad elektronlambid, mille abil võimendatakse ja genereeritakse elektrisignaale, ning muundurid, mis muundavad kiirgusenergiat elektrienergiaks (fotoelektronseadised) või elektrisignaale valgussignaalideks (elektronkiiretorud).

Ioonseadistes on voolukandjateks peamiselt hõrendatud gaasi läbivad positiivsetest ionidest ümbratsetud elektronid. Ioonid tekivad vahetult seadise elektroodivahemikus, kus kiired elektronid ioniseerivad täidisgaasi aatomeid. Ionisatsioon seisneb elektroni vabastamises gaasi aatomite või molekulide struktuuride meist. Gaasides tekitavad juhtivuse peamiselt vabanevad elektronid, vähemal määral ioonid.

Pooljuhtseadised on ühtlike või mitteühtlike pooljuhtivate keskkondade ühendused. Niisuguseid keskkondi moodustavad kristallilised kehad, mille aatomite valentselektronid vabanevad soojuskvantide ehk foononite või valguskvantide ehk footonite mõjul, samuti tugeva elektrivälja toimel. Metallides on juhtivust põhjustavate elektronide vabastamiseks vaja väga väikese energiaga kvante. Pooljuhtides peab elektrone vabastavate kvantide energia olema suurem, dielektrikutes veel suurem.

Ülalmärgitud seadiseid kasutatakse laialdaselt rakenduselektronikas.

Nüüdisajal jaguneb rakenduselektronika järgmiselt.

1. Raadioelektroonika, mis hõlmab kõiki sideliike — raadiolevi, televisiooni, raadiolokatsiooni, raadionavigatsiooni, raadioastronomiat jt.

2. Tööstuselektronika, mis hõlmab mitmesuguseid elektronmõõte-, elektronkontrolli-, elektronreguleerimis-, elektronkaitse- ja muid elektronjuhtimisseadmeid, samuti elektron-voolumuundussüsteeme, mida rakendatakse laialdaselt energeetikaseadmetes ja elektertranspordis.

3. Tuumaelektronika, mis on seotud aatomituumaga lõhustumisel või ümberformeerimisel tekkivate tuumaosakeste või radioaktiivkiirguse saamise ja kasutamise uurimisega.

4. Biooloogiaelektronika, mis kasutab elektronnähtusi ja elektroonikaaparatuuri bioloogilisteks uurimisteks, seda eriti meditsiinis (meditsiinielektroonika).

On ka teisi alasid, nagu geoloogia, keemia jt., kus kasutatakse elektronseadmeid ja -süsteeme.

Rakenduselektronika iga nimetatud ala piires on viimasel ajal välja kujunenud ka kitsamad teadusalad. Tööstuselektronika jaguneb järgmiselt.

1. Informatsioonielektroonika, kuhu kuuluvad tööstuslike objektide ja tehnoloogiliste protsesside töörežiimide mõõtmise, kontrollimise ning juhtimisega seotud elektronsüsteemid. Nüüdisajal on elektronjuhtimissõlmed kõige rohkem levinud automaatikaseadmeis ja arvutustehnikas.

2. Energeetiline elektroonika, kuhu kuuluvad keskmise ja suure võimsusega seadmed ühe vooluliigi muundamiseks teiseks. Selliste seadmete erikaal riigi energiabilansis on väga suur, sest muundussüsteeme kasutatakse värviliste metallide ja soolade elektrolüüsi seadmetes, elektertranspordis, tööstuslikes elektrijaamites, tõsteseadmetes ning energia alalisvoolu-ülekandel suurtele kaugustele.

3. Elektrontehnoloogia, mis kasutab elektron- ja ioonkiirte kimpe ning elektromagnetilist ja helivõnkumist (ultraheli) materjalide mõjutamiseks kelmete saamise eesmärgil ja tehnoloogiliste protsesside täiustamiseks.

Elektroonika ajaloost

XIX sajandi lõpp – XX sajandi algus

Alaldid, Cu O, Se, ...

Raadio leiutamine. Säde, koherer, Morse

A.Popov - 1889.a; vastuvõtja - 1895.a

G.Markoni - 1897.a - patent.

1904.a. - elektronlamp, - diood - J.Fleming

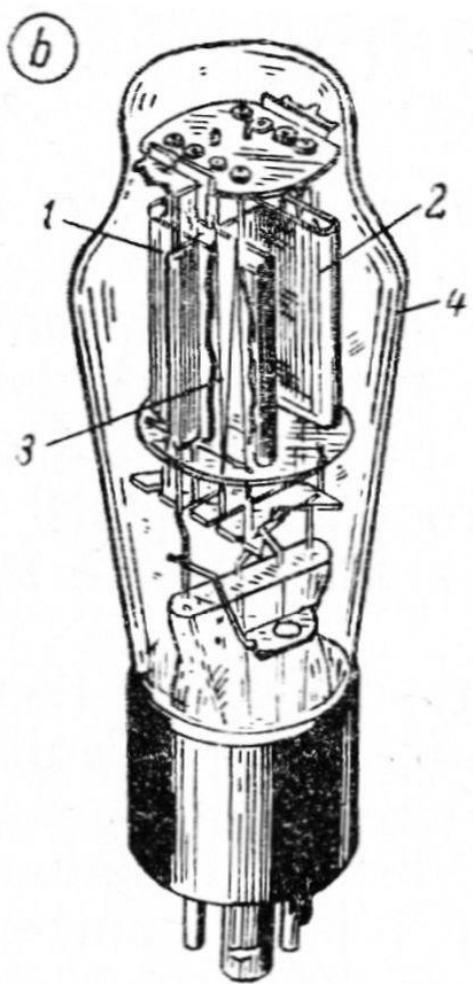
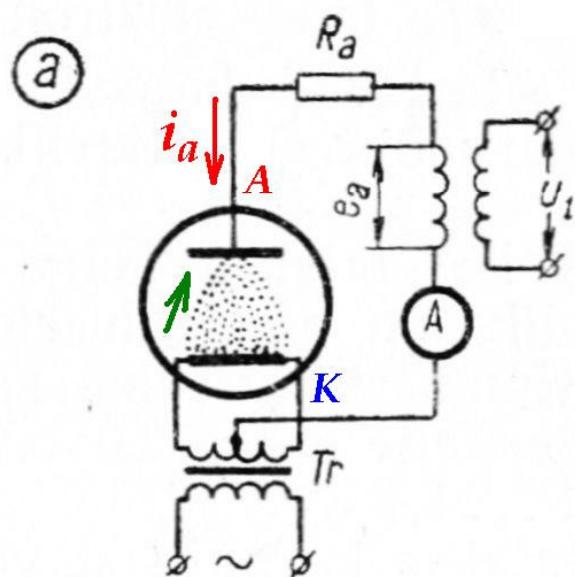
- alaldi,
- detektor.

Voolu juhib ühes suunas. Dioodi ehitus:

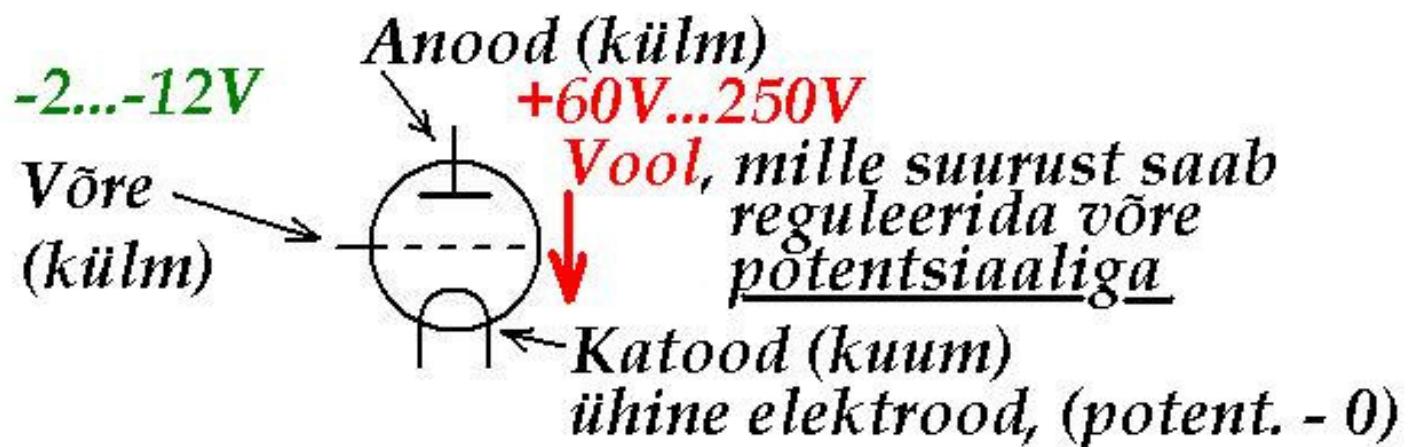


Kui anoodil on + potentsiaal, siis tekib elektronide liikumine katoodist - anoodile.

1907.a. - Li de Forest - elektronvaakumtriood.

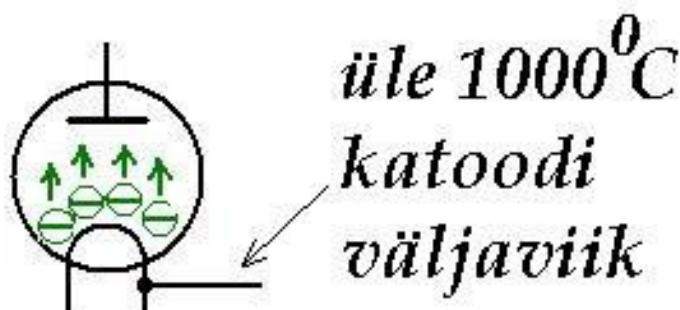


Elektronventiili ühendamine vooluahelasse (a)
ja kahe anoodiga kenotroni välisvaade (b)
1, 2 — anoodid; 3 — katood; 4 — klaaskest



Elektroonikas: potentsiaal on pinge minge väljavalitud ühise elektroodi (juhtme) suhtes.

Võre potentsiaal on negatiivne - selleks, et ei tekiks võrevoolu.



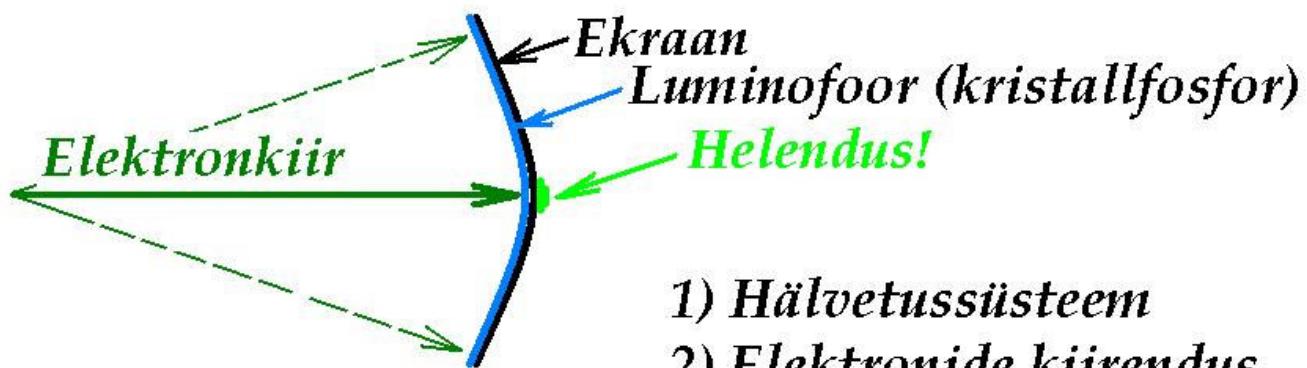
küttepinge 2...12,6V
vahelduvpinge, 50Hz
Otsese küttega katood



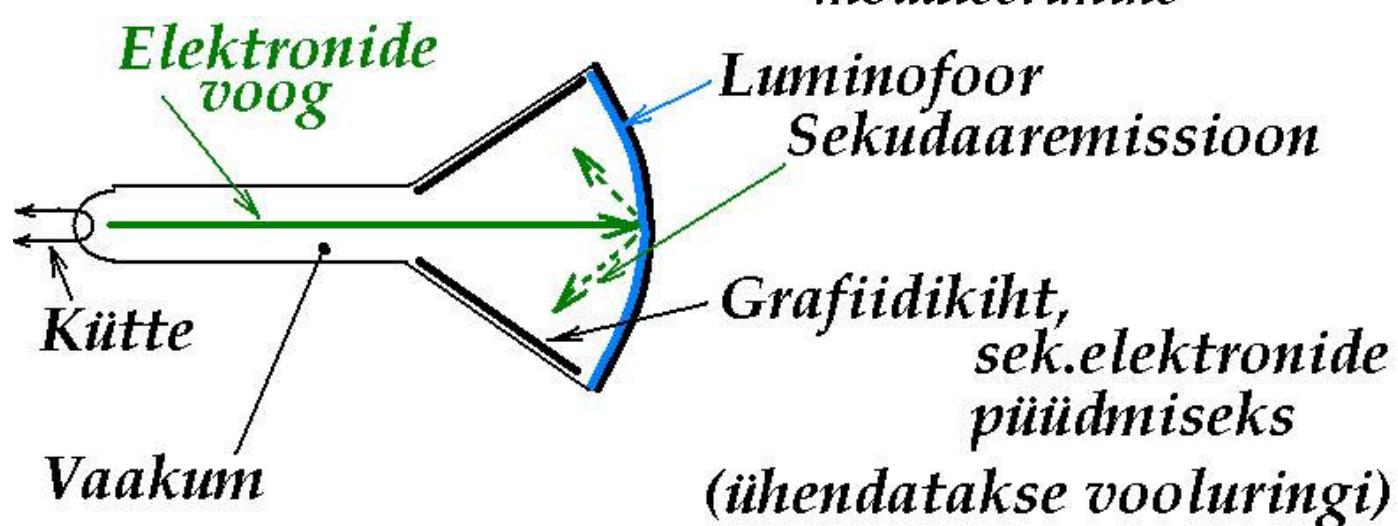
küttepinge, taval. 6,3V
Kaudse küttega katood

Pentood - 3 võrega el.lamp. Oktood - 6 võrega el.lamp.
1914.a. - el.lambid Venemaal.
1922.a. - 400 kW(!!!) radiosaatja Moskvas.

Elektronkiiretoru (EKT, ERT, CRT, ЭЛТ).

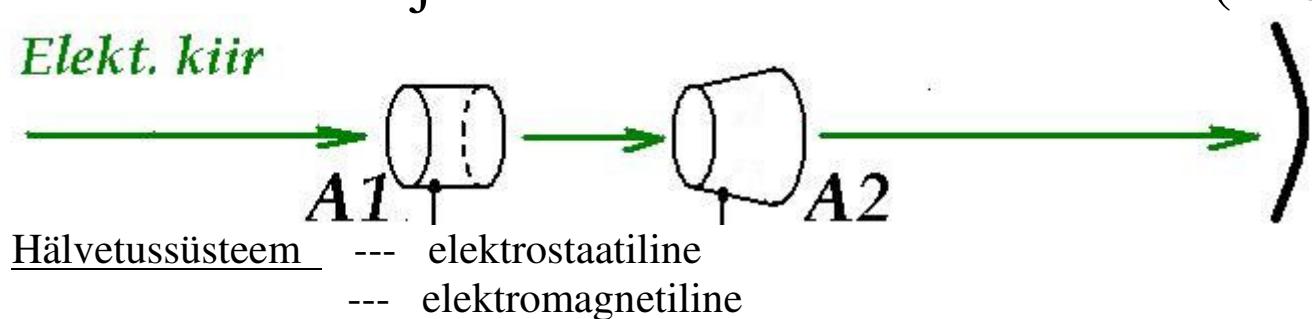


- 1) Hälvetussüsteem
- 2) Elektronide kiirendus
- 3) Fokusseerimine
- 4) Kiire intensiivsuse moduleerimine



Kiirendamiseks ja fokuseerimiseks on anoodid (2 -3 tk)

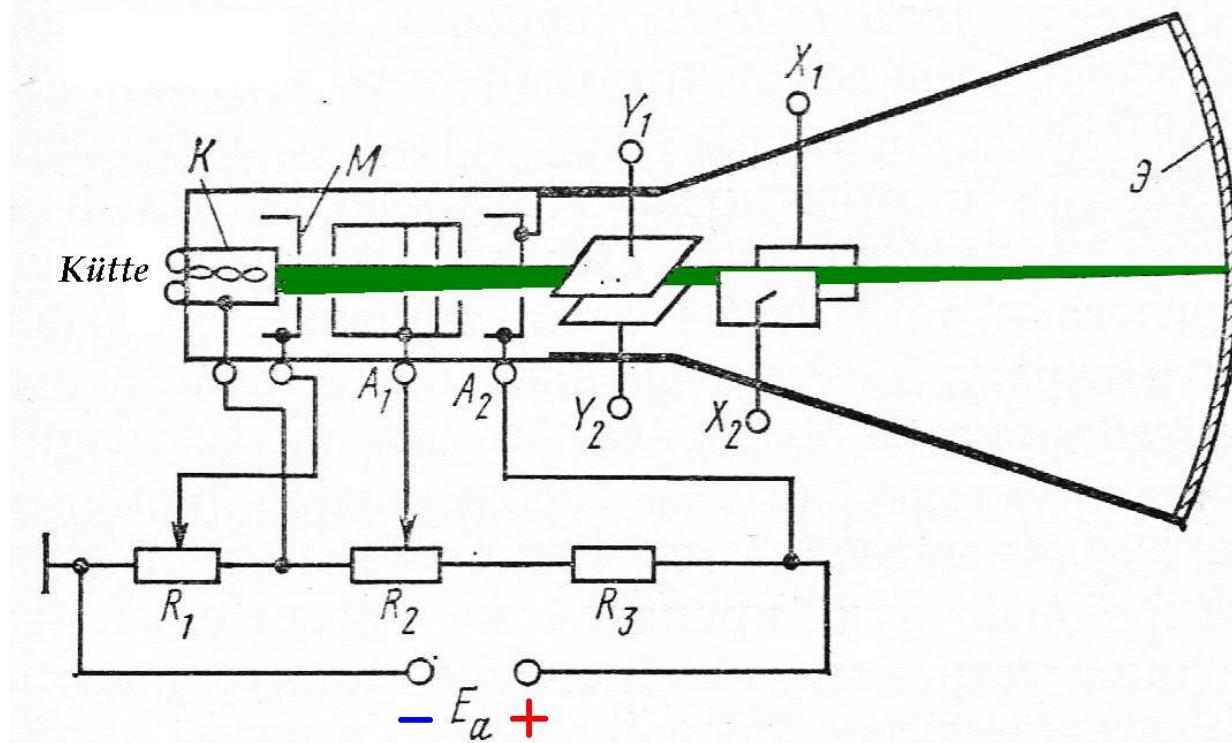
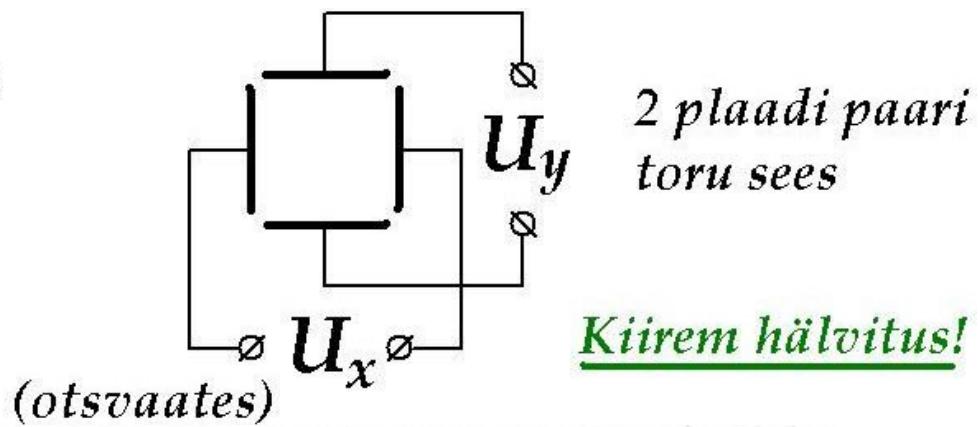
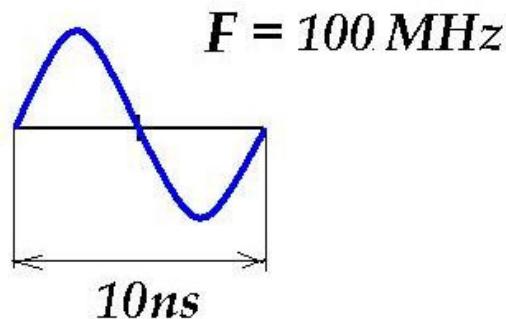
Elekt. kiir



Arvuti monitoris ja televiisoris on elektromagnetiline süsteem.

→ 2 mähist, mis on toru välispinnal.

Ostsillograafis (õigem. ostsiloskoobis) on elektrostaatiline kallutussüsteem.



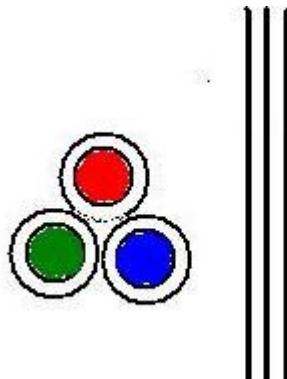
Raster



1000 joont ekraani kõrguses
100 korda sekundis

Ühe hälvetuse aeg: $\frac{1}{100 \cdot 1000} = 10\mu s$

Värviline indikatsioon. Kolme värvit süsteem:



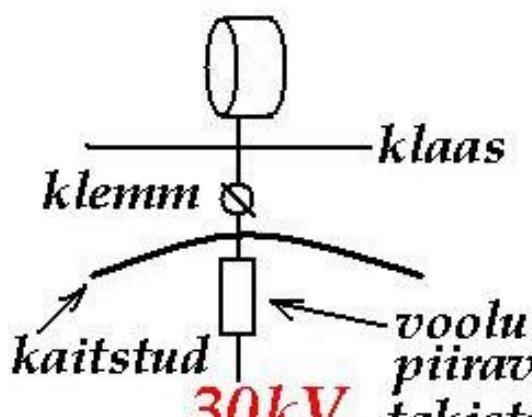
| | |
|--------------|----------|
| <i>Red</i> | R |
| <i>Blue</i> | B |
| <i>Green</i> | G |

EKT pinged:

anoodidel: kuni 3000V -- ostsillograaf.
kuni 30 000V -- TV, kuvarid.

NB!

Näiteks: 10 MΩ:



$$I_{\max} = \frac{30kV}{10M\Omega} = 3mA$$

Paneme 100 MΩ:

$$I_{\max} = \frac{30kV}{100M\Omega} = 0,3mA$$

1910.a. – 1960.a. (50 aastat) –
lampelektronika.

Elektronlambi kesk. eluiga – 500 tundi.
Esimesel numbrilisel (digitaalsel) arvutil (USA) – umbes 2000 lampi. → Arvuti tõrgeteta tööaeg → **15 min.!**

1948.a. – USA – Pooljuhtrioodi leiutamine.
Ge – transistor – D.Bardin, W.Brattain, W.Schokly
→ Nobeli preemia laureaadid.

1949.a. – transistorid NSV Liidus.

1960.a. – kuni tänaseni – transistorelektronika.

1960.a. – 1970.a. – diskreetsed transistorid.

1958.a. – USA – esimesed integraalskeemid (IC),
→ D.Kilby – R.Noice.

1962.a. – algab integraallülituste seeriaootmine.

1970.a. – kuni tänaseni – integraalelektronika.

1970.a. → 10 transistori ühele kristallile.

1987.a. → 1,5 – 2,0 miljonit tr.

2000.a. → **10 miljonit!**

Mis on elektronlülituse element?

- Elektronlamp, kondensaator, induktiivsus, takisti, transistor, diood.

ELEMENDI BAAS:

| | |
|----------------|---|
| I tase | diskreetsed elemendid |
| | ► transistor, diood, L, C, R |
| II tase | võimendid kui tervikud, loogikaelemendid NING, VÕI, EI |
| III tase | triger, kombinatsioonloogika lihtsamad lülitused |
| IV tase | loendurid, registrid. |

Montaaži areng:

- Plekist šassii peale monteeritud elemendid.
- Trükkplaatidel
THT - through hole technology
- Pindmontaaž
SMT - surface mount tecnology

Elektroonika komponendid.

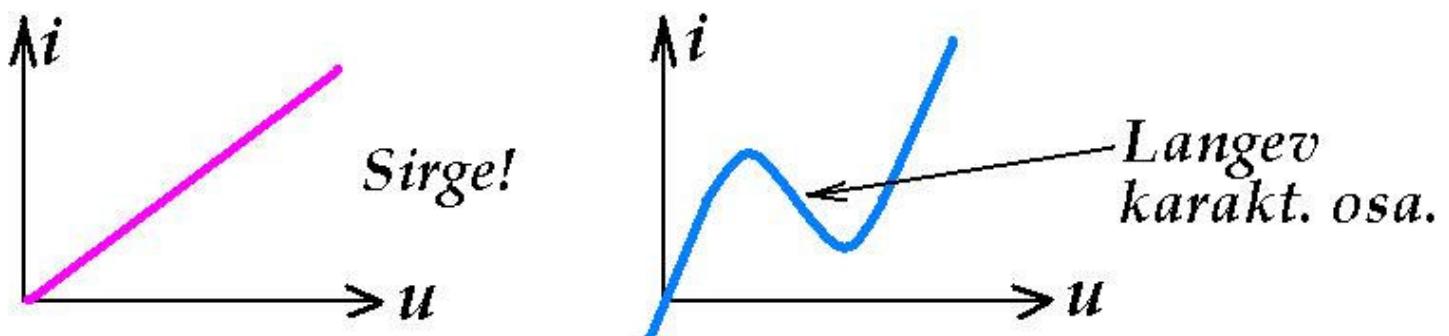
I elemendibaasi tase

Passiivsed elemendid: **R, C, L, trafo**

Aktiiveelemendid → saab teha võimendi → **Transistor.**

Diood → passiivelement? → aktiivelement?

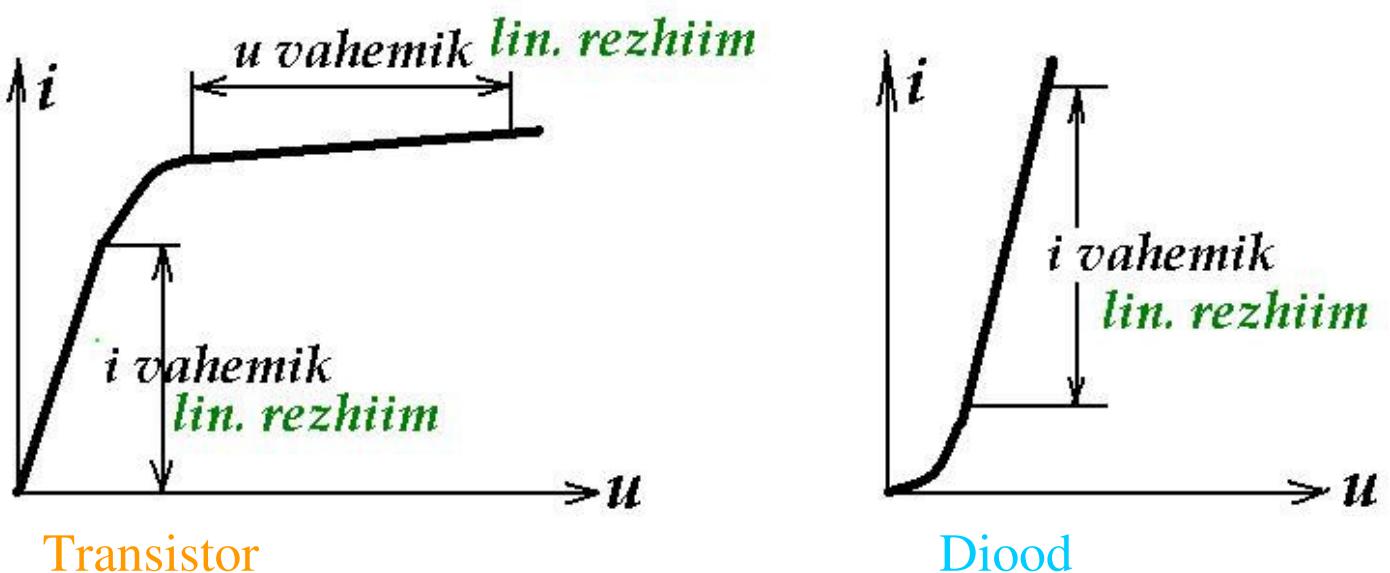
Lineaarsed või mittelineaarsed? → **VAK** järgi!



VAK → volt-amper-karakteristik

Transistor, diood – kõik mittelineaarsed!

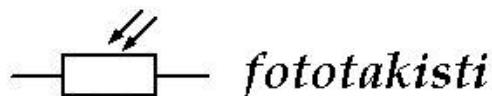
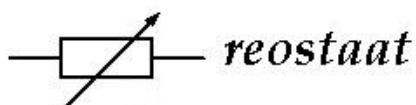
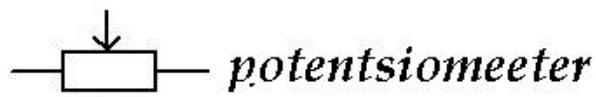
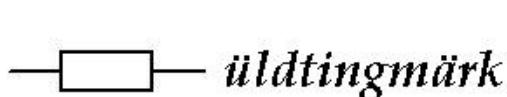
→ Võib kasutada lineaarses režiimis.



2. Elektroonika passiivsed komponendid

Takisti (resistor) – on elektriahela element, mille tähtsaim tunnussuurus on elektriline takistus.

→ voolu piiramiseks, → vajaliku pingelangu või potentsiaali tekitamiseks.



Takistuse muutumise seaduspärasuse järgi: lineaartakisti (läbiv vool on võrdne pingega), mittelineartakisti (takistus sõltub välismõjurist).

Otstarbe ning ehituse järgi: püsitakisti ja muuttakisti.

Takistuskeha kuju järgi: kihttakisti (isoleerainest alus on kaetud takistusmaterjali kihiga), masstakisti (takistuskeha koosneb tervenisti takistusmaterjalist), traattakisti.

Takistusmaterjalid: süsinik, süsiniku ja boori segu, metallsulamid, grafiit, pooljuhtmaterjalid, konstantaan, nikroom.

Tunnussuurused:

Nimitakistus (vastab standardidele, näit. E6, E12, E24.... E192.

Tähele E järgnev number näitab nimiväärtuste arvu reas).

Takistushälve: tavatakitid (ebatäpsed) $\pm 5\%$, $\pm 10\%$, $\pm 20\%$.

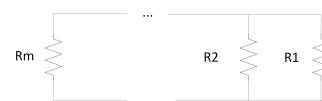
täppistakistid (mõõtmeseadmete jaoks)

$\pm 2\%$, $\pm 1\%$, → $\pm 0,05\%$ (eritellimisel $\pm 0.001\%$)

$$V=RI$$

$$R_{ser}=R_1+R_2+\dots+R_n$$

$$R_{par}=\frac{1}{\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\dots+\frac{1}{R_m}}$$



Nominaalide read:

$\pm 5\%$ rida : (Ω , $k\Omega$, $M\Omega$)

E24: $1,0 - 1,1 - 1,2 - 1,3 - 1,5 - 1,6 - 1,8 - 2,0 \rightarrow 8,2 - 9,1 - 10$

$\pm 10\%$ rida: **E12**: $1,0 - 1,2 - 1,3 - 1,5 - 1,8 \rightarrow 10$

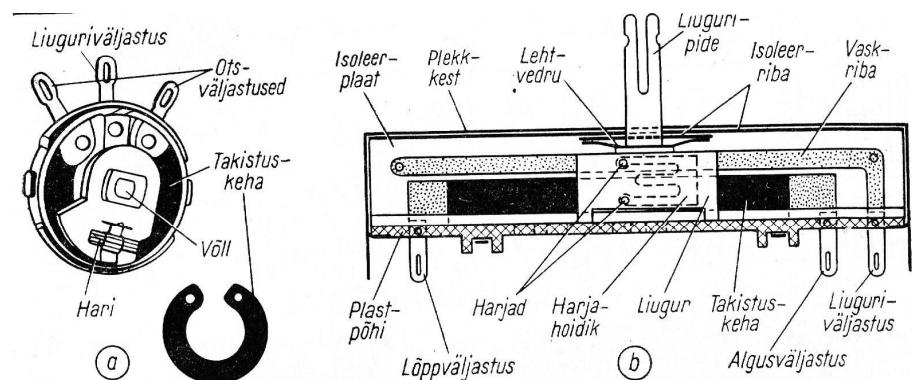
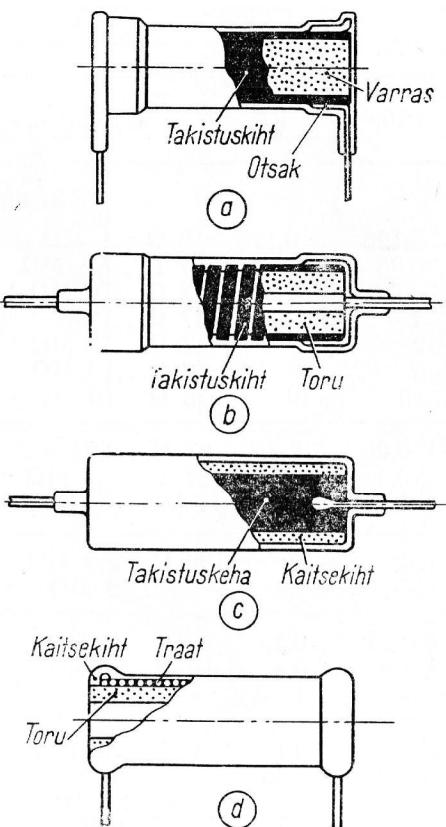
$\pm 20\%$ rida: **E6**: $1,0 - 1,5 - 2,0 \rightarrow 10$

Nimivõimsus (suurim võimsus, millele vastavat soojust on takisti võimeline kestvalt hajutama takisti tüübist sõltuval kõrgeimal ümbrustemperatuuril ilma lubamatult üle kuumenemata) $0,068W \rightarrow 100W$

Suurim tööpinge → kõrgeim pinge, mida takisti kestvalt talub, ilma et tekiks läbilöök.

Takistuse temperatuuritegur → näitab takistuse suhtelist muutust temperatuuri muutumisel 1 K vörra. – (TKC)

$$\frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{100\%}{\Delta T} \left[\frac{\%}{^{\circ}\text{C}} \right] \quad \text{kus } \Delta R \text{ on } \Delta T\text{-st tingitud } R \text{ muutus;} \\ \Delta T - \text{temperatuuri muutus.}$$



Pöördtakisti (a) ja lükandtakisti (b) ehitus

Püsitaristite ehitus: a süsinikihttaristi BC, b metallkihttakisti MJT, c masstaristi C4-1, d traattakisti ПЭ

Resistor Color Code Guide

The diagram illustrates the color coding for resistors. It shows two resistor components: one with four bands (labeled 4-Band-Code) and one with five bands (labeled 5-Band-Code). Brackets indicate how each band corresponds to values in a reference table.

4-Band-Code: The first three bands represent the resistance value, and the fourth band represents the tolerance. The resistor shown has bands: Green (0), Blue (0), Yellow (0), and Brown (5%). The calculated value is $560\text{k}\Omega \pm 5\%$.

5-Band-Code: The first four bands represent the resistance value, and the fifth band represents the tolerance. The resistor shown has bands: Red (2), Green (3), Blue (6), Gold (0.1), and Silver (± 10%). The calculated value is $237\Omega \pm 1\%$.

| COLOR | 1st BAND | 2nd BAND | 3rd BAND | MULTIPLIER | TOLERANCE |
|--------|----------|----------|----------|---------------------|------------------|
| Black | 0 | 0 | 0 | 1Ω | |
| Brown | 1 | 1 | 1 | 10Ω | $\pm 1\%$ (F) |
| Red | 2 | 2 | 2 | 100Ω | $\pm 2\%$ (G) |
| Orange | 3 | 3 | 3 | $1\text{K}\Omega$ | |
| Yellow | 4 | 4 | 4 | $10\text{K}\Omega$ | |
| Green | 5 | 5 | 5 | $100\text{K}\Omega$ | $\pm 0.5\%$ (D) |
| Blue | 6 | 6 | 6 | $1\text{M}\Omega$ | $\pm 0.25\%$ (C) |
| Violet | 7 | 7 | 7 | $10\text{M}\Omega$ | $\pm 0.10\%$ (B) |
| Grey | 8 | 8 | 8 | | $\pm 0.05\%$ |
| White | 9 | 9 | 9 | | |
| Gold | | | | 0.1 | $\pm 5\%$ (J) |
| Silver | | | | 0.01 | $\pm 10\%$ (K) |

Electronix Express / RSR
<http://www.elexp.com>

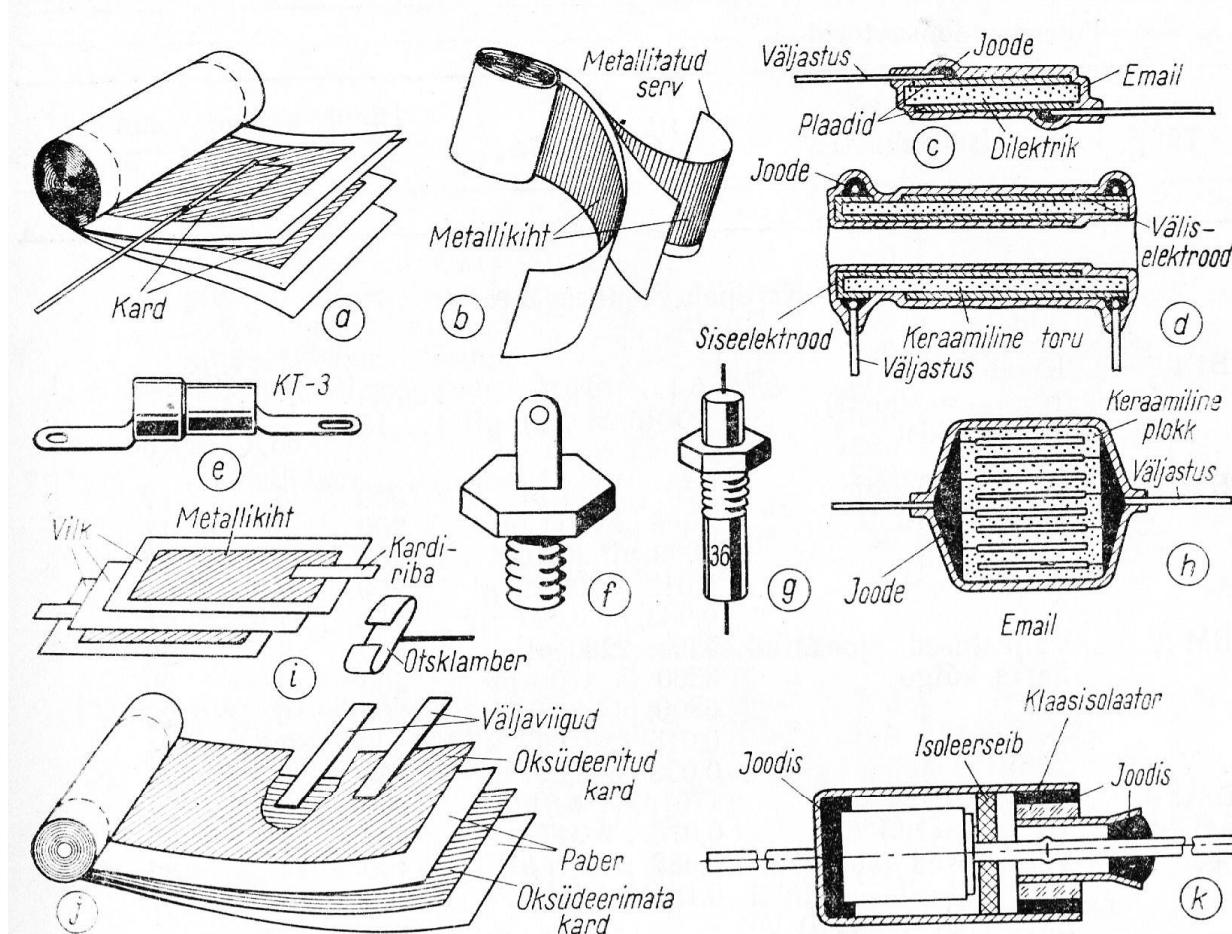
1-800-972-2225
 In NJ 732-381-8020

Kondensaator – on elektriahela element, mille tähtsaim tunnussuurus on mahtuvus.

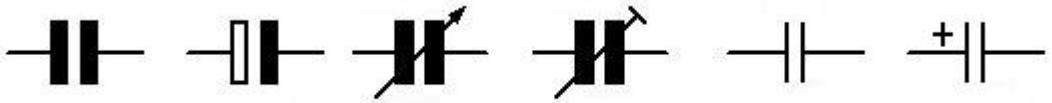
→ elektrienergia salvestamiseks, → vahelduvvooluahelates reaktiivtakistitena
→ reaktiivvõimsusallikatena, → filtrite ja vönkeringide koostisosadena
Kondensaatorid jagunevad püsi- ja muutkondensaatoreiks.

Püsikondensaatoreid liigitakse dielektriku järgi: paber-, plast-, keraamika-,
vilk-, klaas- ja elektrolüütkondensaatoreiks.

Muutkondensaatoreist eristatakse **häälestuskondensaatoreid**
(vönkeringide häälestamiseks vastuvõetava raadiosaatja sagedusele) ja
seadekondensaatoreid (esmahäälestuseks). Ehituselt on nii häälestus kui
seadekondensaatorid enamasti pöördkondensaatorid.



Püsikondensaatorite ehitus: a kardpaber- ja kardplastkondensaatori sektioon, b metallpaber- ja metallplastkondensaatori sektioon, c kettakujuline keraamikakondensaator, d torukujuline keraamikakondensaator, e ülikõrgsageduslik keeraamikakondensaator, f keraamiline tugikondensaator КДО, g keraamiline läbi-viikkondensaator КТП, h keraamiline plokk-kondensaator, i vilkkondensaator, j elektrolüütkondensaatori sektioon, k oksiidpooljuhtkondensaator.



Tingmärgid:

$$C = \epsilon \frac{s}{l} ; \text{ kus } \epsilon - \text{ dielektriline läbitavus;}$$

$$W_C = \frac{CU^2}{2}$$

↑ salvestav energia

Kondensaator alalisvooolul on isolaator!

Kondensaator vahelduvvooolul on reaktiivtakistus.

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{\omega C} ; \text{ kus } f - \text{sagedus, Hz}$$

ω - nurksagedus, (ringsagedus), rad/

Tunnussuurused:

Nimimahtuvus – pikofaradites vastab standardridadele

(elektrolüüt. kond. on oma rida)

Mahtuvushälve - ±5% (E24), ±10% (E12), ±20% (E6)

Elektrolüüt. kond. mahtuvushälbed võivad ulatuda kuni +100%, - 20%.

Nimipige. Mahtuvuse temperatuuritegur. Isolatsioonitakistus.

Elektrolüütkondensaatorid → polaarsed, polariseeritud.

Al, Ta, ... 0,1μF → 100.000μF (→ 10F !!)

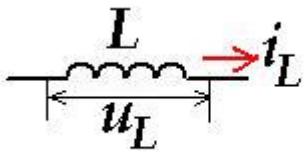
Elektrolüütkondensaatoris toimib dielektrikuna alumiinkarra lindile elektrokeemiliselt tekitatud oksiidikiht. Üheks elektroodiks (anoodiks) on alumiiniumkard ise, teiseks (katoodiks) elektrolüüdiga (näit. boorhappe ja glütseriinitaolise vedeliku seguga) immutatud paber. Katoodiga loob kontakti teine, oksüdeerimata kardlint. Rulli keeratud sektsioon paikneb alumiiniumkestas.

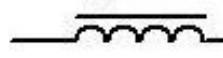
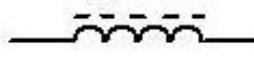
Tähtis! → Tööpinge, → Töötemperatuur (85⁰C, 105⁰C), → Pinge pulsatsiooni suurus.

Induktiivpool (inductor), drossel, mähis

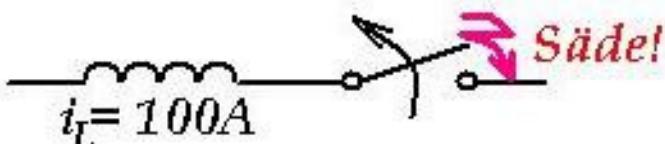
See on elektriahela element, mida iseloomustab induktiivsus või induktiivtakistus.

→ vahelduvvooluahelates reaktiivtakistina, → filtride ja võnkeringide koostisosadena, → voolu kasvukiiruse seadmiseks.

$$W_L = \frac{LI^2}{2} \quad u_L = L \frac{di_L}{dt}$$


 Terasplekist südamikuga  Ferriitsüdamikuga

Ferriit – magn. pulber, kokku pressitud plastikuga.



$$\frac{di}{dt} \rightarrow \infty \rightarrow u_L \rightarrow \infty$$

Alalisvooolul induktiivsus on praktiliselt → lühis.

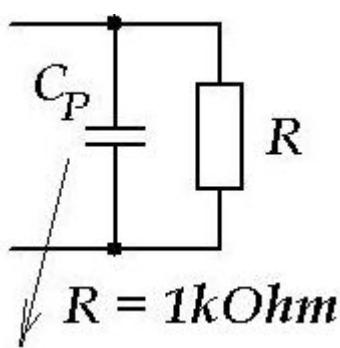
Vahelduvvoolul **L** on reaktiivtakistus:

$$X_L = 2\pi fL = \omega L ;$$

Vahelduvpinge puhul $u = U_m \sin \omega t$ ja X_C, X_L , tekib vahelduvvool:

$$I_m = \frac{U_m}{X_{...}}$$

1. Parasiitmahtuvus takisti juures:



$$C_P = 1\text{pF} (10^{-12}\text{F})$$

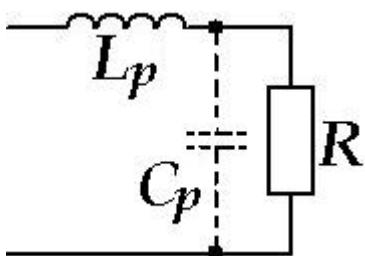
$$X_C = \frac{1}{2\pi f C_P} = \frac{10^{12}}{2\pi f} \approx \frac{10^{11}}{f}$$

Šunteeerib

R-i !

Kui $f = 10^8\text{Hz} = 100\text{MHz} \rightarrow X_C \approx 10^{11}/10^8 = 10^3\Omega = 1\text{k}\Omega$!

2. Parasiitinduktiovsused takisti ja kondensaatori juures:



Meie õnneks L_p -d tuleb arvestada nii kõrgetel sagedustel, mida me oma kursusega ei haara!

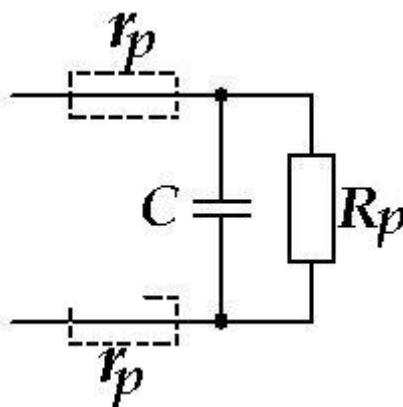
3. Parasiittakistus induktiovsuse ja kondensaatori juures:



→ kaod vases (mähisetraadi takistus)

$r_p \rightarrow$

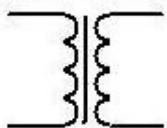
→ kaod rauas (kadudest südamikus)



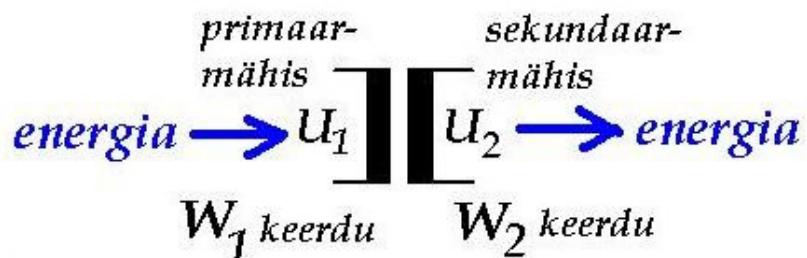
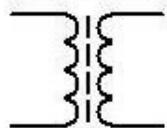
$R_p \rightarrow$ kaod dielektrikus
(suur takistus, ideaalis $R_p \rightarrow \infty$)

Trafo.

**Terasplekist
südamik**



**Ferriidist
südamik**



$$n \rightarrow \text{ülekandetegur}, \quad n = W_2/W_1, \quad \rightarrow U_2 = n \cdot U_1$$

Toitetrafod → vajalike pingete saamiseks võrgupingest ning seejuures ka elektrivõrgu ja toidetava seadme vahelise galvaanilise (vahetu elektrilise) sidestuse katkestamiseks;

Sobituustrafod → signaaliallikat väljundtakistuse sobitamiseks võimendusastme sisendtakistusega (sisendtrafod), võimendusastmete sidestamiseks (sidestuustrafod) ja võimendi väljundtakistuse sobitamiseks koormuse takistusega (väljundtrafod);

Impulsstrafod → lühikeste impusside muundamiseks ja kujundamiseks;

Autotrafod → kui pinget on vaja transformeerida väikeses ulatuses ja sekundaarahel ei pea olema primaarsest galvaaniliselt eraldatud.

Tunnussuurused:

Toitetrafol → primaarpinge U_1 , → sekundaarpinged $U_{2.1}, U_{2.2} \dots$, → sekundaarvoolid $I_{2.1}, I_{2.2} \dots$, primaarvõimsus $S_1 = U_1 I_1$ (I_1 on võrgust tarbiv vool), → sekundaarvõimsus e nimivõimsus $S_2 = U_{2.1} I_{2.1} + U_{2.2} I_{2.2} \dots$, → kasutegur $\eta = S_2/S_1$.

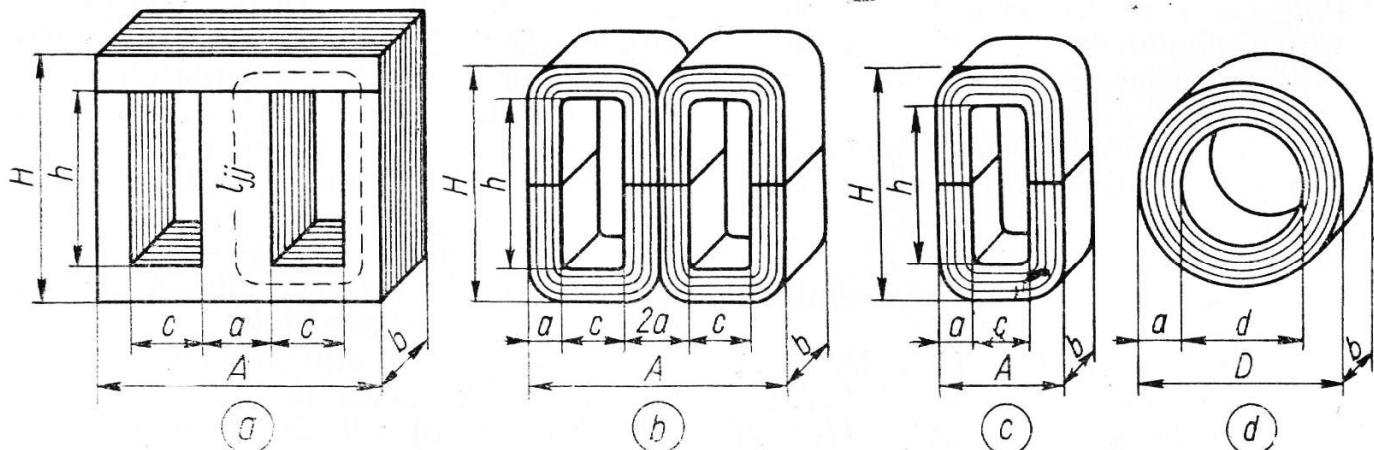
Sobituustrafol → sisendtakistus r_{sis} , väljundtakistus $r_{\text{välj}}$, → sagedusriba $f_{\min} \dots f_{\max}$ (alumise piiri määrab primaarmähise induktiivsus L_1 ja ülemise piiri trafo oma mahtuvus C_0).

Impulsstrafol → transformeeritava impulsi ning selle esi- ja tagakülje kestus.

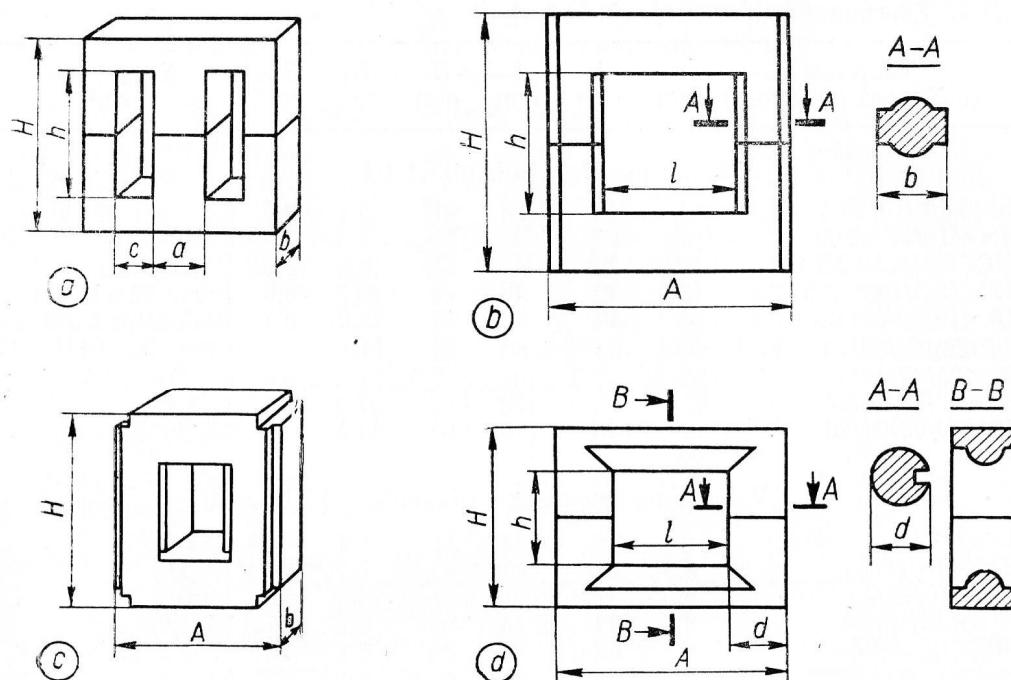
Trafode südamikud → enamasti **elektrotehnilisest terasest**, millel on suur magnetiline läbitavus ja väike teraseskadu.

Väikese võimsusega sobitus- ja impulsitrafode südamikud tehakse **permalloit** (nikli ja raua sulam).

Kõrgsagedus-sidestustrafode ja impulsitrafode südamikud valmistatakse **ferriidist**.



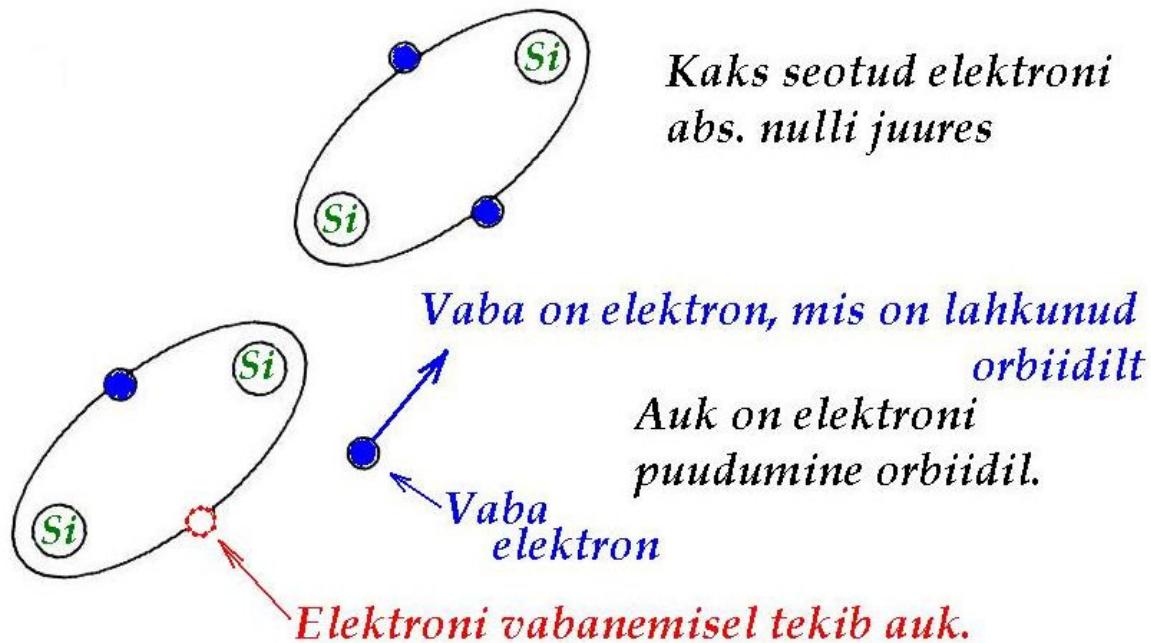
Hargneva (a, b) ja hargnematu (c, d) magnetahelaga südamikud:
a plaatmantelsüdamik, **b** lintmantelsüdamik, **c** lintvarassüdamik, **d** lintrõngas-
 südamik



Ferroidist mantelsüdamik (a) ja varrassüdamikud teleri realaotustra-
 fole (b, c, d)

3. Pooljuhtseadised

Pooljuhtdioodid.



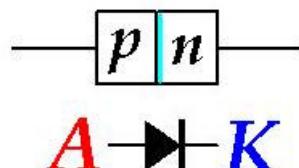
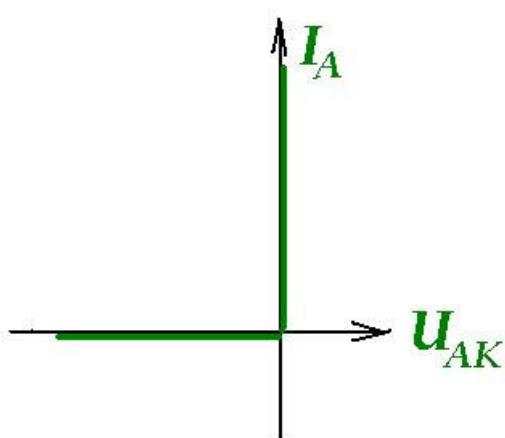
Elektron – negatiivse laengu kandja.

Auk – positiivse laengu kandja.

IV – Ge, Si; V – As, P; III – Al, Bo

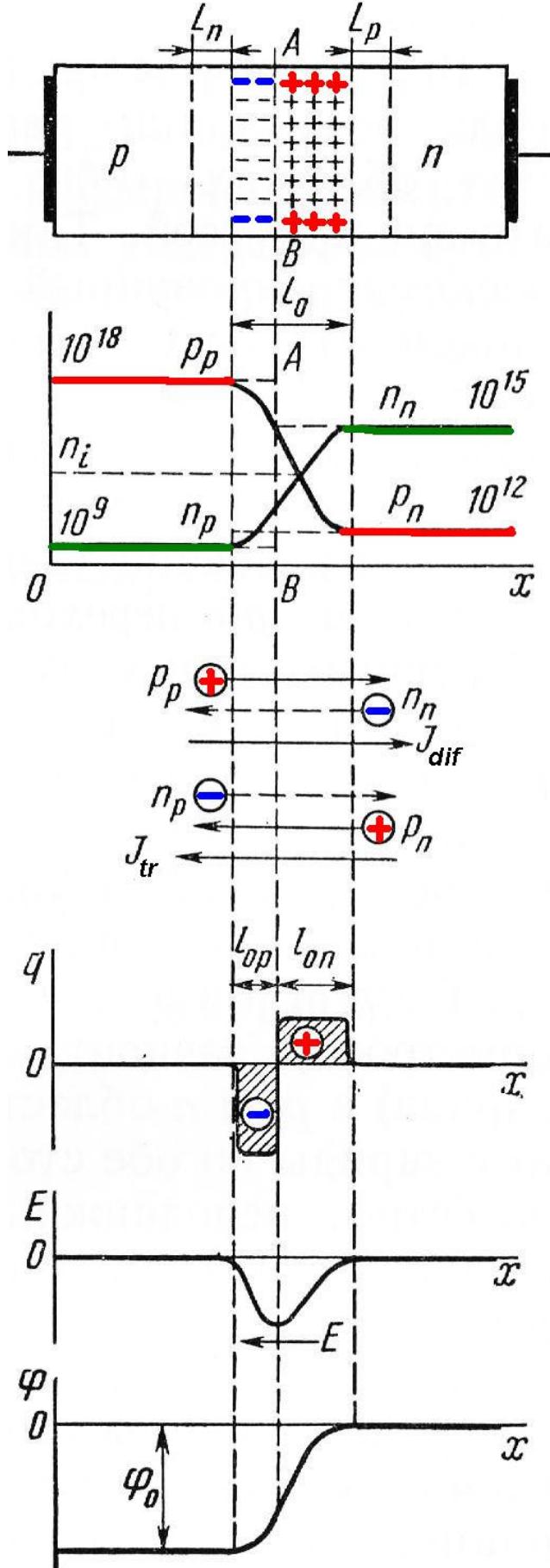
Pooljuhtdiood

Ideaalse ventiili VAK



Alalдava siirde tekkimise tingimus
 $P_p \gg n_n$

Protsessid pooljuhtdioodis, kui välispinge puudub:



$$\underline{P_p \gg n_n}$$

l_0 – siirde laius

$$n_n P_n = P_p n_p = P_i n_i$$

$[cm^{-3}]$

$P_i n_i$ – omakontsentratsioonid
puhtpooljuhis

Φ_0 - potentsiaaltõkke kõrgus
(kontaktpotentsiaal)

$$\Phi_0 = \varphi_t \ln \frac{P_p}{P_n} = \varphi_t \ln \frac{n_n}{n_p}$$

φ_t - temperatuuripotentsiaal

$$\varphi_t \approx 25 \text{ mV}$$

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ – Boltzmanni

[J/K] - konstant

q – laengukandja laeng

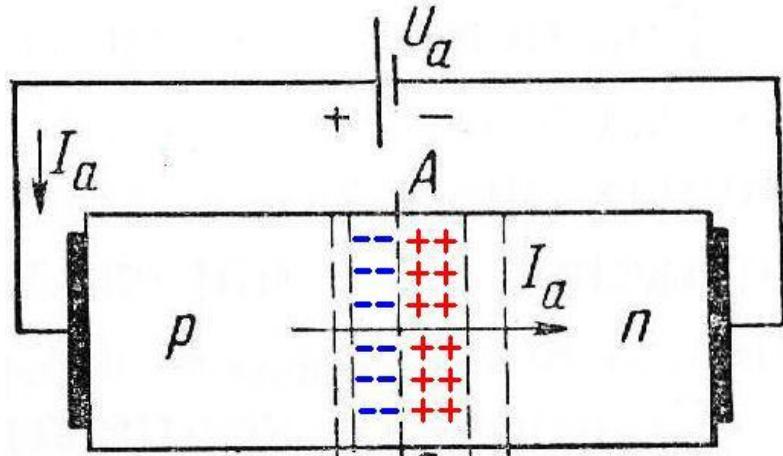
J_{dif} - diff. voolu tihedus

J_{tr} - triivivoolu tihedus

$$\underline{J_{dif} = J_{tr}}$$

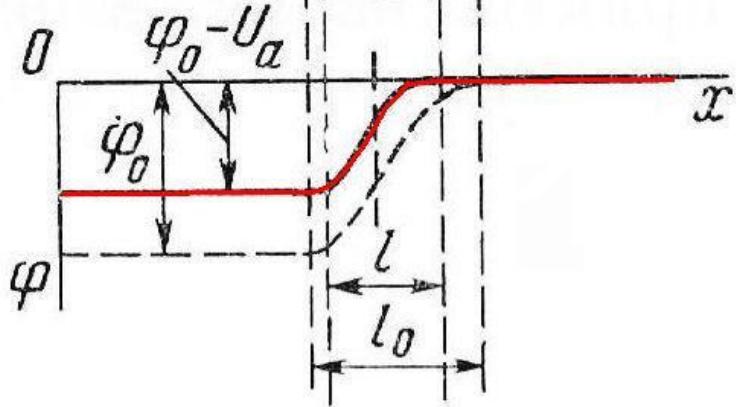
$$\varphi_t = \frac{kT}{q}$$

Pingestame pärisuunas!



- Ruumiliste laengute Q vähenemine
- P-n – siirde laiuse vähenemine n – kihi arvel

Dünaamiline tasakaal kaob!

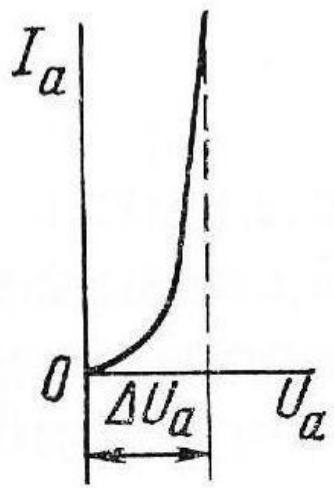


$$\rightarrow J_a = \uparrow J_{\text{dif}} - \downarrow J_{\text{tr}}$$

$$I_a = J_a S$$

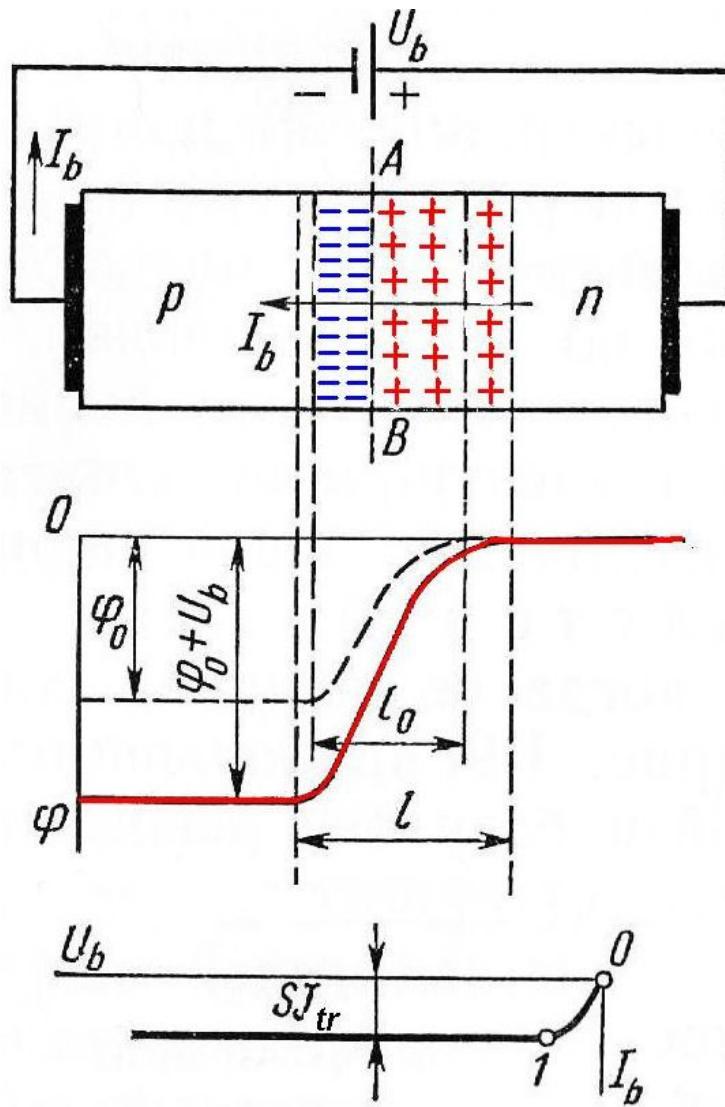
S - siire ristlõige
 $\Delta U_a \rightarrow$ päripingelang

G_e dioodidel → 0,3 – 0,6 V
 Si dioodidel → 0,8 – 1,2 V



$U_0 \rightarrow$ lävepinge
 G_e → 0,25 – 0,3 V
 Si → 0,6 – 0,7 V

Katkematu aukude diffusioon (läbi p-n siirde) ja nende rekombinatsioon tekitab elektronide juurdevoor pingegallika „miinuse“ poolt.

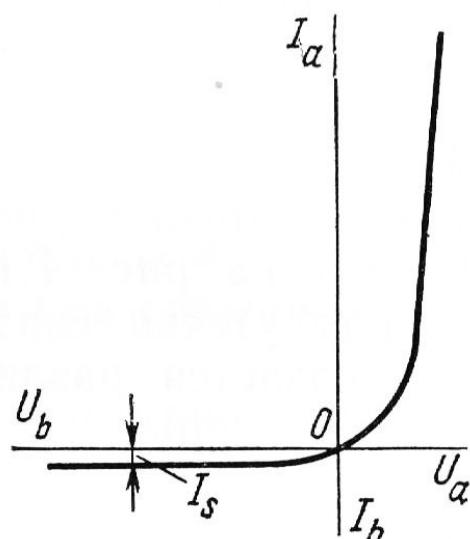


Pingestame vastassuunas!

Dünaamiline tasakaal kaob!

$$J_b = \uparrow J_{tr} - \downarrow J_{dif}$$

φ_0 – on kasvanud ja takistab enamuslaengukandjatele (augud) siirdest läbiminekut. Diff. komponent langeb, vool läheb vastassuunas.



Vool pärisuunas → enamuslaengukandjad, vool vastassuunas → vähemuslaengukandjad.

$P_p \gg n_n$
→ ventili omadused

$$I_a = I_s \left(e^{\frac{U}{\varphi_t}} - 1 \right)$$

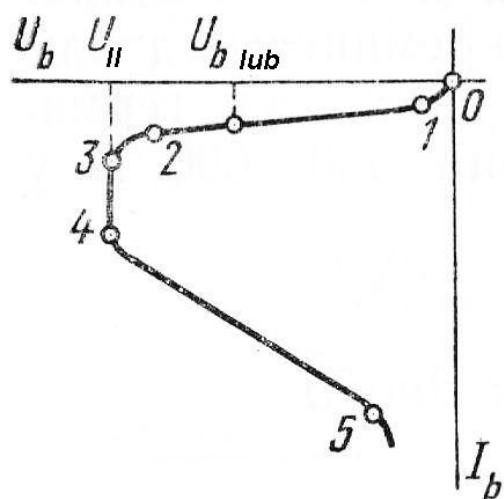
← eksponent!

$I_s = SJ_{tr}$ → soojuslik vool

$$U = 0 \rightarrow I_0 = 0$$

$$U_a > 0 \rightarrow \exp$$

$$U_b < 0 \rightarrow I = -I$$

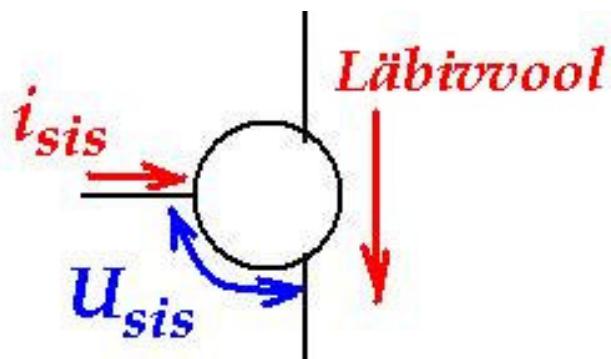


3 – 4 → elektriline läbilöök, 4 – 5 → termiline läbilöök.

Transistorid: kaks põhitüüpi:

→ bipolaarsed

→ unipolaarsed (väljatransistorid)

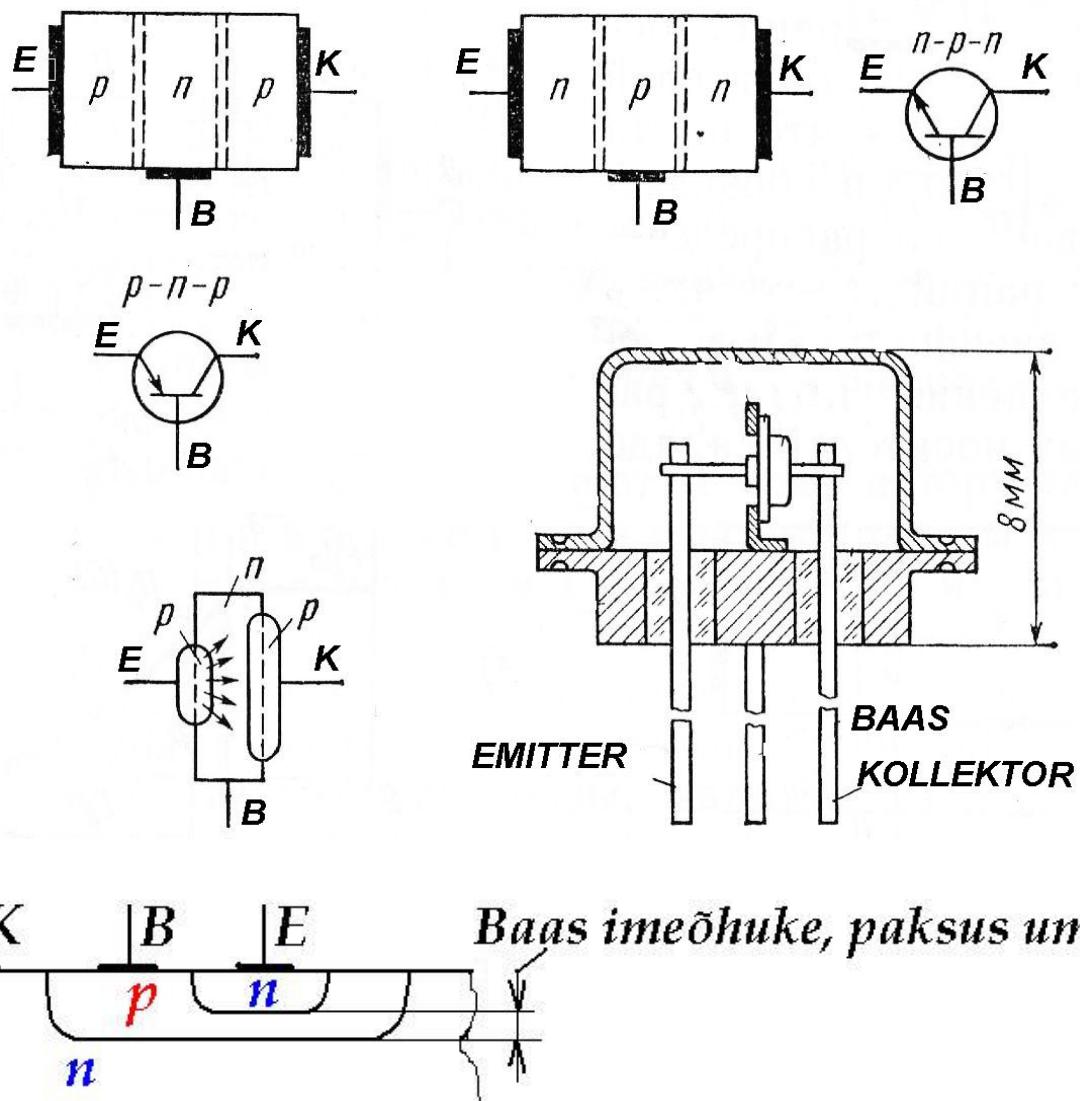


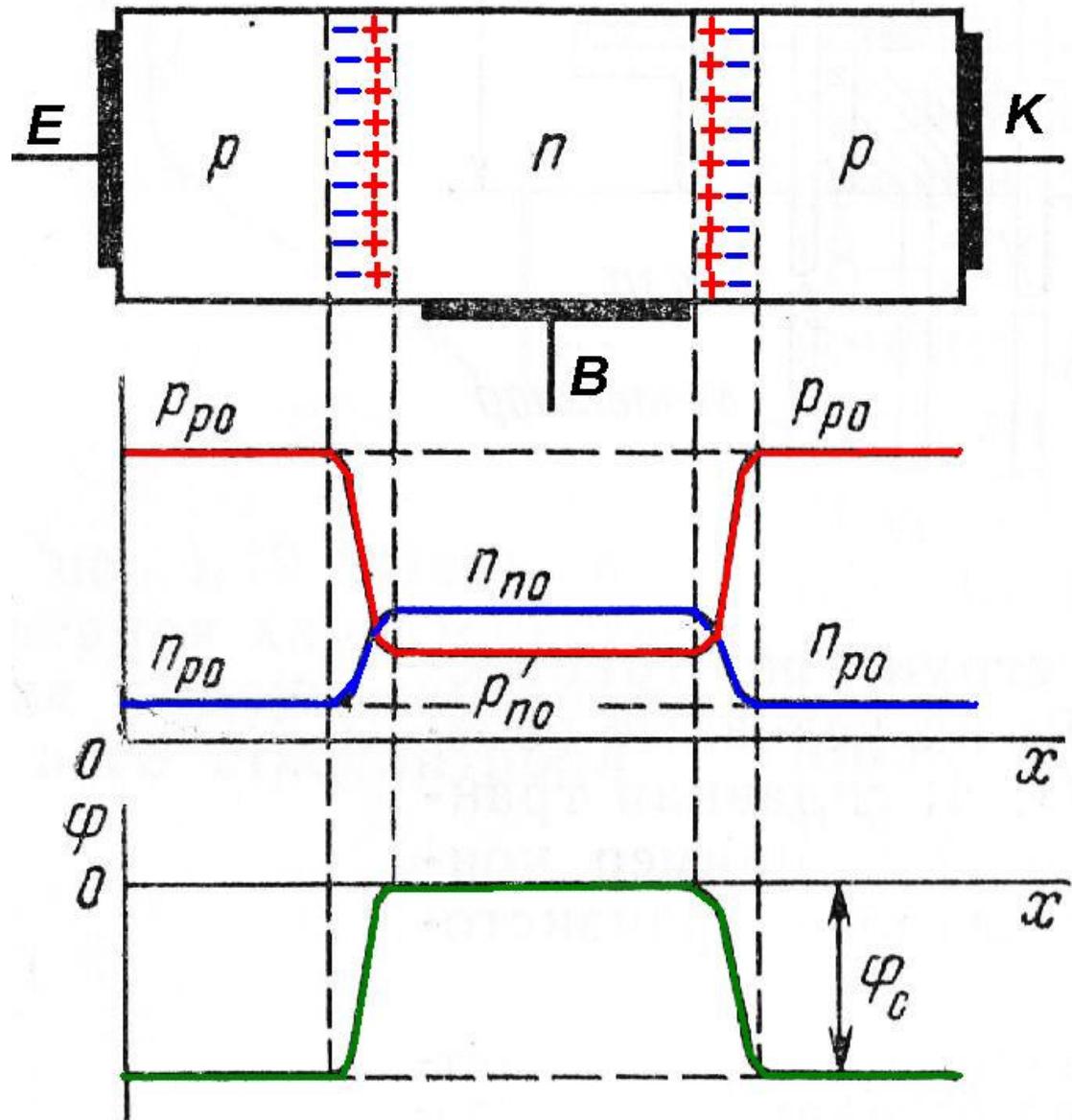
Otstarve:

reguleerida läbivvoolu sisendpingega U_{sis} või sisendvooluga i_{sis}

Bipolaartransistor.

- kasutamisel mõlema märgi laengukandjad (augud ja elektronid)
- kolmekihiline, 2-ga p-n – siirdega seadis





Tingimus: $P_p \gg n_n$

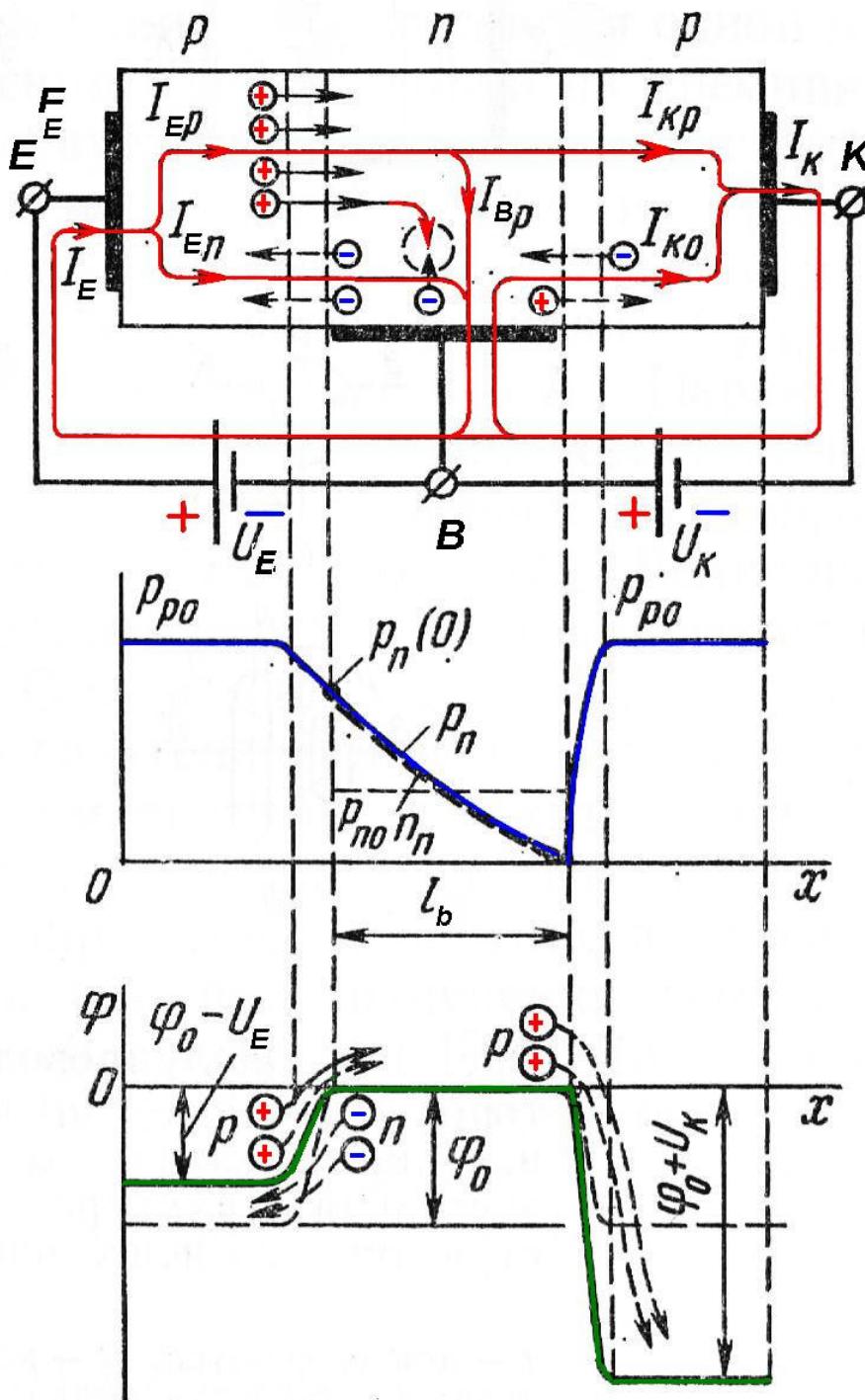
Väline elektriväli puudub!

→ Dünaamiline tasakaal →

P-n – siirdeid läbivate diffusioon- ja triivivoolude võrdsus.

$$\mathbf{J}_{\text{diff}} = \mathbf{J}_{\text{tr}}$$

Bipolaartransistor elektriahelas



Rakendame:
 U_E – pärisuunas,
 U_K – vastassuunas.

Emitter injekteerib
positiivsed
laengukandjad (augud)
baasi.

$$I_E = I_{Ep} + I_{En}$$

I_{En} ei leia kasul. tarvit.

$$\gamma = I_{Ep}/I_E$$

→ injektsioonitegur
(0.995)

→ rekombinatsioon

Elektronid
rekombinatsiooniks
tulevad baasiahelast ja
moodustavad
baasivoolu I_B .

$$I_{Ep} = I_{Kp} + I_{Bp}; \quad \partial = I_{Kp}/I_{Ep} \rightarrow \text{ülekandetegur } (0,996),$$

näitab, palju auke on jõudnud kollektorini.

Bipolaartransistor – vooluga tüüritav seadis!

Välispinge eesmärk on organiseerida transiitne laengukandjate voog.

Vooluülekandetegur $\alpha = I_{Kp}/I_E$

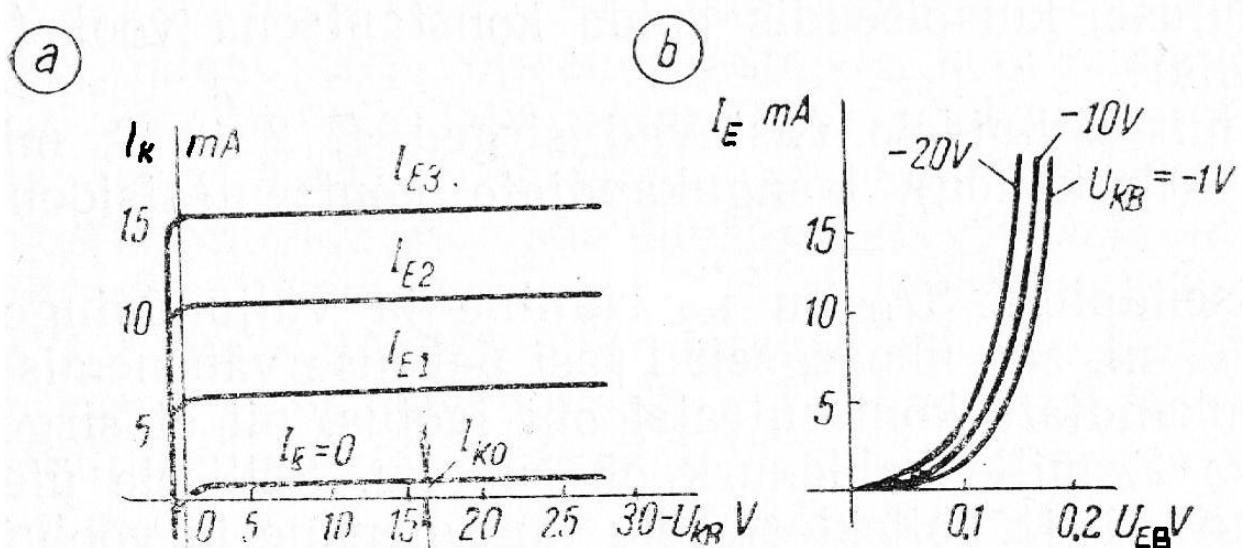
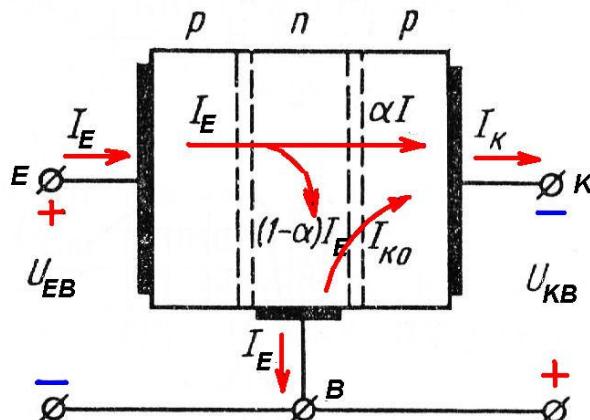
$$\alpha = (I_{Ep}/I_E) \cdot (I_{Kp}/I_{Ep}) = \gamma \partial$$

Kuna kollektorsiire on vastupingestatud, tekib vastuvool I_{K0} , mis sõltub temperatuurist. $\rightarrow I_{K0}$ – soojuslik vool.

$$I_B = I_{En} + I_{Bp} - I_{K0}$$

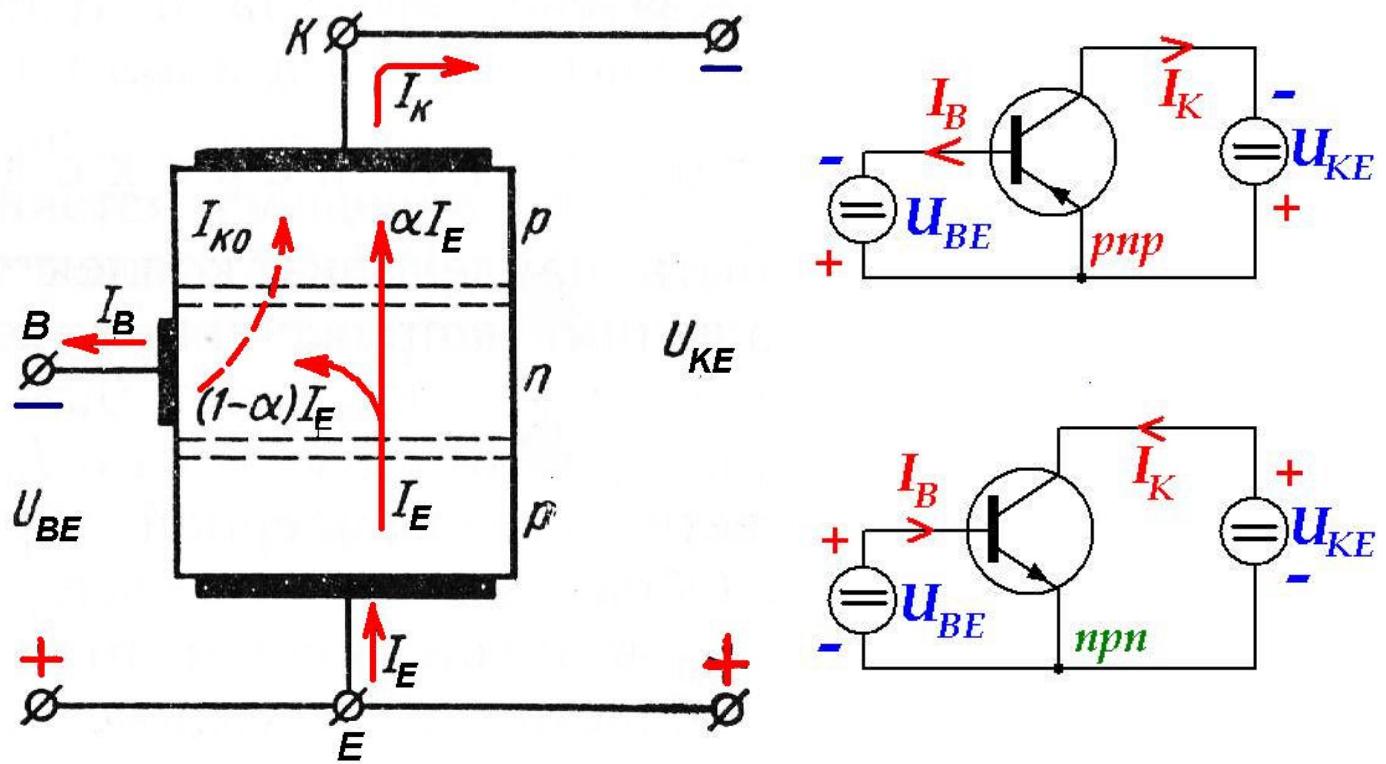
$$I_E = I_K + I_B \quad I_K = \alpha I_E + I_{K0} \quad I_B = (1 - \alpha) I_E - I_{K0}$$

ÜB – lülitus



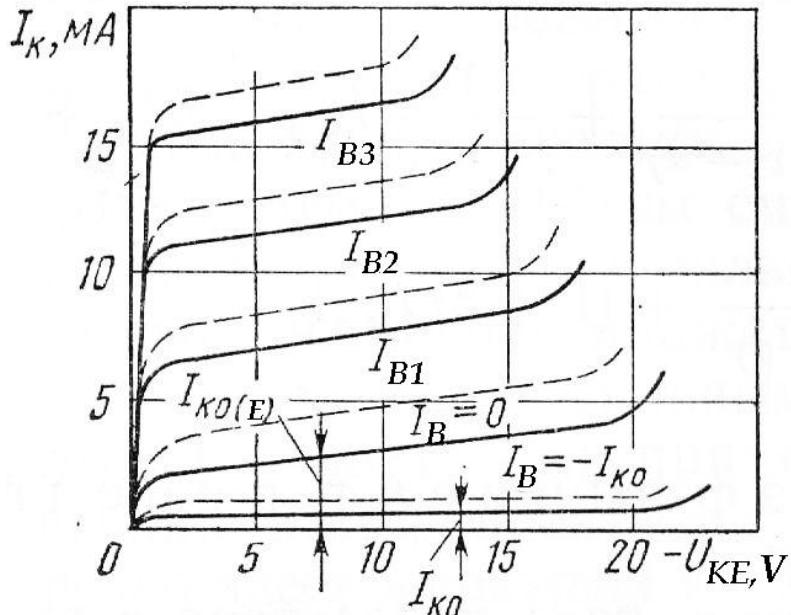
ÜB-lülituses transistori väljund- (a) ja sisend-karakteristikud (b)

ÜE – lülitus.

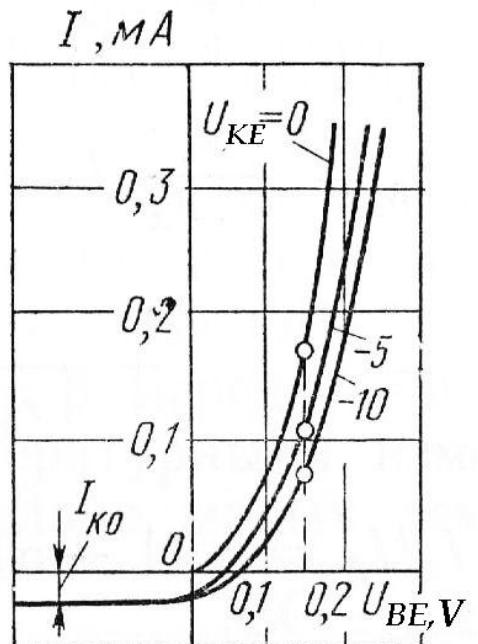


$$I_K = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_B + \frac{1}{1-\alpha} I_{K0} = \beta I_B + (1+\beta) I_{K0}$$

$$\text{kus } (1+\beta)I_{K0} \rightarrow I_{K0(E)} \quad \text{ja} \quad \beta = \frac{I_K}{I_B} = \frac{\alpha}{1-\alpha}$$



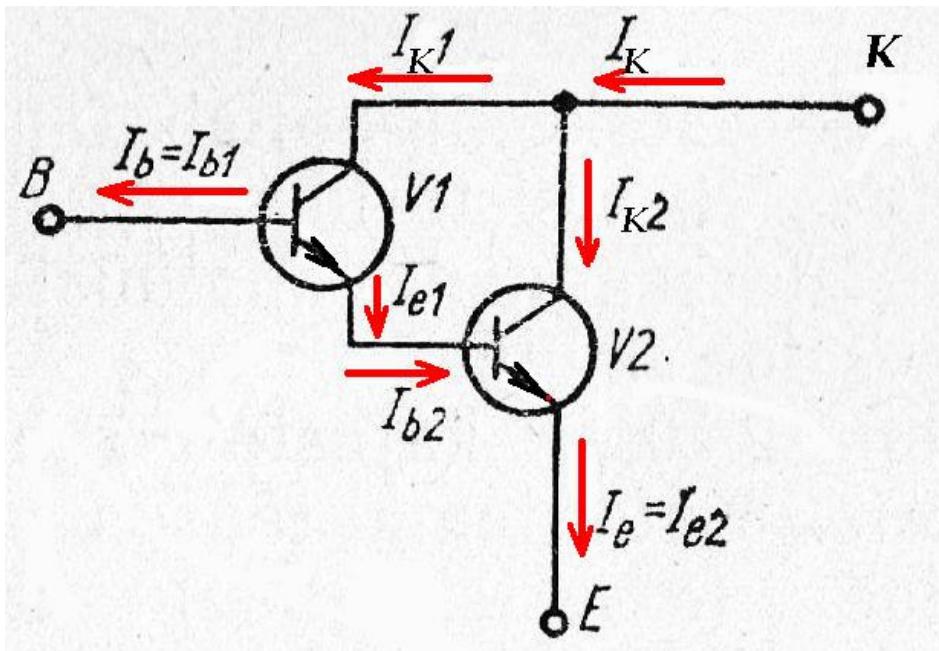
Väljundkarakteristikud



Sisendkarakteristikud

Kui $U_{KE}=0$, siis kollekt. siire pinge $\rightarrow U_{BE}$ ja kollekt. siire injekteerib auke baasi, $\rightarrow \sum I_K = 0$.

BP liittransistor (Darlington`i lülitus).



Üldine voolu ülekandetegur:

$$\beta = \beta_1 + \beta_2 + \beta_1\beta_2; \text{ kuna } \beta_1 \gg 1; \beta_2 \gg 1 \text{ siis } \underline{\underline{\beta \approx \beta_1\beta_2}}$$

Transistori parameetrid (ÜE) \rightarrow h – param. süsteemis:

$h_{21E} = \Delta i_K / \Delta i_B \approx i_k / i_B \rightarrow$ vooluvõimenduse tegur;

$h_{11E} = \Delta U_{BE} / \Delta i_B \rightarrow$ transistori sisendtakistus – leitakse kui diferentsiaalne takistus sisendkarakteristikult.

$$h_{21E} = 50 - 250 \rightarrow \text{tavaliselt.}$$

Võib olla $h_{21E} = 30 - 3000 \rightarrow$ Tehnoloogia
“superbeta”

$$h_{21D} = 500 \dots$$

Väljatransistorid (unipolaarsed), FET

Väljatransistoris liiguvad ühenimelised laengukandjad kanalis, mille juhtivus muudetakse elektrivälja abil.

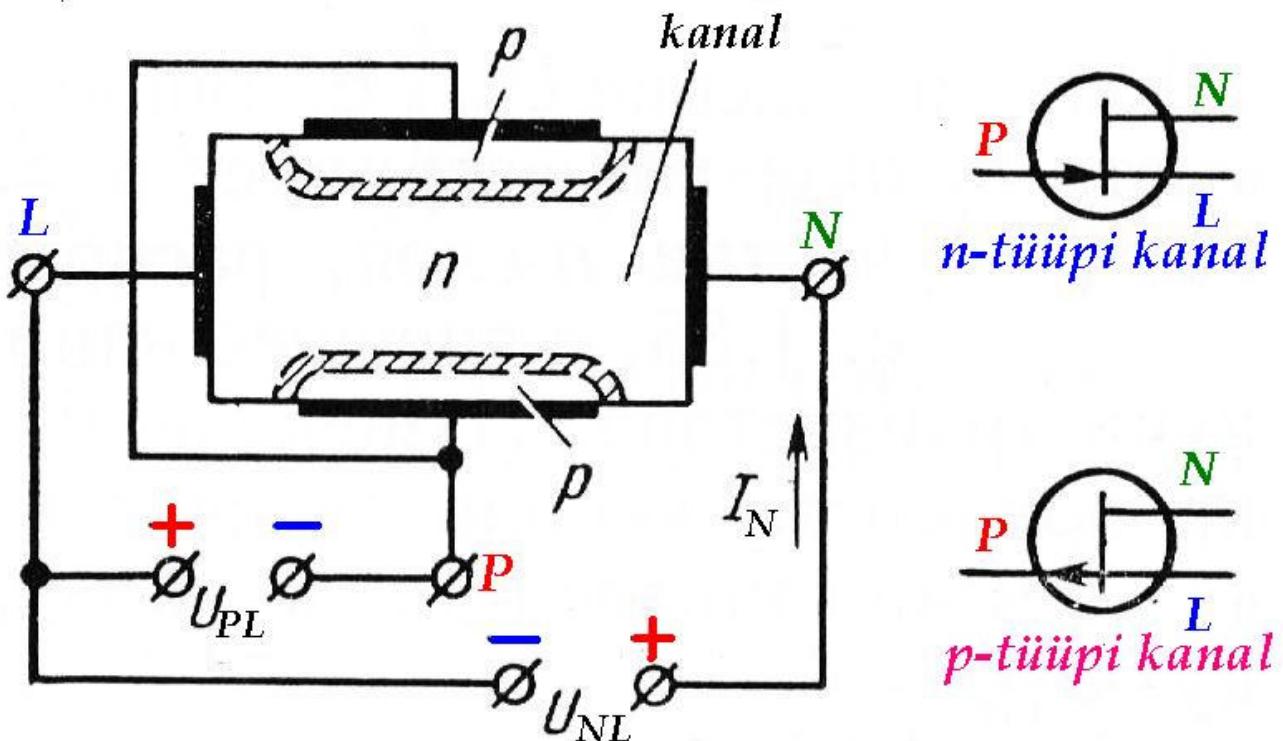
Väljatransistorid:

→ p-n – siirdega, → isoleeritud paisuga.

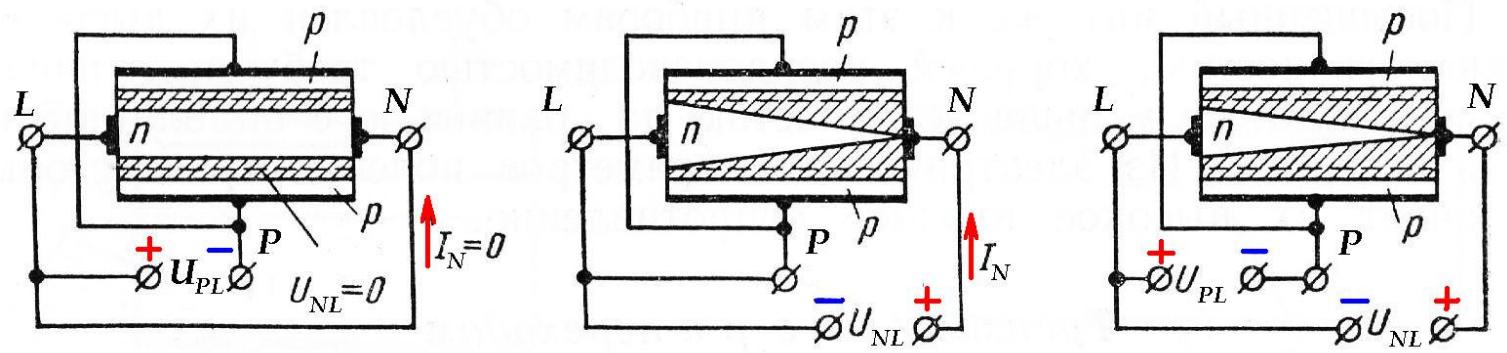
Pais, Gate, Затвор, Lätte, Source, Исток, Neel, Drane, Сток

Mida laiem vaesunud ala, seda kitsam kanal, seda väiksem vool voolab läbi kanali. Vaesunud alas on vähe voolukandjaid.

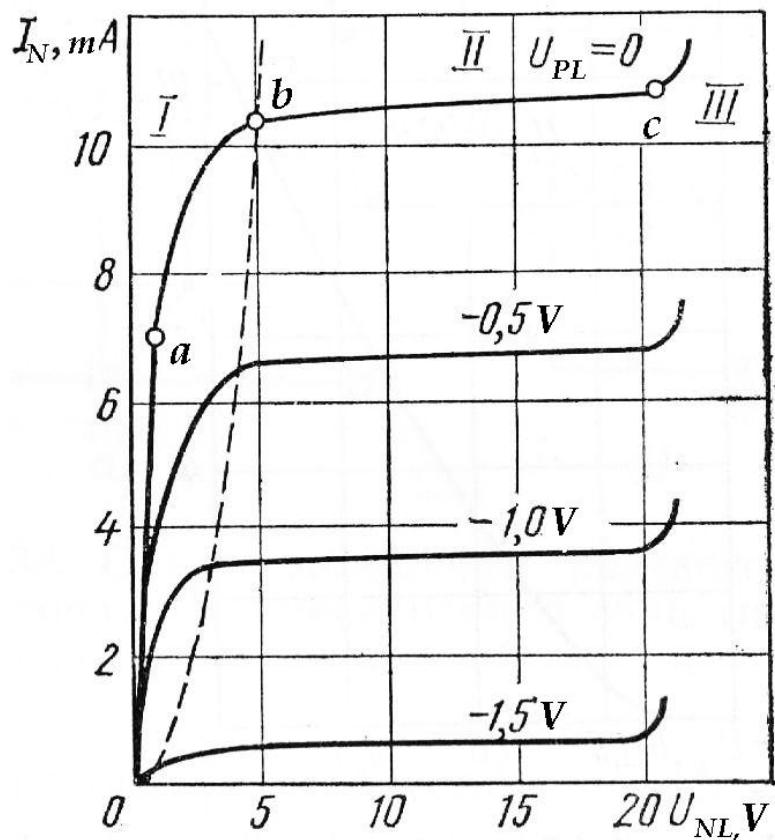
p-n – siirdega väljatransistor.



p-n – siire on alati vastupingestatud!



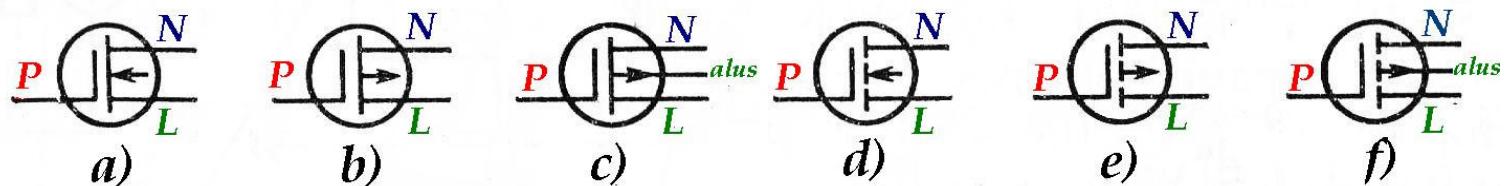
Mida kõrgem vastupinge p-n – siirdel, seda laiem on vaesunud ala.



Isoleeritud paisuga väljatransistorid (MOP- transistorid).

→ Formeerkanaliga (sisseehitatud kanal)

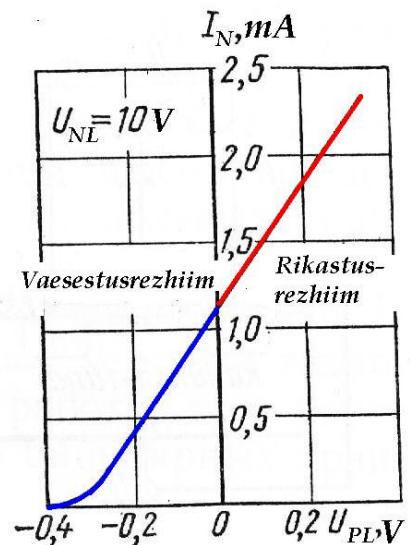
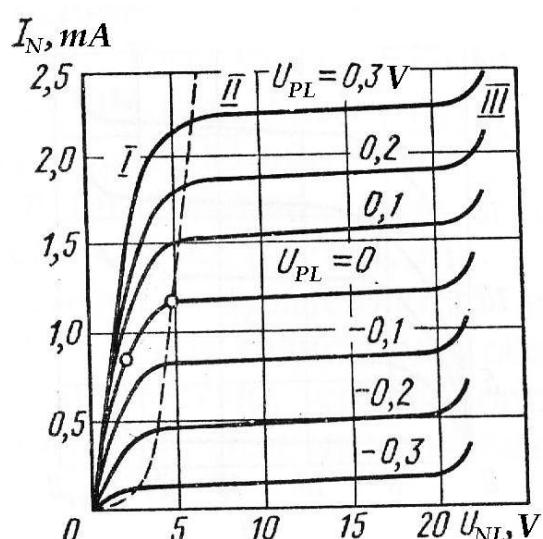
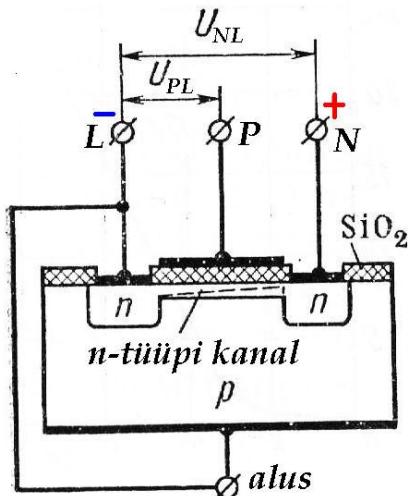
→ Indutseerkanaliga



Formeerkanaliga MOP- transistor

$$R_{SIS} \rightarrow 10^{12} - 10^{14} \text{ Ohm.} \quad \text{Isolaator} \rightarrow \text{SiO}_2$$

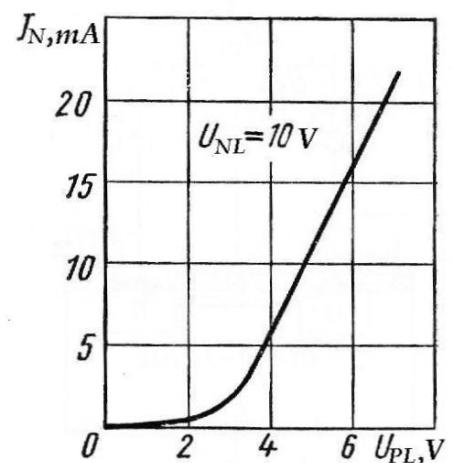
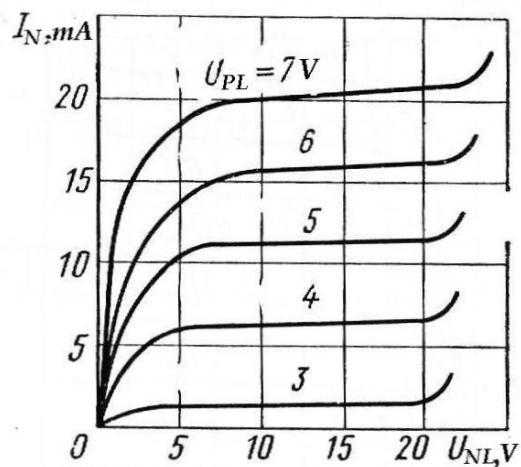
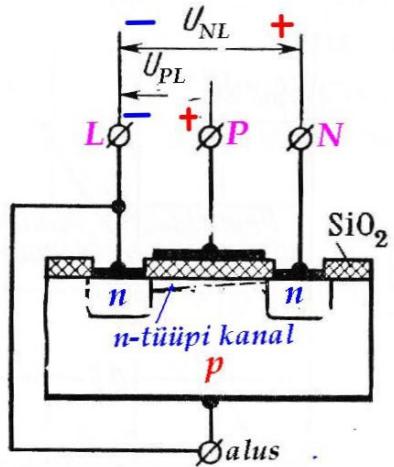
Alus tavaliselt on ühendatud lättega.



n- kanal ühendab taskud valmistamise hetkest alates. Paisupinge abil vaid laiendame või kitsendame seda kanalit. U_{PL} pingे mõju all muutub paisualuse kihi juhtivus.

n- kanali ja p- tüüpi aluse vahel → p-n – siire.

Indutseerkanaliga MOP- transistor (n- tüüpi kanal).

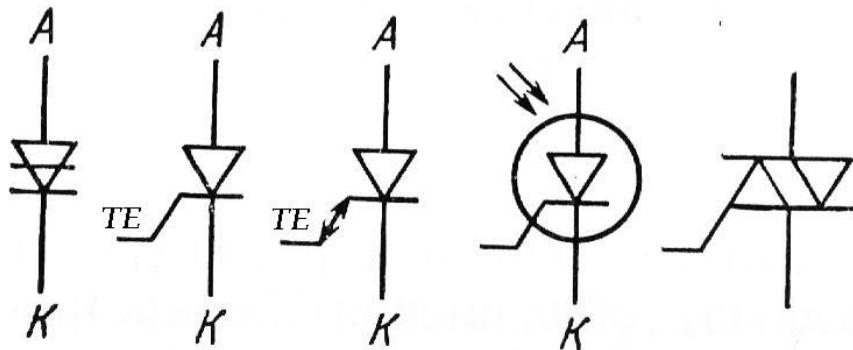


Kristallis on 2 taskut.

Paisule antakse positiivne pinge. Vabad elektronid kogunevad paisu alla. n- alas tekib ühendatav kanal. Seal saab voolata läbivvool.

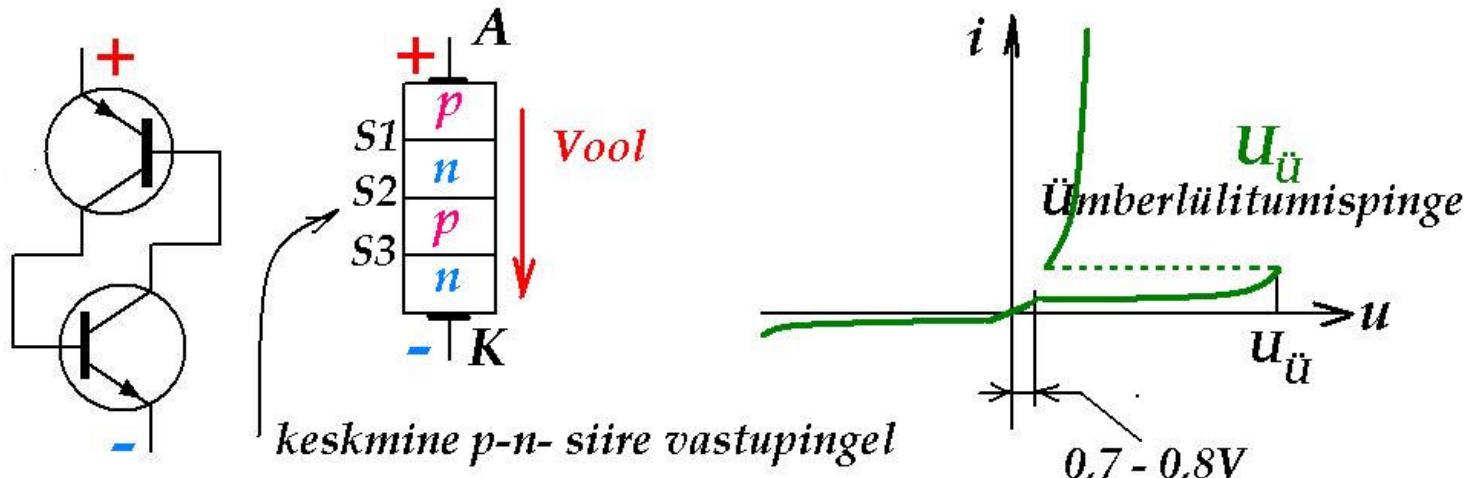
Türistorid.

→ Vahendid voolu sisse- (välja) lülitamiseks. Kasutusel jõuelektronikas (energeetilises elektroonikas).



Türistoril on neljakihiline pnpn – struktuur.

Diood – türistor (Dinistor) → mittetüüritav seadis.



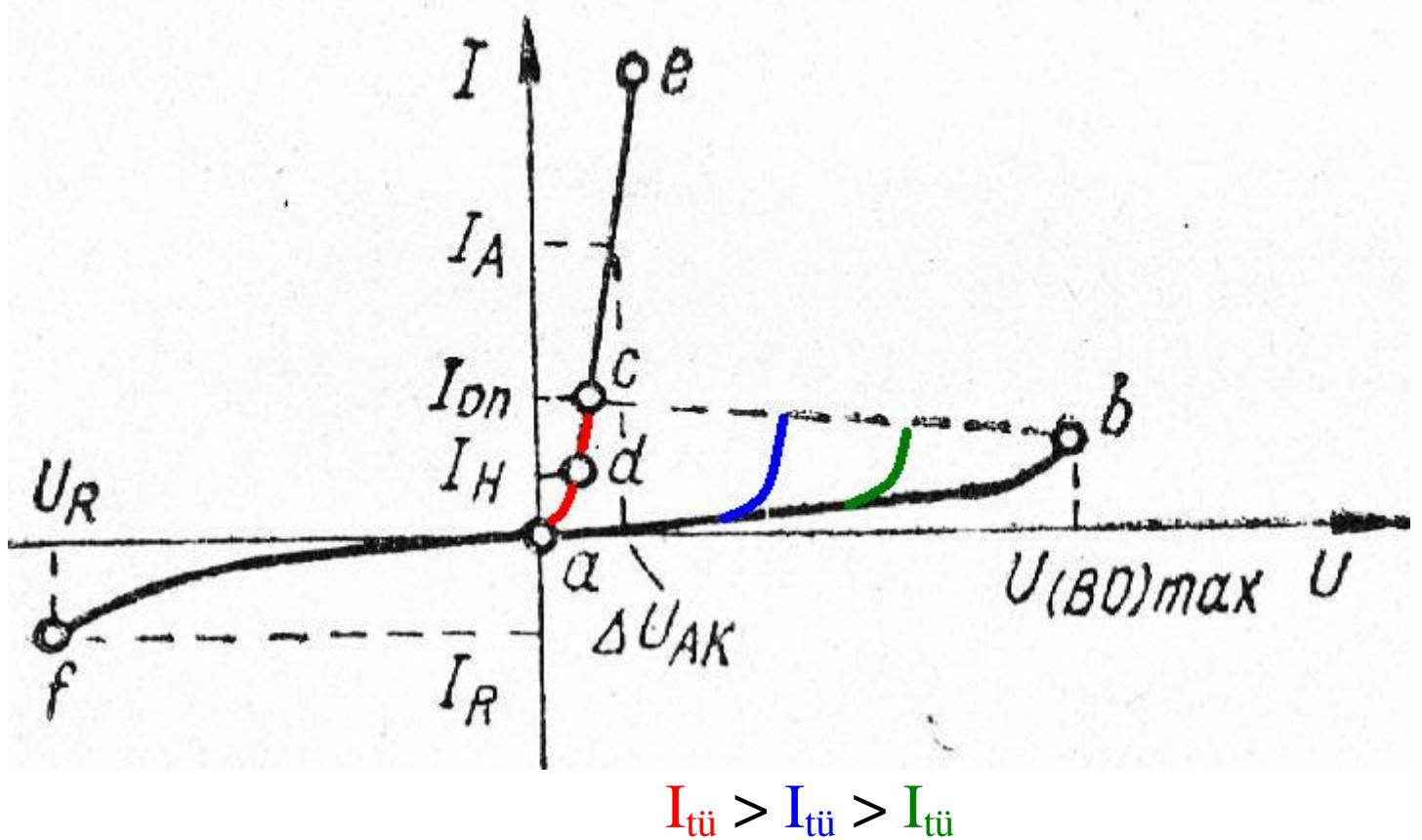
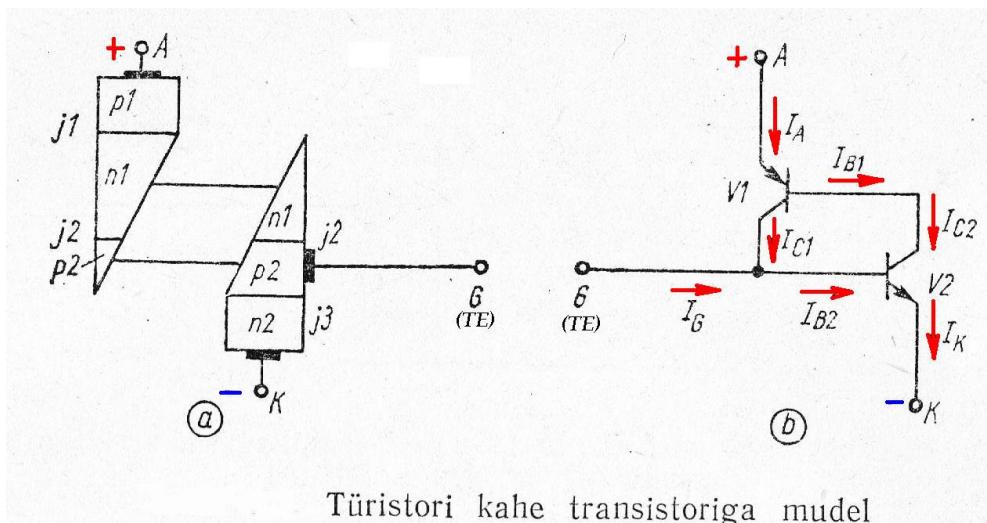
Türistoril on sisemine positiivne tagasiside.

$$I_a = \frac{I_K}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}$$

$I_K \rightarrow S_2$ soojuslik vastuvool I_{K0} ; $\alpha_1, \alpha_2 \rightarrow$ elementaarsete transistoride vooluülekandetegurid.

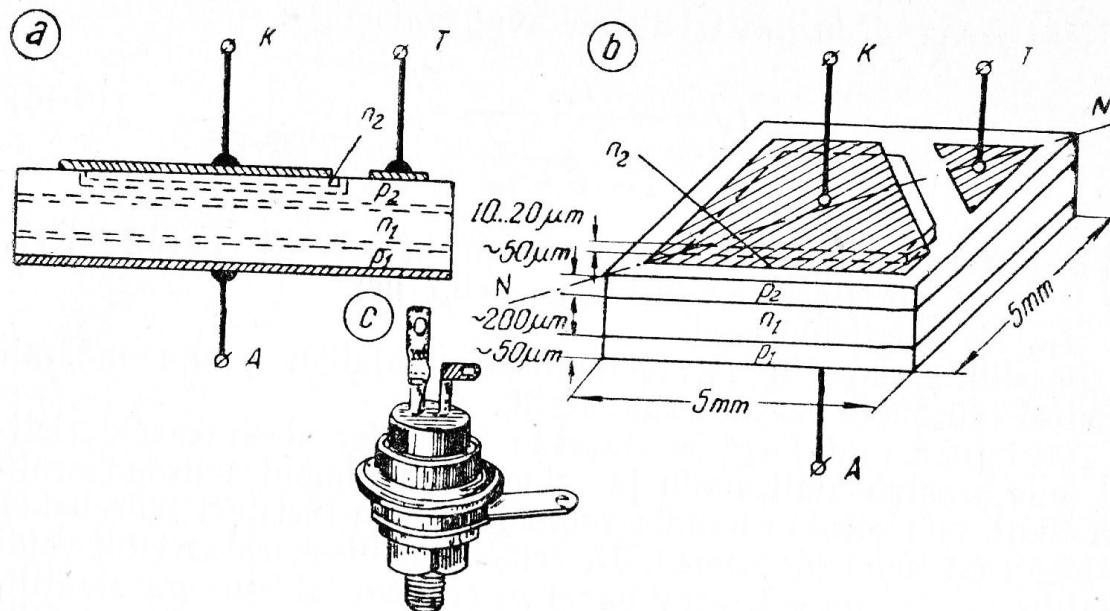
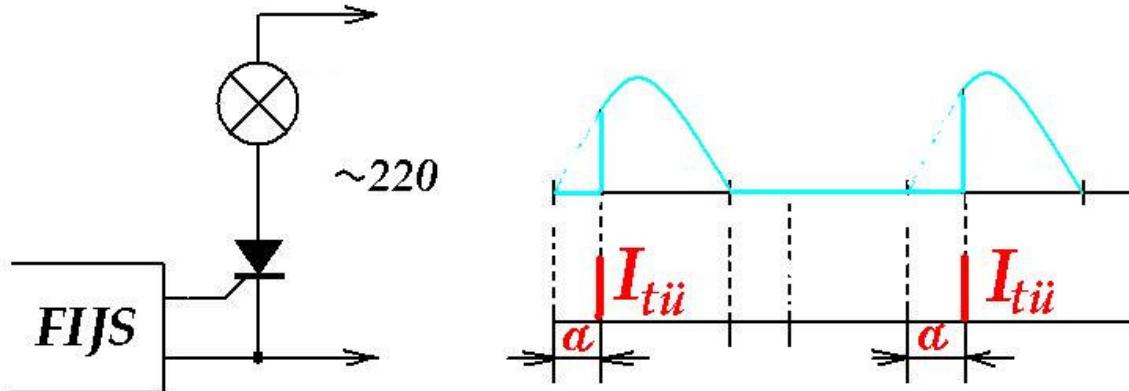
Türistori väljalülitamine (kui ta töötab alalisvoolu ahelates) - ainult toitepinge mahavõtmisega!

Triood – türistor (Trinistor) → tüüritav seadis.



Tüürvoolu sisseandmine vähendab $U_{\text{Ü}}$ pingे suurust.

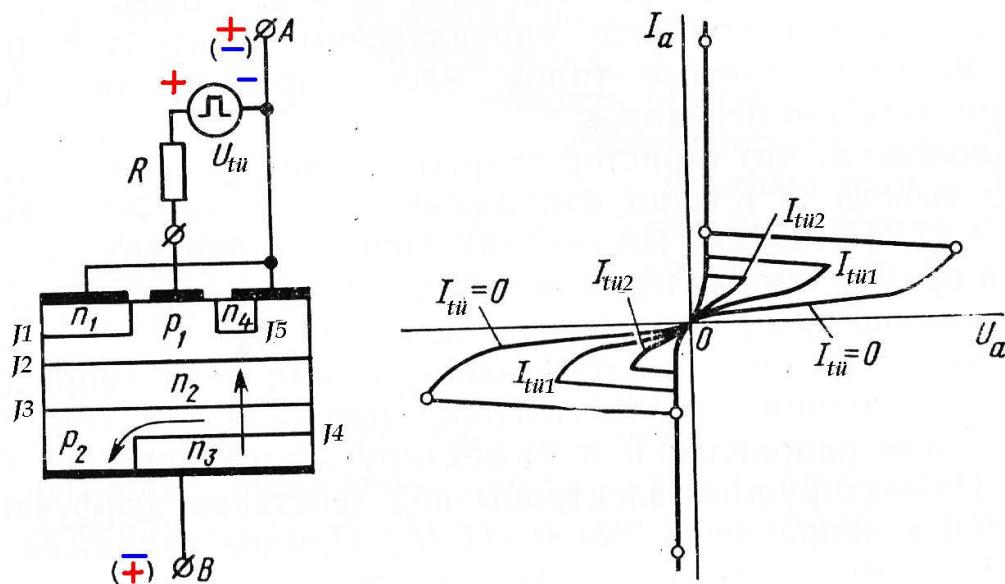
Türistori töö vahelduvpinge regulaatori skeemis:



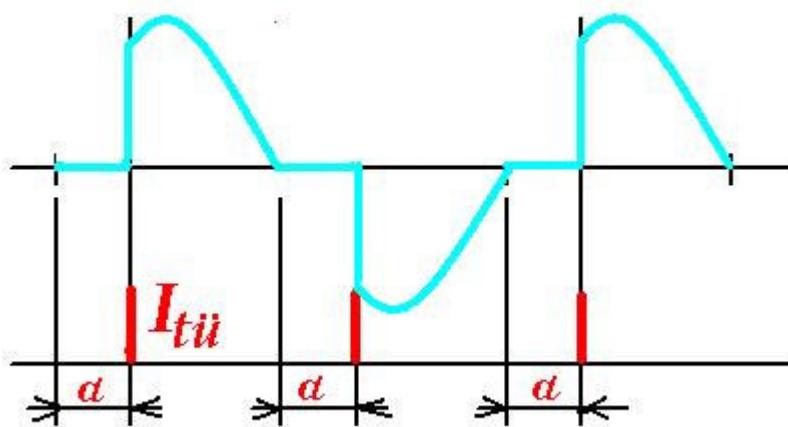
Nõrgavoolulise türistori ($2 - 10\text{A}$) ristlõige ja struktuuriskeem.

Sümmeetrilised türistorid → vahelduvvoolule;

Diood-türistor → Diak; triood-türistor → Triak.



Sümmeetrilist türistirit saab kasutada: 1) regulaatorina; 2) lülitena.



Suletav türistor → GTO

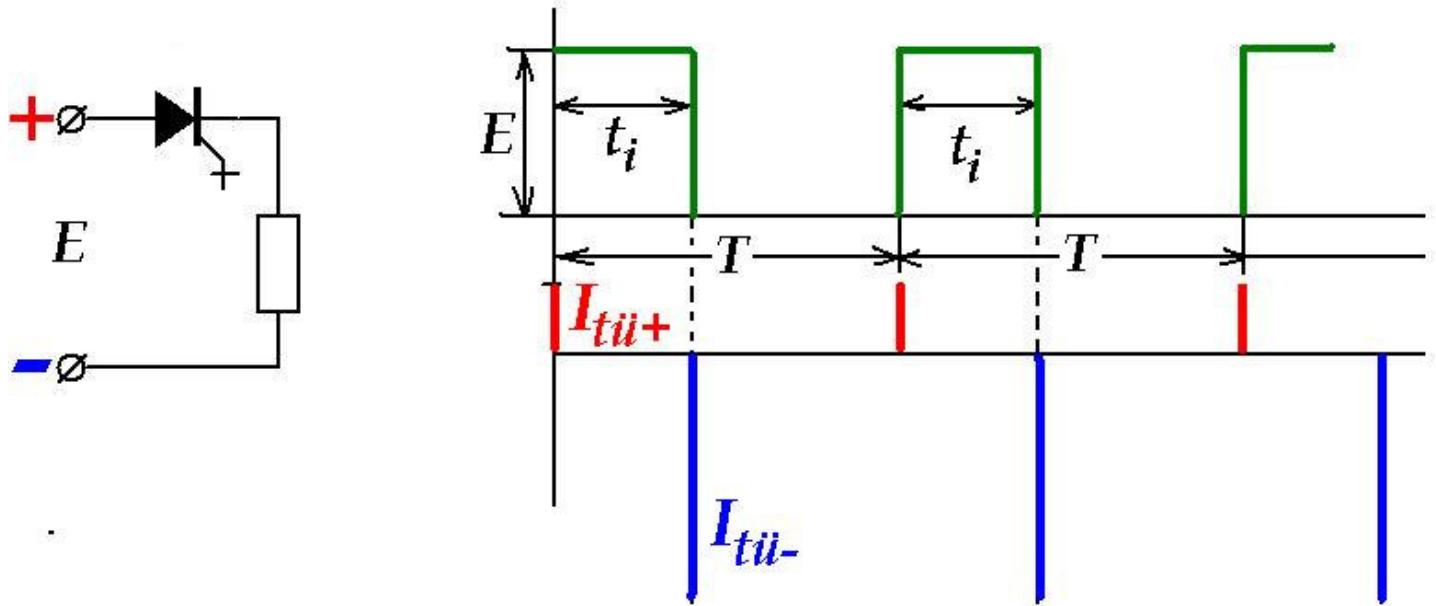
Saab väljalülitada tüürelektroodi kaudu. Keeruline, n n mitmekatoodiline struktuur.

Sisselülitamine → positiivse vooluimpulsiga;

Väljalülitamine → negatiivse vooluimpulsiga.

Andes negatiivse vooluimpulsi teise ekvivalentse transistori baasivool langeb ja sisemine positiivne tagasiside praktiliselt kaob; - türistor läheb kinni.

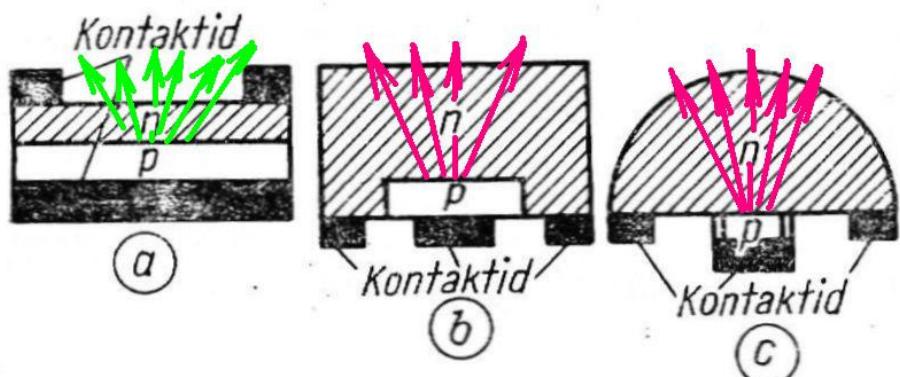
Väljalülitamistegur $K_{VL} = I_a/I_{tü-}$ → Tavaliselt $K_{VL} = 3-5$.



4. Optoelektronika elemendid, infoesitusseadmed

Valgusdiodid.

Päripingestatud pn- siirdega pooljuhtseadis, milles siire kiirgab valgust laengukandjate rekombinatsiooni tõttu.



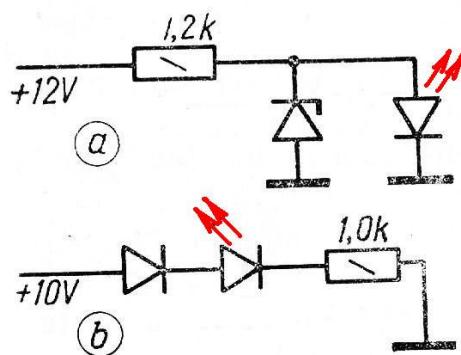
Valgusdiodide ehitusskeeme:
a tasapinnalise *pn*-siirdega, b planaar-menetlusel valmistatud *pn*-siirdega, c mesastruktuuriga poolsfäärilise *pn*-siirdega valgusdiod

Ge, Si → väike keelutsoon → nõrk kiirgus ja mittenähtavas spektrumi osas. GaAs → infrapunased VD,

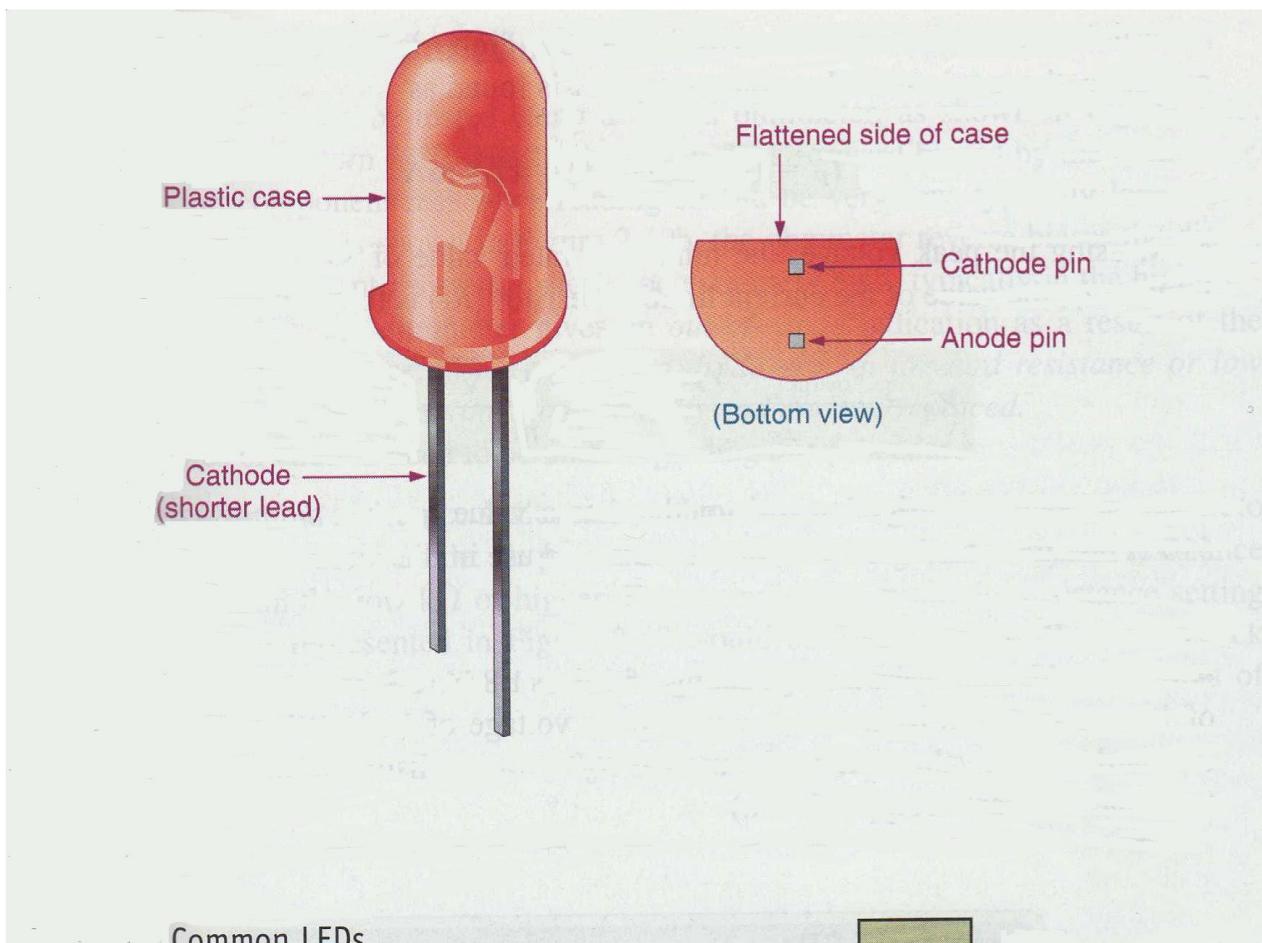
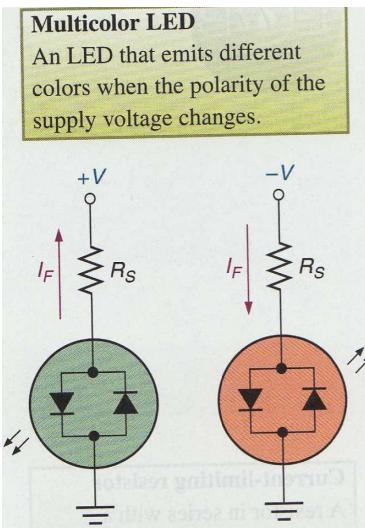
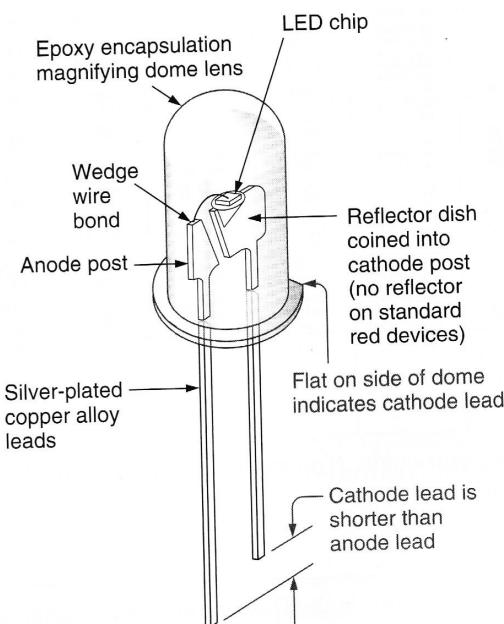
 GaP → nähtav valgus

$U_P = 1,5 - 2,5V$, $I_P = 5 - 20mA$ (30mA), $t_{OFF} = 10^{-6} - 10^{-8}$ s.

$U_{b\ max} \leq 5V$!



Valgusdioodi kaitse ülemäärase pärvivoolu eest (a) ja vastupinge eest



Common LEDs

| Elements | Forward Voltage (V_F) | Color Emitted |
|----------|---------------------------|----------------------|
| GeAs | 1.5 V @ $I_F = 20$ mA | Infrared (invisible) |
| AlGaAs | 1.8 V @ $I_F = 20$ mA | Red |
| GaP | 2.4 V @ $I_F = 20$ mA | Green |
| AlGaInP | 2.0 V @ $I_F = 20$ mA | Amber (yellow) |
| AlGaInN | 3.6 V @ $I_F = 20$ mA | Blue |

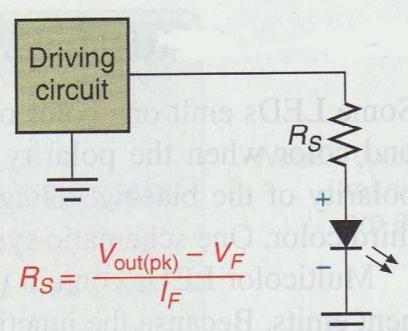
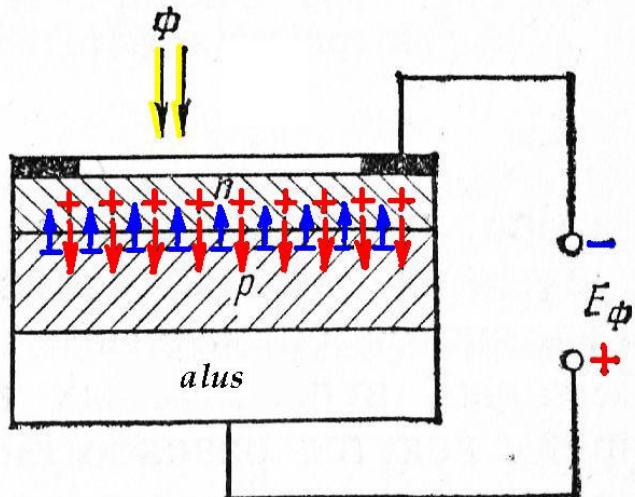


FIGURE 2.38 An LED needs a current-limiting resistor.

Fotodiood



Fotodiood on pooljuhtseadis, milles optilise kiirguse energiatoimel tekib laengukandjate suunatud liikumine.

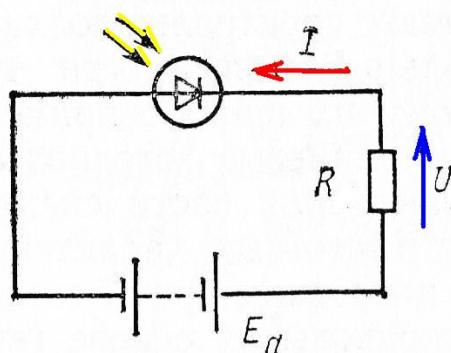
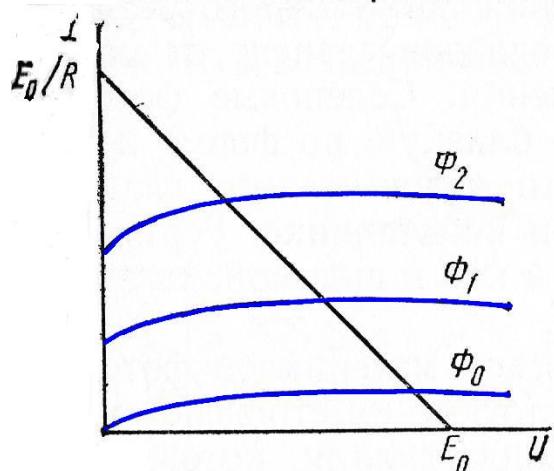
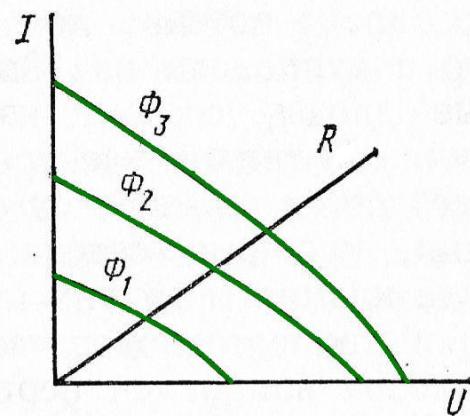
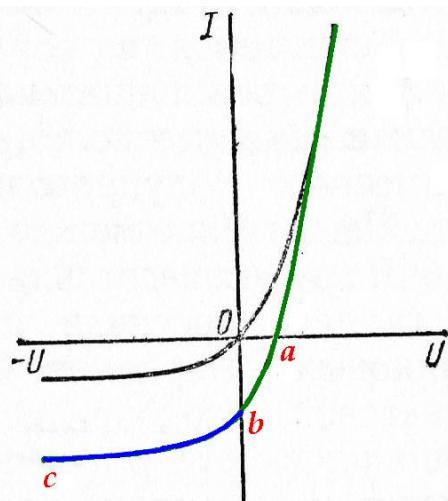
Materjaliks → Ge, Si.

Fotodiood võib töötada kahes režiimis:

a – b → fotogeneratori režiim;

b – c → fotomuunduri režiim.

Valgustatud diood: 0 – **a** → foto E.M.J., 0 – **b** → lühisevool.



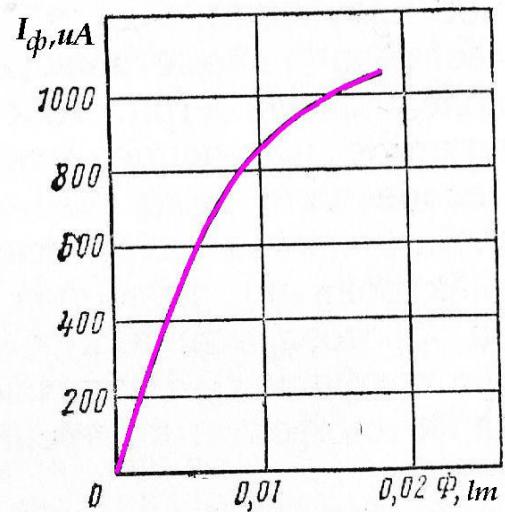
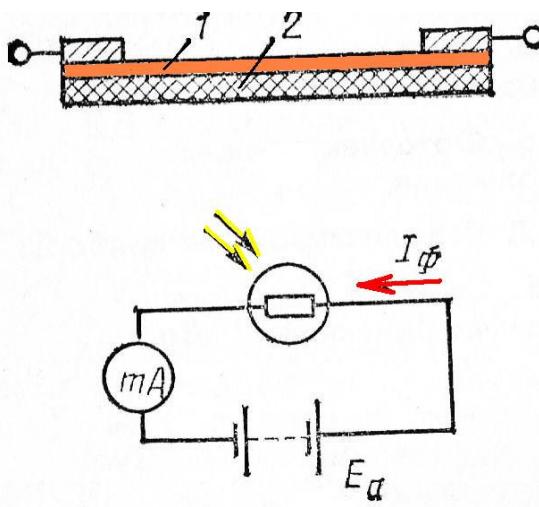
Tundlikkus: I_Φ/Φ : [mA/Lm]; $S_{Si} \approx 3$, $S_{Ge} \leq 20$

Fotomuunduri režiimis rakendatakse fotodioodile vastupinge, mis on tunduvalt kõrgem, kui foto E.M.J. ja pn-siirde valgustamisel potentsiaaltõkke kõrgus praktiliselt ei muudu. Selle tagajärjel jäavad kõik vabanenud ja pn-siirde välja poolt eraldatud laengud fotodioodi. Seega fotodioodi selles režiimis pärivool puudub. Fotodioodi pimekarakteristik ei erine pooljuhtdioodi vastavas pingevoolu tunnusjoonest ja läbib koordinaatide alguspunkti. Sel juhul läbib pn-siiret vool, mis tekib vähemuslaengukandjate liikumisest välispinge toimel. Valgustustiheduse tugevnemisel vastuvool kasvab, sest suureneb pooljuhi aatomite ionisatsioonist tekkinud laengukandjate hulk. Fotodiood töötab selles režiimis nagu pooljuhtdiood, mille vastuvoolu tüürib valgus.

E_{Φmax}: Si → 0,5-0,6V; GaAs → ≈ 0,87V

Fototakisti (fotoresistor).

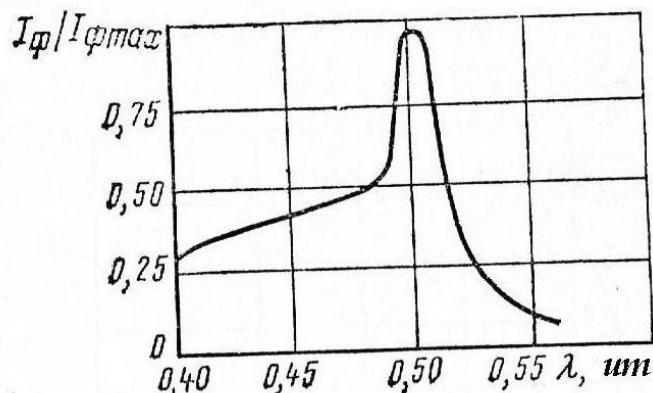
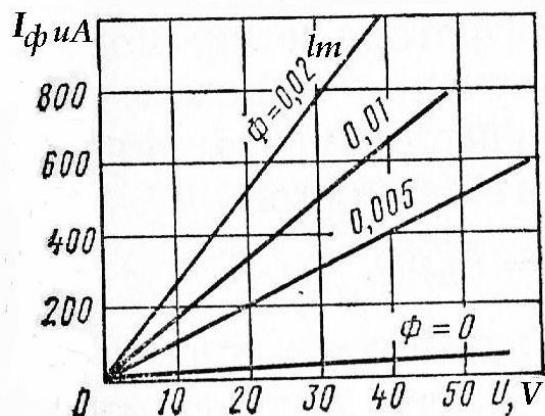
Seadis, mille elektritakistus muutub kiirgusenergia toimel. Fotojuhtivuse effekt → W.Smith (1873) → Se.



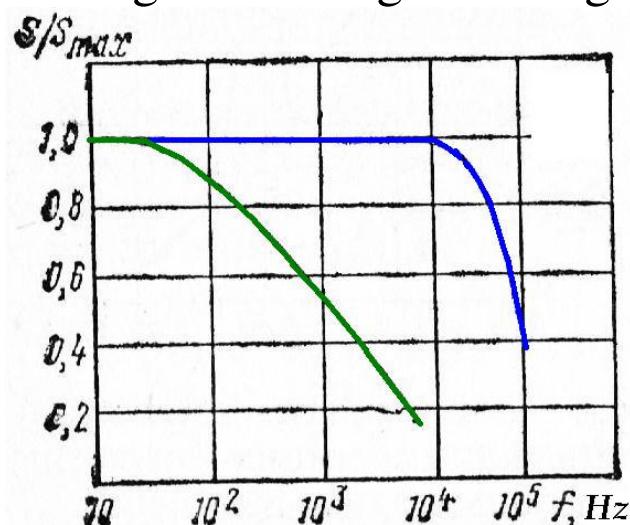
→ klaasplaadile kantud pooljuhtkiht koos voolujuhtivate kontaktidega.

Materjalina kasutakse WiS, PbS, CdS; ← sulfiidid.

Fototakisti valgus- ja spektraaltunnusjooned:

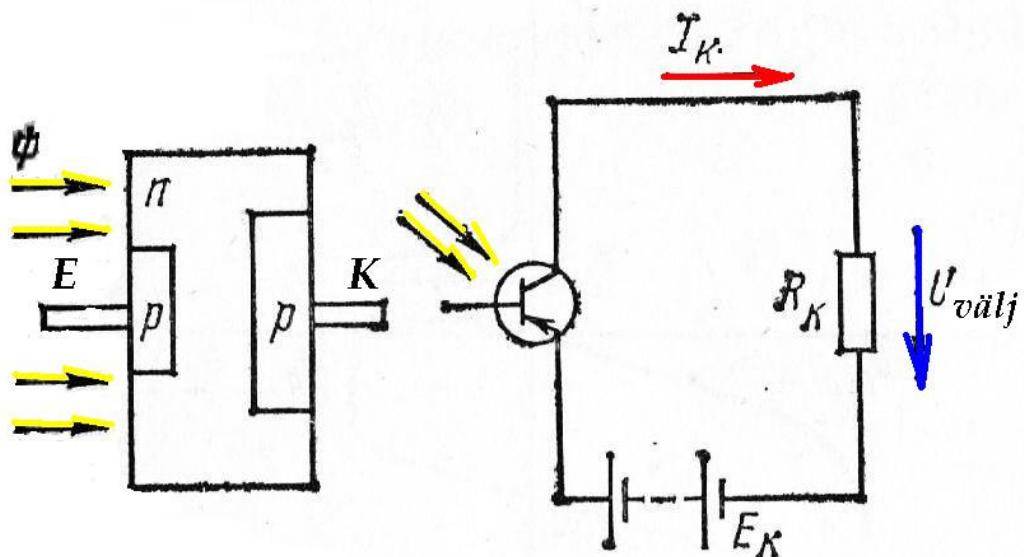


Üldjuhul seadis aeglase toimega. Töösagedused kuni 100 Hz !

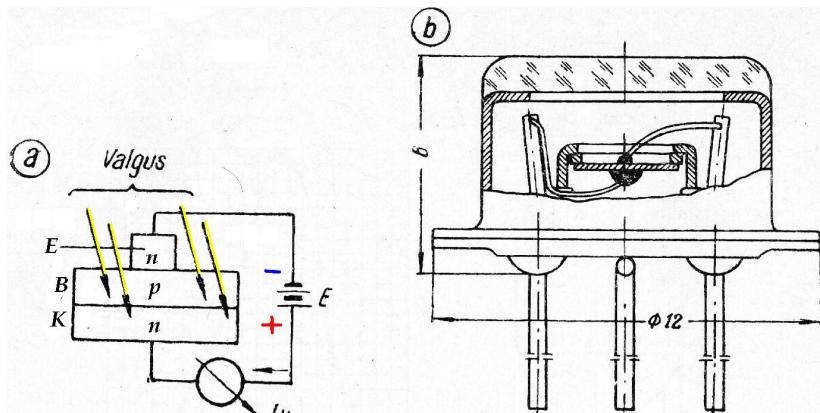


- fototakistid pliisulfiidide baasil.

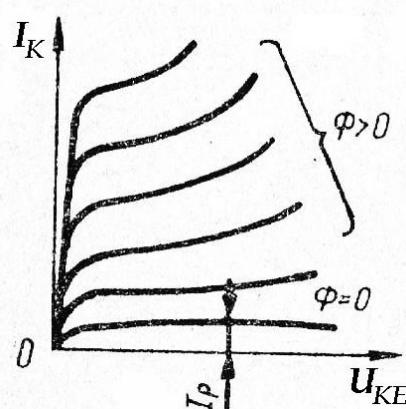
Fototransistor



Fototransistor (fototriood) (FT) kahe pn-siirdega pooljuhtseadis, milles toimub laengukandjate suunatud liikumine ja mille omaduseks on üheaegne valgusenergia muundamine ning fotovoolu võimendamine.



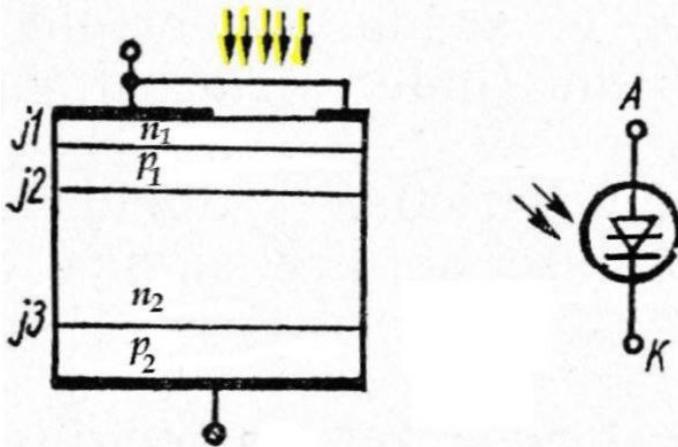
Fototrioodi talitus (a) ja konstruktsioon (b)



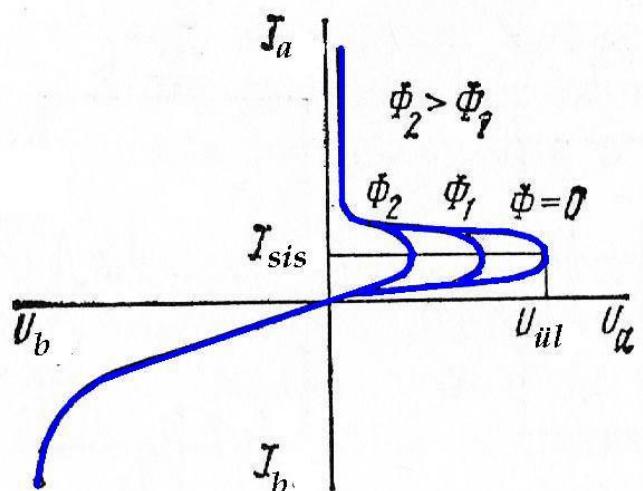
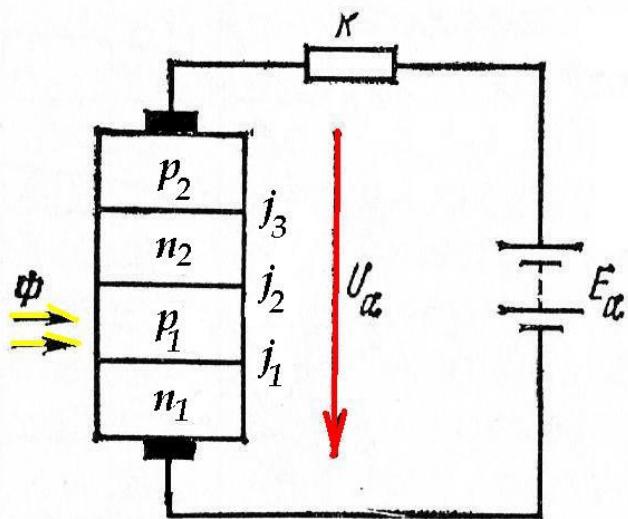
Kui FT baasiahel on lahti, ja FT ei valgustata, siis läbib vooluahe- lat pimevool $I_p = I_{KB0}/(1 - \alpha)$. Valguse mõjul tekivad baasis vabad laengukandjad. Vähemuslaengukandjad (antud juhul elektronid) tõmbuvad pn-siirete elektriväljade mõjul FT emitterisse ja kollektorisse. Baasi jäänud enamuslaengukandjad – augud – tekitavad positiivse ruumlaengu, mis vähendab emittersiirde potentsiaaltõkke kõrgust ja seega muudab baasi potentsiaali emitteri suhtes. Selle tagajärjel suureneb emitterist baasi injitseeruvate vähemuslaengukandjate –elektronide – hulk. Osa neist rekombineerib baasis aukudega, suurim osa aga läbib kollektorsiirde, suurendades kollektorvoolu. Et FT on ÜE-lülituses, saab kollek- torivool lisajuurdekasvu βI_B .

Tundlikum, kui fotodiiod $\rightarrow S = 0,5 - 1,0 \text{ A/L}_m$

Fototüristor



Fototüristor on mitmekihi-line pooljuhtseadis, mis lülitakse sisse valguse abil. Puhtal kujul fototüristori praktiliselt ei eksisteeri. Tavaliselt ainult optotüristori koosseisus.

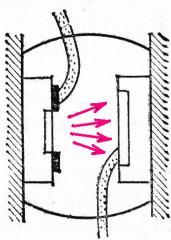


Valgustamisel seadise nendes kihtides, kuhu tungib valgus, tekivad footonite neeldumise tagajärjel vabad laengukandjad: elektronid ja augud. Vähemuslaengukandjad liiguvad türistori moodustavate ekvivalentsete transistoride $p_1n_1p_2$ ja $n_2p_2n_1$ emittersiirete juurde vähendades nende potentsiaaltõkke kõrgust. See põhjustab enamuslaengukandjate lisainjektsiooni emitteritest, mis tekitab seadisele langeva valgusvooga Φ võrdelise fotovoolu I_Φ . Fototüristori vool on määratud võrrandiga:

$$I_A = (I_{KB0} + I_\Phi) / (1 - \alpha_P - \alpha_n)$$

Valgusvoo tugevnemisel suurenevad emittervoolu ülekandetegurid α_P ja α_n ja valgusvoo teatalval väärtsel, mille korral nende summa saab võrdseks ühega, lülitab türistori sisse.

Optotüristoris valgusallika rolli mängib infrapunane valgusdiood.



Optronid.

Valgusallikas → **Valguse vastuvõtja**

valguse saamiseks ↑
kasutame elektrit

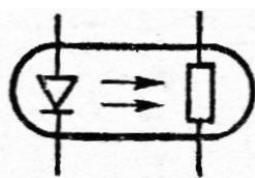
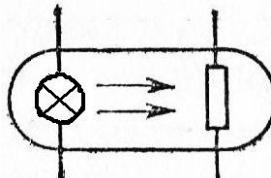
↑ muudab valguse
elektriks

näide:

elektrisignaal → **optiline signaal** → **elektrisignaal**

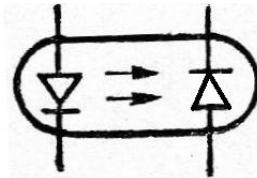
↓ ↑ ↑ ↓
kõrgepingeliin elektriliselt (galvaaniliselt) lahtisidestatud signaal
(näit.300kV) arvutile (5V)

Valgusallikad: → hõõglamp (abistav, mõnikord, vananenud)
→ valgusdiood (LED) (põhiline)
→ laser (optilised kaabelvõrgud)



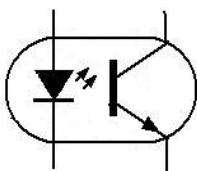
Resistoroptron

$$t_{\text{off}} = 10^{-2} \text{ s} ;$$



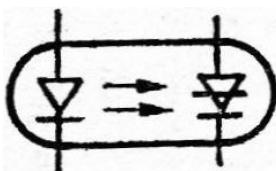
Dioodoptron

$$t_{\text{off}} = 10^{-8} \text{ s} ;$$



Transistoroptron

$$t_{\text{off}} = 10^{-4} \text{ s} ;$$

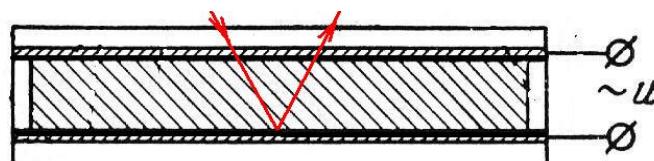


Türistoroptron

$$t_{\text{off}} = 10^{-4} \text{ s} .$$

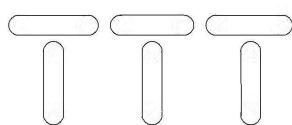
Infoesitusseadmed. (visuaalsed).

- 1) Elektronkiiretoru.
- 2) Vedelkristallpaneel.

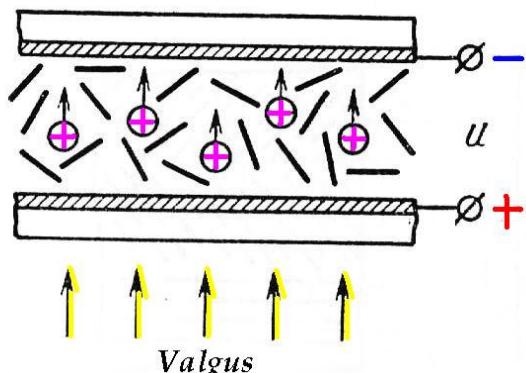
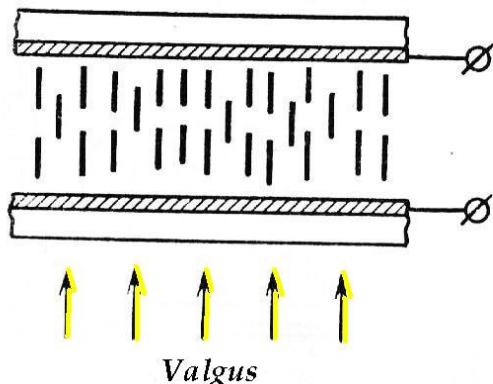


Plaatide vahekaugus on umbes $10 - 20 \mu\text{m}$.

Vedelkristall on vedelik, mille pikad, sigarikujulised molekulid on orienteeritavad: → elektrivälja abil;
→ või pinna töötlemisega



→ elektriväli keerab neid püstti.



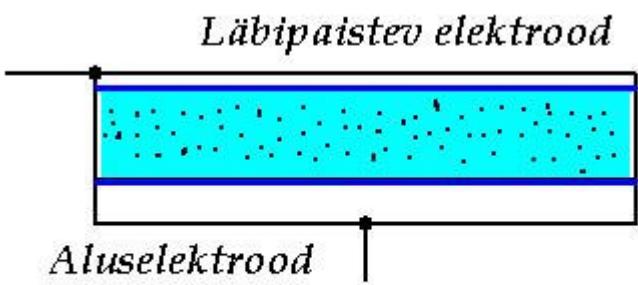
Põhiparametrid: tööpinged $\geq 1,5\text{V}$, voolutarbe – alla μA ,
töötemperatuur: $+1 - +50^{\circ}\text{C}$.

Kasutakse R-B-G süsteemis, - värviline indikatsioon.

3) Plasmapaneelid.

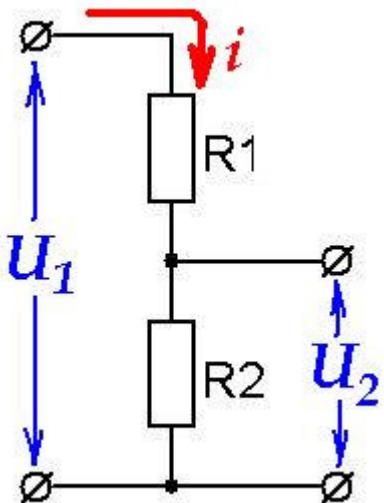
Tegelikult gaaslahenduspaneelid. Elektrivool hõrendatud gaasis tekitab helenduse. Tööpinged $60 - 350\text{V}$. Kasutamisel inertgaasid He, Ne, Xe... Gaas kiirgab UV– kiirgust. UV – kiirgus muudetakse nähtavaks R-B-G luminofoori abil.

4) Elektroluminestsentspaneelid.



← Kiht, mis kiirgab valgust elektrivälja toimel (mingi lumofoor).
Töötab vahelduvpingel 100 – 250V.

Pingejagur.

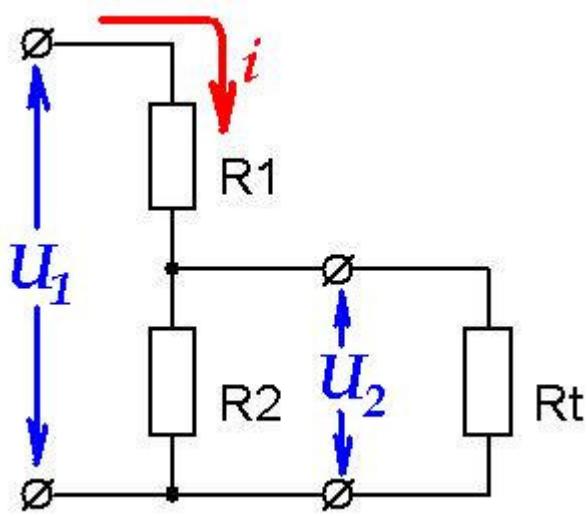


Pingejagur on koormamata! $\rightarrow R_t = \infty$

$$U_2 = iR2 = \frac{U_1 R2}{R1 + R2}; \quad U_2 = U_1 K_{PJ}$$

Pingejagamise tegur $K_{PJ} = \frac{R2}{R1 + R2}$

Koormatud pingejagur



Koos $\rightarrow R_2$ ekv

$$U_2 = U_1 K_{PJ}$$

$$K_{PJ} = \frac{R2_{ekv}}{R1 + R2_{ekv}}$$

$$R2_{ekv} = \frac{R2 R_t}{R2 + R_t}$$

Logaritmiline sageduskarakteristik. (tegelikult neid on kaks)

ASK → amplituudi sag.karak. – Süsteemi väljund sisendpinge amplituudide suhte sõltuvus sagedusest f (nurksagedusest ω).

FSK → faasi sag.karak. – Süsteemi väljund ja sisendpinge faasinihke sõltuvus sagedusest (f või ω).

Logaritmiline on sageduse mastaap!

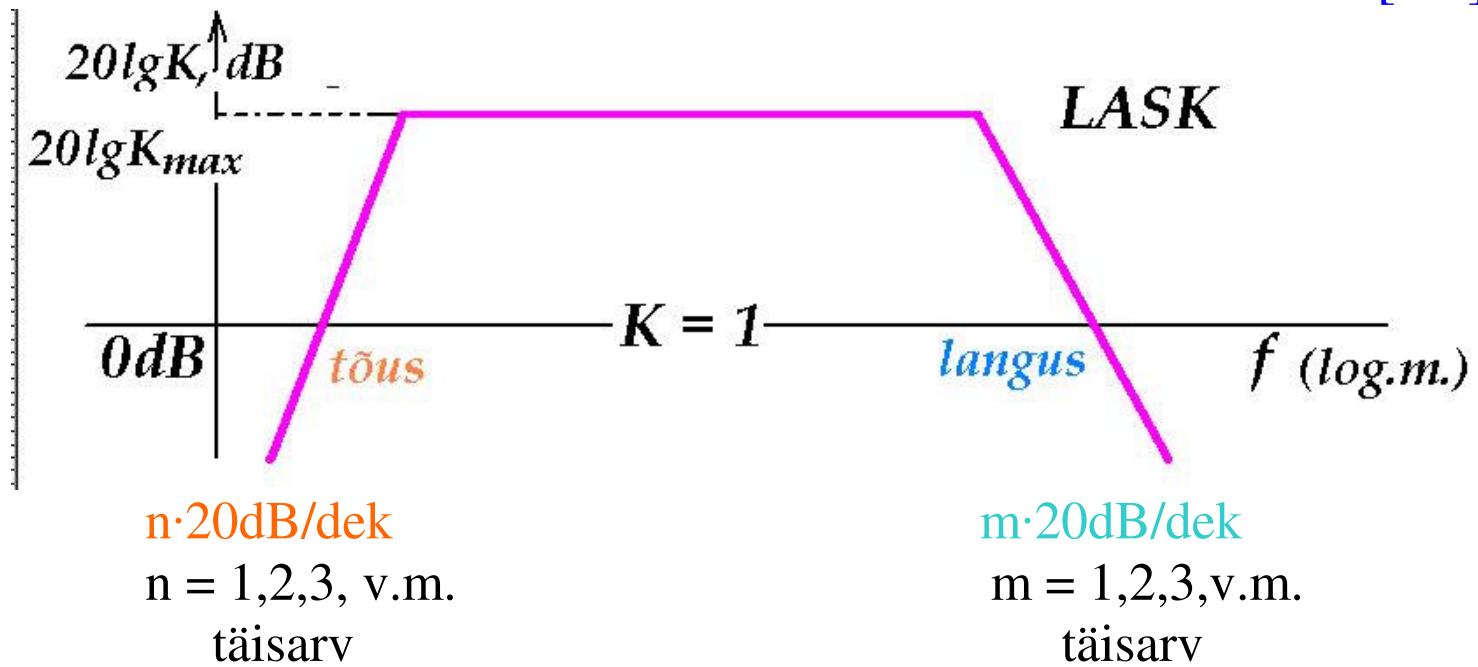
Põhjus: muidu suur sag. diapasoon ei mahu ära.

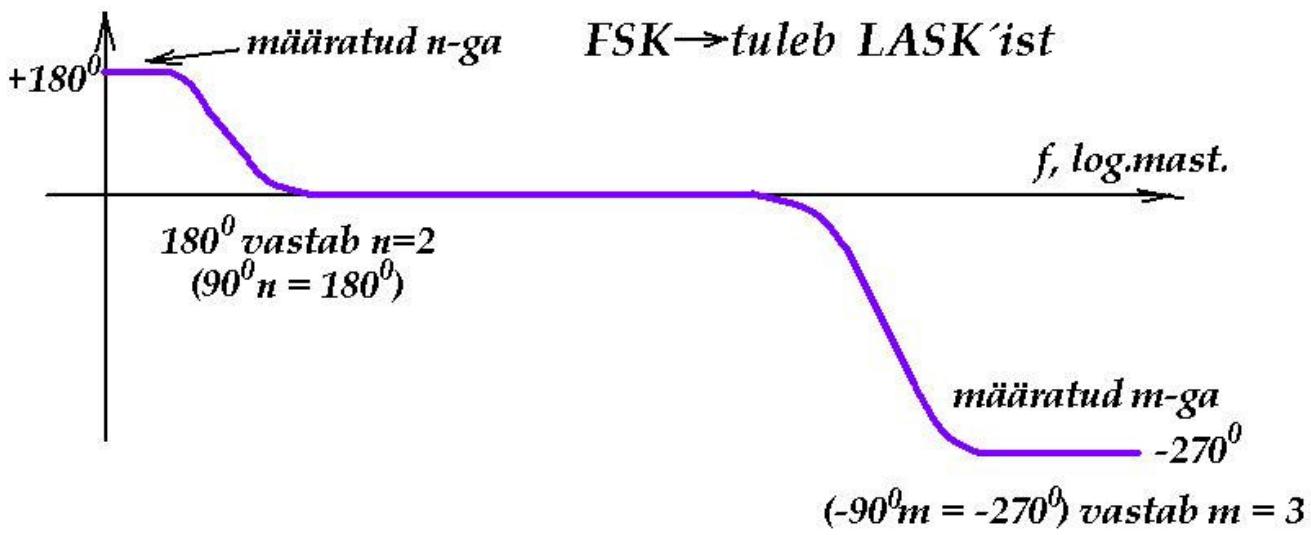
Ühik (dekaad)

| 0,1 Hz | 1 Hz | 10 Hz | 100 Hz | 1 kHz | 10 kHz | 100 kHz | 1 MHz | f (või ω) <u>log.mastaabis</u> |
|-----------|---------|----------|-----------|----------|-----------|------------|----------|---|
|-----------|---------|----------|-----------|----------|-----------|------------|----------|---|

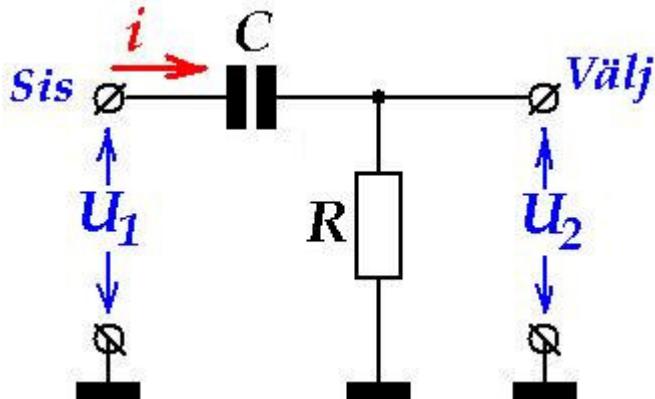


Log.ASK puhul on Y teljel $20\log_{10}$ (pingeampl.suhe) → ühik → → [dB]





Diferentseeriv ahel.



$$U_2 \approx \frac{dU_1}{dt}$$

Koormamata, $R_t \rightarrow \infty$,
 U_1, U_2 – siinulised

$$I_m = \frac{U_{1m}}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} = \frac{U_{1m}}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

$$U_{2m} = I_m R = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}} \cdot U_{1m}$$

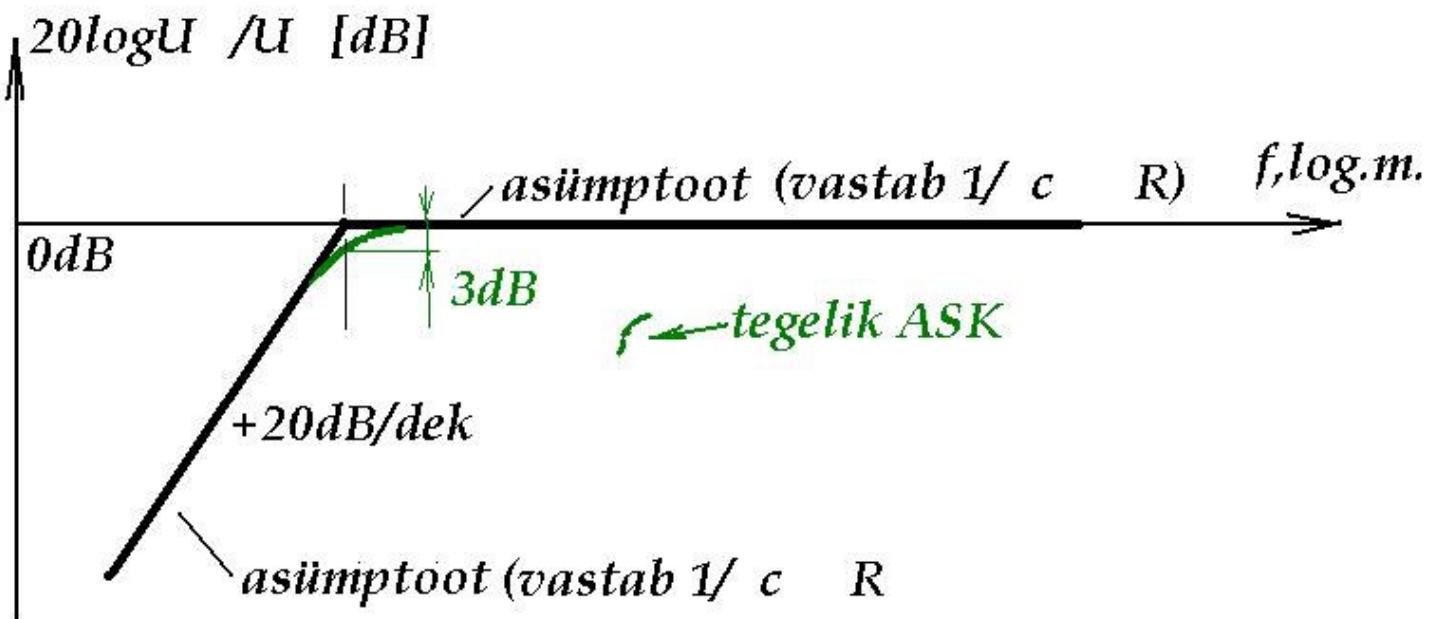
Olgu sagedused nii madalad, et $1/\omega C \gg R$; siis võime kirjutada

$$U_{2m} = U_{1m} \frac{R}{\sqrt{\left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}} = U_{1m} \cdot \omega C R$$

$$\text{Ülekanne } U_{2m}/U_{1m} = \omega CR = \underline{\omega\tau}, \quad \tau = RC - \text{ajakonstant}$$

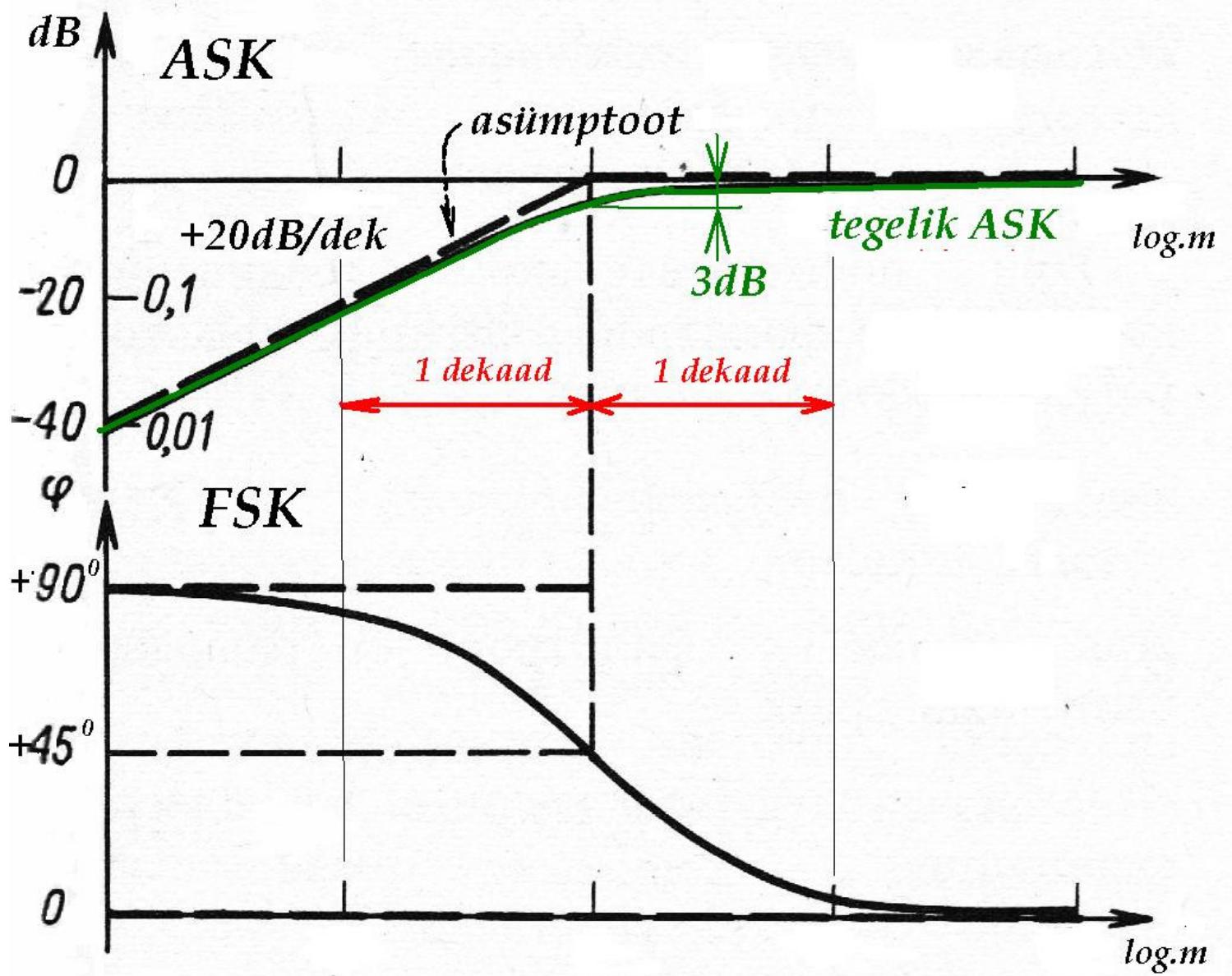
Ülekandetegur U_{2m}/U_{1m} kasvab kiirusega (ASK-1)
 $\rightarrow \underline{20\text{dB/dek}}$

\rightarrow [Sageduse kasvades 10 korda ülekandetegur kasvab 10 korda]



Küllalt kõrgetel sagedustel $1/\omega C \ll R$; siis $U_{2m}/U_{1m} \rightarrow 1$;
 $\text{ehk } 20\log U_{2m}/U_{1m} = 0$

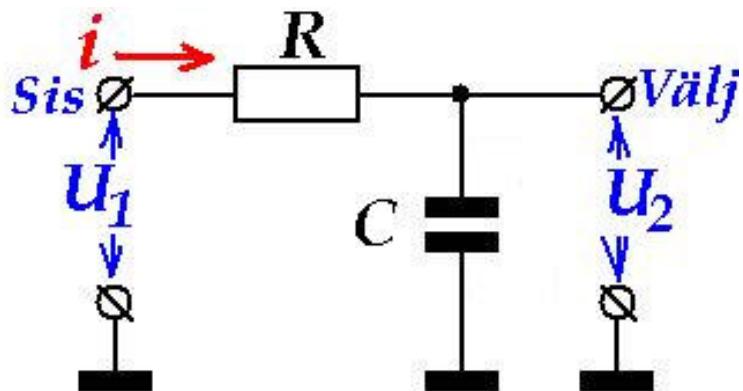
Kehtib seos: $\underline{\omega\tau = 1}$ ehk $\omega_{ul} = 1/\tau = 1/RC$.
 ASK alusel saame konstrueerida FSK:



$$\omega_{UL} = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{RC}$$

Integreeriv ahel.

Teat. tingimustel: $U_2 \approx \int_0^t U_1 dt$ kus U_1, U_2 – siinuselised.



$$I_m = \frac{U_{1m}}{Z} = \frac{U_{1m}}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} = \frac{U_{1m}}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

Kuna $U_{2m} = I_m X_C$, siis:

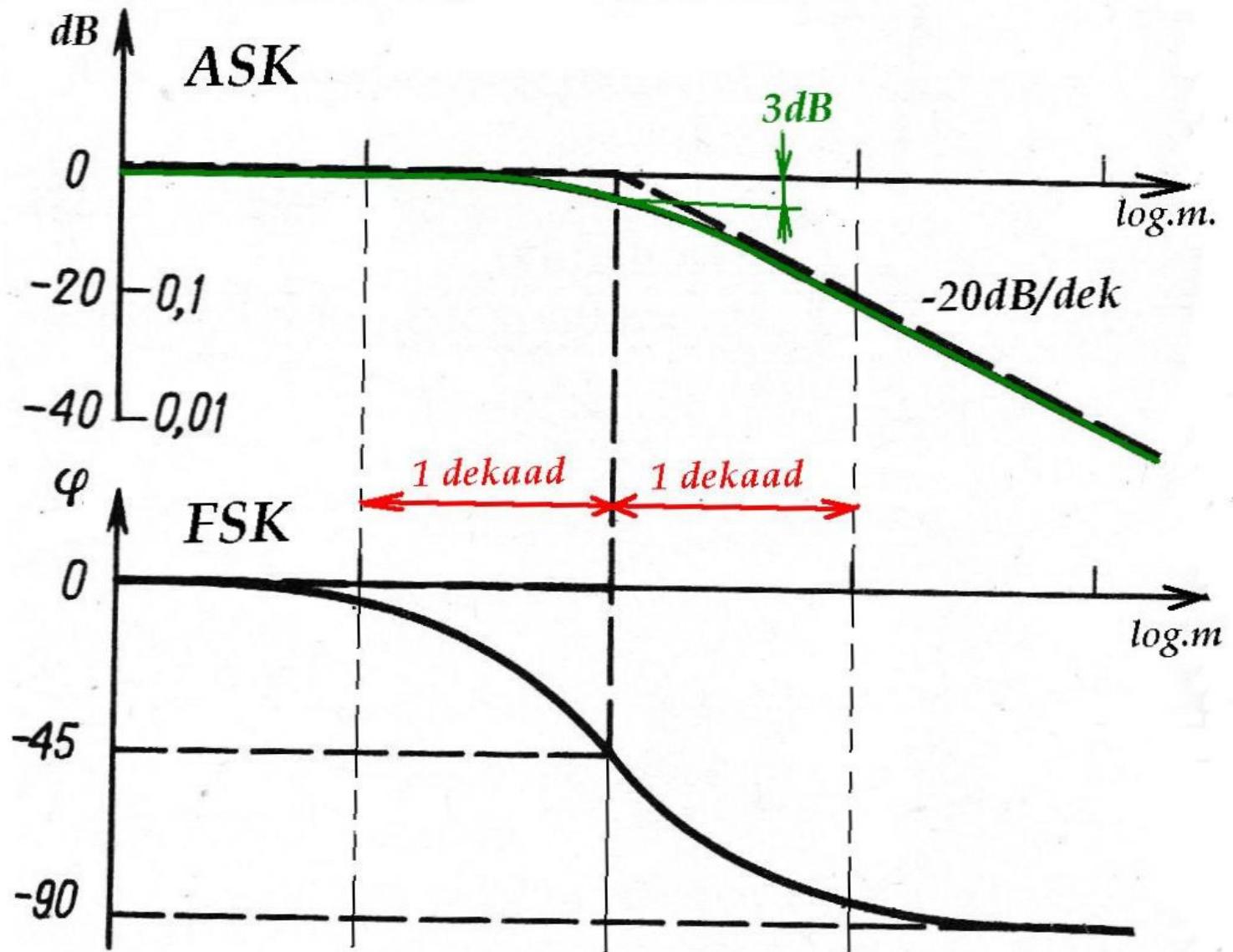
$$U_{2m} = U_{1m} \frac{\frac{1}{\omega C}}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}} = U_{1m} \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}$$

Analüüsime seda seost! ↑

Kui $\omega RC \ll 1$, siis $U_{2m}/U_{1m} = 1$;

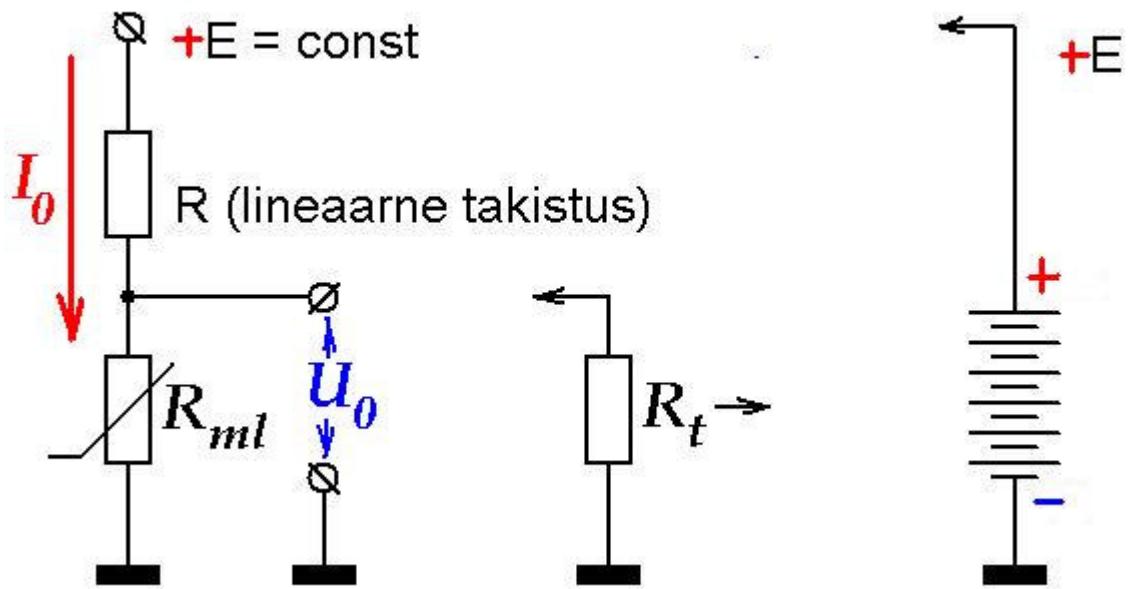
$$\text{Kui } \omega RC \gg 1, \text{ siis } \frac{U_{2m}}{U_{1m}} = \frac{1}{\omega RC} = \frac{1}{\omega \tau}, \quad \underline{\tau = RC}$$

Integreeriva ahela ASK ja FSK:



$\omega_{\text{üll}}$ on nn murde- ehk üleminekusagedus.

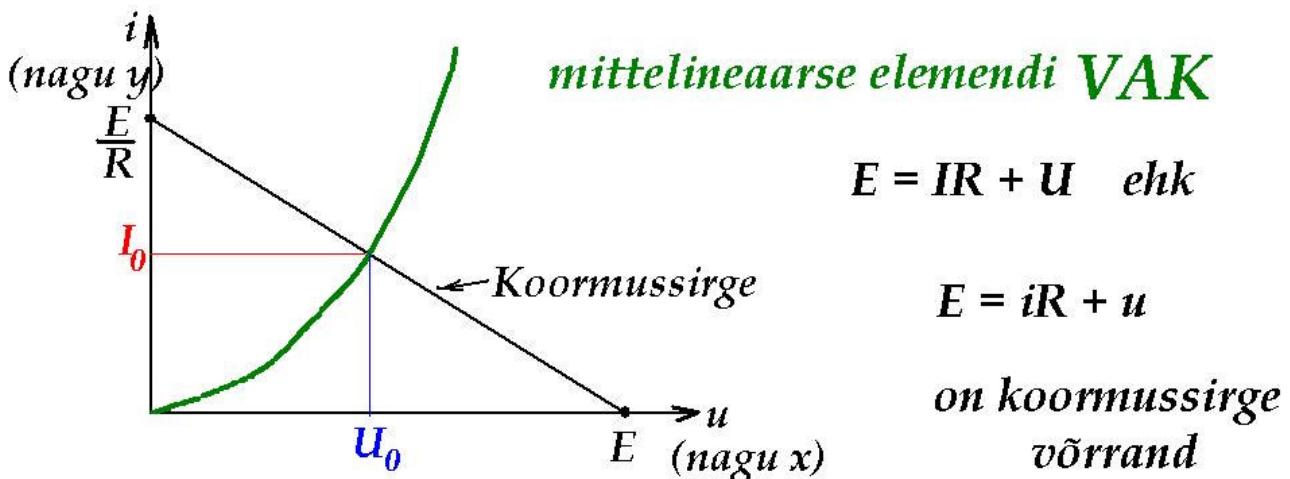
Koormussirge → Vahend lihtsa mittelineaarse ahela (sidu) režiimi leidmiseks. Lihne mittelineaarse ahel.



Režiim on voolud ja pinged rahuolukorras. Vahelduvpinged puuduvad, on vaid toide $+E$. Mittelineaarse elemendi R_{ml} režiim on määratud vooluga I_0 ja pingega U_0 .

$$E = I_0 R + U_0 \quad \text{muutuja } X \rightarrow Y = ax + b \rightarrow \underline{\text{const1}} = y \underline{\text{const2}} + x$$

const1 muutuja Y const2



Sirge, s h koormussirge, väljajoonistamiseks on vaja teada 2 sirge punkti:

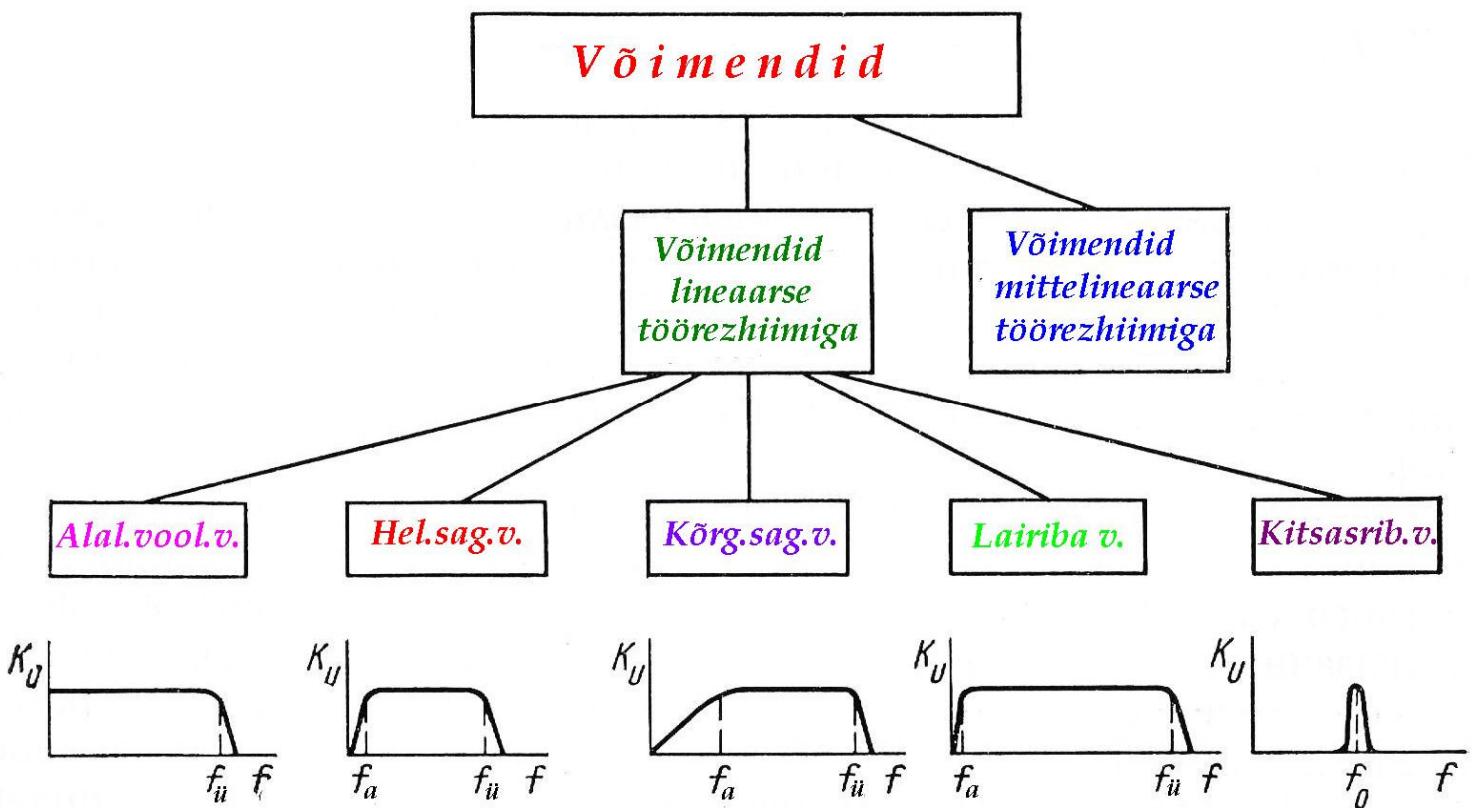
- Valime:
- 1) $u = 0$, siis $i = E/R \rightarrow$ (lühis)
 - 2) $i = 0$, siis $u = E \rightarrow$ (tüh.jooks)

5. Analoogelektronika lülitused

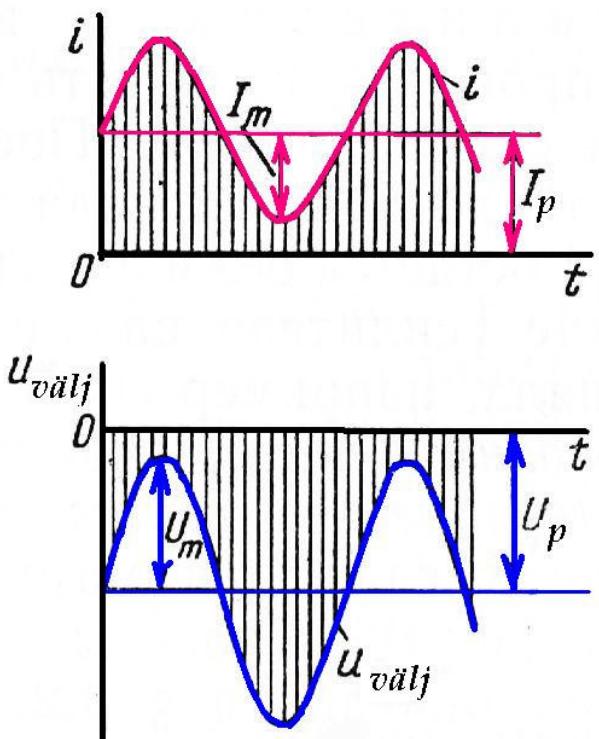
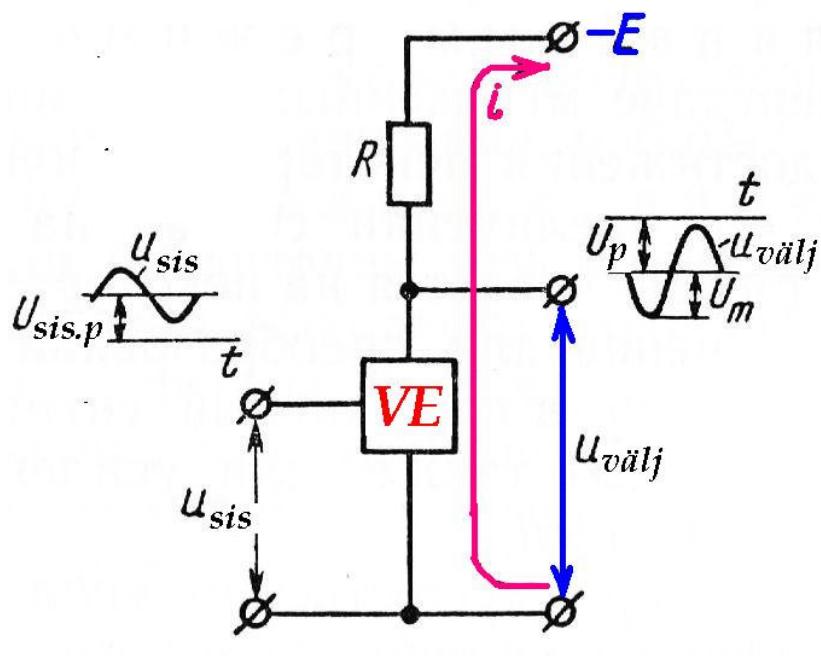
5.1. Elektrisignaali võimendamine

Transistor kui pidevatoimeline võimenduselement

Võimendite liigitus esimeses lähenduses → töörežiimi järgi:



Võimendusaste: **VE** → võimenduselement



Võimendus → toiteallika (E) elektrienergia muundamine väljundsignaali energiaks võimenduselemendi takistuse muutmise abil.

Võimenduselemendi takistus sõltub sisendsignaalist.

Võimendusastme põhiparametrid:

$$K_U = U_{välj}/U_{sis} ; \quad K_I = I_{välj}/I_{sis} ;$$

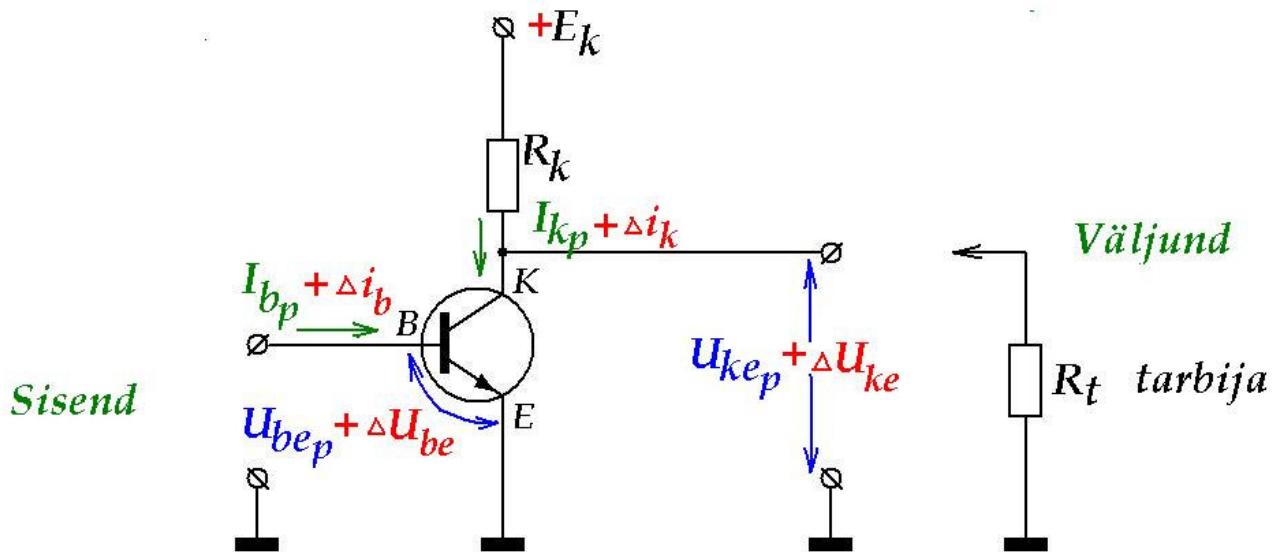
$$K_P = P_{välj} / P_{sis} = (U_{välj}/U_{sis})(I_{välj}/I_{sis}) = K_U K_I$$

Tavaliselt: $K_U > 1$; $K_I > 1$; $K_P \gg 1$

Mõnedel võimendusastmetel $K_U < 1$ või $K_I < 1$; aga **K_P võimendi puhul on alati $K_P \gg 1$**

5.2. Võimendusastmed bipolaartransistori baasil

Transistor kui pidevatoimeline võimenduselement



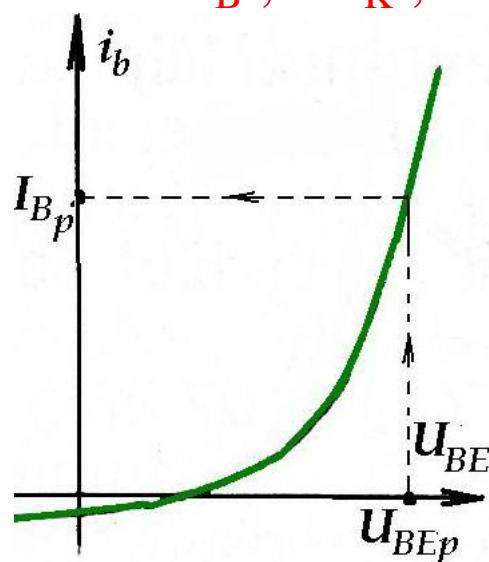
R_K, R_t võivad olla resistorid, aga ka muud takistuslikud elemendid.

$I_{Bp}, I_{Kp}, U_{BEp}, U_{KEp} \rightarrow$ režiimi voolud ja pinged.

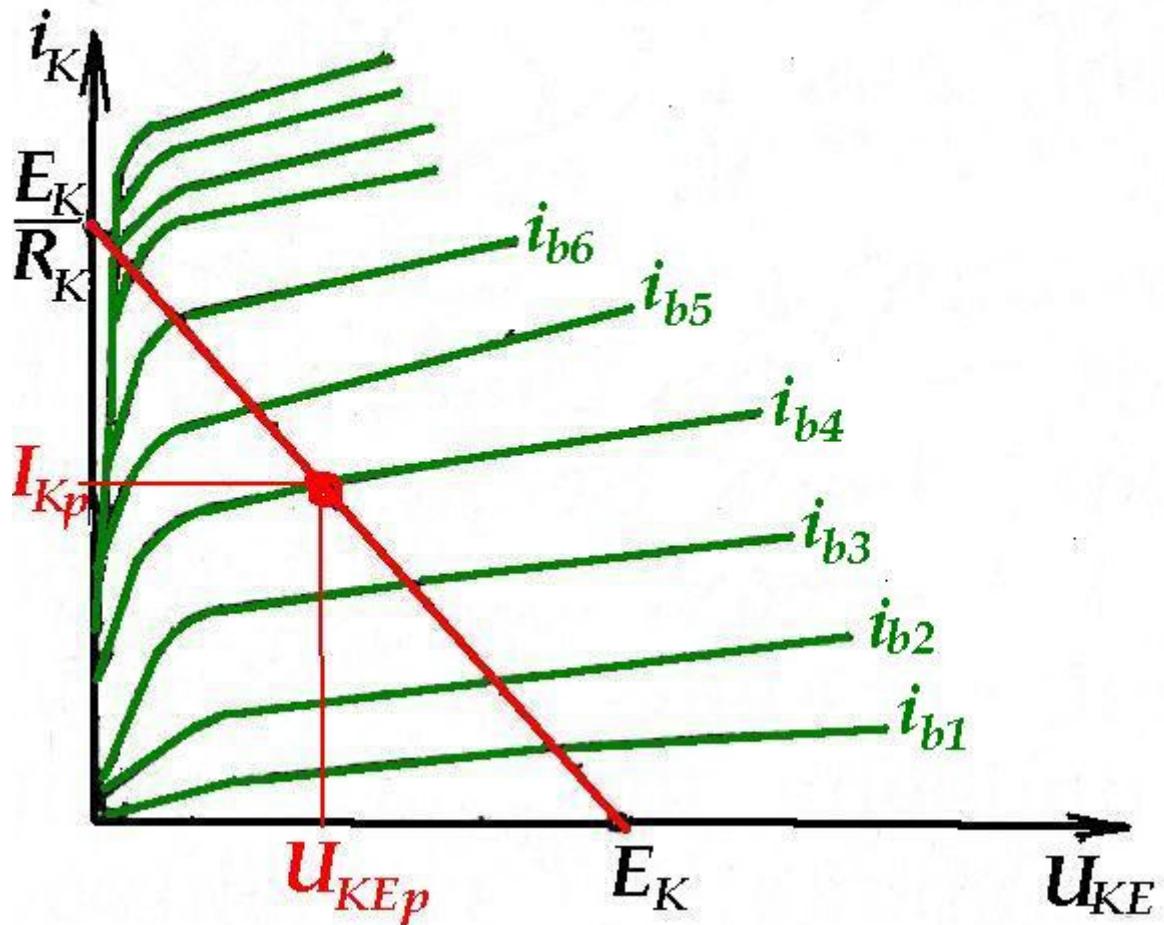
alalisvoolid, pinged \rightarrow TÖÖPUNKT

Signaal (väike signal):

$$\Delta i_B, \Delta i_K, \Delta U_{BE}, \Delta U_{KE}$$



Väljundkarakteristikud $I_K = f(U_{KE}) \rightarrow I_B = \text{const}$



Koormussirge $E_K = U_{KE} + i_K R_K$ (Kui $R_t \rightarrow \infty$)

$$1) i_K = 0 \quad U_{KE} = E_K ;$$

$$2) U_{KE} = 0 \quad i_k = E_K / R_K$$

Režiim paigas, nüüd signaaliarvutus:

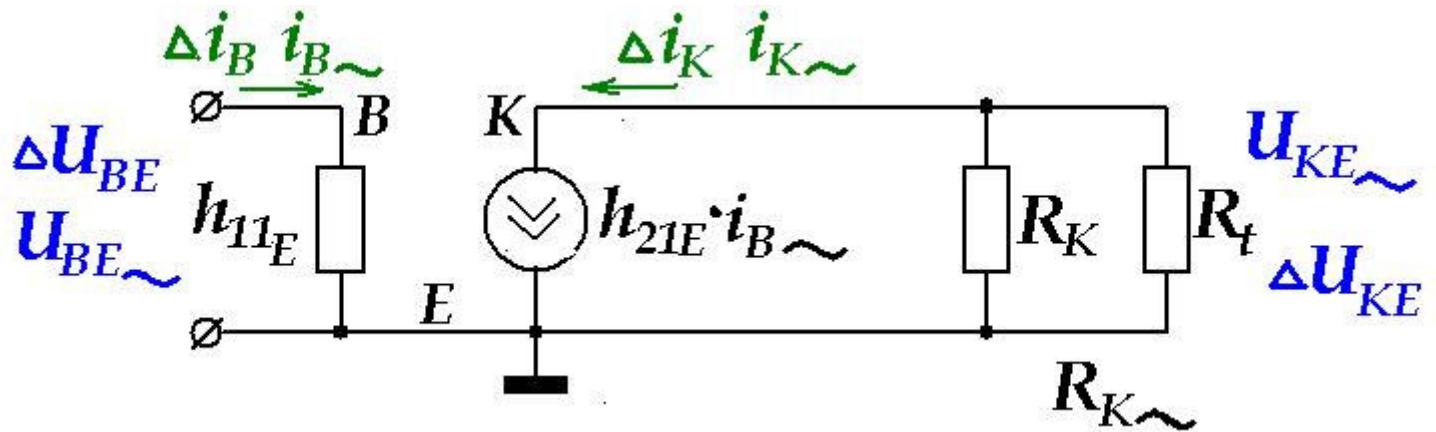
ΔU_{BE} ja Δi_b vahekord:

$R_{\text{sis}} = \Delta U_{BE} / i_B \rightarrow$ sisendtakistus signaalile;

$K_U = \Delta U_{KE} / U_{BE} \rightarrow$ võimendustegur signaalile.

Kasutame (väikese) signaali aseskeemi.

Aseskeem:



$$R_{sis} = \frac{U_{BE\approx}}{i_{B\approx}} = h_{11E} = \frac{dU_{BE}}{di_b} \rightarrow I_{Bp} \text{ juures}$$

Sisendkarakteristikult

$$U_{KE\approx} = - h_{21E} i_{B\approx} R_{K\approx}$$

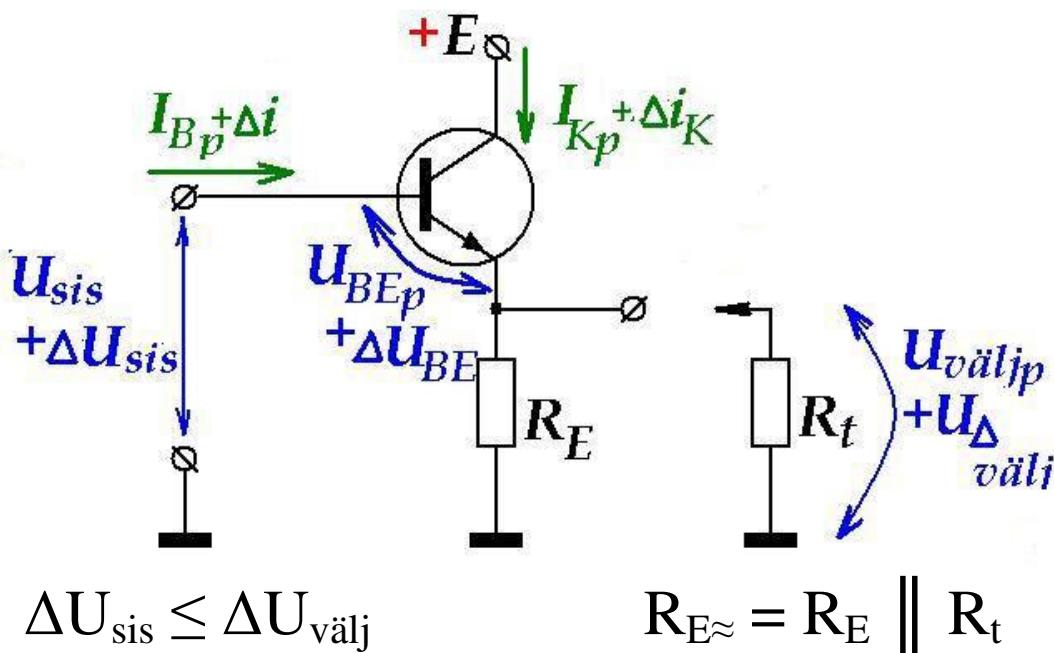
$$K_U = \frac{U_{KE\approx}}{U_{BE\approx}} = - \frac{h_{21E}}{h_{11E}} \cdot R_{K\approx}$$

$$R_{K\approx} = \frac{R_K R_t}{R_K + R_t}$$

$U_{KE\approx}$ ja $U_{BE\approx}$ on vastasfaasis!

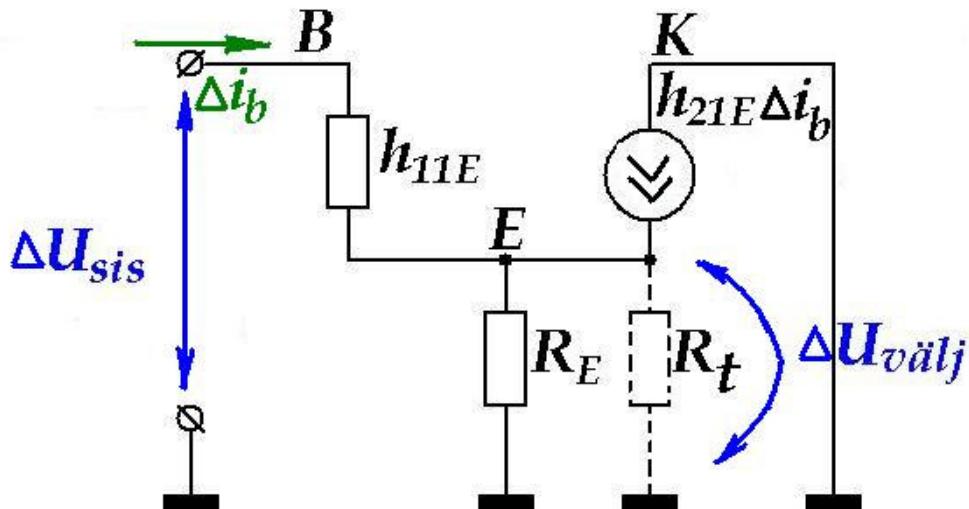
ÜE → põhilülitus → **invertor!**

Emitterijärgija (ÜK lülitus).



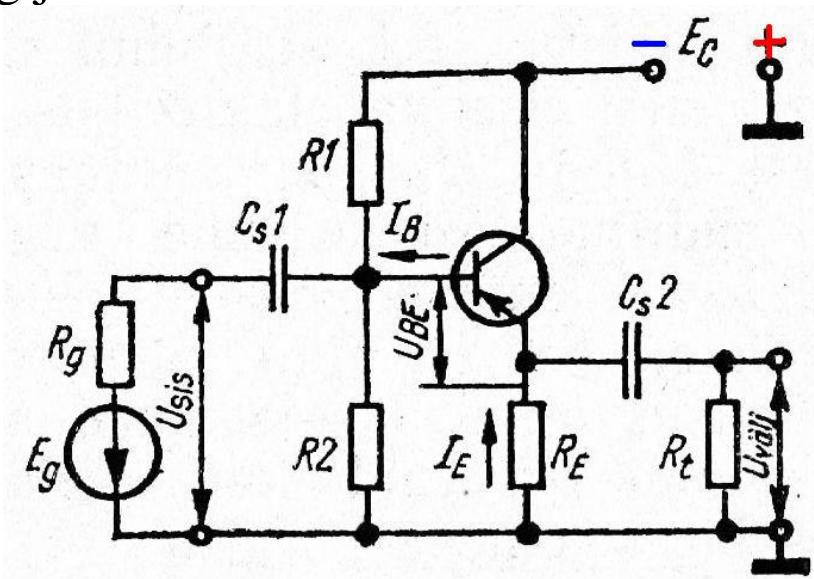
$$K_U = \frac{\Delta U_{välj}}{\Delta U_{sis}} \approx 1 \quad (\text{pisut vähem kui } 0,95)$$

Signaaliarvutus → aseskeemi alusel.

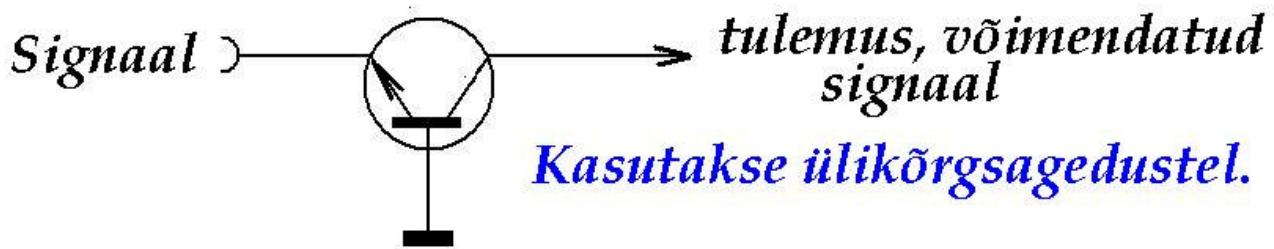


R_{sis} on väga suur! → $R_{sis} = h_{11E} + (1 + h_{21E})R_{E\approx}$

Emitterijärgija reaalne skeem:

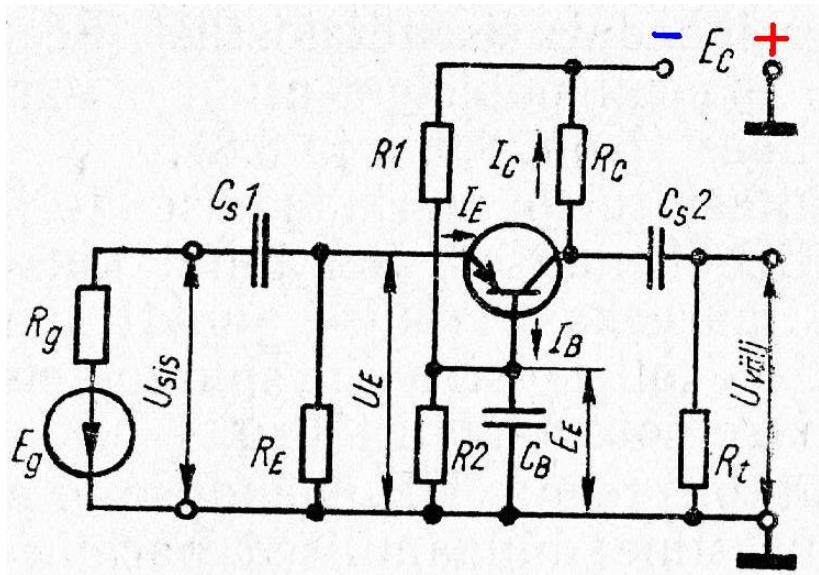


ÜB – „maandatud baasiga“ lülitus.



$K_I \leq 1$, R_{sis} – väike, $R_{välj}$ – suur.

ÜB – võimendusastme reaalne skeem:

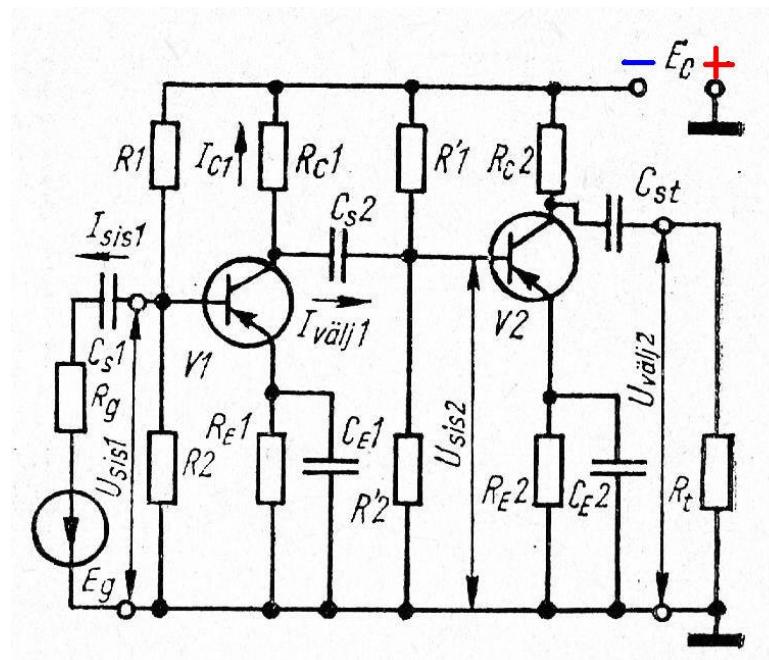
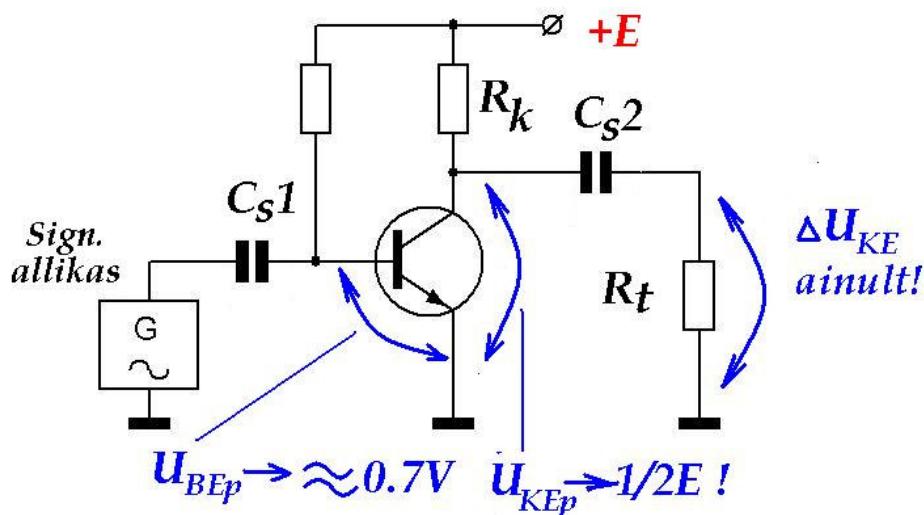


Sidestus võimendusastmete vahel.

- Sidestusviisid: → RC-sidestus;
 → Trafosidestus;
 → Galvaaniline (otse-) sidestus.

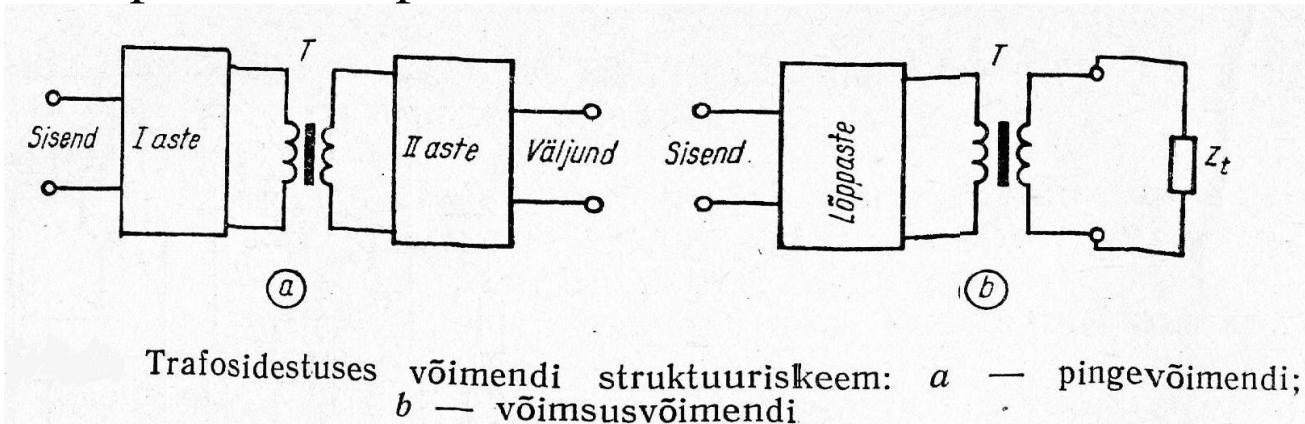
RC-sidestus:

→ odav, võib ühendada eraldi kokkupandud võimendusastmed, sisend- väljundpotentsiaalide lihtne sobitamine, sagedusriba piiratud „altpoolt“, võib üle kanda piiratud võimsust.

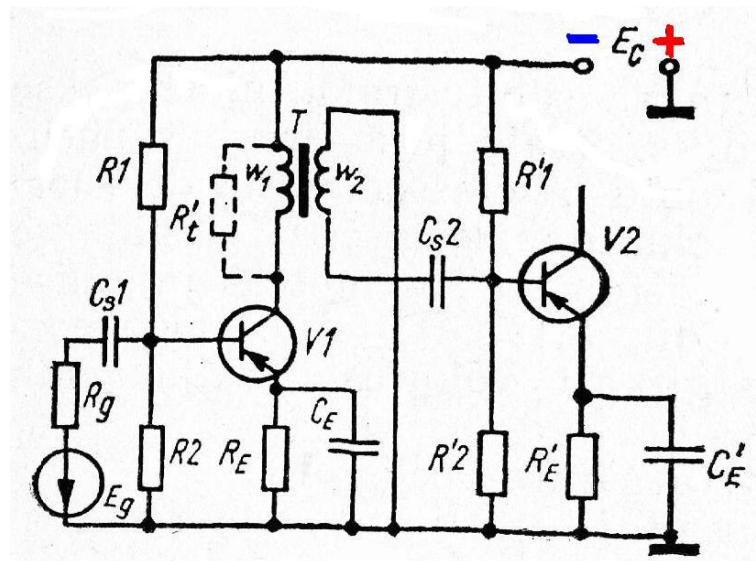
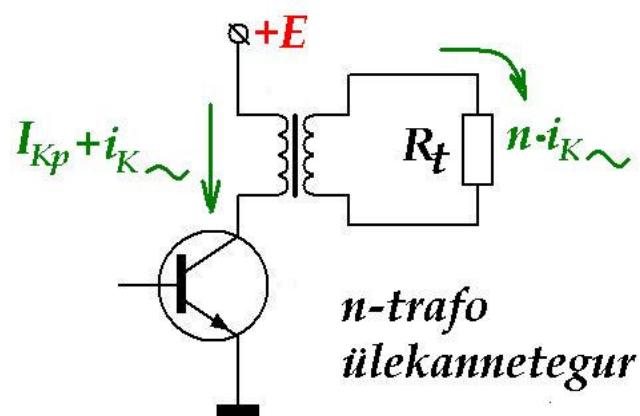


Trafosidestus:

→ kallis, võib ühendada eraldi kokkupandud võimendusastmed hea galvaaniline lahtisidestus, saab edukalt sobitada erinevad potentsiaalid, sagedusriba piiratud mõlemal pool, võib üle kanda praktiliselt piiramatu võimsust.

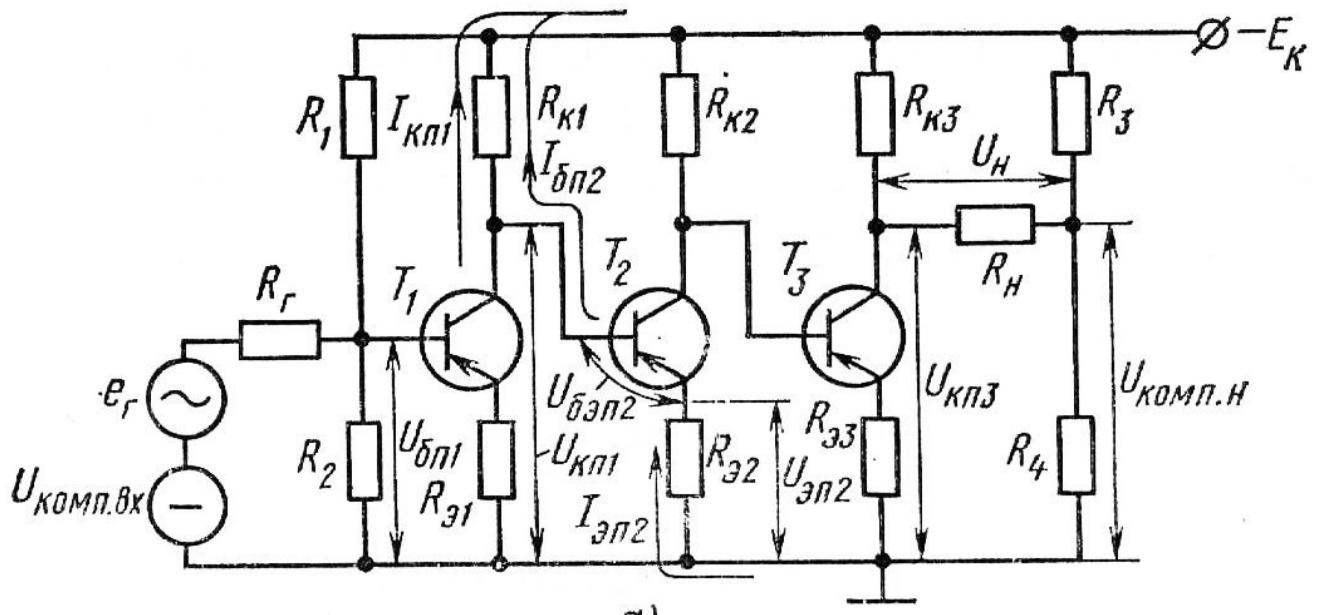
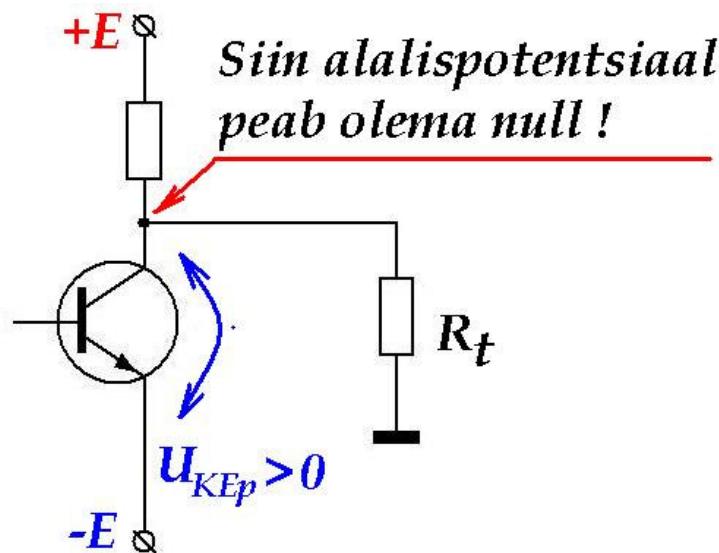


Trafosidestuses võimendi struktuuriskeem: a — pingevõimendi; b — võimsusvõimendi

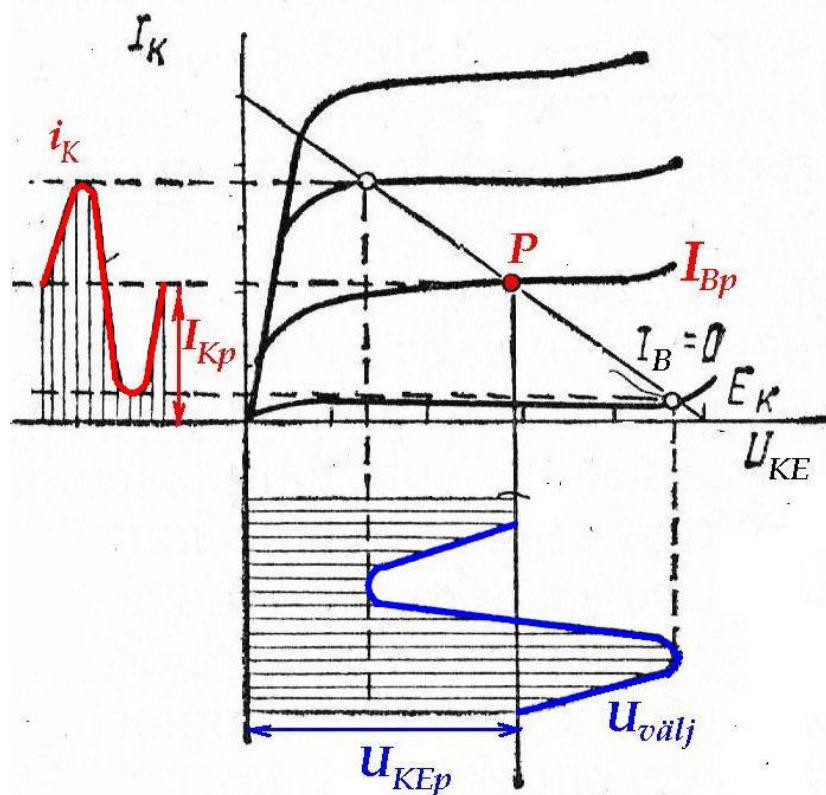
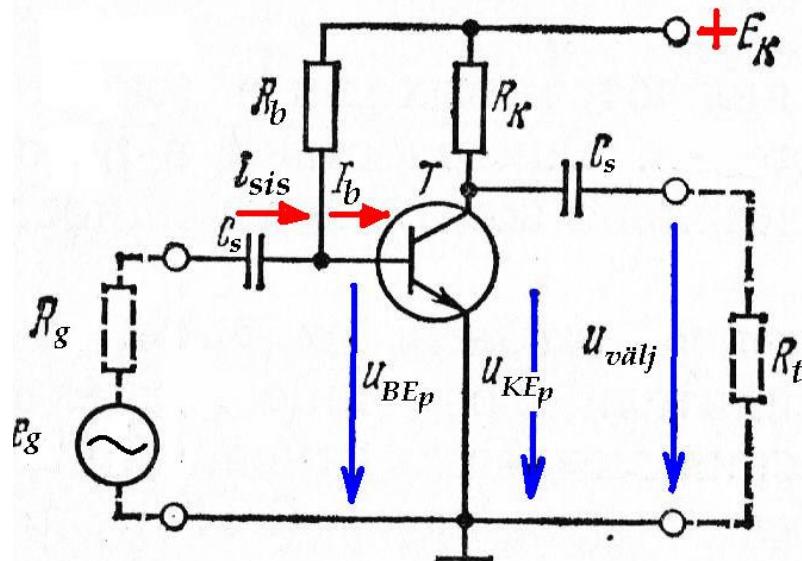


Galvaaniline (otse-) sidestus

→ potentsiaalide kokkusobitamise probleem! → seadme skeem tuleb projekteerida tervenisti!; sagedusribale esimeses lähenuduses piiranguid ei ole, võib üle kanda piiramatu võimsust.



Transistori tööpunkt fikseerimine.



Lähtume väljundkarakteristikatest: $R_K < R_t$ ja samal ajal

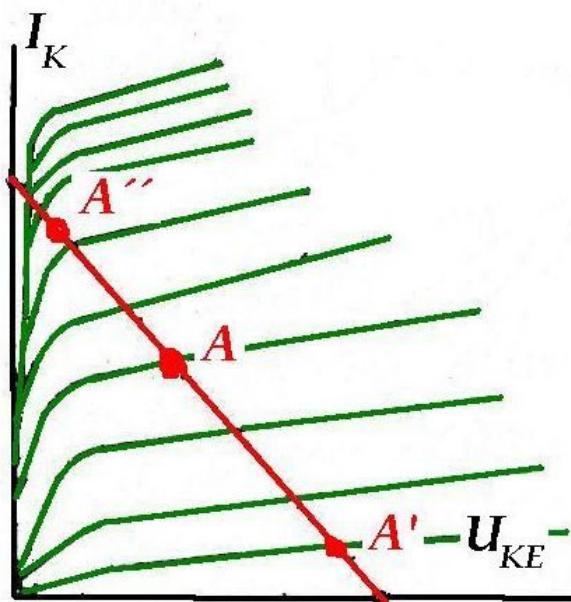
$$R_K \rightarrow \max$$

$$R_K = \frac{E_K - U_{KEp}}{I_{Kp}} \quad I_{Bp} = \frac{I_{Kp}}{\beta}; \quad \rightarrow \quad R_B = \frac{E_K - U_{BEp}}{I_{Bp}}$$

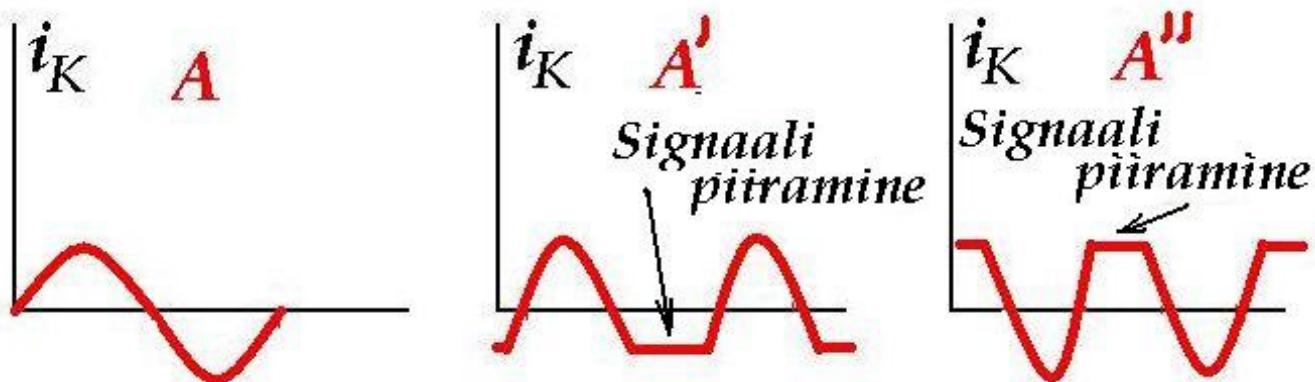
Valida tuleb: $\rightarrow U_{KEp} < E_K/2$; $I_{Kp} > E_K/2R$

Tööpunkt stabiilsus

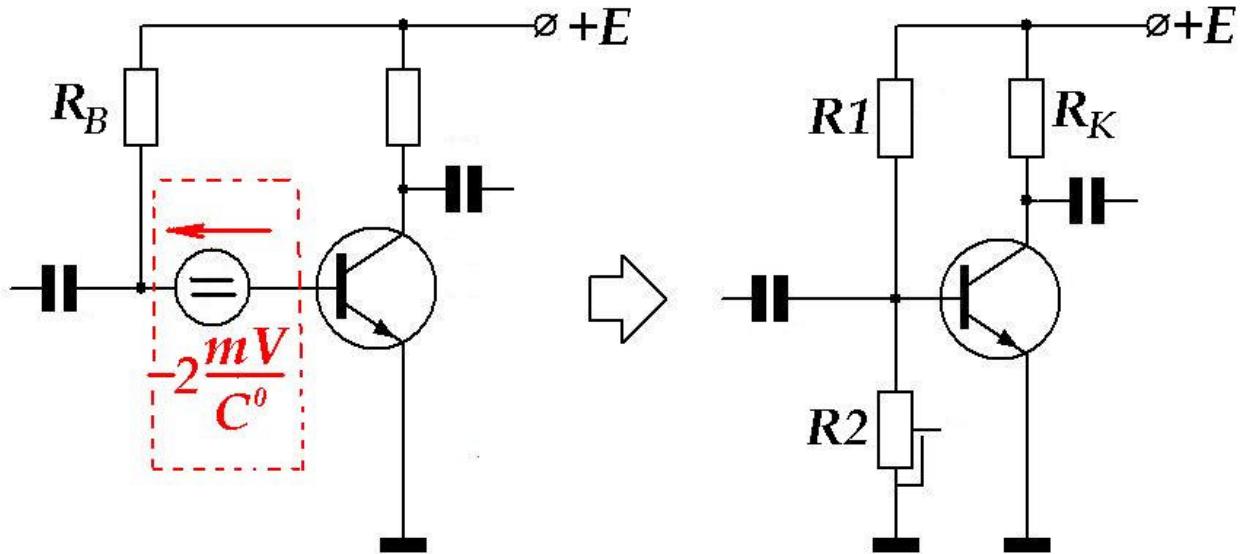
Temperatuurist sõltuvad: I_{K0} ; β ; U_{BE} .
 U_{BE} soojuslik tegur: $\rightarrow -2 \text{ mV/C}^0$.



$$A' \rightarrow \beta \gg \beta_{arvest} \quad A'' \rightarrow \beta \ll \beta_{arvest}$$



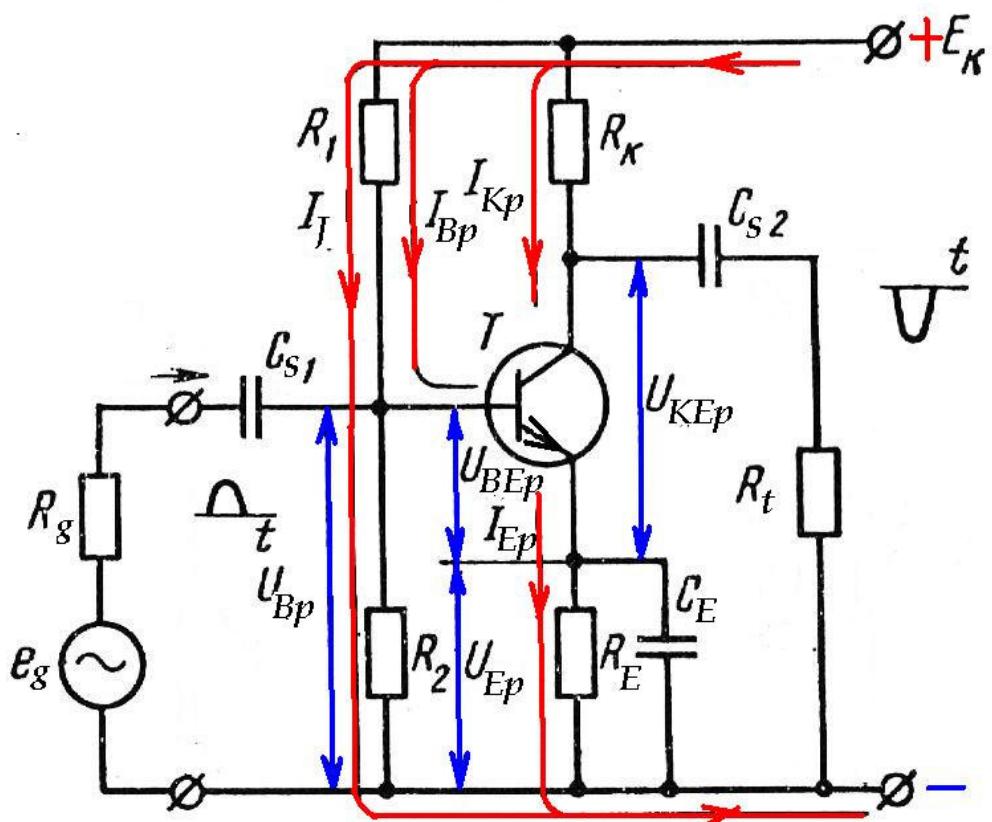
Temperatuuri mõju:



! β kasvab $1\% / K^0$!

→ Stabiilsuse tõstmiseks tuleb rakendada tagasisidet

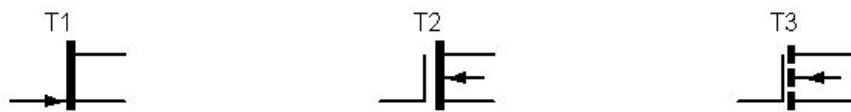
Häälestada tuleb väga täpselt.



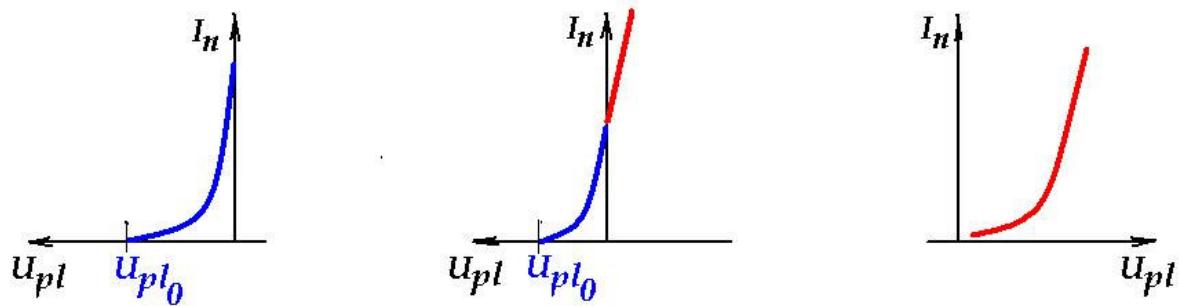
Oletame: $I_{Kp} \uparrow \rightarrow I_{Ep} \uparrow \rightarrow U_{Ep} \uparrow$ (kuna $U_{Ep} = I_{Ep} \cdot R_E$) \rightarrow
 $\rightarrow U_{BEp} \downarrow$ (kuna $U_{BEp} = U_{Bp} - U_{Ep}$) $\rightarrow I_{Bp} \downarrow \rightarrow I_{Kp} \downarrow$

5.3. Võimendusastmed VT baasil

n – tüüpi kanaliga väljatransistorid:

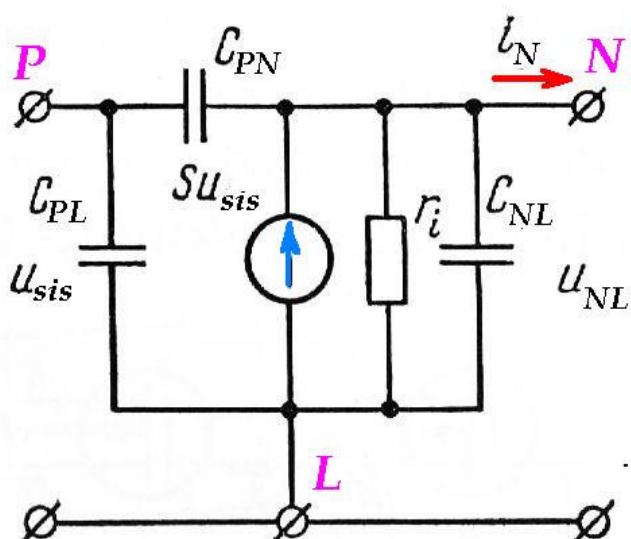


$I_n = f(U_{pl}) \rightarrow$ neelu-paisu karakteristikud. U_{pl0} – sulgepinge.

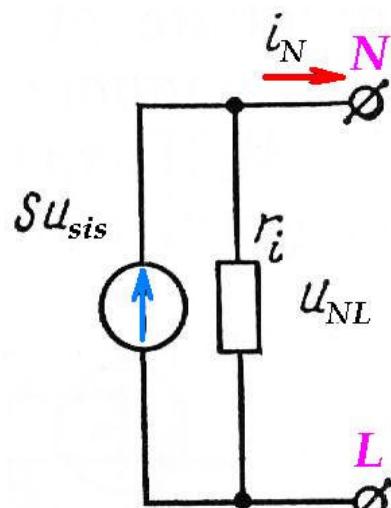


S – neelu-paisu karakteristiku tõus. $S = dI_n/dU_{pl} \mid U_{nl} = \text{const.}$
r_i – transistori sisetakistus → väljundkarakteristikute kallak.

Väljatransistori aseskeemid:

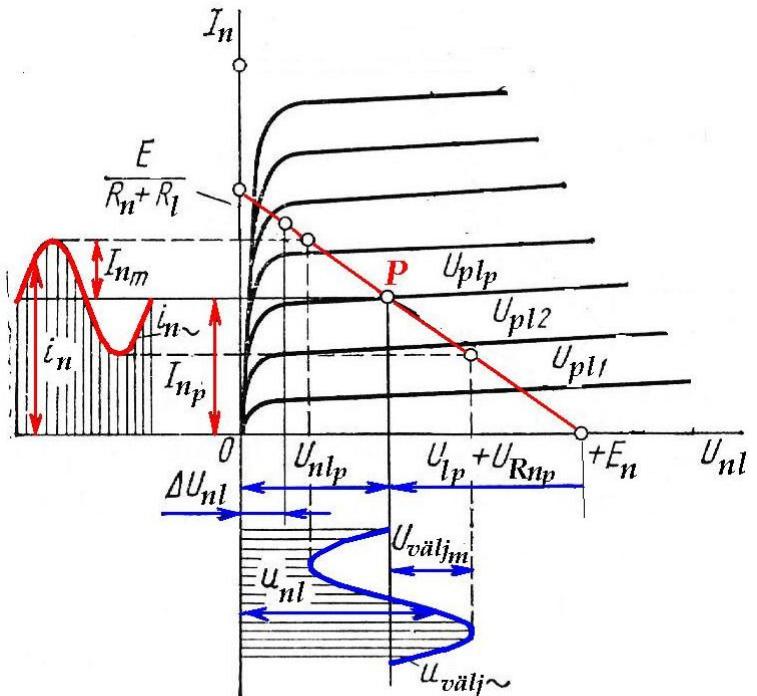
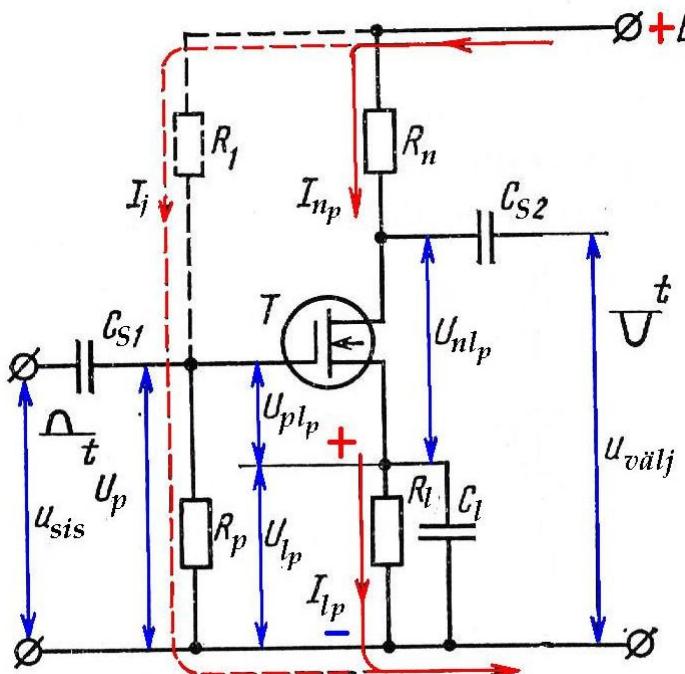


Kõrgetel sagedustel



Madalatel sagedustel

n-kanaline VT:



Režiimi valik: $U_{nlp} > U_{välj_m} + \Delta U_{nl}$; $I_{np} > I_{nm}$

Seos I_{np} ja U_{nlp} vahel: $\rightarrow U_{nlp} = E_n - I_{np}(R_n + R_l)$:

- määräatakse pingega U_{plp} , vastavalt punktile P.

Seda tüüpi transistoril võib olla:

$$U_{plp} = 0; \quad U_{plp} < 0; \quad U_{plp} > 0$$

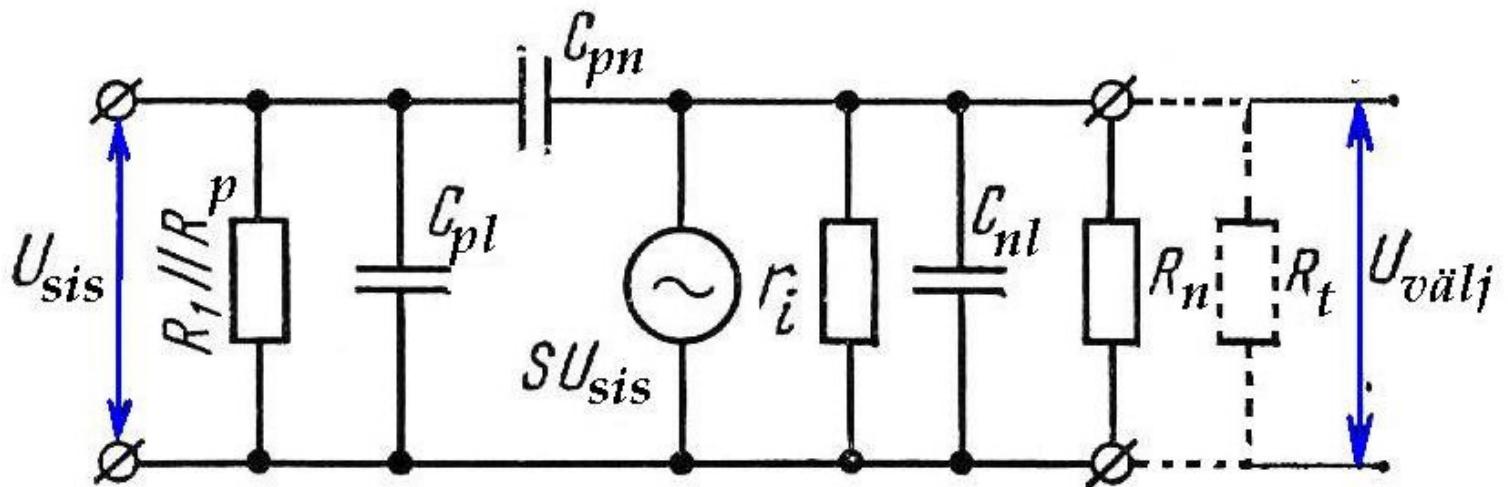
Võiks valida: $R_p = (0,01 - 0,001)r_{sis}$;

R_1 on tagasiside takisti selles võimendusastmes. Stabiilsuse tõstmiseks oleks vaja suurendada R_1 . Sel juhul on vaja kasutada kompensatsiooniks takistit R_1 .

$$U_{plp} \geq 0$$

→ Sel juhul R_1 on kohustuslik.

Selline režiim sobib formeer- ja indutseerkanaliga transistorile. Selline võimendusaste on „faasipöörja“. Signaali arvutus aseskeemi alusel:



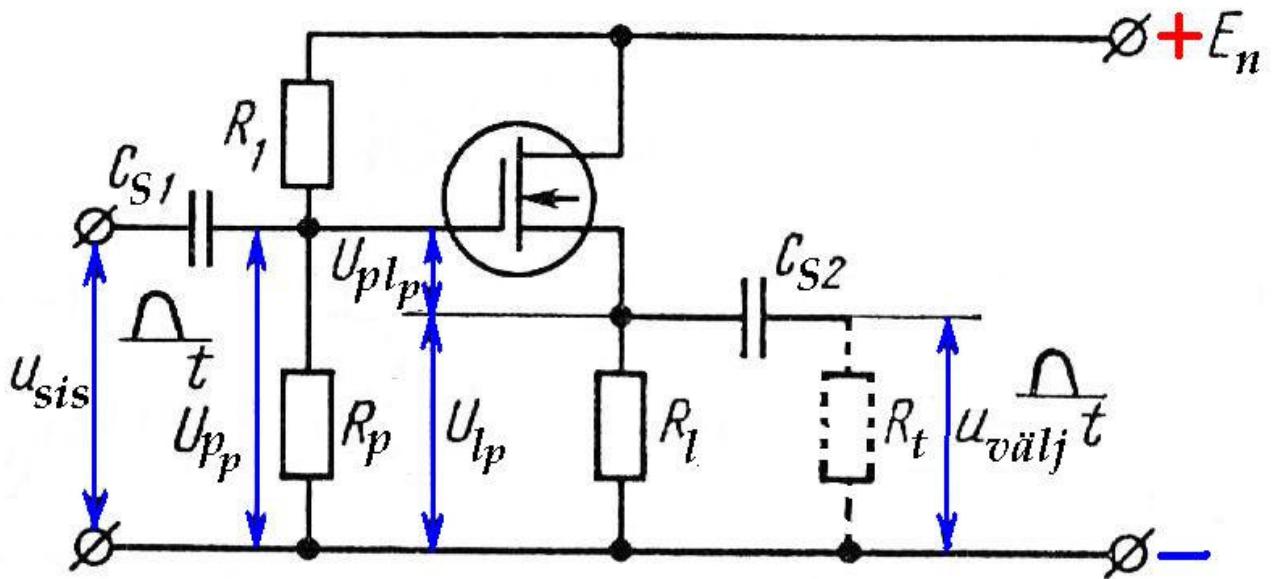
Pingevõimendustegur:

$$K_U = \frac{U_{välj}}{U_{sis}} = \frac{SU_{sis}(r_i \parallel R_n)}{U_{sis}} = S(r_i \parallel R_n)$$

Sisendtakistus $R_{sis} = R_1 \parallel R_p$

Väljundtakistus $R_{välj} = R_n \parallel r_i \approx R_n$

Ühisneeluga võimendusaste .



R₁, R_p, R_l – transistori töörežiimi seadmiseks (eelmise skeemiga analoogselt).

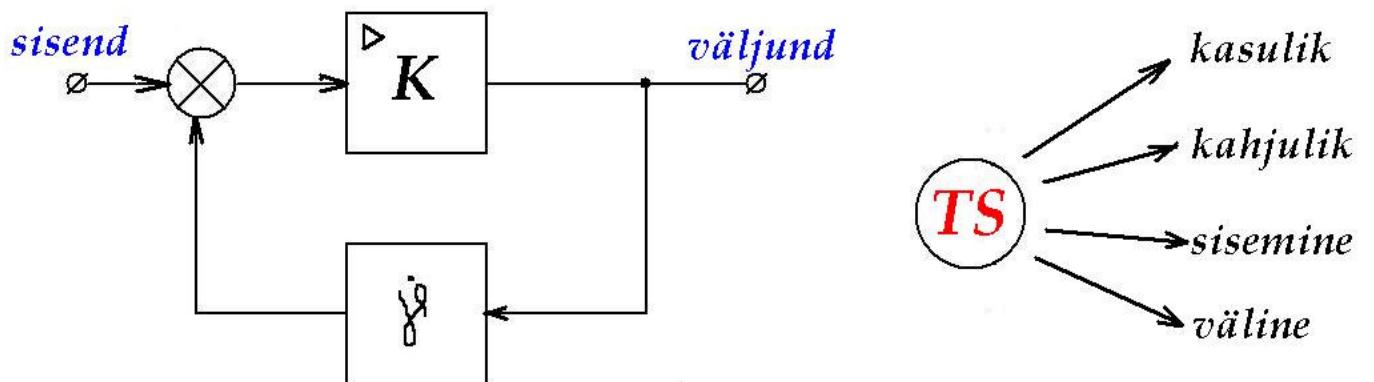
- Kõrge sisendtakistus;
- Vähendatud sisendmahtuvus.

$$K_U \equiv \frac{SR_l}{1 + SR_l} \approx 1$$

Faasipööramist ei toimu!

5.4. Tagasiside võimendites

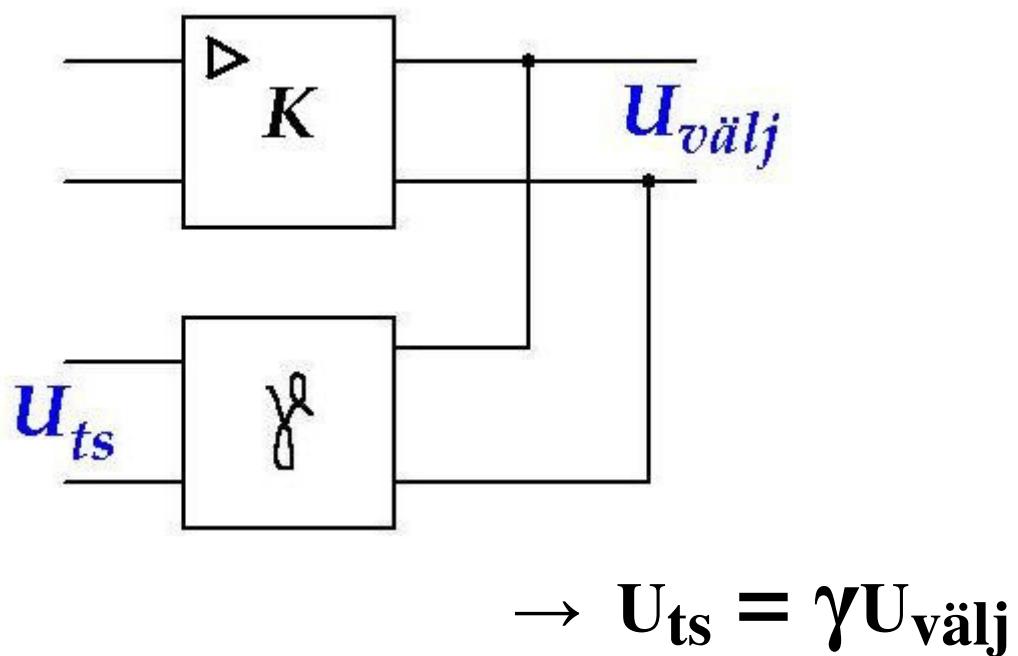
Tagasiside võimendis → selline side, mis annab üle osa kasuliku signaali energiast võimendi väljundist selle sisendile.



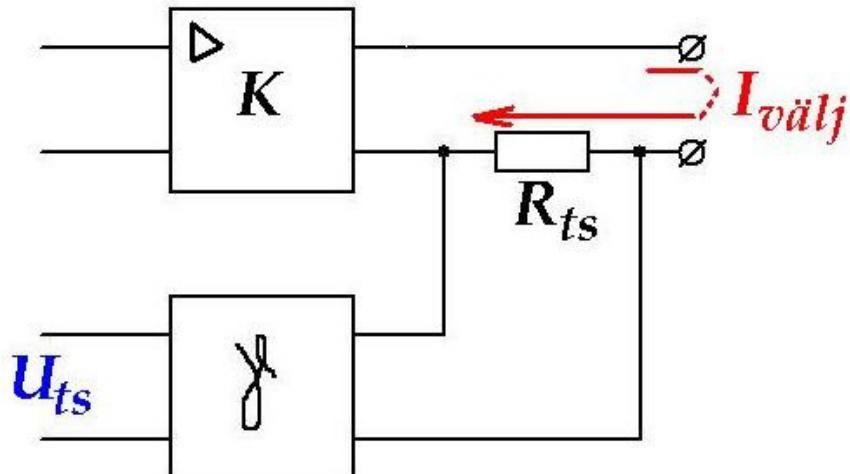
Positiivne TS (PTS) – tõstab võimendustegurit.

Negatiivne TS (NTS) – vähendab võimendustegurit.

1. Tagasiside pinge järgi:

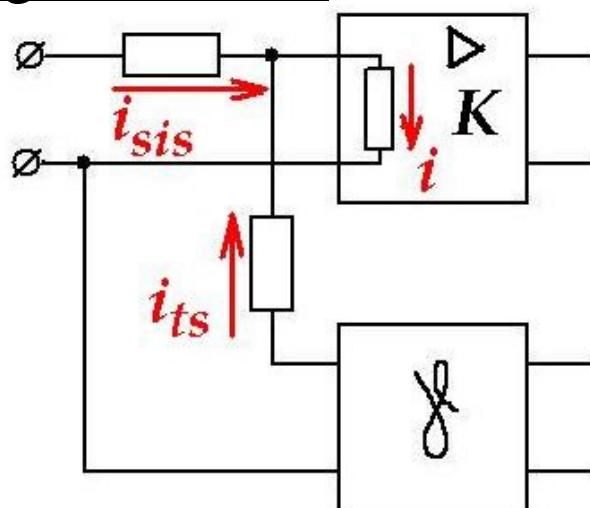


2. Tagasiside voolu järgi:



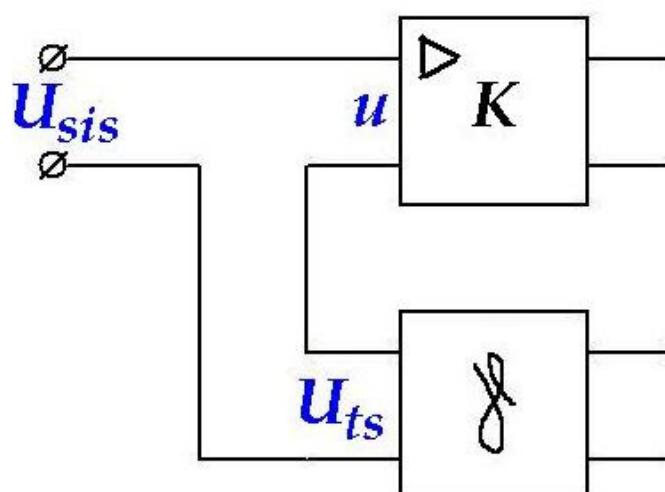
$$\rightarrow U_{ts} = \gamma R_{ts} I_{välj}$$

3. Rööptagasisidestus:



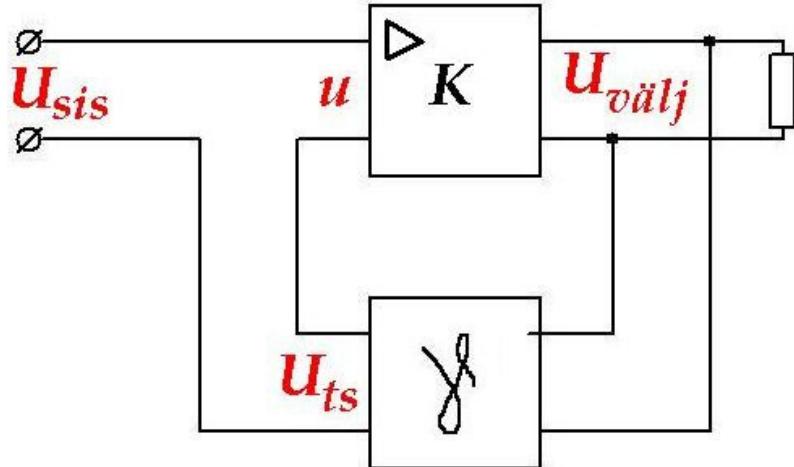
$$\rightarrow i = i_{sis} + i_{ts}$$

4. Jadatagasisidestus:



$$\rightarrow u = U_{sis} + U_{ts}$$

Pinge-jadatagasisidestus võimendis.



Vaja

leida tagasisidega haaratud võimendi ülekandetegur K_{ts}

On teada: $u = U_{sis} + U_{ts}$. Jagades selle võrrandi mõlemad pooled pingega $U_{välj}$ saame:

$$\frac{u}{U_{välj}} = \frac{U_{sis}}{U_{välj}} + \frac{U_{ts}}{U_{välj}}$$

Kuna on teada, et:

$$\frac{U_{välj}}{u} = K ; \quad \frac{U_{välj}}{U_{sis}} = K_{ts} ; \quad \frac{U_{ts}}{U_{välj}} = \gamma$$

$$\text{Siis: } \frac{1}{K} = \frac{1}{K_{ts}} + \gamma \quad \text{või} \rightarrow$$

$$K_{ts} = \frac{K}{1 - K\gamma}$$

$K\gamma < 0 \rightarrow \text{NTS}$

$$K_{NTS} = \frac{K}{1 + K\gamma} \rightarrow \underline{K_{NTS} < K !}$$

Juhul, kui $|K\gamma| \gg 1$, $K_{NTS} \cong \frac{1}{\gamma}$: Sügava NTS`i

puhul **K_{ts} ei sõltu K !** ; $(1 - K\gamma) \rightarrow$ tagasiside sügavus

.....

Vaja leida (põhivalemist) ülekandeteguri K_{ts} diferentsiaali:

$$dK_{ts} = \frac{dK(1 - K\gamma) - K(-\gamma)dK}{(1 - K\gamma)^2} = \frac{dK}{(1 - K\gamma)^2}$$

Jagame K_{ts} , saame suhtelise mittestabiilsuse (TS puhul):

$$\frac{dK_{ts}}{K_{ts}} = \frac{dK}{K} \cdot \frac{1}{1 - K\gamma} \cong \frac{dK}{K} \cdot \frac{K_{ts}}{K}$$

Suhteline mittestabiilsus otseselt sõltub tagasiside sügavusest:
 → Rakendame NTS ja sellega vähendame algset K 10 kordsest ($\gamma=0,01$):

$$\dots \text{juhul, kui } \frac{dK}{K} = 5\%, \text{ ja } K_{ts} = 0,1K \rightarrow \frac{dK_{ts}}{K_{ts}} = 0,5\%$$

.....

$\gamma = 0$ → $K\gamma = 0$ → tagasisidet ei ole, → $K_{ts} = K$.

$K\gamma > 0$, kuid $|K\gamma| < 1$, ($1 \geq K\gamma \geq 0$) → PTS – positiivne tagasiside

Sel juhul $K_{ts} > K$, → stabiilsus langeb.

$K\gamma > 0$ ja $|K\gamma| = 1 \rightarrow K_{ts} = \infty \rightarrow$ iseergutamine, -- $U_{välj}$ olemas, kui $U_{sis} = 0$. \rightarrow Võnkumised laias sageduse diapasoonis.

Kui K ja γ on komplekssuurused, ning $|K\gamma| \geq 1$ - - iseergutamine konkreetsel sagedusel, siinusvõnkumised.

Kuidas TS mõjub võimendi sisend- ja väljundtakistusele:

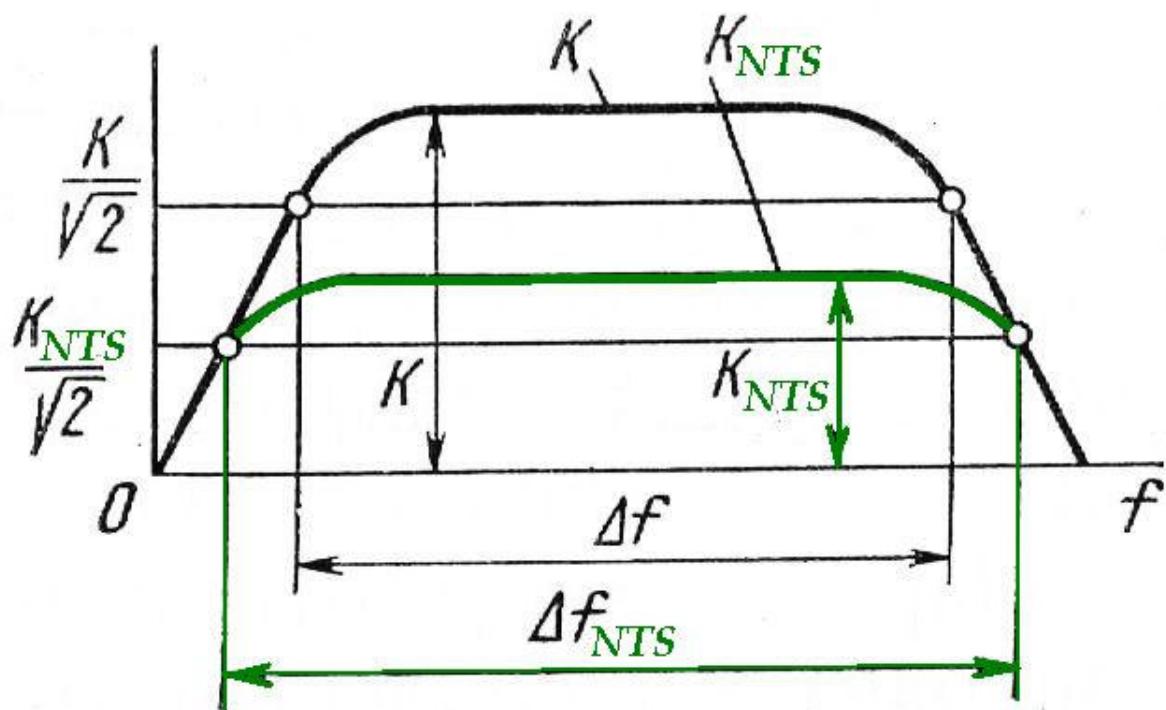
$$R_{sisTS} = R_{sis} \frac{K}{K_{ts}}$$

NTS → suurendab R_{sis} , **PTS** → vähendab R_{sis} .

$$R_{väljTS} = R_{välj} \frac{K_{ts}}{K}$$

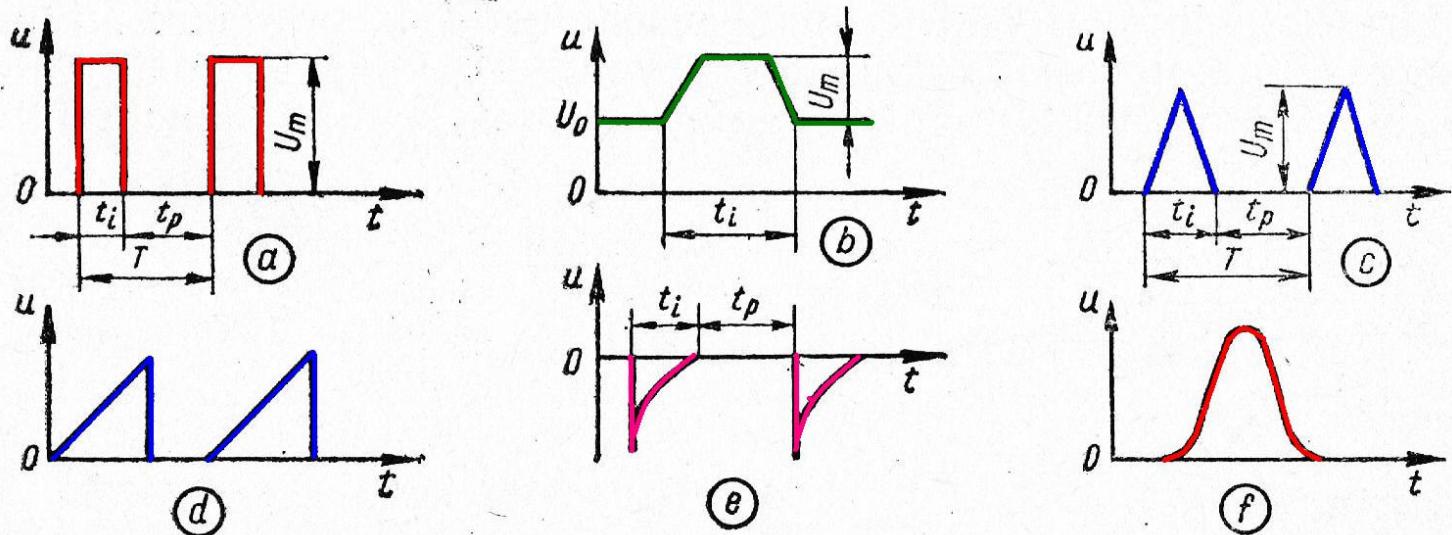
NTS → vähendab $R_{välj}$, **PTS** → suurendab $R_{välj}$

Sagedusriba laiendamine NTS puhul:



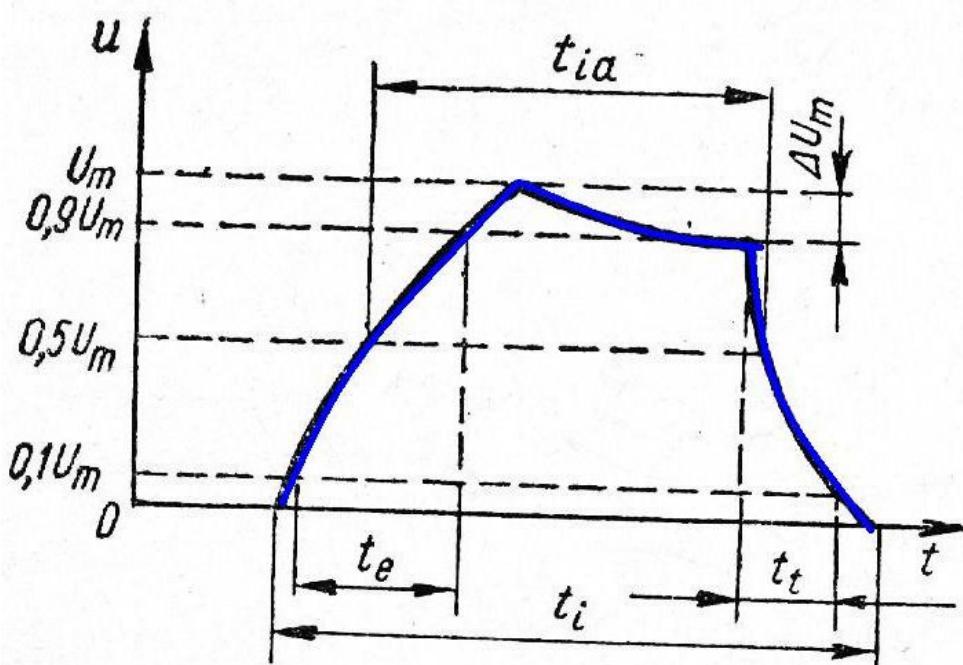
Impulsside liigid ja parameetrid.

Eristatakse kaht liiki impulsse: video- ja raadioimpulsse. Videoimpulss on lühiajaline pinge- või voolumuutus alalisvoolu ahelas. Raadioimpulss on lühiajaline pinge või voolu jada, mille piirdekõveral on videoimpulsi kuju.



Videoimpulsid: a — ristkülik-; b — trapets-; c — kolmnurk-;
 d — saehambahakujuline; e — eksponent-; f — kellukakujuline impulss

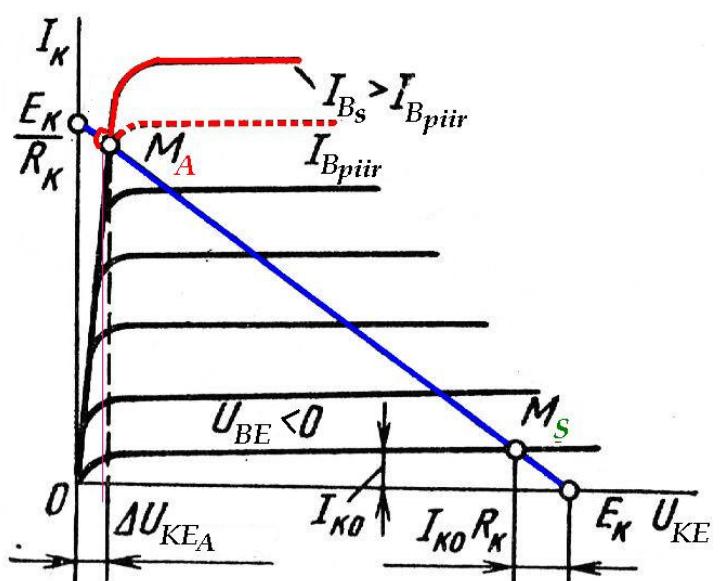
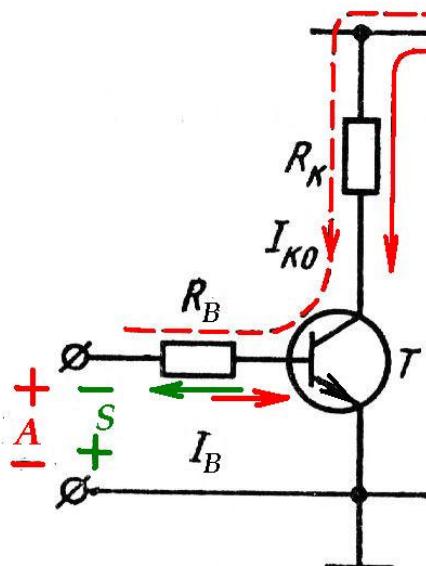
Reaalse ristkülikimpulsi parameetrid:



Ristkülikimpulsi tegelik kuju

5.5. Bipolaartransistori töö lülitri režiimis (staatika)

Aktiivne koormus:



1) Sulgealas: $U_{\text{sis}} \rightarrow + - S$.

$$\text{Sulgemispinge } U_{BE} = U_{\text{sis}} - I_{k0(E)} R_B < 0$$

2) Küllastusalas: $U_{\text{sis}} \rightarrow + - S$.

Küllastuse piirini: $I_K = B_{st} I_B + (1 + B_{st}) I_{k0(E)} \approx B_{st} I_B$

Transistor täielikult avatud: $I_K = (E_K - \Delta U_{KEA}) / R_K$;

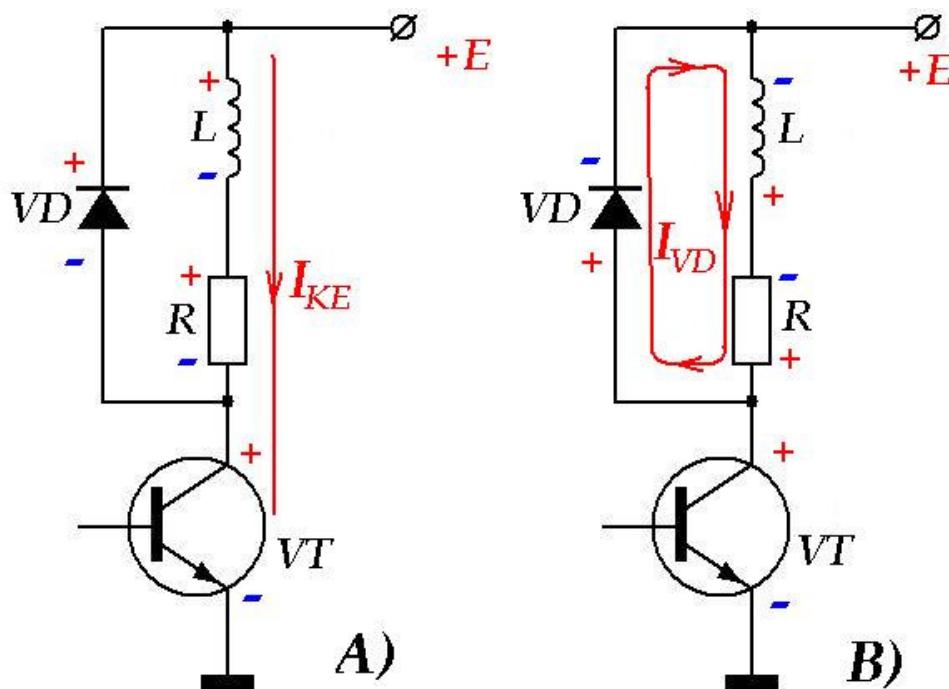
Kui oletada $\Delta U_{KEA} \approx 0 \rightarrow I_{Bpiir} = I_K / B_{st} \rightarrow \frac{E_k}{B_{st} R_k}$ Kui voolu I_B veel suurendada. \rightarrow tööpunkt nihe.

Alati tuleb anda $I_B > I_{Bpiir}$

$$S = \frac{I_B}{I_{Bpiir}}$$

S – küllastustegur, $S = 1,5 - 2,0$

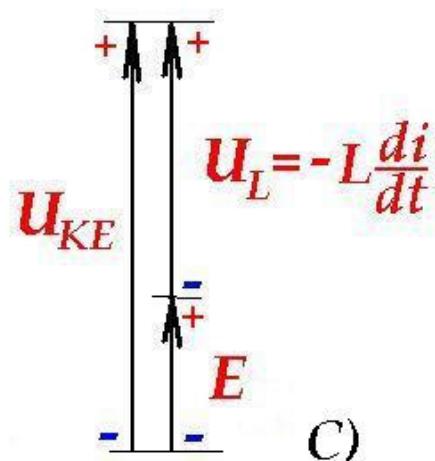
Transistori koormus peab olema šunteeeritud vastuvoolu dioodiga juhul, kui tema koosseisus on induktiivne komponent



A) Pingelangud ahelas, transistori lahtiolekul (vastuvoolu diood VD on vastupingestatud ja kinni).

B) Situatsioon vahetult peale transistori väljalülitamist. (U_L vahetas polaarsust ja avas dioodi VD . Koormuse reaktiivvool sulgub kontuuris $L - R - VD$, moodustades voolu I_{VD}).

C) Transistori pinge U_{KE} vastuvoolu dioodi puudumisel.



5.6. Stabilise voolu generaatorid

Bipolaartransistori alusel, ühisbaasiga lülituse (ÜB) kasutamine.

Väljundvool jäääb konstantseks, kuni

$$U_{KE} > U_{KESAT}$$

$$I_t \approx I_E = \frac{U_B - U_{BE}}{R_E}$$

← Parem nii: pinget U_B saame stabilitronilt.

$$I_t \approx I_E = \frac{U_{st} - U_{BE}}{R_E}$$

Lihne “voolu peegel”

↑ Skeemides $U_{BE} \rightarrow - 2\text{mV/grad}$!

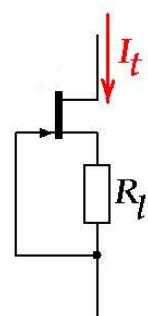
Oleks hea kompenseerida. Oletame: $U_{BE} = U_D$

$$I_t \approx I_E = \frac{U_B - U_{BE}}{R_E} = \frac{IR2 + U_D - U_{BE}}{R_E} \approx \frac{R2}{R_E} I$$

$I_t = (R1/R_E) \cdot I$ Vool I_t proportsionaalne voolule I , s.t. → “voolu peegel”

Väljatransistori baasil, (ÜL)

$$R_l = \frac{U_{pl}}{I_t}$$

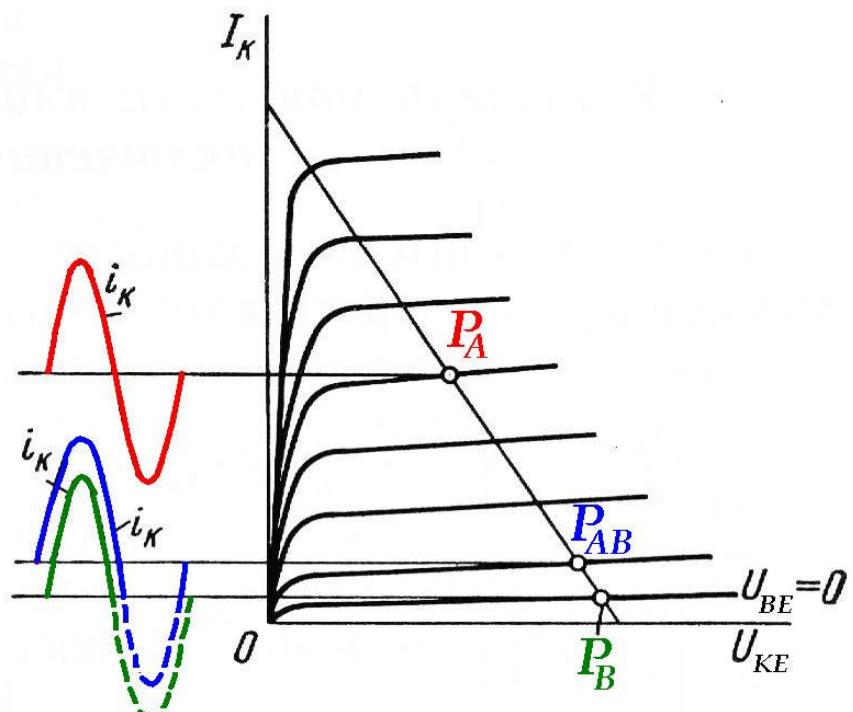
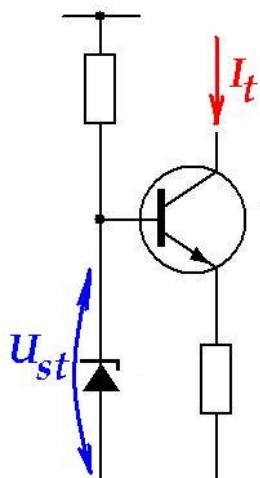


5.7. Võimsusvõimendid

Võimendataava signaali mittelineaarmoonutuse suuruse ja võimendusastme kasuteguri määrab astme töörežiimi (klassi) valik. Sõltuvalt tööpunktiga asendist eristatakse võimendusastmete töötamist kahes põhiklassis: A ja B.

Tavaliselt see on väljundastmed → ÜE-ÜL, ÜK-ÜN.

Side koormusega: trafo abil, kond.sidestus, otsesidestus.



Klass **A** → ühetaktilised võimsusvõimendid.

→ Kasutatakse lõppvõimendina mitmeastmelistes süsteemides, juhul, kui väljundsignaali pingे peab olema suurem, kui toitepinge (trafosidestusega).

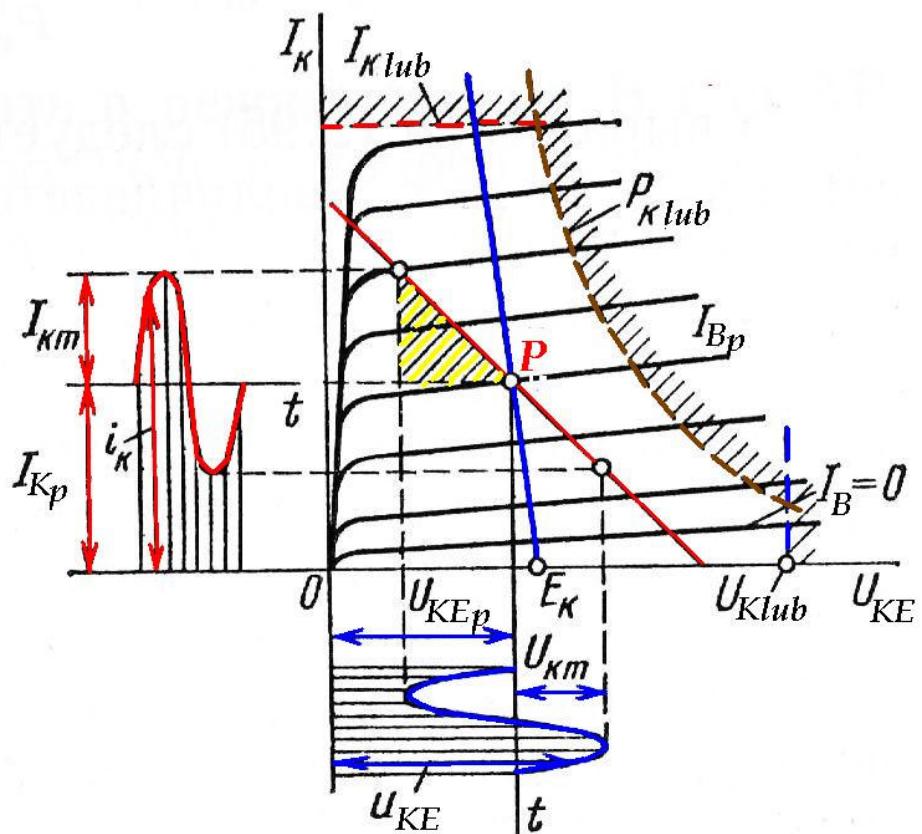
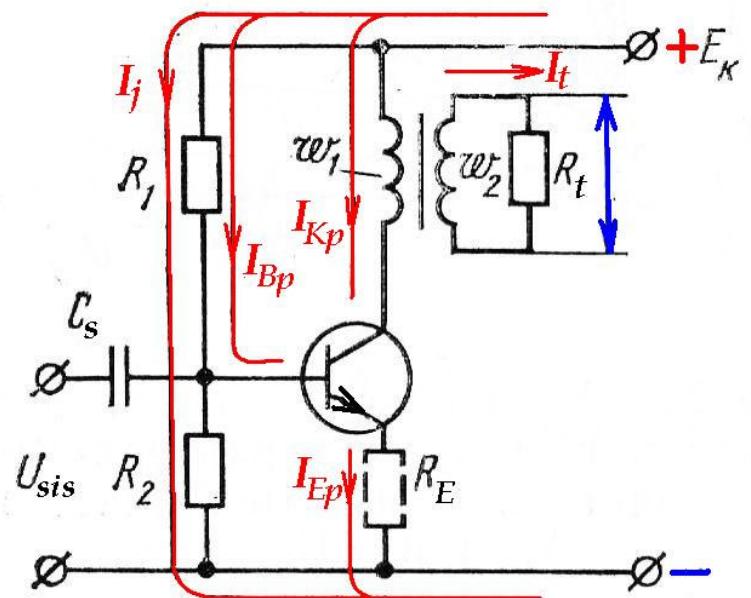
Klass **B** → vastastakt-skeemid (kahetaktilised skeemid).

→ Suurema väljundvõimsuse saamiseks, kuna omavad ka suurema kasutegurit, võrreldes A-klassiga.

Režiim **AB** → parandatud B klass.

→ Mittelineaarmoonutuste vähendamiseks. A- ja B-klassi vahepealne.

Klass A – ühetaktiline skeem



Transistori valik: $U_{KElub} > U_{KEp} + U_{Km} \approx 2E_K$

“

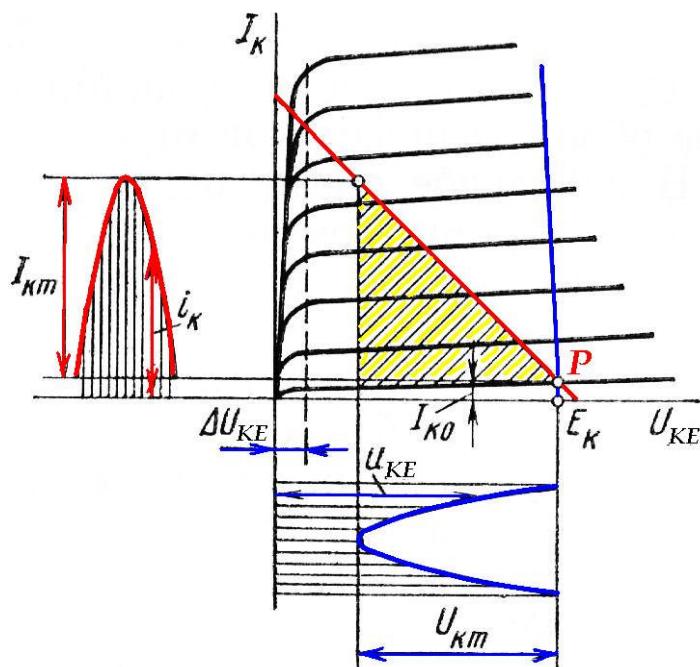
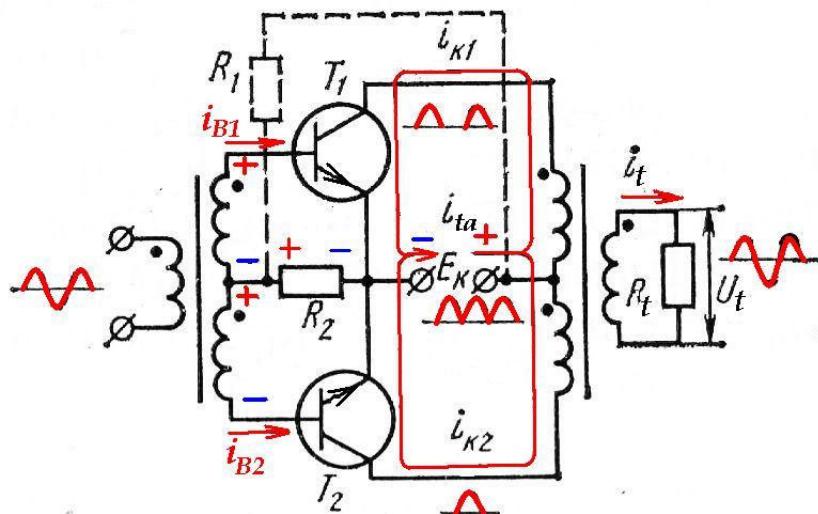
Võimsuse kolmnurk " → L → võimendusastme võimsus

$$P_{\text{väljK}} = U_{Km} \cdot I_{Km} / 2; \quad \text{Kasutegur: } \eta = \eta_{\text{ast}} \cdot \eta_{\text{trafo}}$$

$$\eta_{\text{ast}} = \frac{P_{\text{väljK}}}{P_{t.all}} = \frac{U_{Km} \cdot I_{Km} / 2}{\approx U_{KEp} \cdot I_{Kp}} = \frac{U_{Km} \cdot I_{Km}}{2U_{KEp} \cdot I_{Km}}$$

Juhul, kui oletada et $I_{Km} = I_{Kp}$; $U_{Km} = U_{KEp}$, $\eta_{\text{trafo}} = 1,0$
siis $\rightarrow \eta_{\text{max}} = 0,5$. Reaalselt: $\rightarrow \eta = 0,35 - 0,45$.

Vastastaktskeem (kahetaktiline). Klass B.



Transistori valik pinge järgi: $U_{KElub} \geq 2E_K$.

Võimsus, mida võetakse toiteallikast:

$$P_{t.all} = I_{t.all} \cdot E_K = \frac{2I_{Km} \cdot E_K}{\pi}$$

kus $I_{t.all} = \int_0^{\pi} I_{Km} \sin v dv = \frac{2I_{Km}}{\pi}$

„Võimsuse kolmnurk“ $\llcorner \rightarrow$ astme võimsus $P_{välj.K} = \frac{U_{Km} \cdot I_{Km}}{2}$

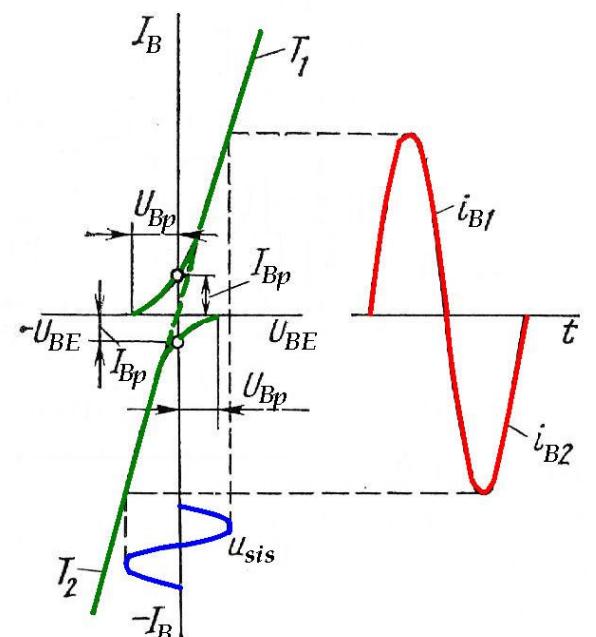
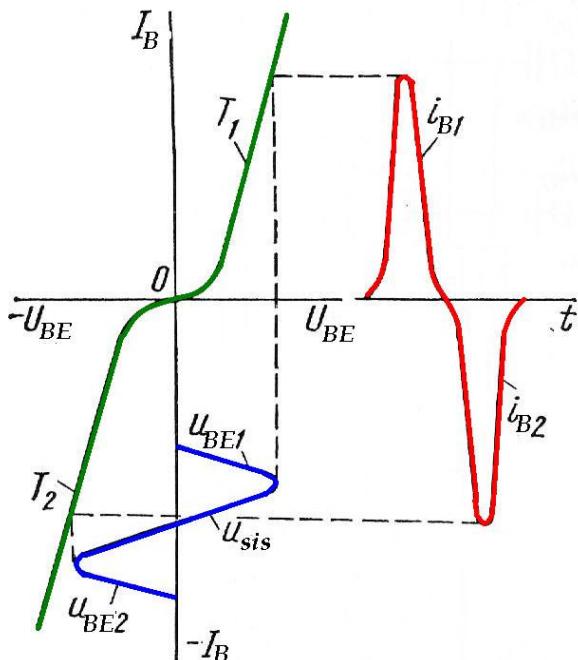
Võimendusastme kasutegur (kollektorahelas):

$$\eta_{ast} = \frac{P_{välj.K}}{P_{t.all}} = \frac{U_{Km} \cdot I_{Km} / 2}{2E_K \cdot I_{Km} / \pi} = \frac{\pi \cdot U_{Km}}{4E_K}$$

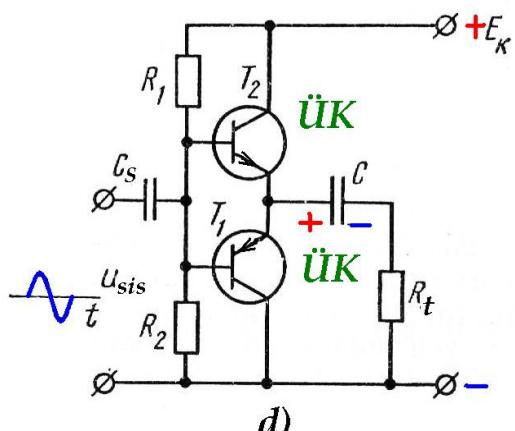
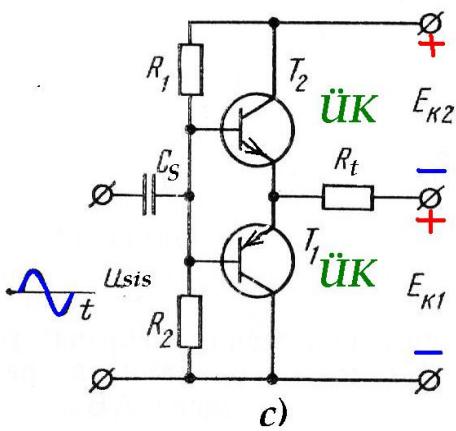
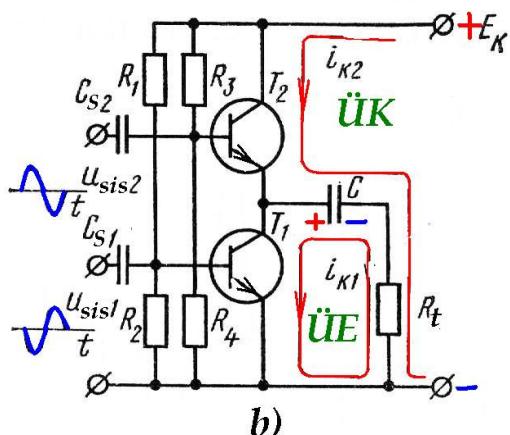
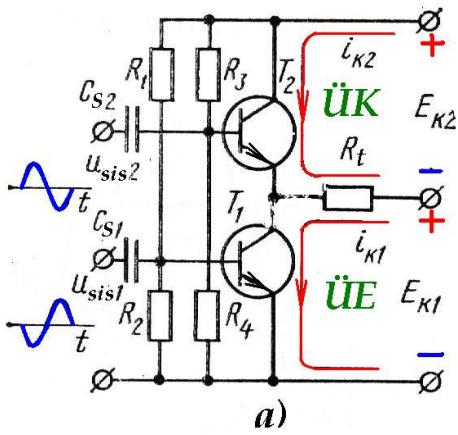
Teada: $\eta = \eta_{ast} \cdot \eta_{trafo}$. Kui oletada, et $U_{Km} = E_K$ ja $\eta_{trafo} = 1$ siis $\rightarrow \eta_{max} = 0,785 \rightarrow 1,5$ korda suurem, kui 1 takt. skeemis.

Klass AB

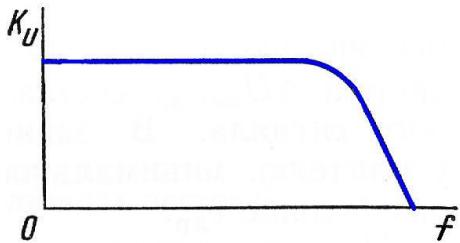
Puhtal B-klassil on suured mittelineaarmoonutused, kuna väiksete baasi voolude puhul sisendkarakteristikud on mittelineaarsed.



Tuleb rakendada R_1, R_2 abil anname mingu algnihkepinge transistoride baasidele, mis vastab sisendkarakter. algusele (U_{Bp}) ja kutsub välja baaside algvoolude (I_{Bp}) tekkimise. Sel juhul ekvivalentne sisendkarak. on sirge.
Kui trafode kasutamine on välistatud, siis võib käituda nii:

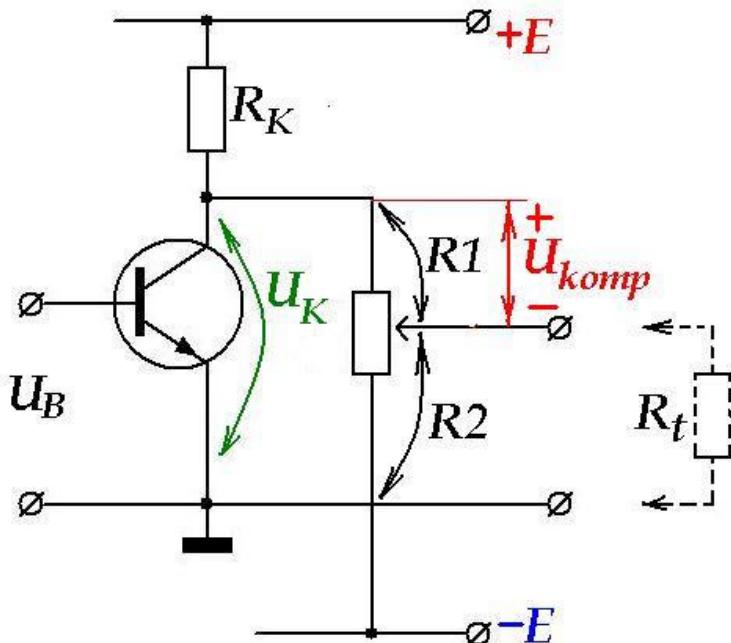


5.8. Alalisvooluvõimendid (AVV)



Probleemid:

- 1) Sidede loomine, mis kompenseeriksid U_{KEp} , U_{BEp} , j.n.e.
- 2) Triivide vähendamine.



U_{sis} kutsub välja

$$\Delta U_K = U_K - U_{Kp}$$

U_{Kp} – alaliskomponent.

Selleks, et saada ΔU_K on

vaja kompenseerida U_{Kp}

Siis kui $U_{sis} = 0 \rightarrow$

$$U_{välj} = 0$$

Kompenseeriv pinge U_{komp} tekib lisapingega $-E$ ja jaguri $R1, R2$ abil. Pingelang takistil $R1$ ongi $U_{komp} = U_{Kp}$.

Kahjuks pingejagur $R1, R2$ vähendab ka kasulikku signaali:

$$U_{välj} = \gamma \cdot \Delta U_K ; \quad \text{Kus} \quad \gamma = \frac{R2IIR_t}{R1 + R2IIR_t}$$

Üks võimalustest: $R1$ asemel kasutada stabilitron. Sel juhul:

$$r_{dif} \ll R1, \text{ ja } U_{st} = U_{Kp} .$$

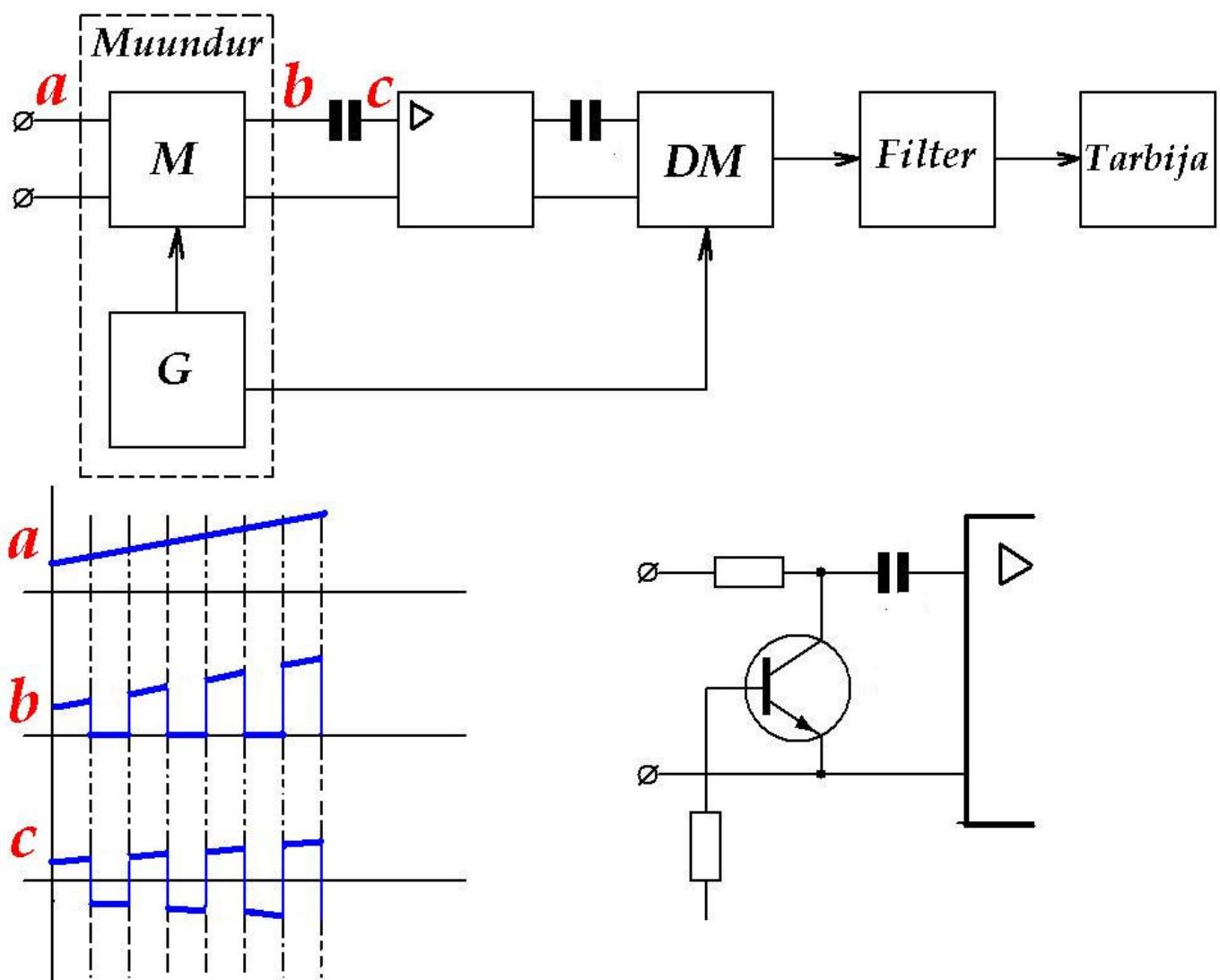
.....

Üldine võimendus väike, 2-3 astet, pinged 0,05-0,1V; (triiv segab).

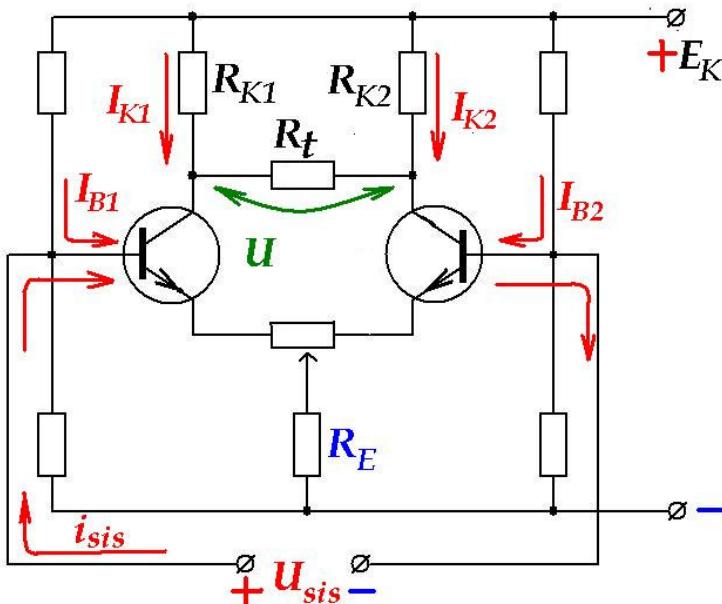
Triiv – kontrollimata $U_{\text{välj}}$ muudatus, kui $U_{\text{sis}} = \text{const.}$

- Vasturohi:** → 1) Termostateerimine,
2) Termokompensatsioon,
3) Skeemiline termostabilisatsioon,
4) **M – DM** süsteemid,
5) Tasakaalustusskeemid.

M – DM süsteem → sagedusmuundus-alalisvooluvõimendi.



Rööptasakaalustatud AVV skeem.

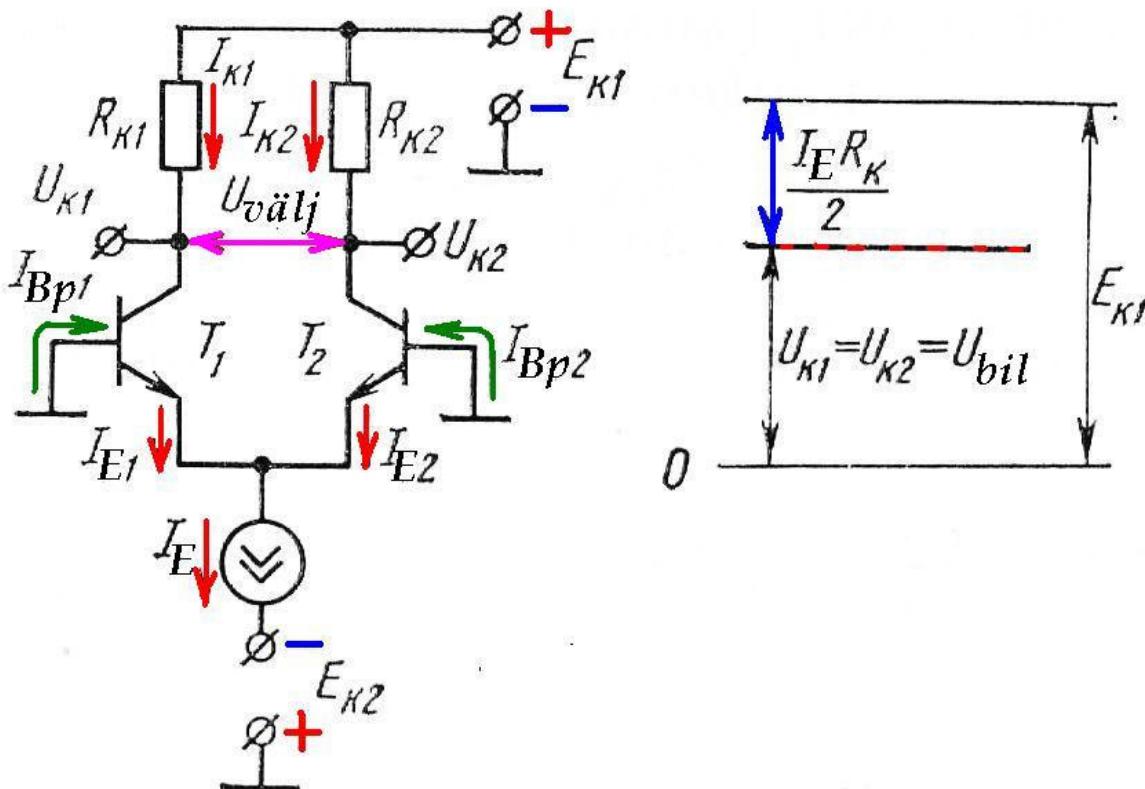


NTS voolu järgi
(R_1, R_2, R_E)

1) Kui $U_{sis} = 0$
→ $I_{K1} = I_{K2}$ ja vastavalt väljundpinge U :
 $U = U_{Kp1} - U_{Kp2} = 0$

2) Kui sisendisse anda U_{sis} :
→ $I_{B1} \uparrow, I_{K1} \uparrow ; I_{B2} \downarrow, I_{K2} \downarrow$. → $U = \Delta I_{K1} R_{K1} + \Delta I_{K2} R_{K2}$. Muutub U_{sis} polaarsus, muutub ka U polaarsus.
Skeem sümmeetriline, → triivi (soojuslikku) ei ole!

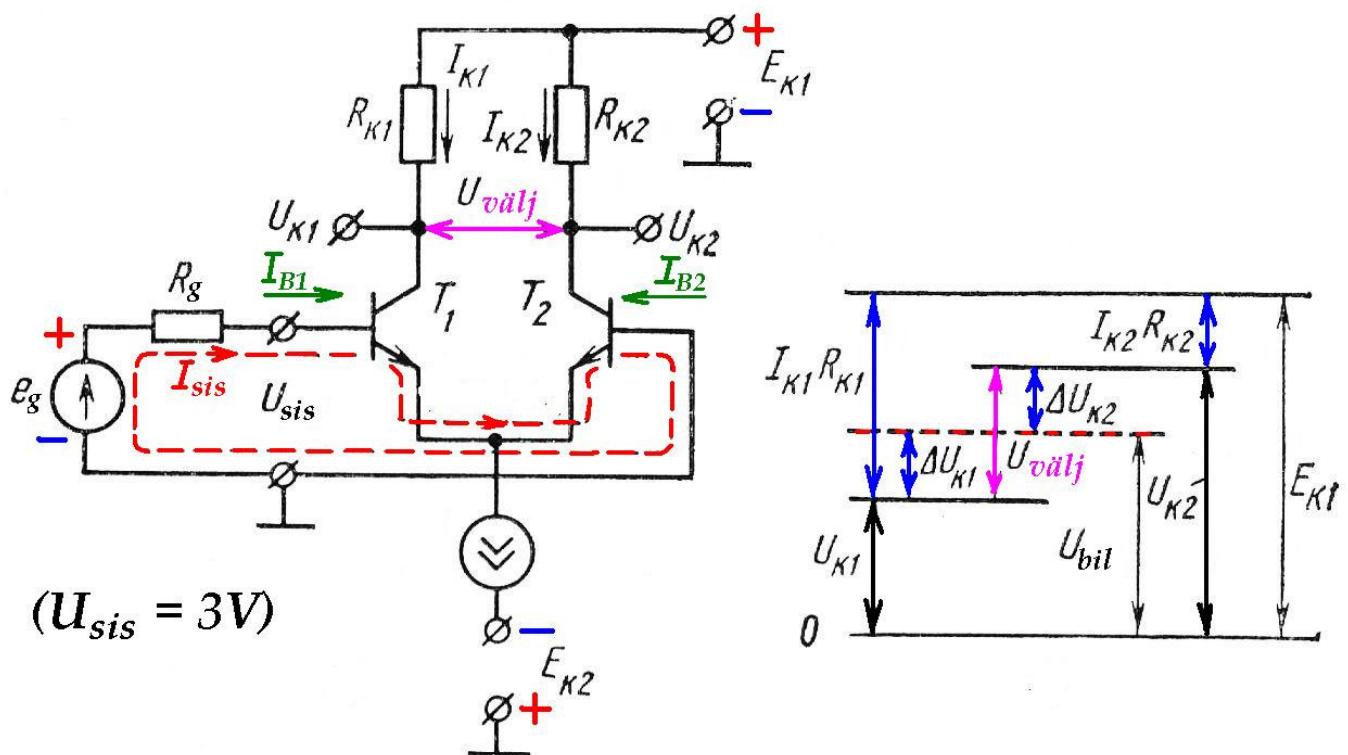
Diferentsvõimendi.



Ühise emittertakisti R_E asemele on kasutatud stabiilse voolu allikas I_E . $\rightarrow I_{E1} = I_{E2} = \frac{1}{2} I_E = \text{const.}$

Diferentsvõimendi ei reageeri alalis (sünfaasse) komponendi peale, - ainult diferentsiaalse komponendile. Emitterite potentsiaali vähendamiseks on rakendatud lisapingeallikas $- E_{K2}$. Kui skeemi sisendite peale pole midagi antud, skeem viibib tasakaalus, ja $U_{\text{välj}} = 0$.

Kui skeemi ühele sisendile (näiteks, vasakpoolsele) anda mingi pingi, skeem läheb tasakaalust välja.



Tekib sisendvool I_{sis} . Selle tõttu I_{B1} suureneb I_{B2} väheneb.

$$I_{E1} + I_{E2} = I_E = \text{const}$$

$$U_{\text{välj}} = U_{K2} - U_{K1} = \Delta U_{K2} + \Delta U_{K1} = 2\Delta U_K$$

Väljundid: T₁ kollektori poolt → **inverteeriv**;

T₂ kollektori poolt → **mitteinverteeriv**.

Samuti ka sisendite kohta....

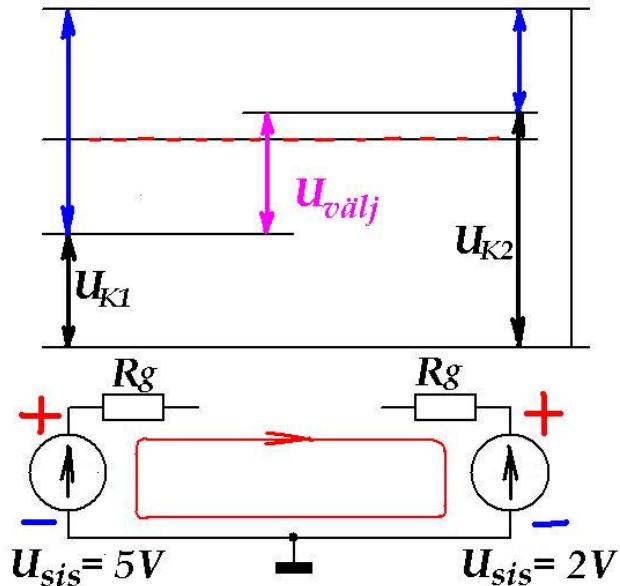
Arvestades R_t :

$$K_{Ud} = \frac{\beta(2R_K IIR_t)}{R_g + 2r_{sis}};$$

Juhul, kui $R_t = \infty$, $R_g = 0$:

$$K_{Ud} = \frac{\beta R_K}{r_{sis}} = \frac{\beta R_K}{r_b + (1 + \beta)r_E}$$

Kui signaalid on mõlemal sisendil:

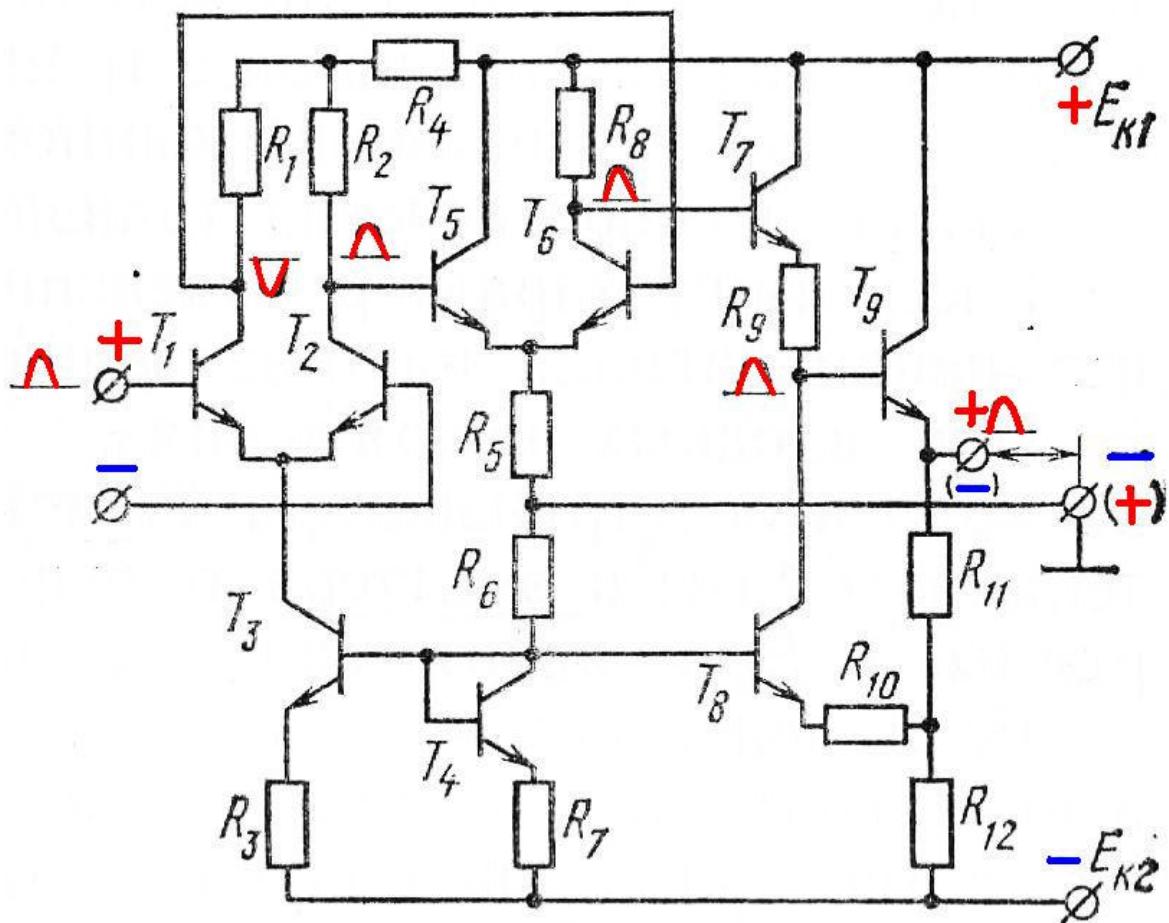
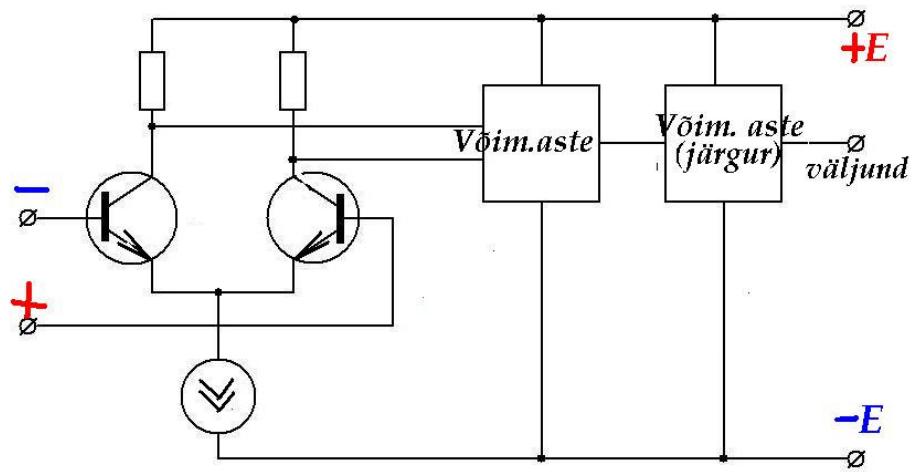


Ühissignaali võimendustegur:

$$K_{Usf} = \frac{\Delta U_{bil}}{E_{sf}};$$

Ühissignaali nõrgendustegur:

$$\ddot{USNT} = \frac{K_{Ud}}{K_{Usf}}; \quad \ddot{USNT} = 20 \lg \frac{K_{Ud}}{K_{Usf}};$$

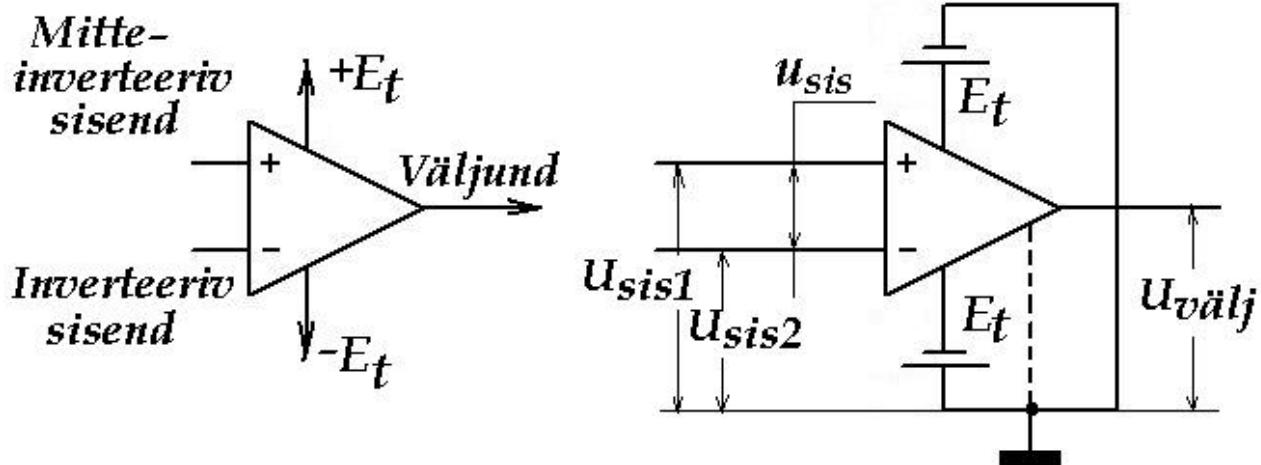


5.9. Operatsioonvõimendid

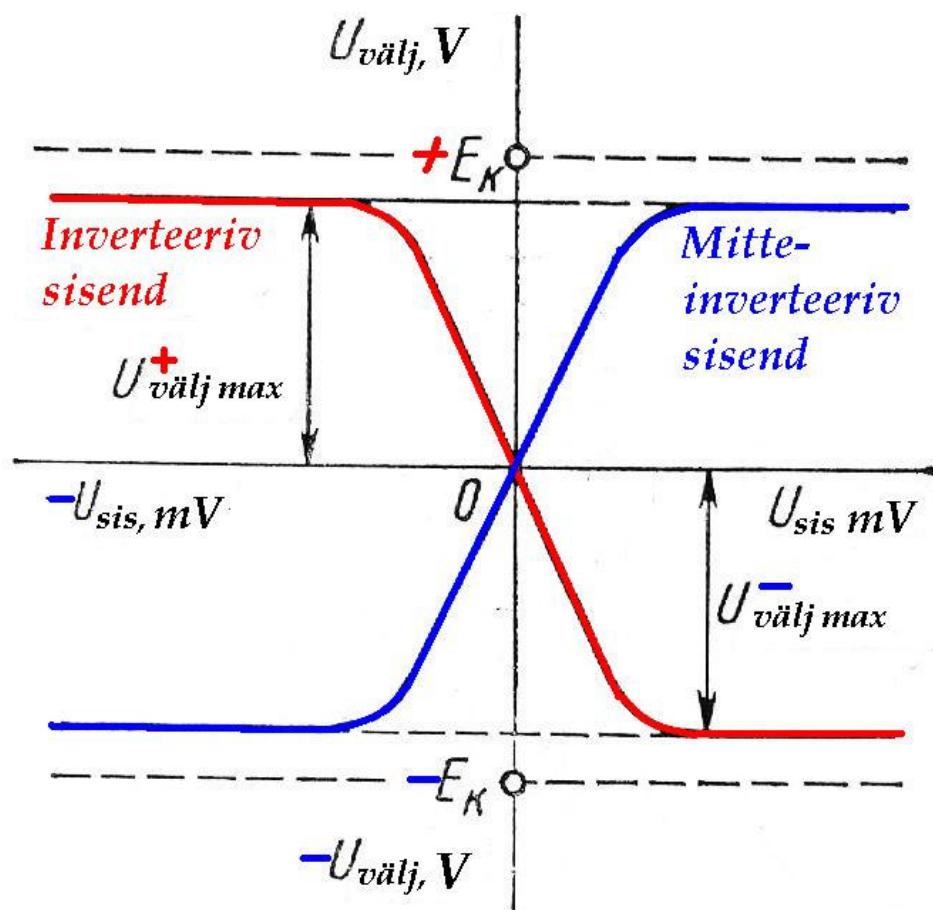
→ AVV, $K_{Ud} = \infty$; dif. sisend, üldjuhul kahepolaarne toide.

Mitteinverteeriv sisend: → $\Delta U_{välj}$ on faasis ΔU_{sis} ;

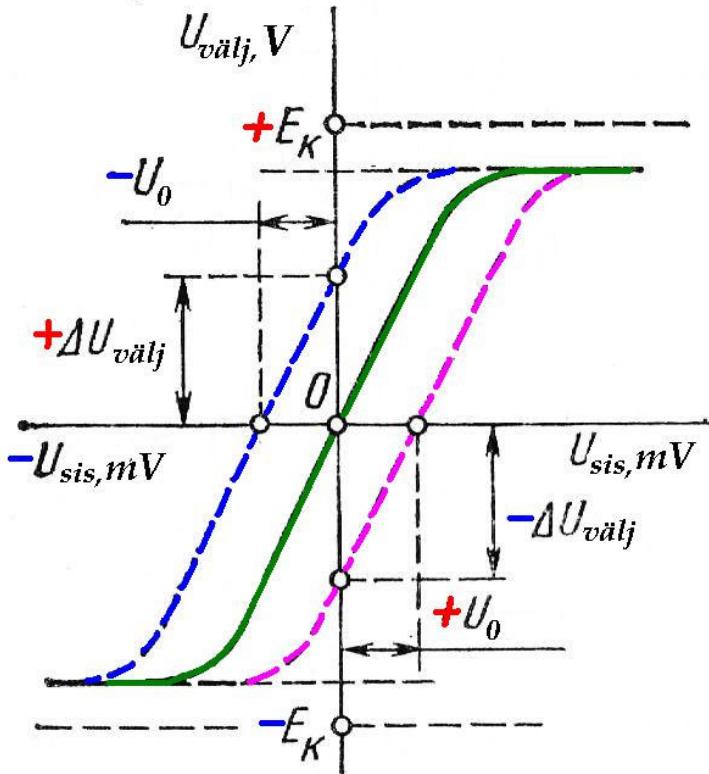
Inverteeriv sisend: → $\Delta U_{välj}$ on vastasfaasis ΔU_{sis} .



Ülekandekarakteristik:



Tegelik ülekandekarakteristik (mitteinverteeriva sisendi järgi):



Operatsioonvõimendi põhiparameetrid.

Võimendustegur K_{Ud} , K . → Sõltub diferentspinge sagedusest, toitepingest, temperatuurist. Antakse nullsagedusel ja nimitingimustel. $K_{Ud} = 500\text{-}500000$.

Ühissignaali nõrgendustegur (ÜSNT) → üldjuhul on väljundpinge ja selle esile kutsunud ühispinge suhe.

$$\text{ÜSNT} = 20 \lg K_{Ud} / K_{Usf} [\text{dB}] ; (-70 - 100 \text{dB}).$$

Nihkepinge (nullnihkepinge) U_N , U_0 → diferentspinge, mis tuleb rakendada operatsioonvõimendi sisendite vahelle, selleks, et $U_{välj}$ oleks null. $U_0 = 3\text{-}30 \text{mV}$.

Sisendvooluks I_{sis} nimetakse sisendite voolude aritmeetilist keskmist sisendpingete puudumisel.

Sisendtakistus diferentssignaalile $R_{d sis}$ on ekvivalentne takistus sisendite ja nullklemmi vahel.

* Nihkepinge triivid:

- 1) Soojuslik triiv: $\delta U_0 / \delta \theta \rightarrow 3 - 10 \mu V/K^0$;
- 2) Ajaline triiv: $\delta U_0 / \delta t \rightarrow 2 - 10 \mu V/kuus$;
- 3) Toitepingest sõltuv triiv: $\delta U_0 / \delta U_t \rightarrow 10 - 100 \mu V/V$ (!)

* **Suurimad väljundpinged** $U^+_{\text{välj max}}$; $U^-_{\text{välj max}}$; (nominaal koormustakistuse ja toitepinge korral).

* **Suurimad diferents- ja ühissignaali pinged** $U_d \text{ max}$ $U_{sf} \text{ max}$

* **Nominaalne koormustakistus** (2kOhm, 10kOhm).

* **Toitepinged** (nomin., min., max.).

* **Ühikvõimenduse sagedus** f_1 (f_t) → on sagedus, mille puhul võimendusteguri moodul on võrdne ühega.

* **Talitluskiirus** (dU/dt) → on väljundpinge suurim muutmiskiirus, diferentspinge hüppelisel muutumisel → (90 – ... V/μs).

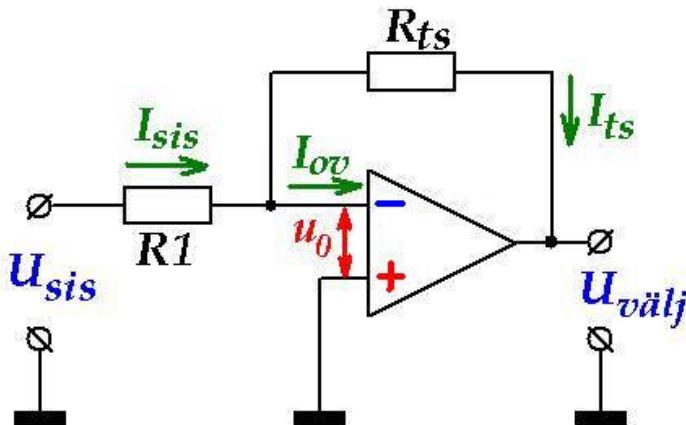
5.10. Idealiseeritud operatsioonvõimendiga põhilülitused.

5.10.1. Lineaarsed skeemid operatsioonvõimendi baasil.

Inverteeriv võimendi

Rööp TS pingे järgi.

Oletame, et $R_{sis\ d} = \infty \rightarrow I_{sis} = I_{ts}$



$$\frac{U_{sis} - u_0}{R1} = - \frac{U_{välj} - u_0}{R_{ts}}$$

Juhul, kui $K_{Ud} \rightarrow \infty$, siis

$$u_0 = U_{välj}/K_{Ud} \rightarrow 0; \text{ või}$$

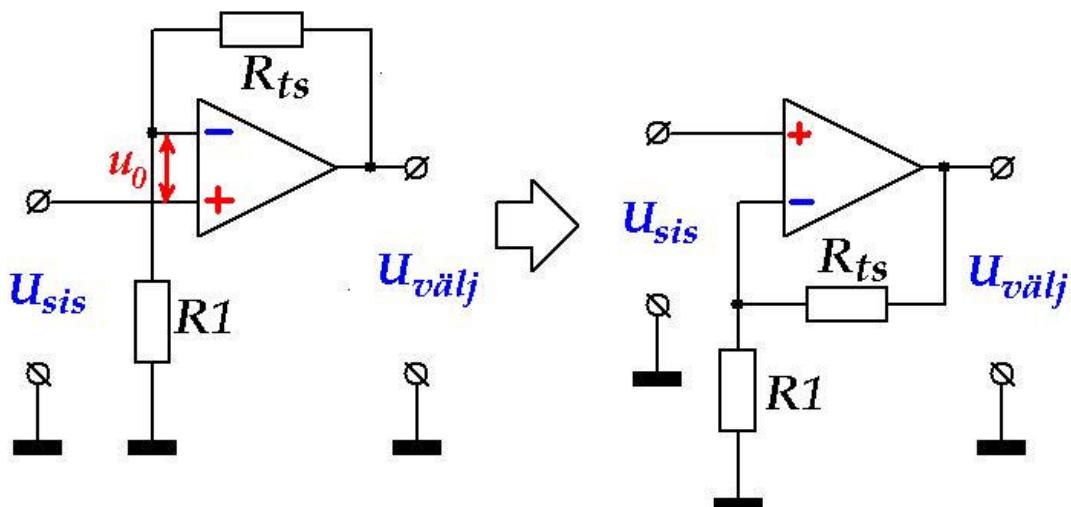
$K_{Ui} = - R_{ts}/R1$

$$U_{sis}/R1 = - U_{välj}/R_{ts}$$

Kui $R_{ts} = R1 \rightarrow K_{Ui} = -1$; Kui $u_0 \rightarrow 0$, siis

skeemi sisendtakistus $R_{sis} = R1$.

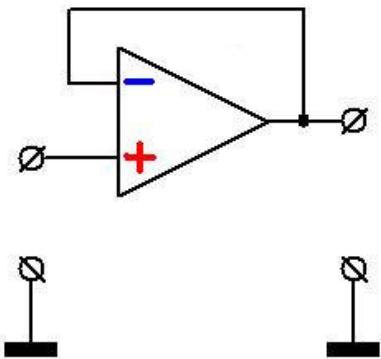
Mitteinverteeriv võimendi



Jada TS pinge järgi. Juhul, kui $u_0 = 0$, siis

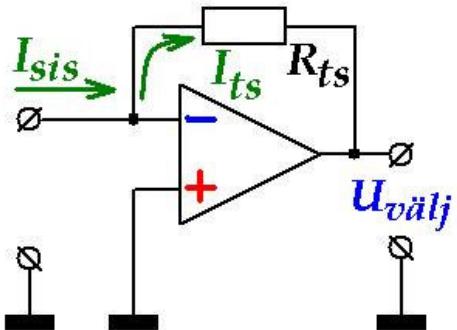
$$U_{sis} = U_{välj} \frac{R1}{R1 + R_{ts}} \quad \text{või}$$

$K_{Umi} = 1 + R_{ts}/R1$



100% tagasiside.
 $R_{ts} = 0; R1 = \infty$
→ Järgur!

Muundur „vool – pinge“ ($I \rightarrow U$)

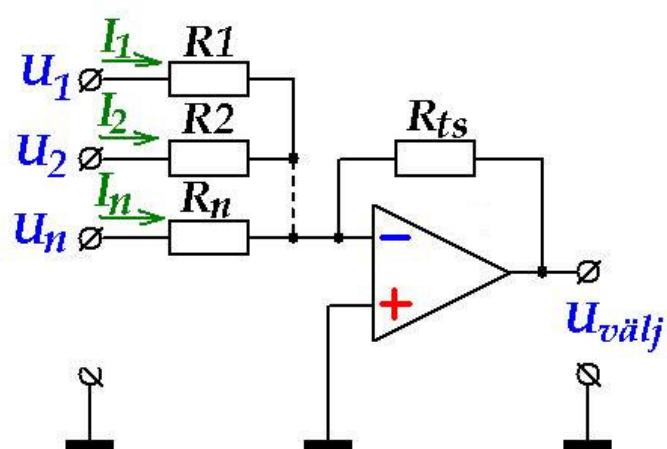


$$R1 = 0$$

$$I_{sis} = I_{ts} = -U_{välj}/R_{ts}$$

$$U_{välj} = -I_{sis}R_{ts}$$

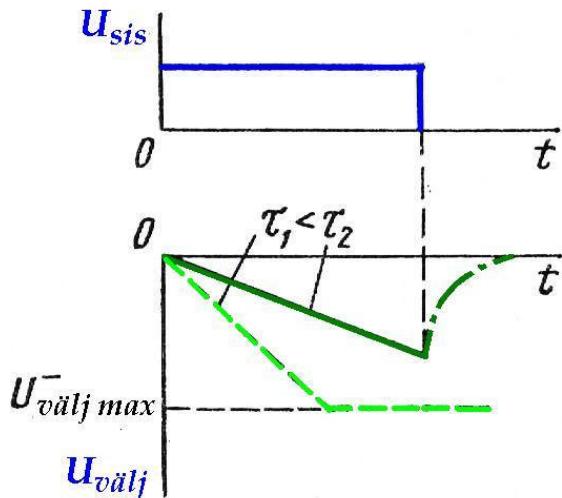
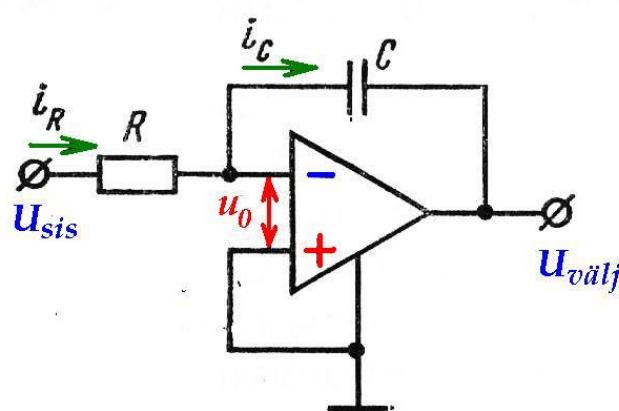
Inverteeriv summaator



Kui võtta:
 $R_{ts} = R1 = R2 = \dots = R_n \ll R_{sis}$
Oletame: $I_{sis} = 0$, siis
 $I_{ts} = I_1 + I_2 + \dots + I_n$;
või: $U_{välj} = -(U_1 + U_2 + \dots + U_n)$
Vastavalt kaalu teguritele:

$$U_{välj} = -\left(\frac{R_{ts}}{R1}U_1 + \frac{R_{ts}}{R2}U_2 + \dots + \frac{R_{ts}}{R_n}U_n\right)$$

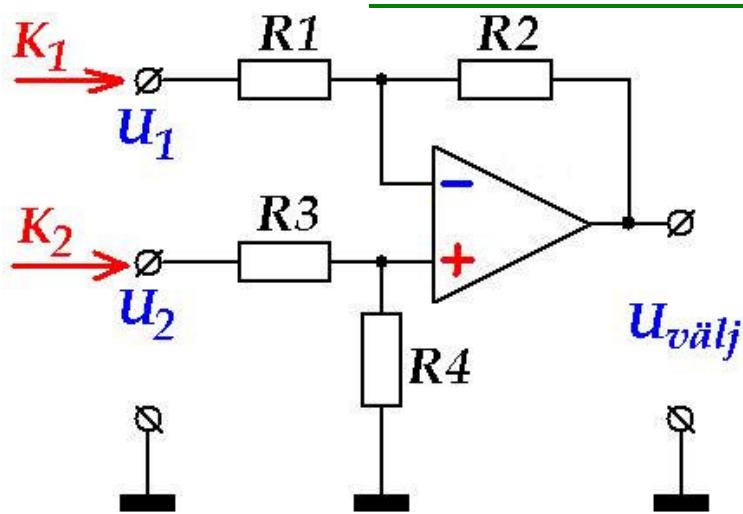
Integraator.



Vahetame takisti R_{ts} baasskeemis (inverteeriv võimendi) kondensaatori C vastu. Arvestame, et $I_C = I_R$.

$$-C \frac{dU_{välj}}{dt} = \frac{u_{sis}}{R} \quad U_{välj} = -\frac{1}{RC} \int_0^t u_{sis} dt + U_{välj}(0)$$

Diferentsiaalne võimendi.



„Lahutaja“ skeem.
Võimendab signaalide U_1 ja U_2 vahet.

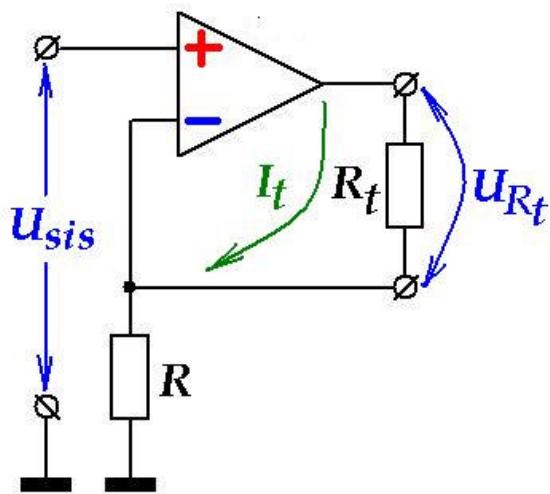
Superpositsiooni printsiibi alusel:

$$K_1 = \frac{U_{välj}}{U_1}, \text{ Kui } U_2 = 0; \quad K_2 = \frac{U_{välj}}{U_2}, \text{ Kui } U_1 = 0$$

$$K_1 = -\frac{R2}{R1}; \quad K_2 = \frac{R4}{R3 + R4} \cdot (1 + \frac{R2}{R1})$$

Siis: $U_{\text{välj}} = K_1 U_1 + K_2 U_2$. Kui kanalite ülekandetegurid on võrdsed: $| -K_1 | = K_2 = K_{\text{dif}}$ $\rightarrow U_{\text{välj}} = K_{\text{dif}} (U_2 - U_1)$.

Muundur „pinge → vool“



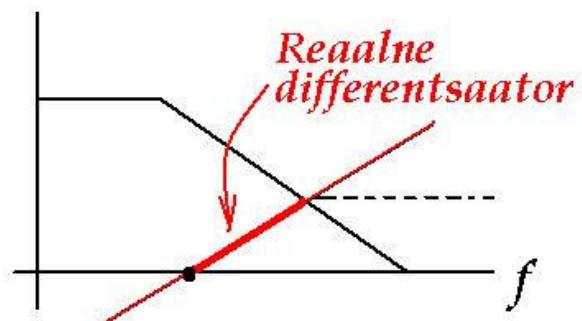
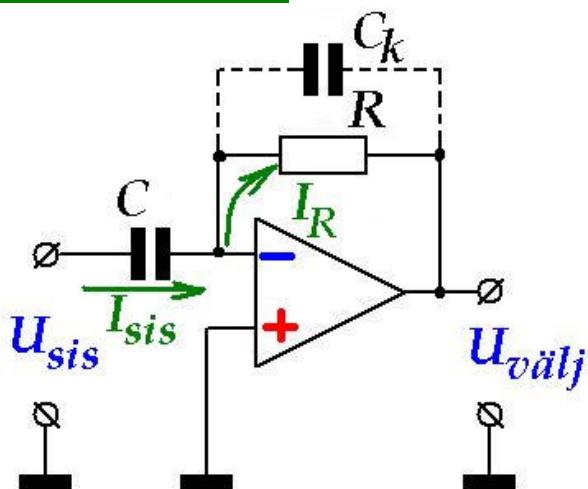
Stabiilse voolu generaator.

Kuna $u_0 = 0$, siis:

$$I_t = \frac{U_{\text{sis}}}{R}$$

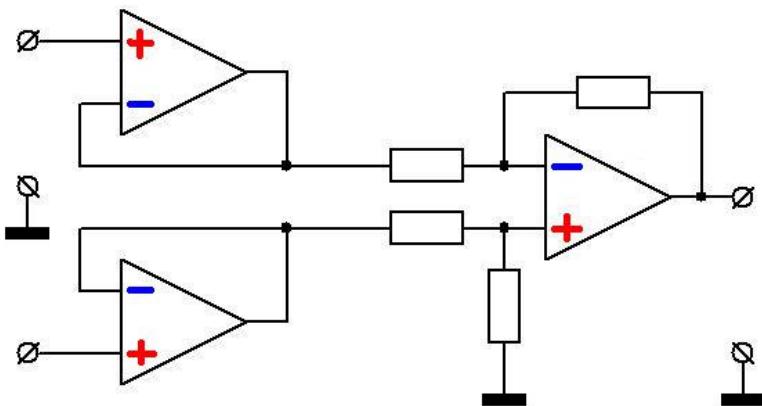
ja $U_{\text{Rt}} = R_t I_t$

Diferentsaator



$$I_{\text{sis}} = I_R; \quad I_{\text{sis}} = C \frac{dU_{\text{sis}}}{dt}; \quad U_{\text{välj}} = -R \cdot I_R = -RC \frac{dU_{\text{sis}}}{dt}$$

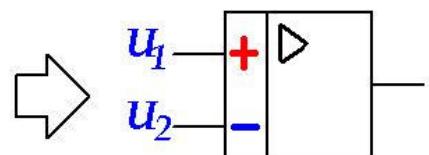
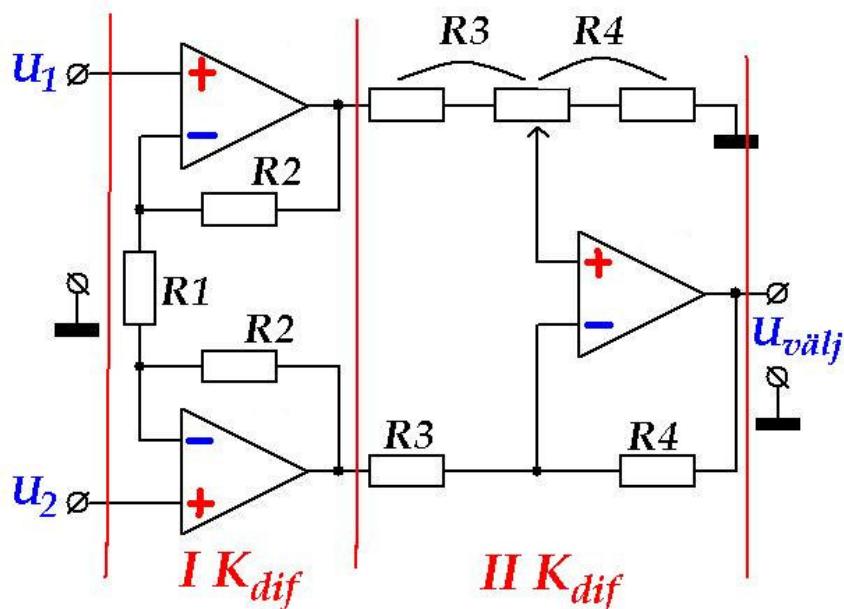
“Instrumentaalne võimendi”



Tahaks parandada dife-
rentsiaalse võimendi
sisendtakistust.

← Lihtne teha nii:

Parem aga oleks nõnda:



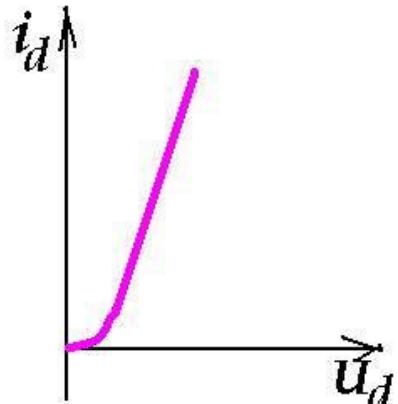
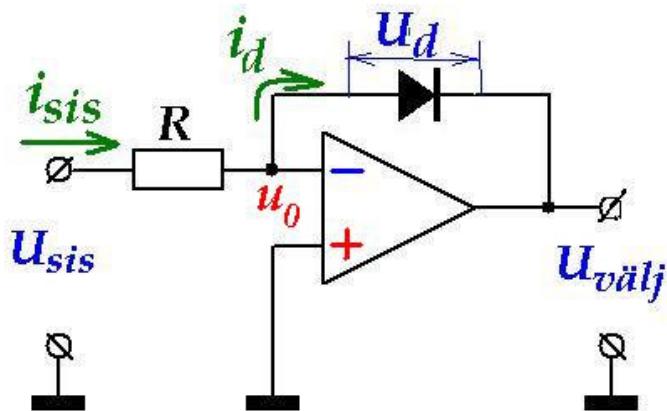
Skeemi omadused:

- Kõrge sisendtakistus;
- Signaali sünfaasse komponendi hea sumbutamine;
- Võimalus balanseerimiseks;
- Kahestmeline võimendamine.

$$IK_{dif} = 1 + 2 \frac{R2}{R1}; \quad IIK_{dif} = \frac{R4}{R3};$$

$$K_{dif} = \left(1 + 2 \frac{R2}{R1}\right) \frac{R4}{R3}$$

Logaritmeeriv võimendi



Dioodi VAK

$$i_d = I_s \left(e^{\frac{U_d}{\varphi_T}} - 1 \right) \approx I_s e^{\frac{U_d}{\varphi_T}}$$

← Kuna $\frac{U_{sis}}{R} \geq I_s$

Räni dioodil $I_s \approx 1 \text{nA}$

Vahetame takisti R_{ts} baasskeemis (inverteeriv võimendi) dioodi vastu. Oletame, et $u_0 = 0$.

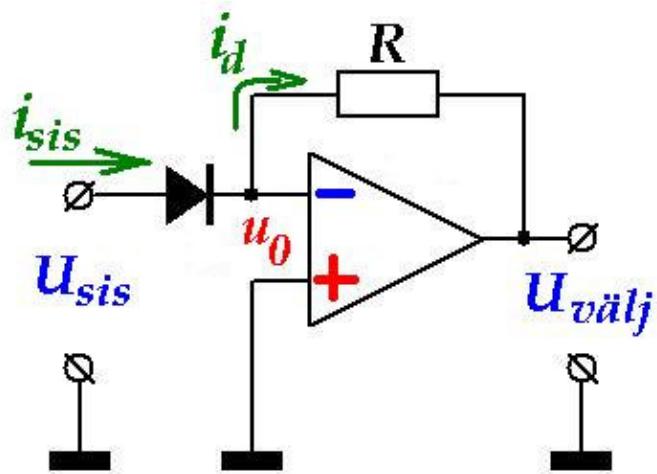
$$i_{sis} = i_d ; \quad i_{sis} = U_{sis}/R \quad U_{välj} = -U_d$$

$$U_{välj} = -\varphi_T \ln \frac{U_{sis}}{RI_s}$$

Kui väga jämedalt, esimeses lähenduses $i_d \approx e^{U_d}$; siis $U_d \approx \ln i_d$; või

$$U_{välj} \cong -\ln \frac{U_{sis}}{R}$$

Eksponentsiaalne võimendi



Kuna $u_0 = 0$, siis $U_{sis} = U_d$ ja $i_{sis} = i_d$; $U_{välj} = -i_d R$

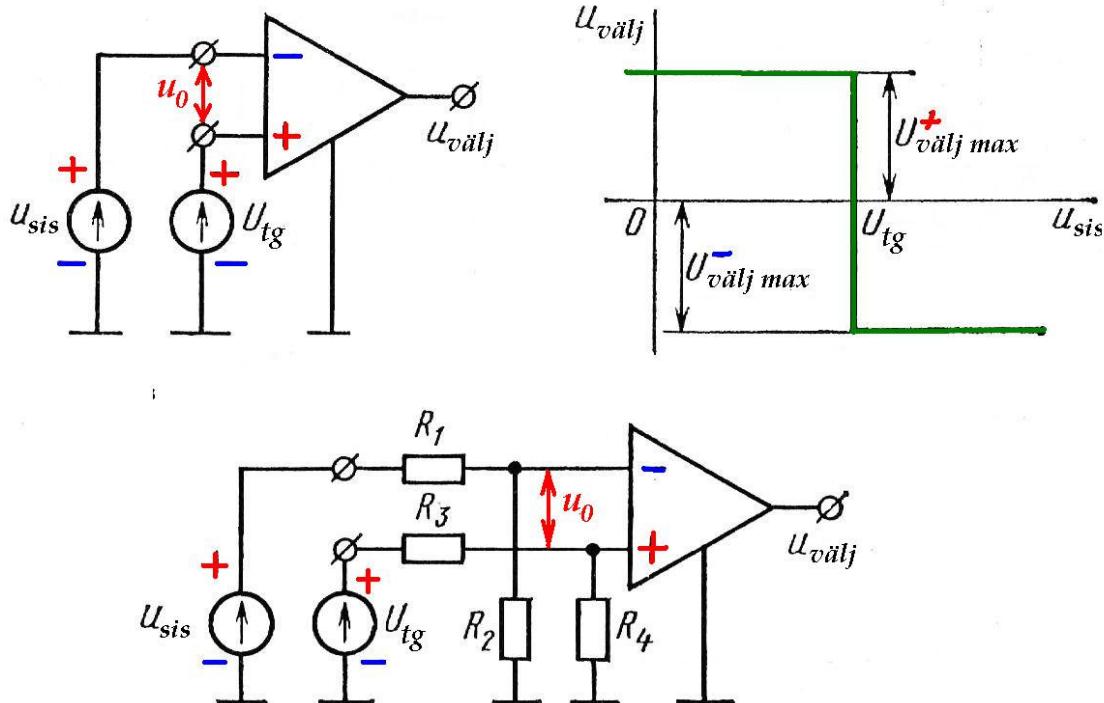
$$\text{Kui lähtuda sellest, et } i_d = e^{\frac{U_{sis}}{\varphi_T}} ;$$

$$\text{siis } \rightarrow U_{välj} \approx -\text{Re}^{\frac{U_{sis}}{\varphi_T}}$$

5.10.2. Operatsioonvõimendi töö impulssrežiimis

Selline režiim tekib, kui sisendsignaalide suurused tunduvalt ületavad neid, mis on vajalikud lineaarse režiimi jaoks.

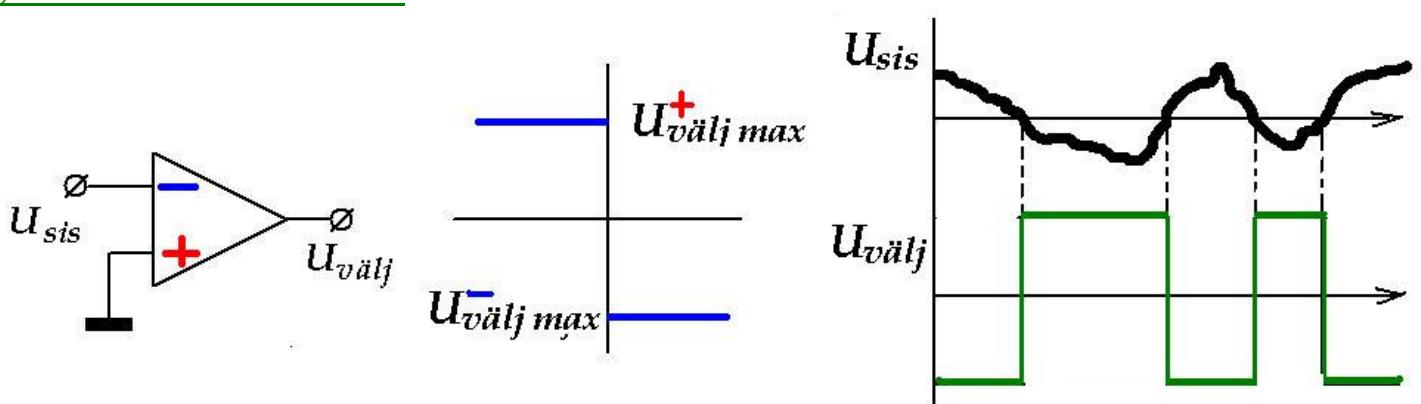
Komparaator – seade, mis võrdleb omavahel kaht pinget (üks nendest on tavaliselt tugipinge).



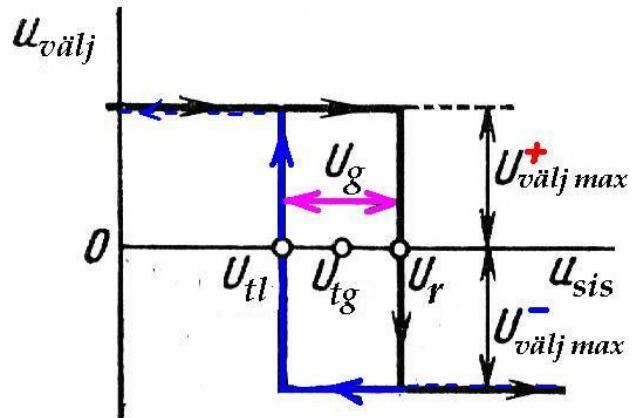
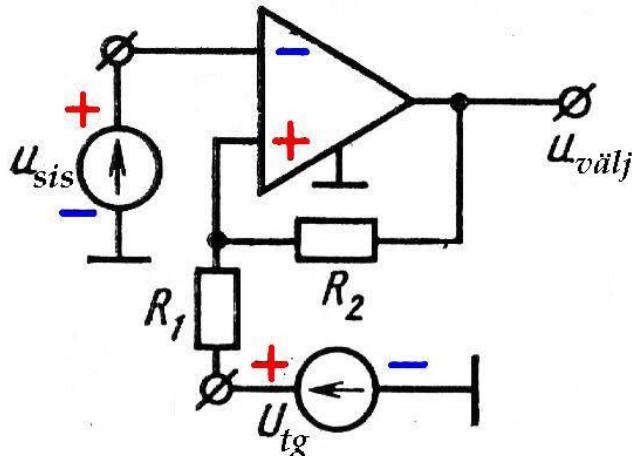
„Pingete võrdlemiseks“ skeemid. Lubavad võrrelda ühepolkaarseid pingeid. Sellisel sisendite ühendamise viisil → „inverteeriv“ komp.

$$\begin{aligned} U_{sis} < U_{tg} &\rightarrow u_0 < 0 \rightarrow U_{välj} = +U_{välj\ max} \\ U_{sis} > U_{tg} &\rightarrow u_0 > 0 \rightarrow U_{välj} = -U_{välj\ max}. \end{aligned}$$

„Null“ – detektor.



Komparaator positiivse tagasisidega (PTS) (Schmitt`i triger)



Rakendamispinge U_r :

$$U_r = U_{tg} + \frac{U_{välj\ max}^+ - U_{tg}^-}{R1 + R2} \cdot R1 ;$$

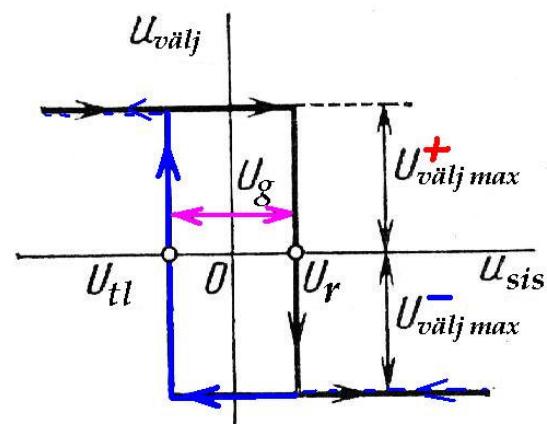
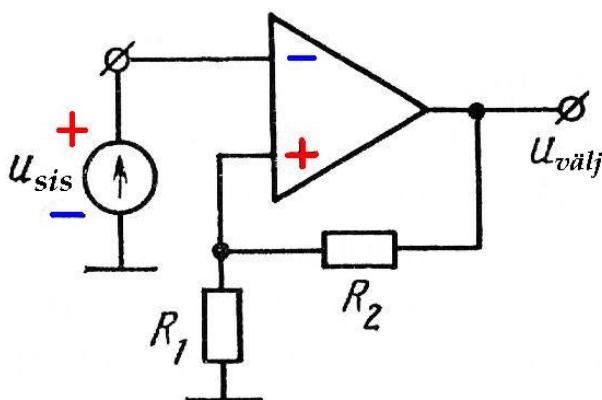
Tagasilaskmise pinge U_{tl} :

$$U_{tl} = U_{tg}^- - \frac{U_{välj\ max}^- + U_{tg}^-}{R1 + R2} \cdot R1 ;$$

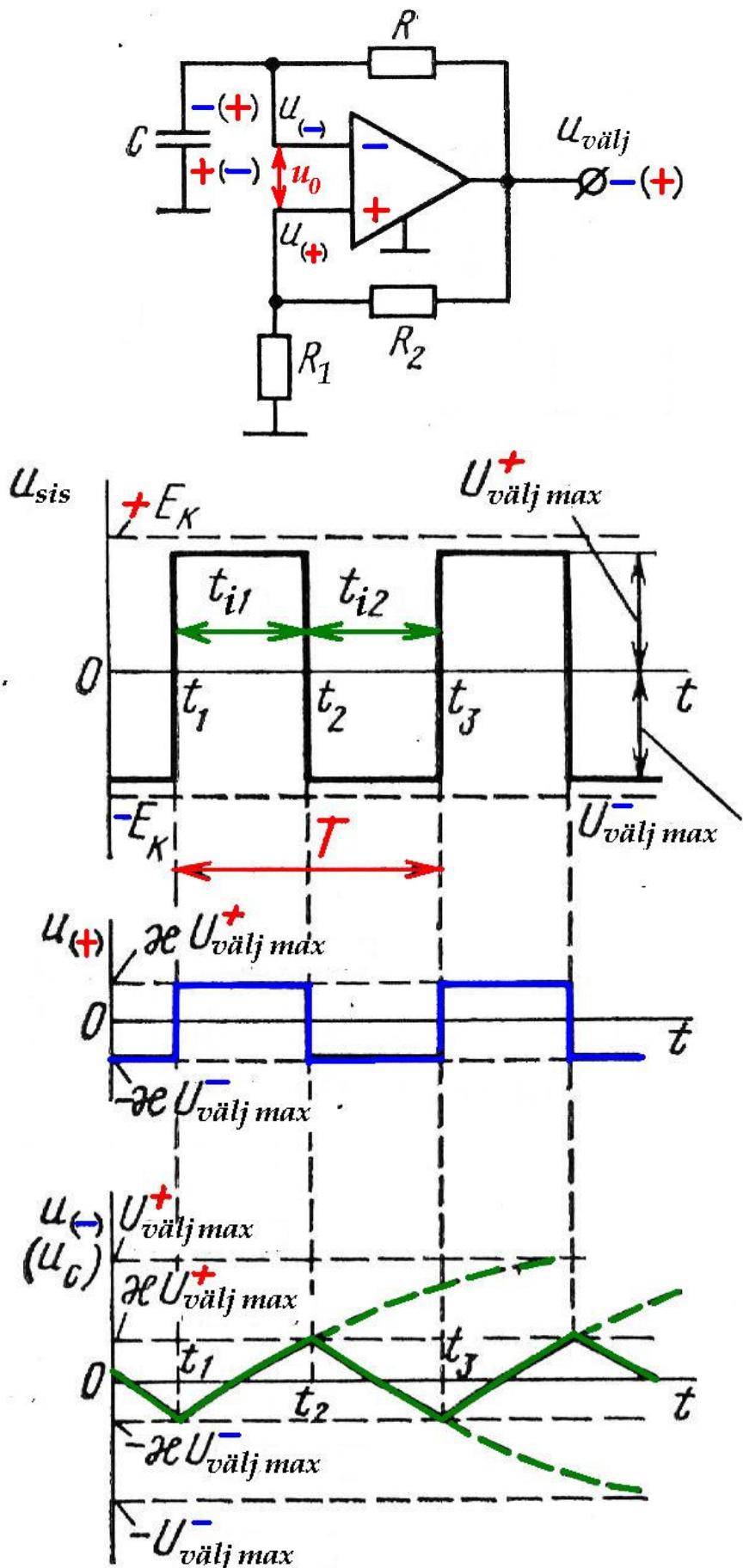
Güstereesi pinge U_g :

$$U_g = U_r - U_{tl} = \frac{R1}{R1 + R2} \cdot (U_{välj\ max}^+ + U_{välj\ max}^-) ;$$

Schmitt`i triger null-detektori režiimis:



Multivibraator operatsioonvõimendi (komparaatori) baasil. Sümmeetriline multivibraator.



Enne $t_1 \rightarrow u_0 > 0$; siis $U_{välj} = U_{välj \max}^-$. Mitteinverteerival sisendil:

$$U(+) = -\kappa U_{välj \max}^- ; \quad \text{kus} \quad K = \frac{R1}{R1 + R2}$$

See pinge laeb kondensaatorit C polaarsusega $-+$. Aja momendil t_1 võimendi inverteerival sisendil pinge $U(-)$ on võrdne pingega $U(+)$ mitteinverteerival sisendil. See tähendab $u_0 = 0$. Peale seda \rightarrow \rightarrow op.võim., mis selles skeemis on pandud tööle PTS-ga komparaatori režiimis, lülitub ümber. Tulemuseks: $U_{välj} = U_{välj \max}^+$; pinge $U(+)$ mitteinverteeritaval sisendil vahetab märgi, ja tema suurus on:

$$U(+) = \kappa U_{välj \max}^+ . \text{ See vastab } u_0 < 0 \text{ ja } U_{välj} = U_{välj \max}^+ .$$

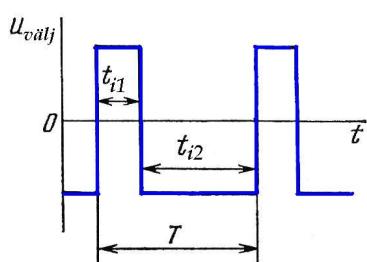
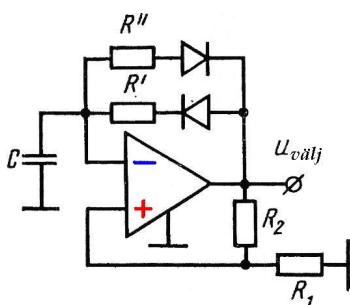
Algab kondensaatori C ümberlaadimine vastassuunas.

$$t_i = \tau \ln \frac{\kappa U_{välj \max}^- + U_{välj \max}^+}{U_{välj \max}^+ - \kappa U_{välj \max}^-} ; \quad f = \frac{1}{2\tau \ln(\dots)} .$$

Impulsi pikkus: $U_{välj \max}^+ = |U_{välj \max}^-|$ (korraliku võimendi puhul),

$$f = \frac{1}{2\tau \ln\left(1 + 2 \frac{R1}{R2}\right)}$$

Mittesümmeetiline MV



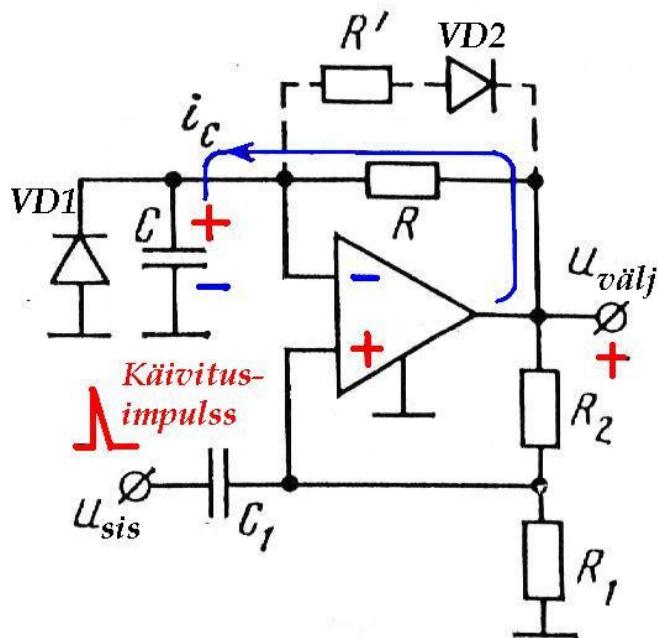
R1,R2 valik:
 \rightarrow maksimaalne sisendivaheline pinge:
 $u_{0 \max} = 2\kappa U_{välj \max}^{+-}$

$$\rightarrow K \leq \frac{u_{0 \max}}{2U_{välj \max}^{+-}}$$

Monovibraator operatsioonvõimendi baasil.

Skeem on mõeldud üksikute impulsside formeerimiseks.

Vajab käivitusimpulssi.



Skeemil on kaks olekut: → ooterežiim;
→ formeerimisrežiim.

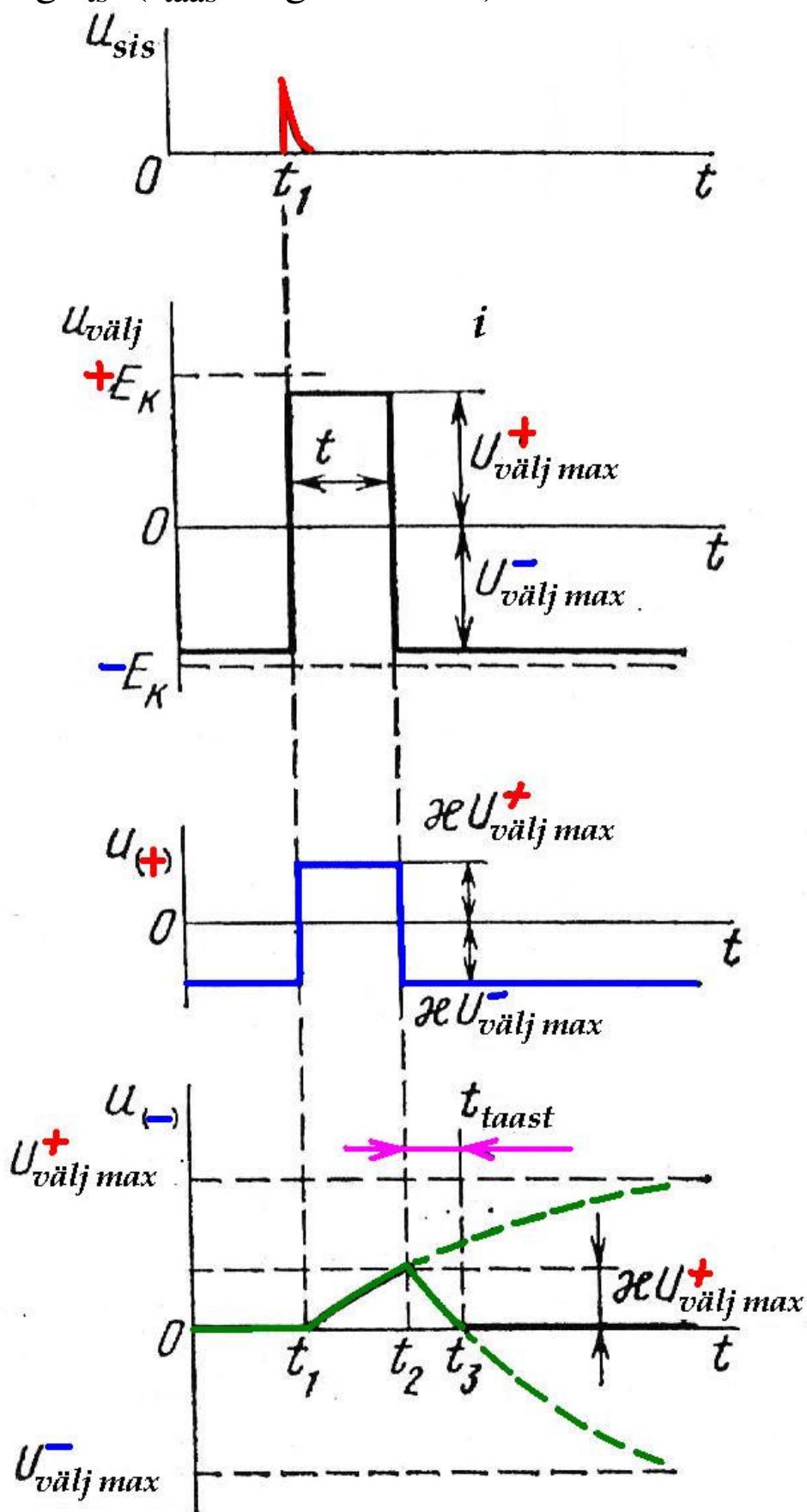
Diood VD1 on ooterežiimi organiseerimiseks. Kui diood VD1 on ühendatud katoodiga vastu ühist siini, siis skeem formeerib negatiivset väljundimpulssi ja vajab ka vastavalt negatiivset käivitamisimpulssi.

Igal juhul käivitusimpulsi amplituud peab olema suurem kui $\kappa U_{välj \max}$. Siis käivitamisel mitteinverteeriva sisendi pinge $U(+)$ ületab inverteeriva sisendi pinget $U(-)$ ja skeem hakkab formeerima väljundimpulssi. Aja momendil t_2 toimub ümberlülitus harilikul viisil (nagu multivibraatoris). Aja momendil t_3 avaneb diood VD1 ja skeem läheb üle ooterežiimi. Impulsi kestvus $t_i = t_1 - t_2$; Intervall $t_2 - t_3$ on skeemi taastumisaeg t_{ts} .

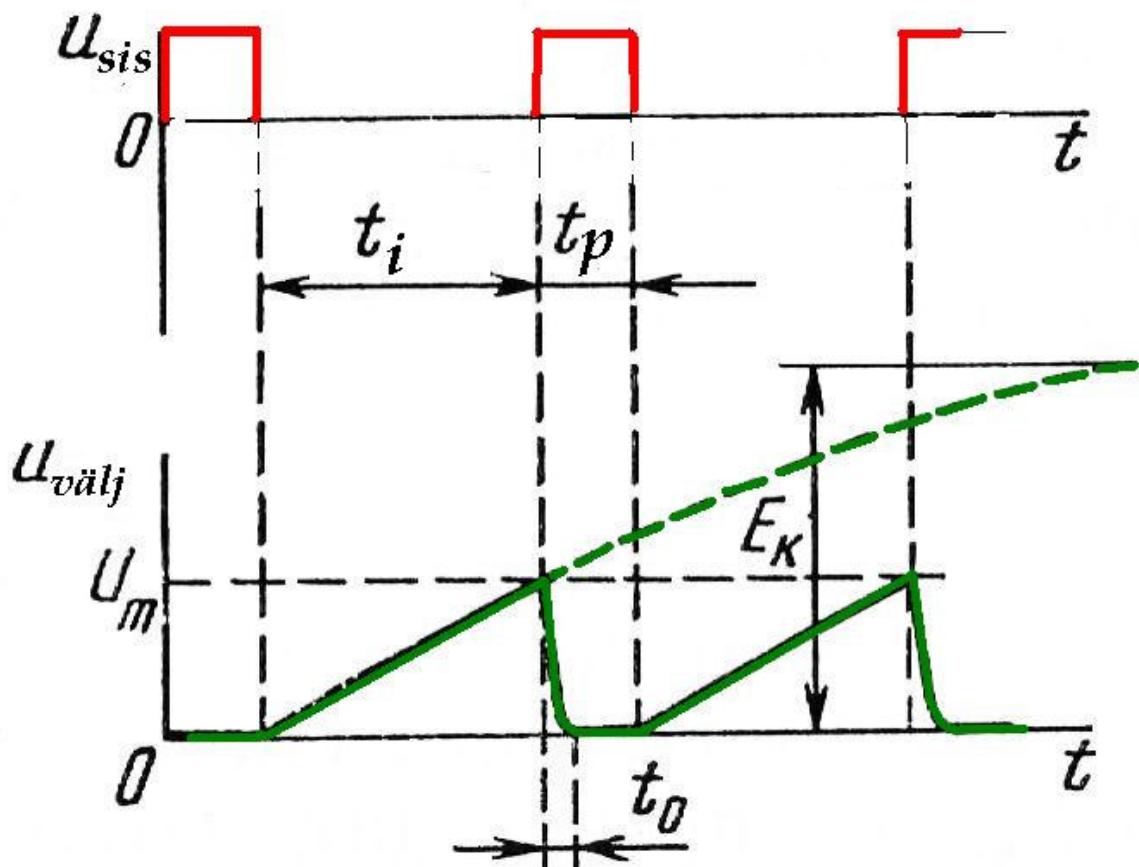
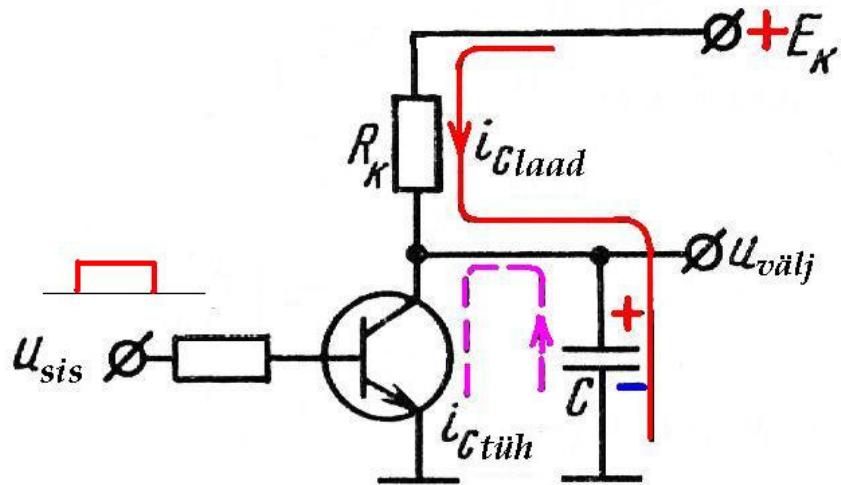
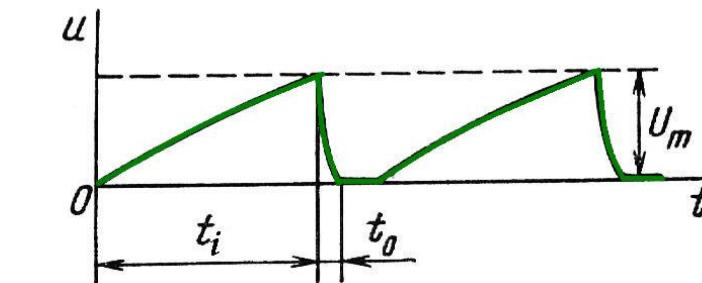
$$t_i = \tau \ln \frac{1}{1 - \kappa} = \tau \ln \left(1 + \frac{R1}{R2} \right); \text{ Oletame: } U_{välj \max}^+ = \left| U_{välj \max}^- \right|$$

siis taastumisaeg: $t_{ts} = \tau \ln \frac{2R1 + R2}{R1 + R2}$

Ahel: takisti R ja diood VD2 kasutakse siis, kui on vaja vähendada taastumisaeg t_{ts} (t_{taas} diagrammidel).



5.11. Saehammaspingegeneraatorid



Genereeritud pinge kvaliteedi näitaja: → mittelineaarsuse tegur \mathcal{E}

$$\mathcal{E} = \frac{\frac{dU}{dt}(0) - \frac{dU}{dt}(t_i)}{\frac{dU}{dt}(0)} \quad \text{kus } \frac{dU}{dt}(0) \leftarrow \text{pinge kasvukiirus}$$

impulsi alguses; $\frac{dU}{dt}(t_i) \leftarrow \text{pinge kasvukiirus impulsi lõpus.}$

Kõige lihtsam on kasutada eksponendi algosa:

$$U_c(t) = E_K(1 - e^{-t/\tau}) ; \quad \text{kus } \tau = R_k C$$

$$\mathcal{E} = \frac{I(0) - I(t_i)}{I(0)}$$

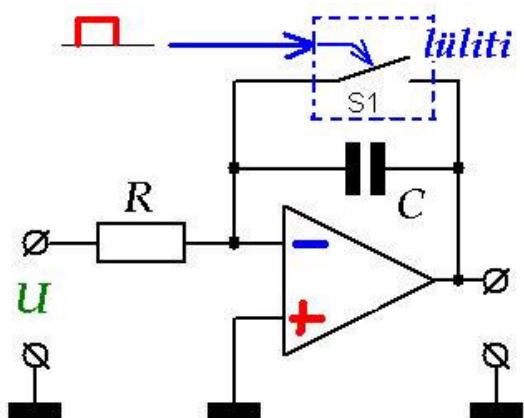
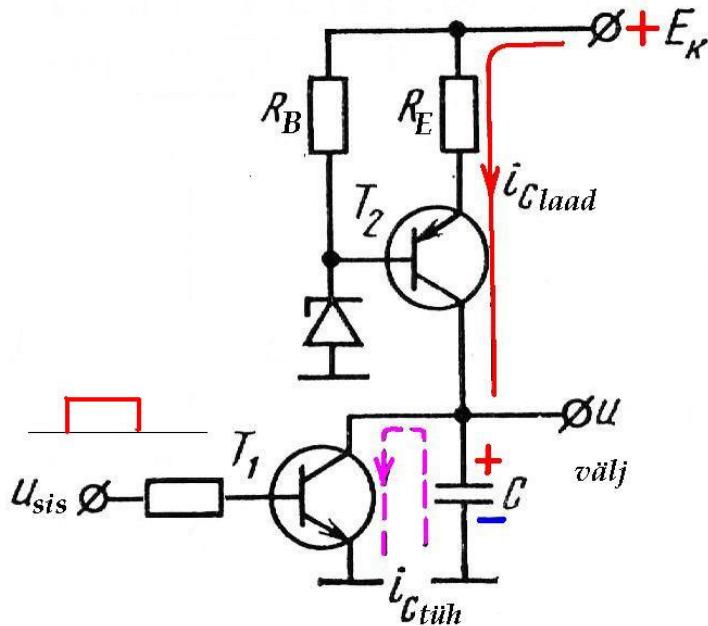
On teada: $dU/dt = i_C/C$ siis \rightarrow

Lähtume kondensaatori laadimisvooludest:

$$\mathcal{E} = \frac{U_m}{E_K}$$

kuna $I(0) = E_K/R_K$; $I(t_i) = (E_K - U_m)/R_K$ siis \rightarrow

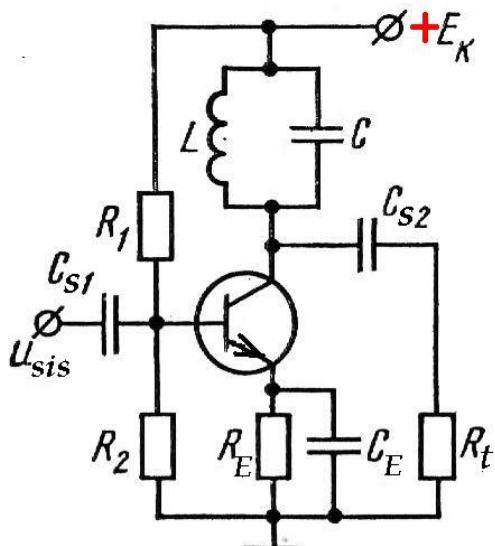
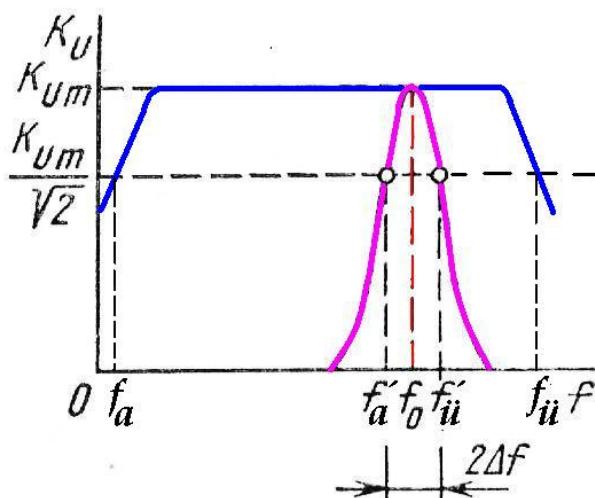
Ideaalis $\rightarrow \boxed{\mathcal{E}=0}$ ← sel juhul kondensaatorit tuleb laadida stabiilse voolu allikast.



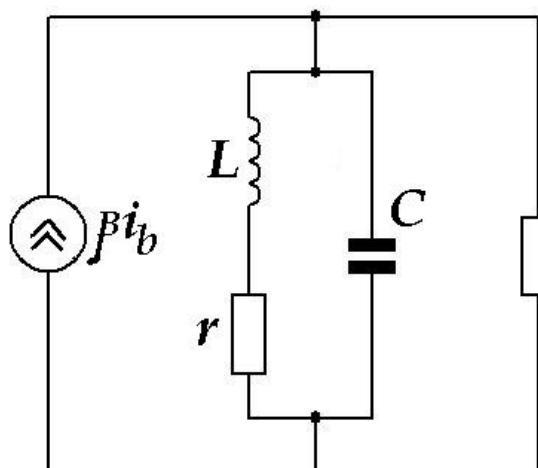
5.12. Selektiivvõimendid (kitsaribavõimendid).

On vaja võimendada signaal ainult mingil kindlal sagedusel. Selliseid võimendeid kasutatakse raadiovastuvõtjates, mõõtetehnikaseadmetes, järgivsüsteemides.

Kõrgetel töösagedustel (mõnekümnest kilohertsist alates) eesmärgi saavutamiseks tuleb kasutada LC-võnkeringe; madalatel aga RC-ahelaid.



LC-kontuur shunteeerib koormust. Oletame et kaod võnkeringis puuduvad, kaotakistus $r = 0$. Võnkeringi takistuse moodul:



$$|Z| = \left| \frac{X_C \cdot X_L}{X_C + X_L} \right| = \left| \frac{\frac{1}{j\omega C} \cdot j\omega L}{\frac{1}{j\omega C} + j\omega L} \right|;$$

kus $X_C = 1/\omega C$, $X_L = \omega L$.

Muutub sagedus, \rightarrow muutub ka

võnkeringi takistus. Ideaalsel rõöp-võnkeringil resonantssagedusel (ω_0):

$$X_C = X_L \Rightarrow \frac{1}{\omega_0 C} = \omega_0 L ; \text{ siit saame } \rightarrow$$

$$\boxed{\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}}$$

Ideaalse rõöpvõnkeringi takistus on lõpmatu suur (reaalselt: aktiivne ja maksimaalne). → Kõik läheb koormusele!

Võnkeringi pinge muutumise iseloom sageduse muutumisel (resonantsikõver) on sama mis võnkeringi takistusel. Seejuures sagedusest ω_0 madalamal sagedusel läbib vool peamiselt võnkeringi induktiivharu, sagedusest ω_0 kõrgemal sagedusel mahtuvusharu. Seega, kui resonantsisagedus ühtib võimendatava signaali sagedusega, on võimendustegur maksimaalne, teistel sagedustel aga langeb.

Selektiivsust võib hinnata hüveteguriga **Q**:

$$Q = \frac{f_0}{2\Delta f} = \frac{R_{EKV}}{\rho}; \text{ kus } \rho = \sqrt{\frac{L}{C}} \text{ on võnkeringi lainetakistus}$$

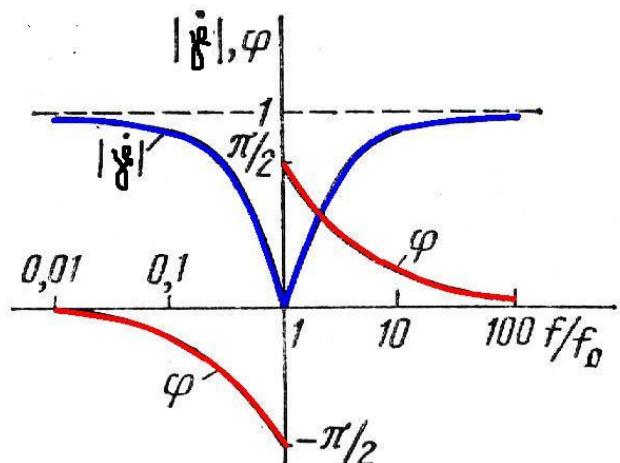
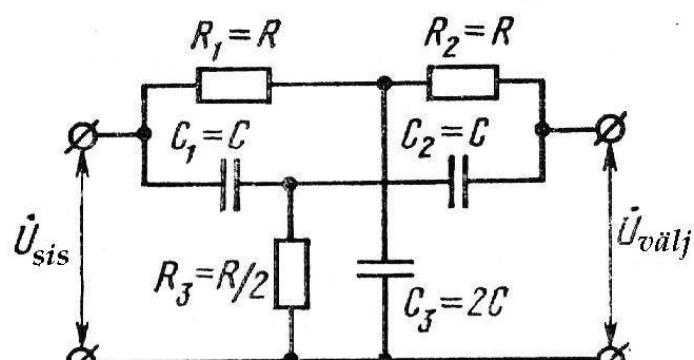
(või tunnustakistus); $R_{EKV} = R_t \parallel r$; ja $2\Delta f$ – pääsuriba

Madalaoomilisel koormusel $R_{EKV} \downarrow \rightarrow 2\Delta f \uparrow$.

Selleks, et tõsta selektiivsust $\rightarrow Q \uparrow \rightarrow \rho \downarrow$.

Sagedusest sõltuva tagasisidega võimendid

Kõige sagedamini tagasisidestusahelana → kaksik-T-sild; → kõrge selektiivsus.

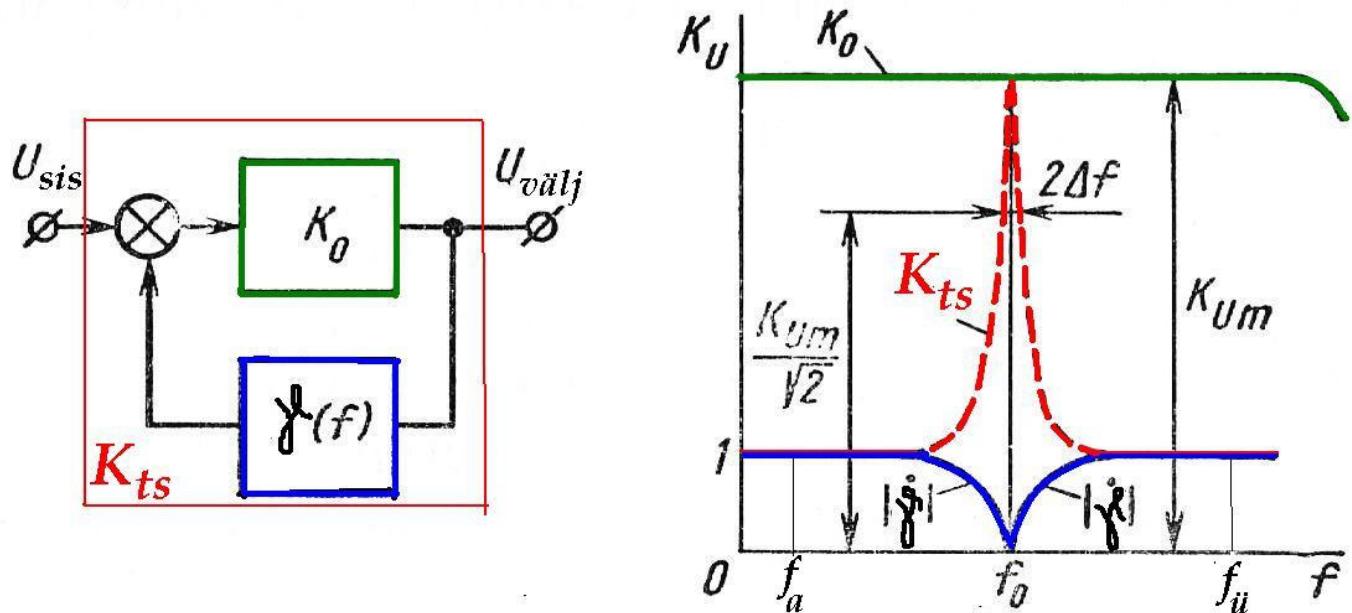


Kvaasiresonantssagedusel f_0 ülekandetegur $|\dot{Y}| = 0$, faasinihe sisend- ja väljundpinge vahel puudub.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{RC}$$

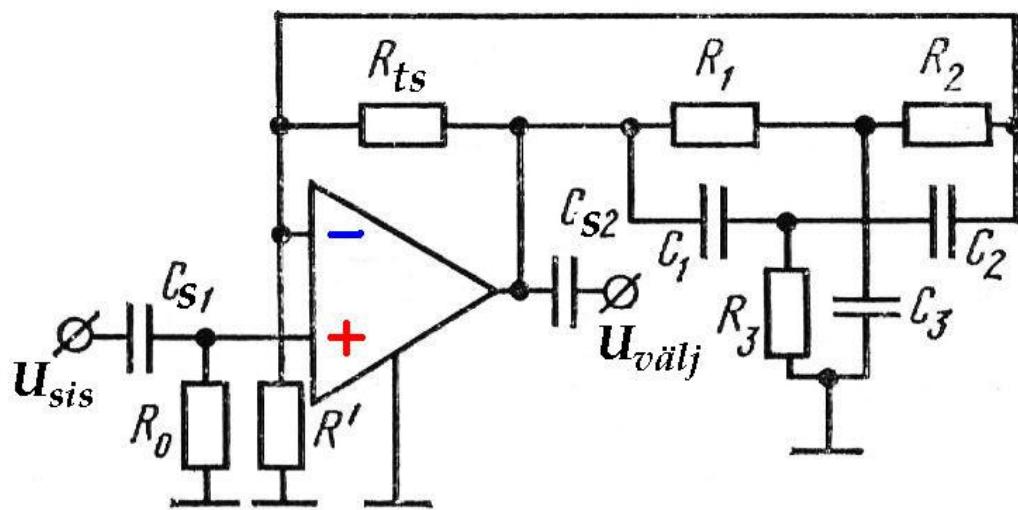
Selektiivvõimendi kaksik-T-silla baasil.

Kaksik-T-sild on lülitatud tagasiside ahelasse.



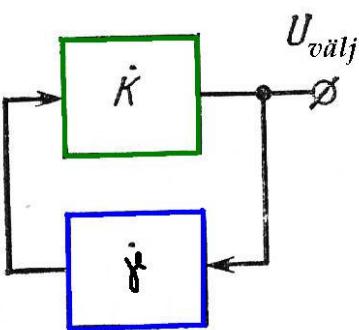
Negatiivse tagasisidega hõlmatud võimendi võimendustegur:

$K_{ts} = K_0 / (1 + \gamma K_0)$. Sellest järeltub, et kui sagedusel f_0 tagasiside skeemis puudub ($\gamma = 0$), on võimendustegur maksimaalne $\rightarrow K_{ts} = K_0$. Lahkhäälestuse suurenemisel $|\gamma|$ kasvab, lähenedes sagedustel f_a ja f_u väärtsusele üks. Seejuures võimendustegur $|K_{ts}|$ väheneb. Et $\gamma_0 = 1$ korral $\gamma K_0 \gg 1$ ja vastavalt $K_{ts} = 1/\gamma$, siis $|K_{ts}| = 1$



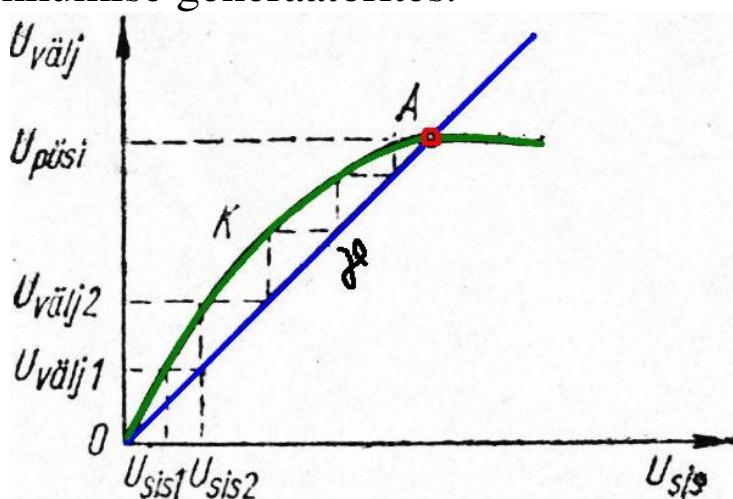
Sild peab töötama “tühijooksul”, koormata teda ei tohi. Siit vastav elementide valik.

$$K_0 = 1 + R_{ts}/R'$$



5.13. Siinusvõnkumise generaatorid.

Teatud tingimustel võib positiivsega tagasisidega hõlmatud võimendi iseergutada, sest võimendustegur muutub teatud sagedustel lõpmata suureks. Selle tagajärjel teib väljundpinge ka sisendsignaali puudumisel. Seda nähtust kasutatakse iseergutuvates harmoonilise võnkumise generaatorites.



PTS`ga võimendi ülekannetegur: $\dot{K}_{ts} = \frac{\dot{K}}{1 - \dot{K}\dot{\gamma}}$; Kui $\dot{K}\dot{\gamma} \geq 1$,

siis $\rightarrow \dot{K}_{ts} = \infty \rightarrow$ võimendist sai f_{välj} generaator. Kui $\dot{K}\dot{\gamma} \geq 1$, siis võnkeamplituud kasvab pidevalt.

Püsivõnkumise tingimus võib esitada järgmiselt:

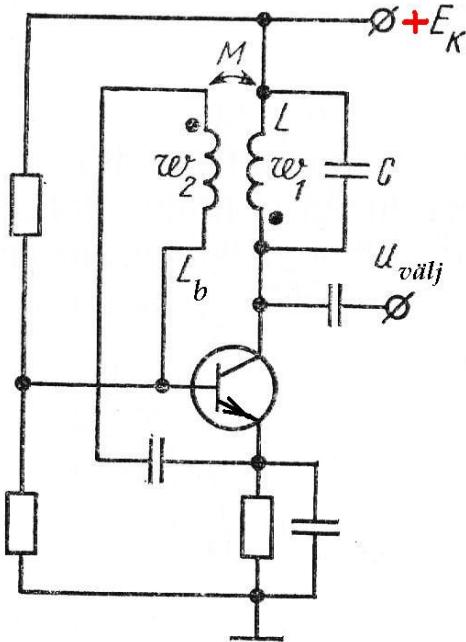
$$\dot{K}\dot{\gamma} = |\dot{K}| e^{j\varphi_K} \cdot |\dot{\gamma}| e^{j\varphi_\gamma} = |\dot{K}| |\dot{\gamma}| e^{j(\varphi_K + \varphi_\gamma)} = 1$$

Seega peavad isevoonkumise tekkimiseks olema täidetud kaks tingimust:

$$1) \quad \varphi_K + \varphi_\gamma = 2\pi n \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \rightarrow \text{faaside tasakaal}$$

$$2) \quad |\dot{K}| \cdot |\dot{\gamma}| = 1 \quad \rightarrow \text{amplituudide tasakaal}$$

Iseergutuvad LC-generaatorid



(Meissner`i skeem)

Sellist lülitust nimetatakse trafosidestuses generaatoriks ja seda rakendatakse tavaliselt radiosagedustel.

Häälestatud vönkeringu takistus on puhtaktiivne.

Seetõttu, kui baasi ahelas

toimib resonantsisagedusega signaal, on kollektoripingi faasinihe 180° nagu ÜE-takistusastmeski. Baasi- ja kollektoripooli induktiivsides tõttu on kollektoripooli läbiva voolu I_K tekitatud vahelduvpinge U_B baasipoolil võrdne $+j\omega MI_K$, kus M on

vastastikuse induktiivsuse tegur. Kui valida poolide mähkimissuund nii, et $U_B = -j\omega MI_K$, on summarne faasinihe suletud ahelas võimendi – tagasidestuslüli null, mis tagab faaside tasakaalutingimuse täitmise.

Amplituudide tasakaalu saavutamine:

U_{ts} peab olema väiksem, kui $U_{välj} \rightarrow \frac{W_1}{W_2} > 1$, juhul kui $M = 1$,

$$\text{siis } \beta \geq \sqrt{\frac{L}{L_b}} = \frac{W_1}{W_2} \quad \text{ja} \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Mahtuvuslik kolmpunktskeem

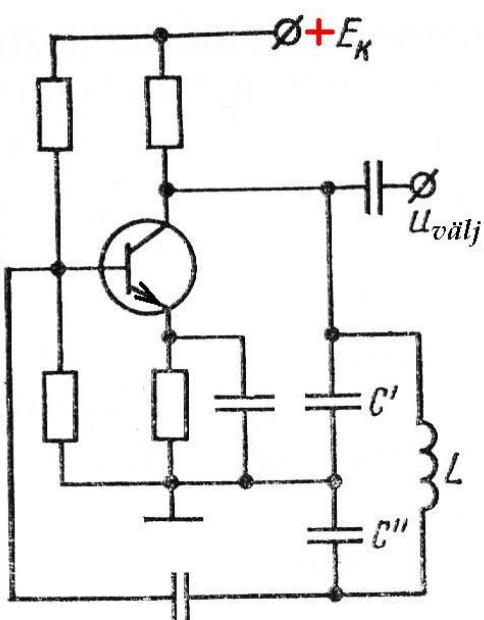
(Colpitts`i skeem)

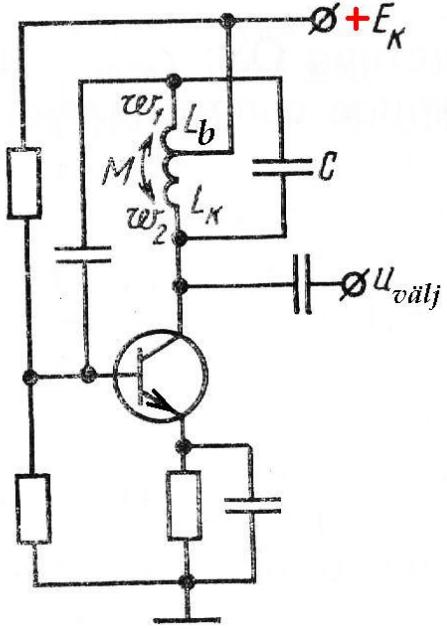
U_{ts} võetakse kondensaatorilt C'' pealt.

Kondensaatorite C' ja C'' pinged on „maa“ suhtes vastasfaasis, selle tõttu tagasiside - positiivne. Iseergutuse tingimus:

$$\frac{C'}{C''} = \frac{r_{sis(B)}}{R_K \| R_t}; \quad C = \frac{C'C''}{C' + C''}$$

Sageduse f_0 arvutamiseks \uparrow





Induktiiivne kolmpunktskeem

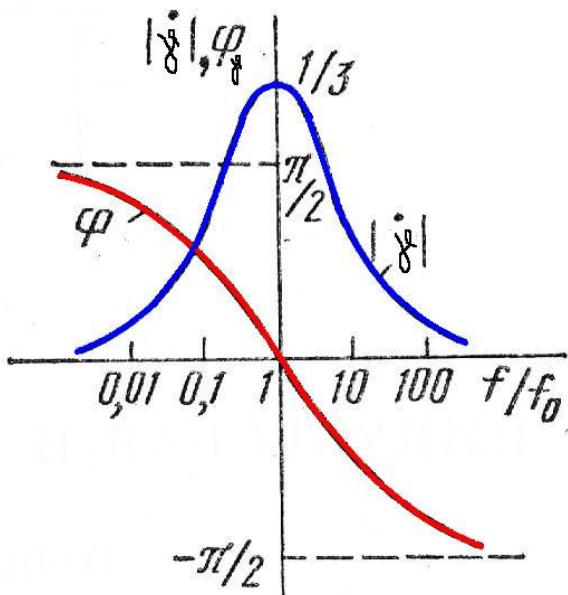
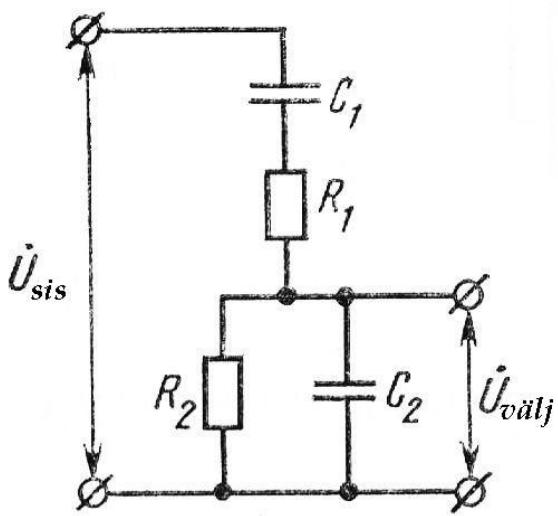
(Hartley skeem)

Kahe sektsiooni L_b ja L_K ühine punkt on läbi toiteallika ühendatud emitteriga. Tagasiside induktiivsuse L_b ja L_K vahel toimub vastastikuse induktiivsuse M kaudu. Et pinge hetkväärtused poolidel L_b ja L_K on ühise punkti suhtes vastasmärgilised (faasinihe 180°), siis tagasiside on positiivne ja faaside tasakaalu tingimus täidetakse.

Püsivõnkesageduse arvutamiseks: $L = L_b + L_K$.

RC – generator

Mida madalam on genereeritav sagedus, seda suurem peab olema LC-generaatori võnkeringu induktiivsus ja mahtuvus. Ühtlasi kasvab pooli aktiivtakistus ja kondensaatori lekkevool, mis kahandavad võnkeringu hüvetegurit ja sageduse stabiilsust. Madalsageduslikes generaatorites kasutatakse selektiivsete elementidega sagedusest sõltuvaid RC-lülisid. Nendest klassikaline → "Wien`i sild"



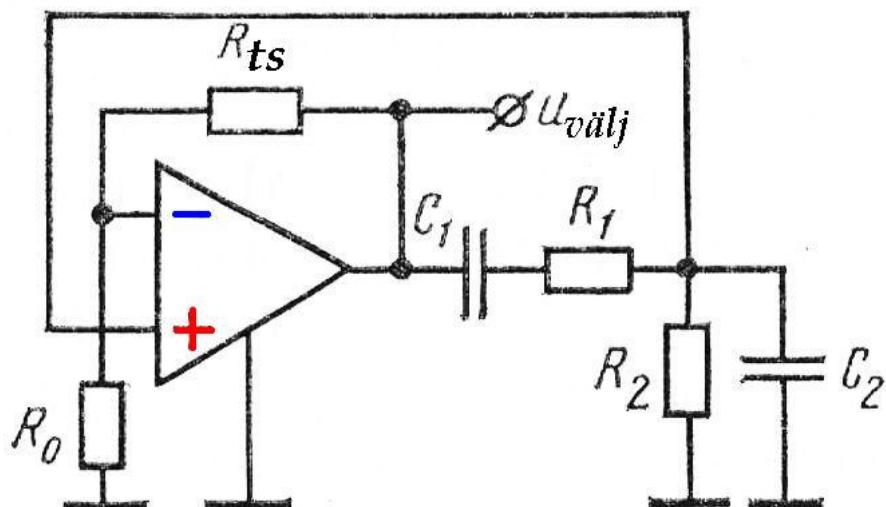
Selle lülituse kvaasiresonantsisagedus:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} = \frac{1}{2\pi R C}$$

kuna tavaliselt: $R_1 = R_2 = R$ ja $C_1 = C_2 = C$

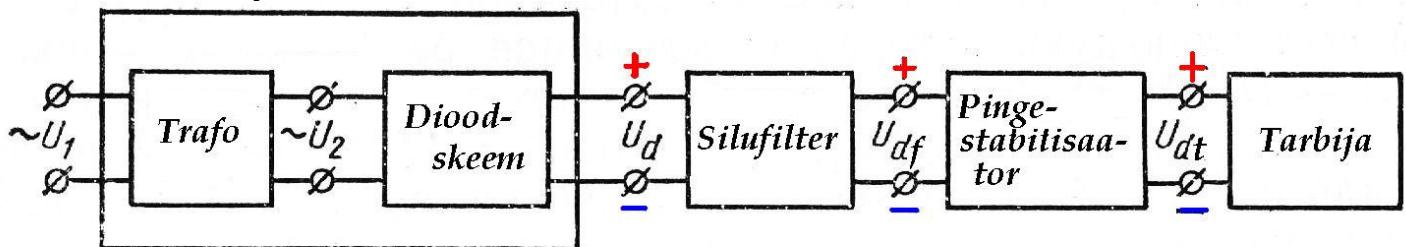
Pingeülekandetegur γ_0 on positiivne, ja seetõttu sisendsignaali faasinihe kvaasiresonantsisagedusel puudub ($\varphi_\gamma = 0$).

Seega endaergutumiseks ei tohi RC-generaatori võimenduslüli sisestuua faasinhett ($\varphi_K + \varphi_\gamma = 0$) ja võimendustegur peab olema suurem kui kolm ($\gamma K = 1$).



Vaja teha $K \geq 3$. Selleks peab valima $\rightarrow R_{ts}/R_0 \geq 2$.

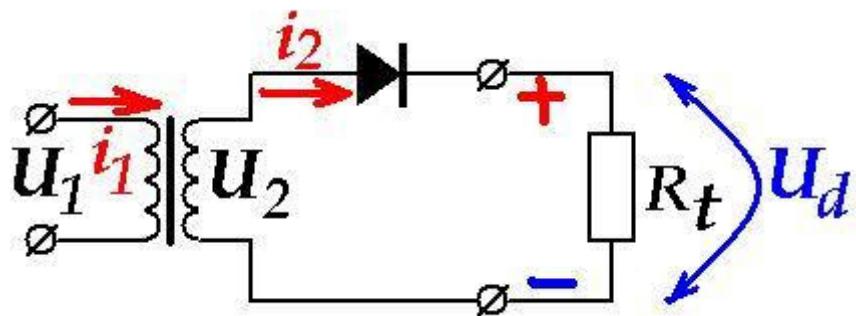
5.14. Elektronaparatuuri toide.



Toiteallika struktuurskeem.

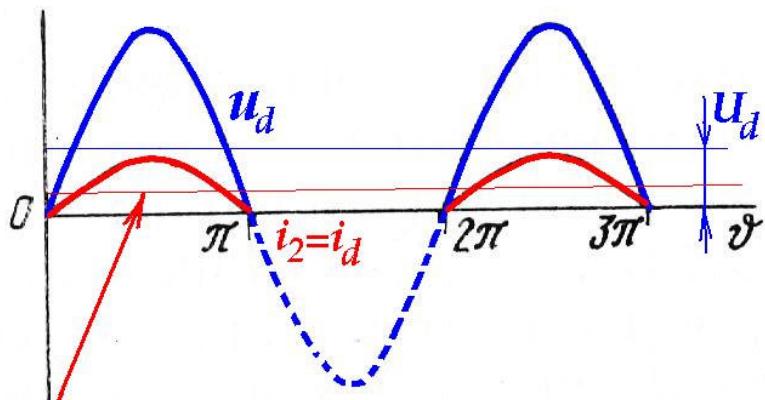
Alaldid.

1). 1F., 1P/P skeem.



U_2 – sekundaarmähise pinge efektiivväärtus; $U_{2m} = \sqrt{2}U_2$

U_d – alaldatud pinge keskväärtus.



Alaliskomponent → trafo südamiku eelmagneetimine!

Eesmärk: leida skeemi ülekandetegur.

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} U_2 d\omega t = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} U_{2m} \sin \omega t d\omega t = \frac{U_{2m}}{\pi} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2$$

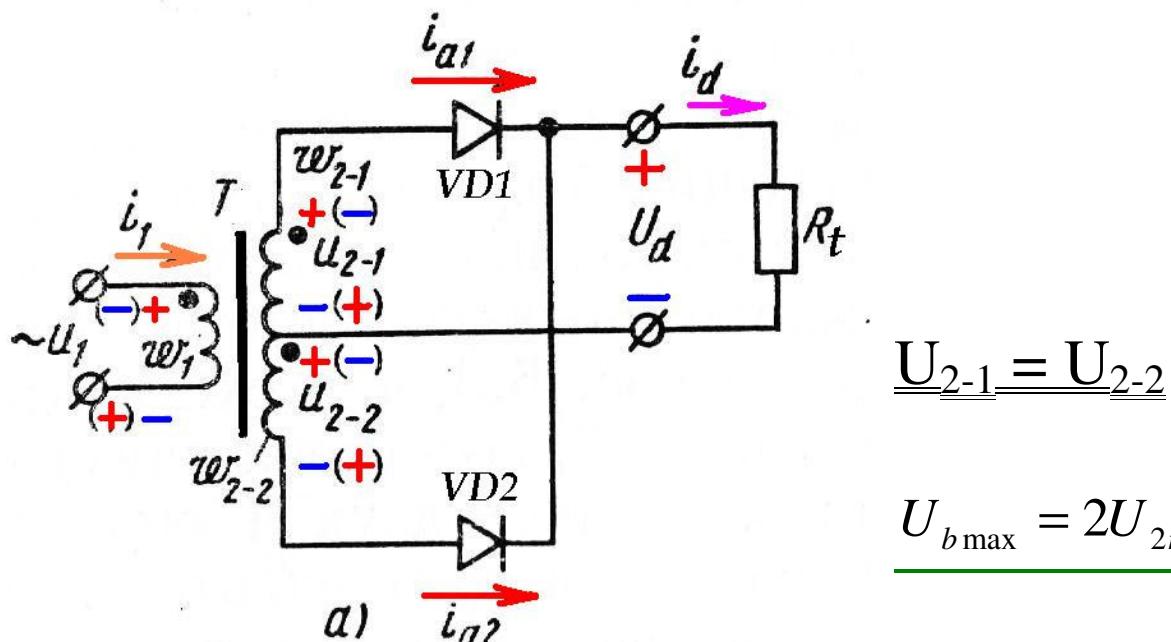
$$U_d = 0,45 U_2$$

$$q_1 = \frac{U_{d_{1m}}}{U_d} = 1,57$$

Pulsatsioonitegur (esimese harmoonilise järgi)

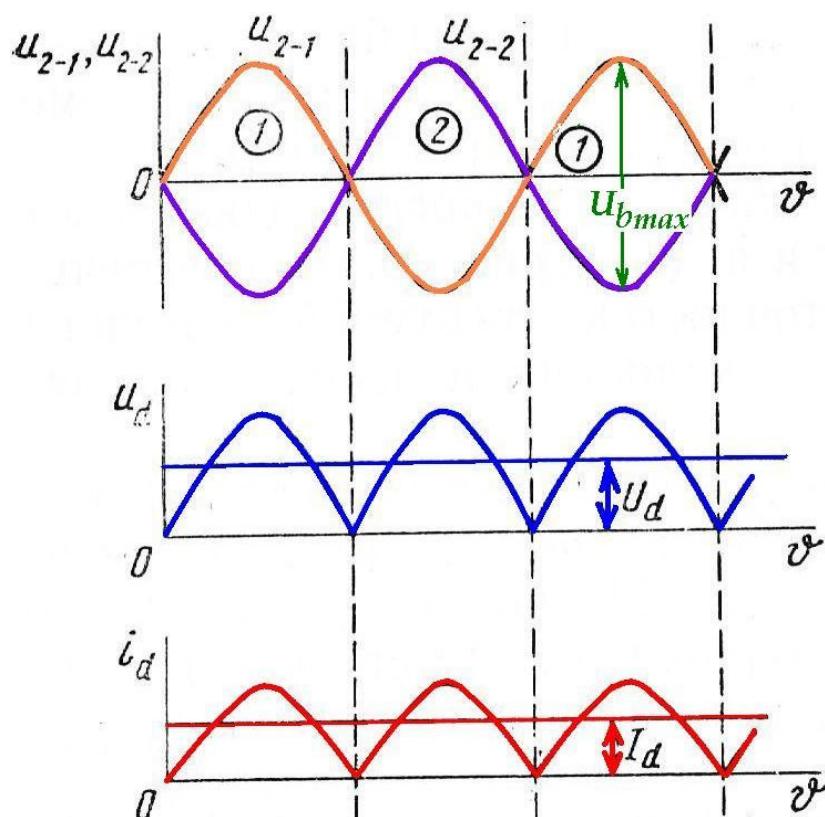
$U_{d_{1m}}$ → alaldatud pinge esimese harmoonilise amplituud.

2). 1F., "0". (null-väljavõttega) skeem.



$$\underline{U_{2-1}} = \underline{U_{2-2}}$$

$$U_{b\max} = 2U_{2m} = 2\sqrt{2}U_2$$



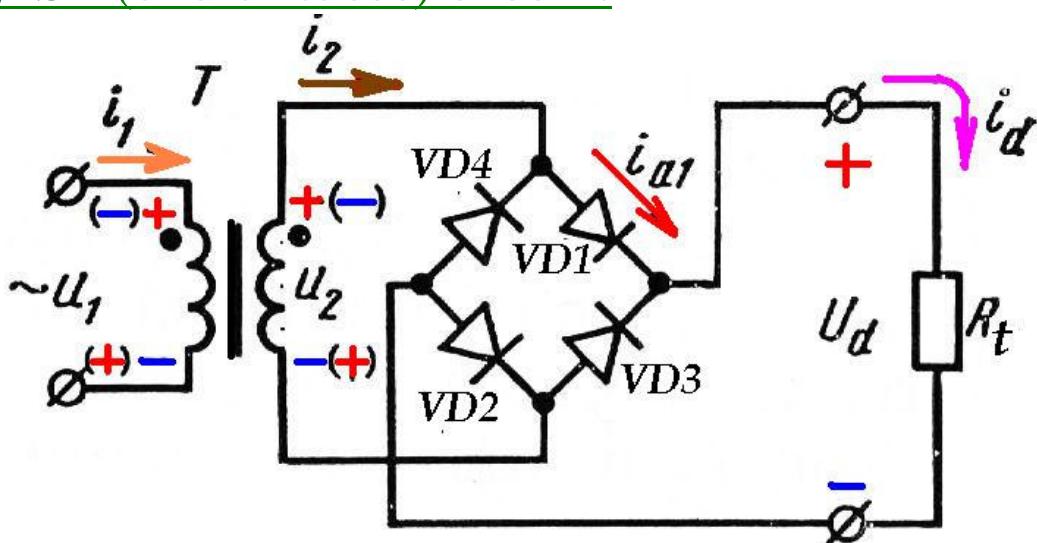
$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d\omega t = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \cong 0,9 U_2$$

$\omega t \rightarrow v ; \quad \boxed{U_d = 0,9U_2}$

$$q_1 = \frac{U_{d_{1m}}}{U_d} = \frac{2}{m^2 - 1} = \frac{2}{2^2 - 1} = \frac{2}{3} = 0,67 \quad q_1 = 67\%$$

$m = ? \rightarrow$ Pulsatsioonide arv alaldatud pinge peeriodil. $\rightarrow m = 2$.
Skeemi kasutamine: suhteliselt tugevate voolude ja suhteliselt madalate pingete alaldamiseks.

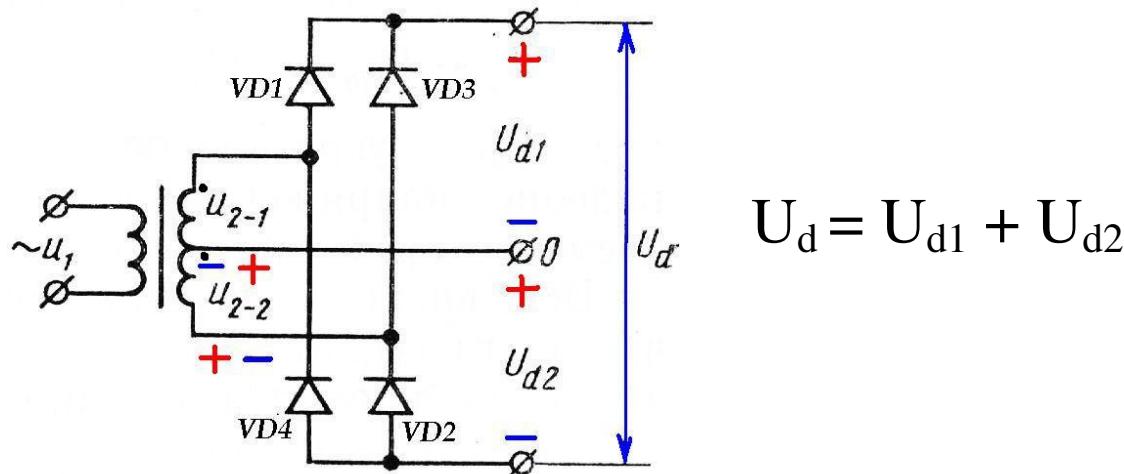
3). 1F., "S" (sildlülitus) skeem.



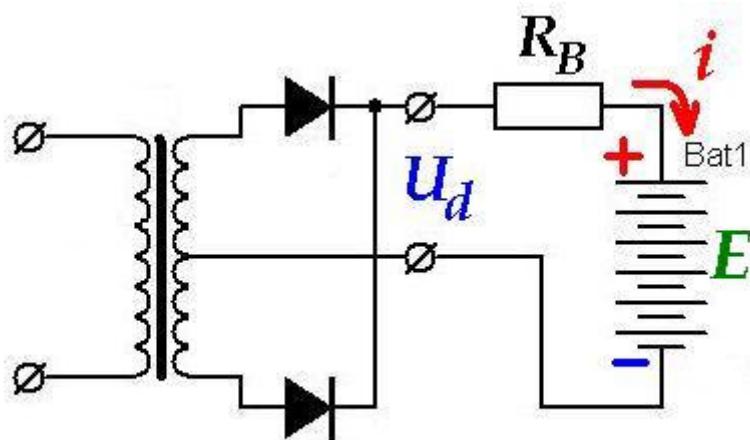
$$U_{b\max} = U_{2m} = \sqrt{2} U_2 \quad \boxed{U_d = 0,9U_2}$$

Skeemi kasutamine: suhteliselt nõrkade voolude ja suhteliselt kõrgeate pingete alaldamiseks.

Skeem kahepolaarsete pingete saamiseks. [2) ja 3) skeemide kombinatsioon].

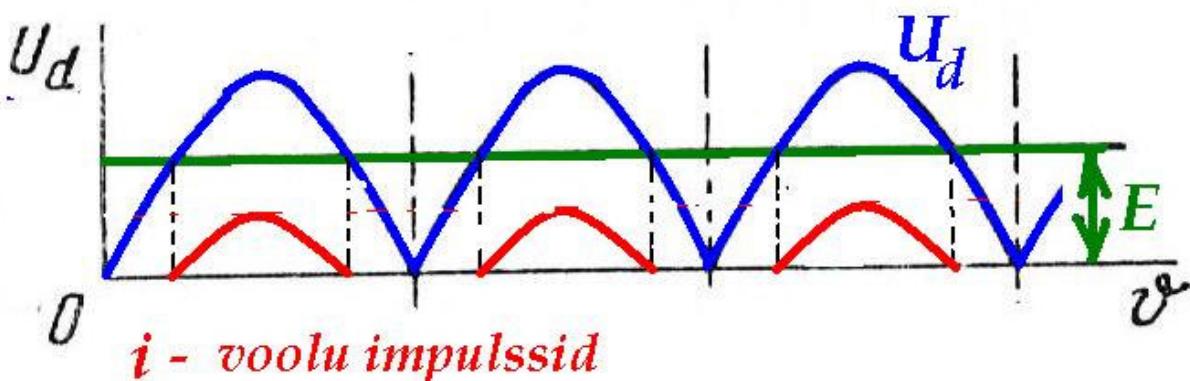


Alaldi töö vastu- E.M.J. peale.



→ Aku laadimine.

Laadimisvoolu piiramiseks
kasutatud
takisti R_B .

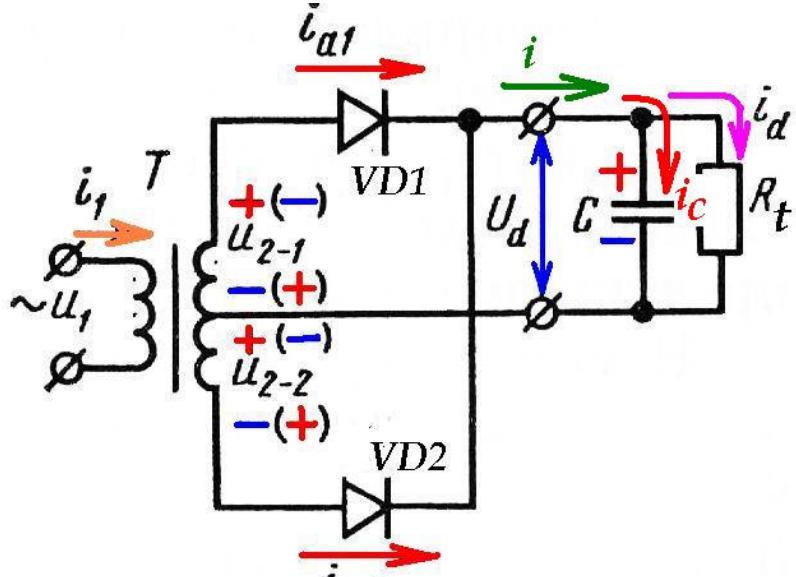


$$i = \frac{U_d - E}{R_{EKV}}$$

Kui $U_d > E \rightarrow$ laadimisvoolu keskväärtus

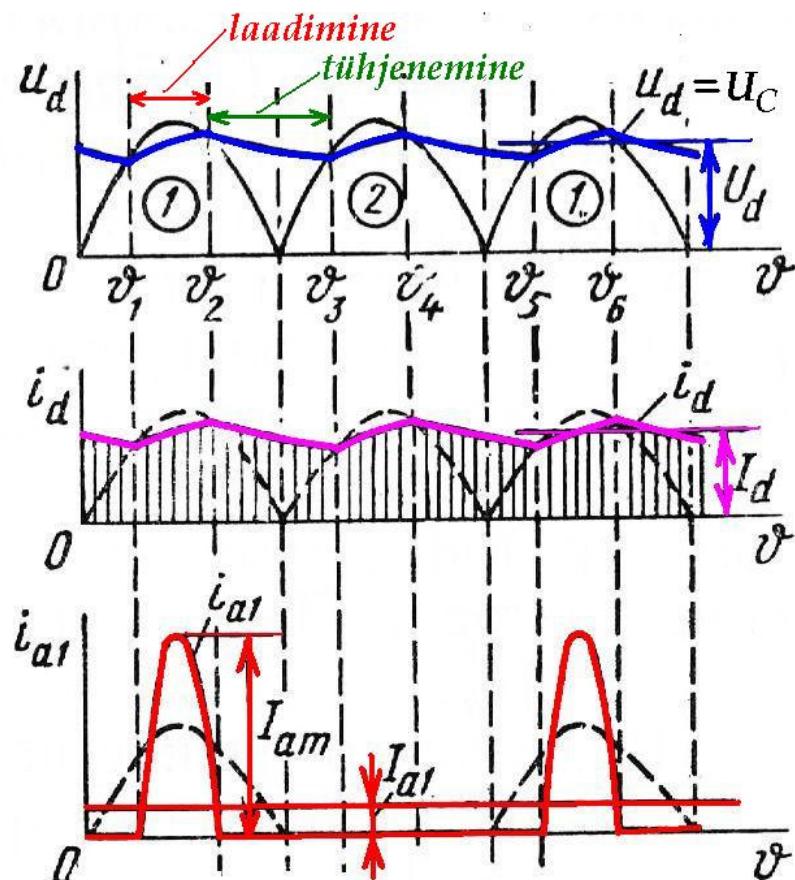
$$R_{EKV} = R_B + r_{diode} + r_{trafo}; \quad r_{trafo} \Rightarrow r'_1 + r''_2$$

Alaldi mahtuvuslik koormus. Mahtuvuslik filter.



$$\begin{aligned} \mathbf{i} &= (|U_2| - U_C) / R_{EKV} \rightarrow |U_2| \geq U_C \\ \mathbf{i} &= 0 \quad \rightarrow |U_2| < U_C \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{i}_C &= \mathbf{i} - |U_2| / R_t \quad \rightarrow |U_2| \geq U_C \\ \mathbf{i}_C &= -|U_2| / R_t \quad \rightarrow |U_2| < U_C \end{aligned}$$



Kui $C = \infty$ → pulsatsioone ei ole.

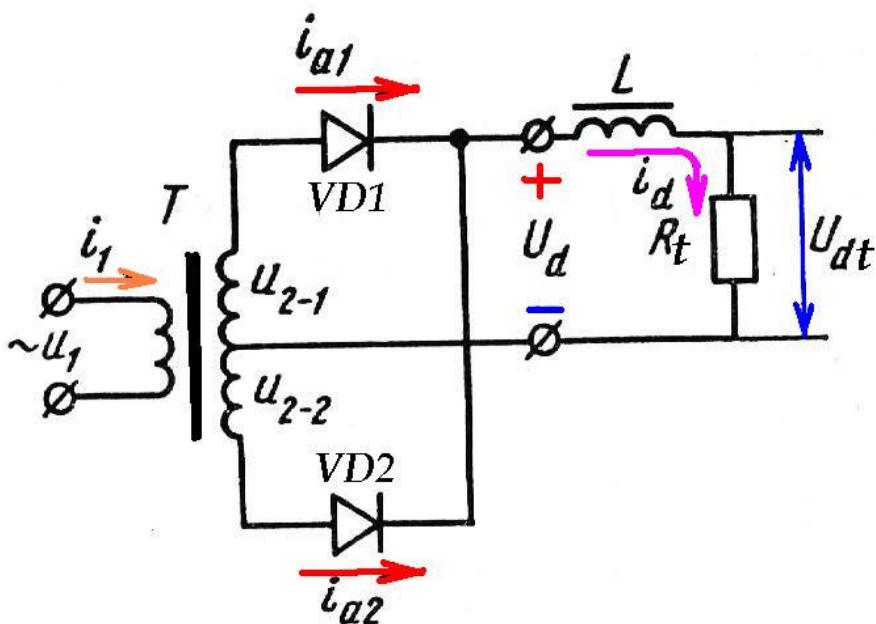
Tühijooksul $R_t = \infty \rightarrow U_d = U_C = U_{2m} = \sqrt{2}U_2$

Mahtuvuslik filter → nõrkade voolude jaoks.

$\tau = R_t C = (4 - 8)T \rightarrow q_1 = 0,02 - 0,04$.

$$q_1 = \frac{1}{2\pi f_{võrk} CR_t}$$

; Kui q_1 on ette antud, siis siit võib leida filtri kondensaatori mahtuvuse.

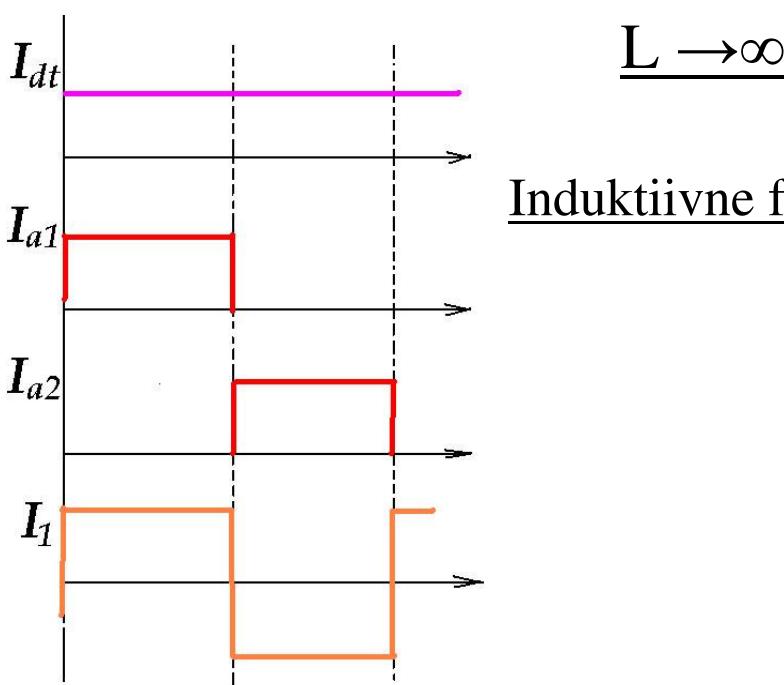


Alaldi induktiivne koormus. Induktiivne filter.

$$U_d = 0,9U_2$$

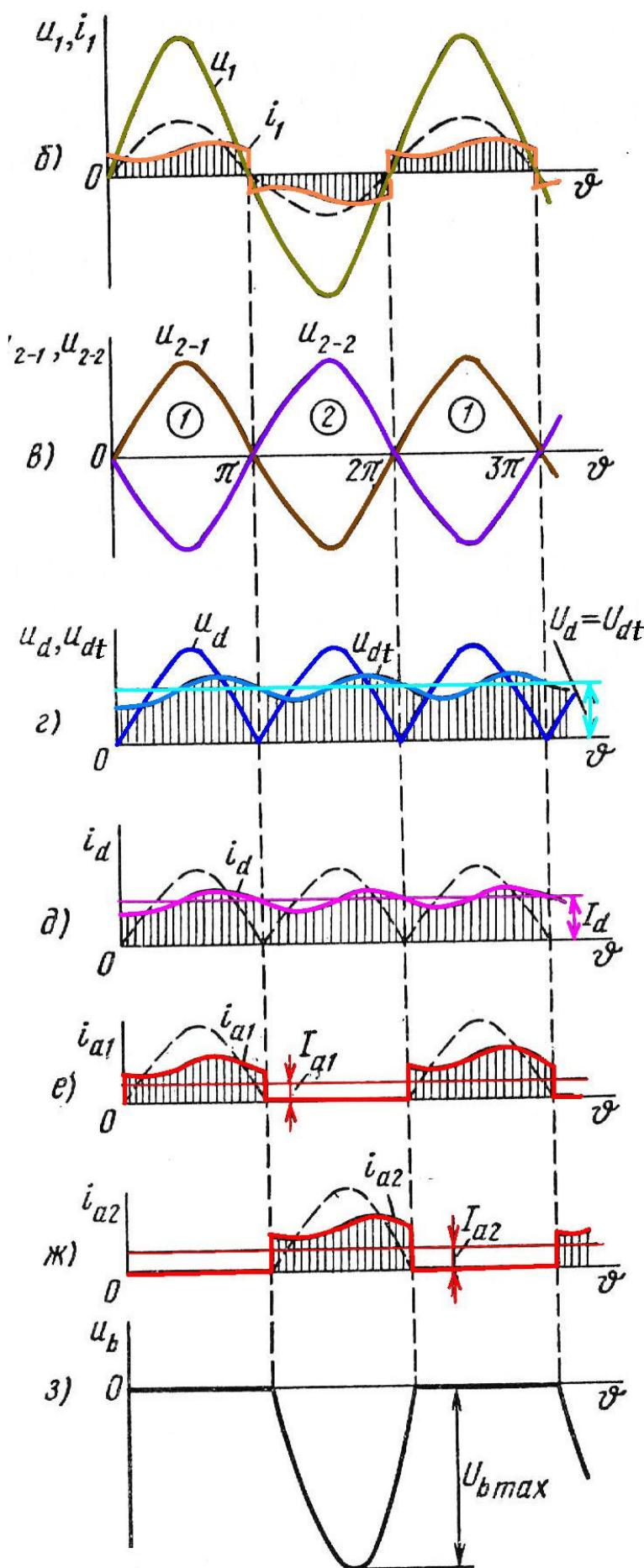
$$q_1 = \frac{2\pi f_{võrk} L}{R_t}$$

Siit samuti võib saada L , kui on tea-da q_1 .

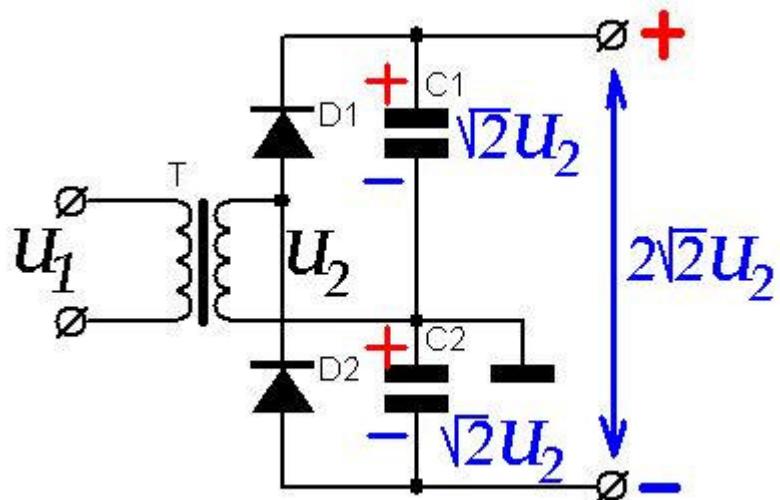


Induktiivne filter → tugevatele vooludele.

L → lõplik suurus.



Pingekordistid 1). Latour'i skeem



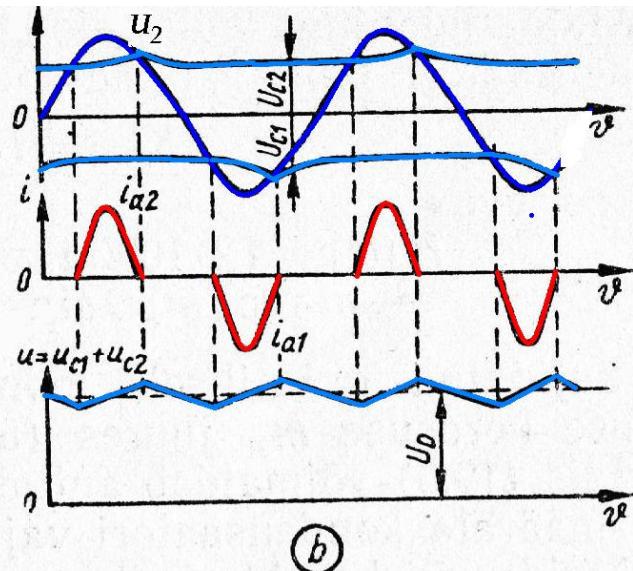
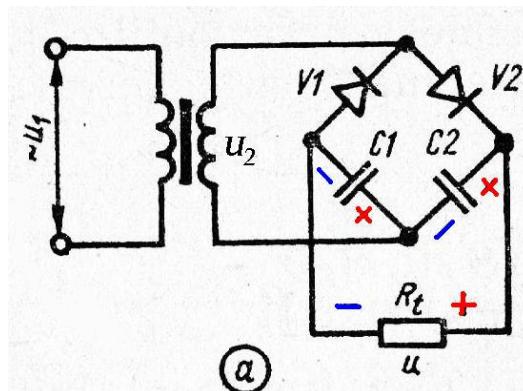
Võimsustele < 50W

$$C_1 = C_2$$

Tavaliselt: $R_t C \gg T$

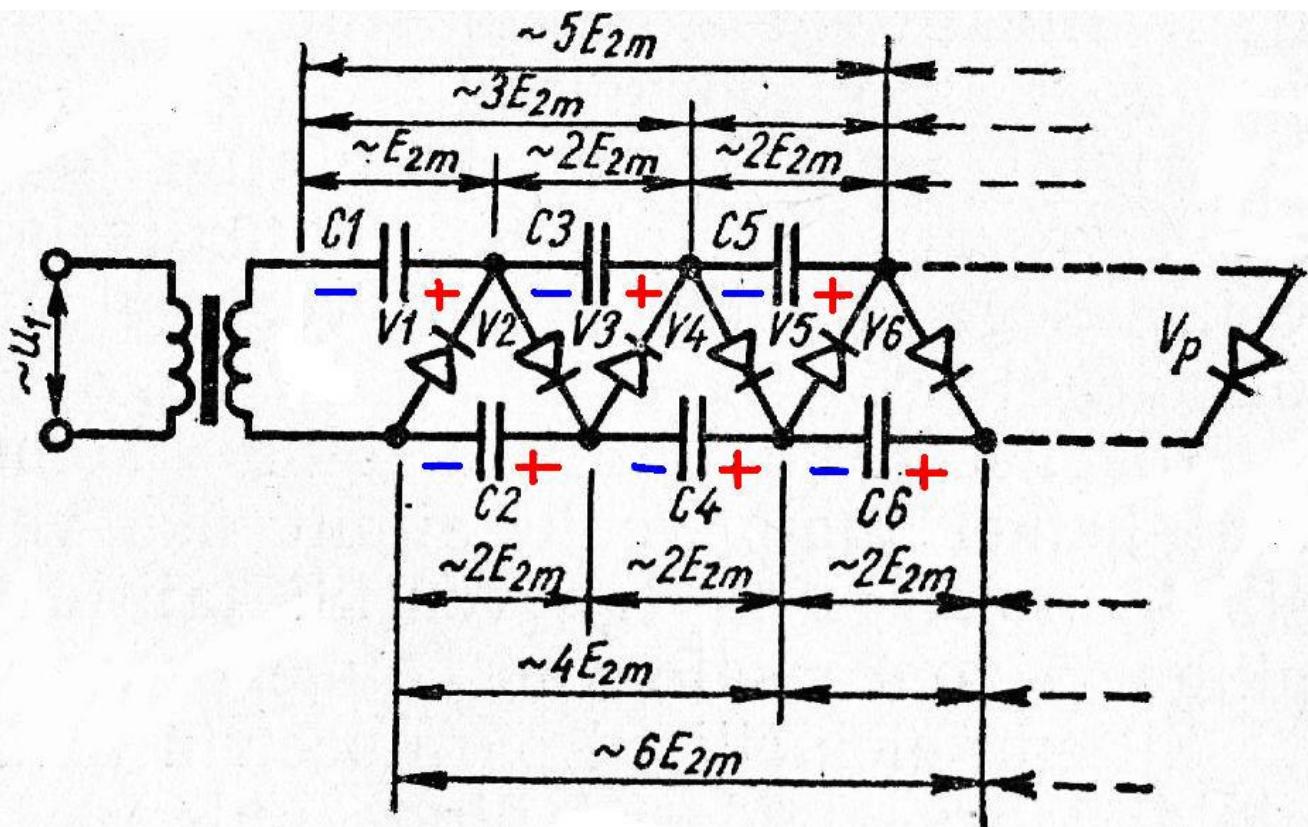
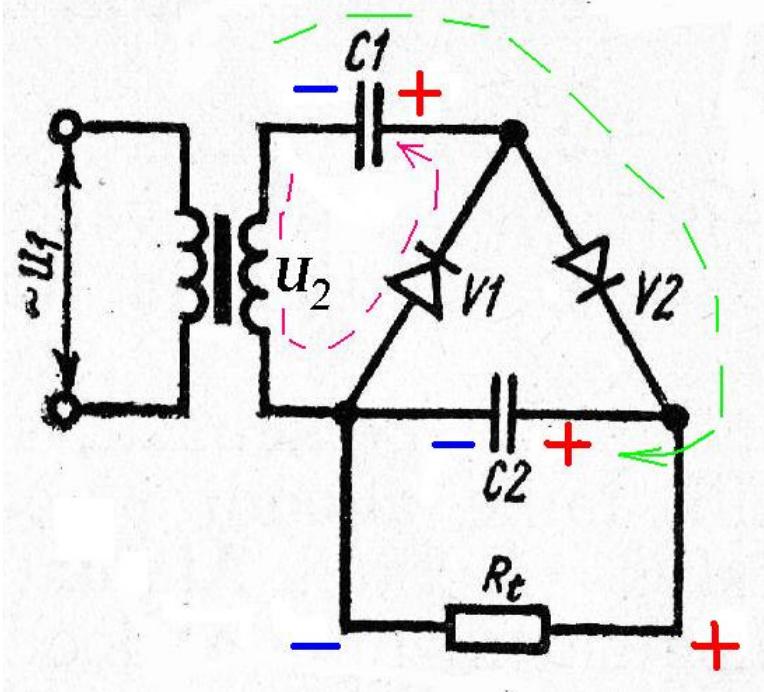
← tühijooksul, $R_t = \infty$

Võib saada kaks pinget trafo ühe mähise pealt.



Pinge kahekordistusskeem (a), pingete ja voolude ajadiagrammid (b)

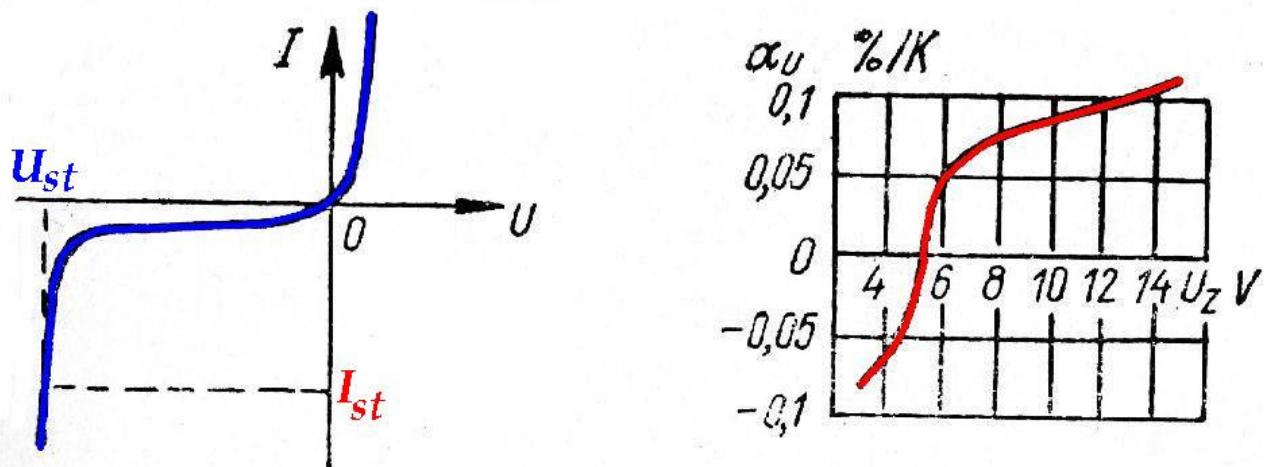
2). Mittesümmmeetrisiline skeem.



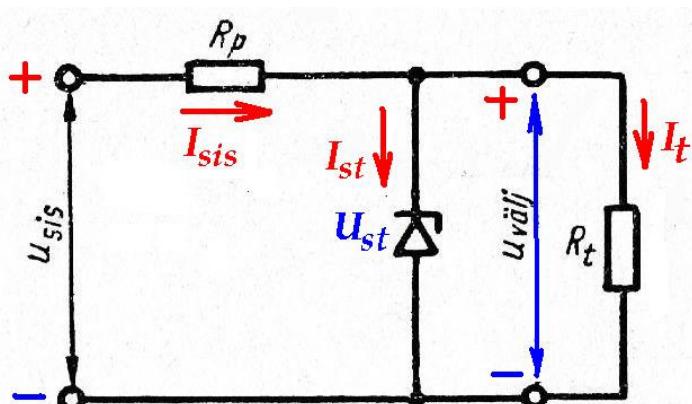
Pingestabilisaatorid.

1). Parameetriline pingestabilisaator

Parameetristeks nimetatakse stabilisaatoreid, mis põhinevad mittele lineaarsetel elementidel, nagu stabilitron, termotakisti, drossel, mille parameetrid muutuvad voolu või pinge muutumisel selliselt, et tarbijaga pinge või vool jääävad peaaegu muutumatuks.



Pingestabilisatsioonitegur sisendpinge järgi:



$$K_U = \frac{\Delta U_{sis} / U_{sisnimi}}{\Delta U_{välj} / U_{väljnimi}};$$

Võib nõnda:

$$K_U = (\Delta U_{sis} / \Delta U_{välj}) \lambda;$$

kus $\lambda = U_{välj\ nimi} / U_{sis\ nimi}$ ← pingüülekandetegur nimirežiimis.

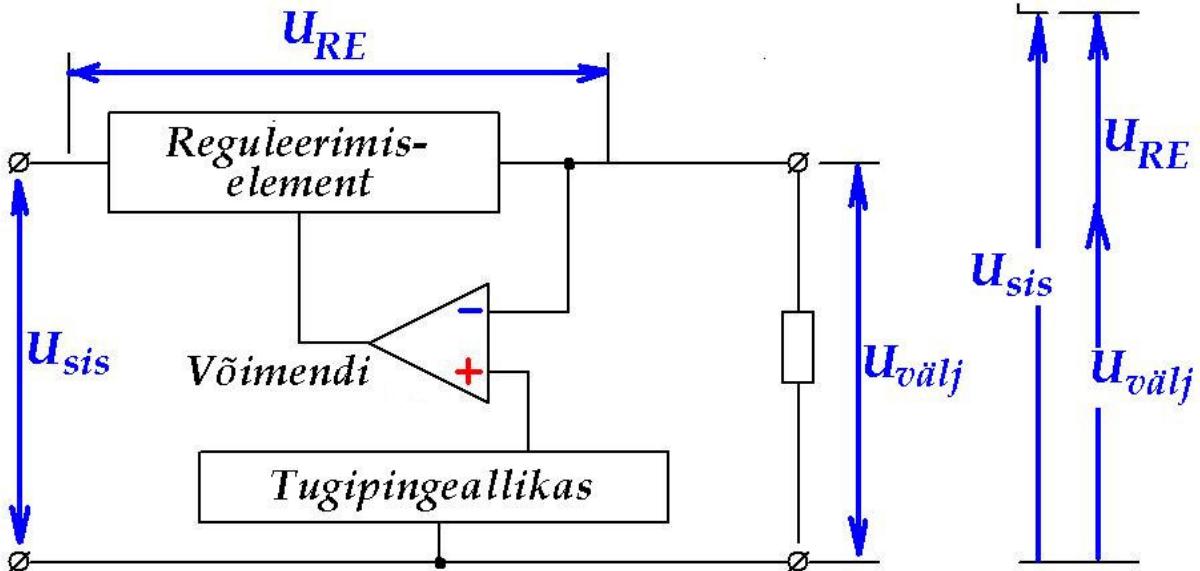
$$K_U \approx (R_P / r_Z) \lambda_{nimi} \text{ kus } r_Z - \text{stabilitroni diferentsiaaltakistus.}$$

Harilikult vaja leida R_P suurust. Kuna $U_{välj} = U_{st}$ ja U_{st} ning I_{st} on stabilitroni tööpunkt, siis:

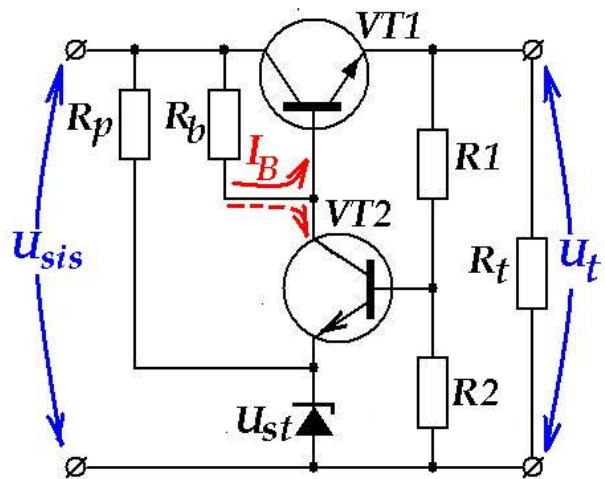
$$I_t = U_{st} / R_t; \quad I_{sis} = I_{st} + I_t;$$

$$R_P = \frac{U_{sis} + U_{st}}{I_{sis}}$$

2). Kompensatsioonstabilisaatorid.

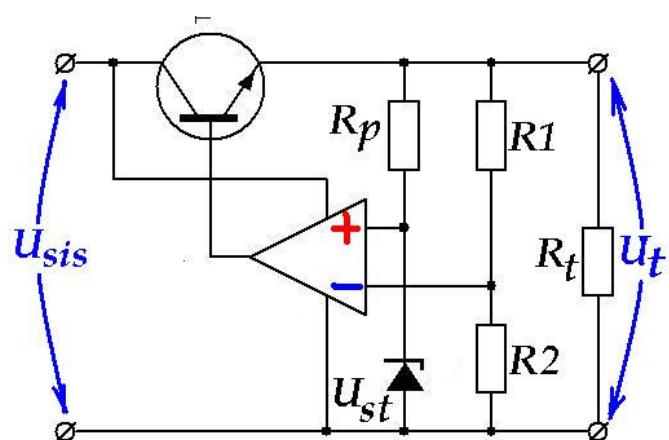


Kompensatsioonstabilisaatoris võrdleb mõõtevõimendi stabiliseeritavat suurust etalonsuurusega (tugipingeallikas) ja töötab välja võimendatud veasignaali, mida antakse reguleerimiselementti, kus muudetakse mingit parameetrit stabiliseeritava pinge vajaliku täpsusega hoidmiseks.



$$U_t = (U_{st} + U_{BE2}) \frac{R1 + R2}{R2}$$

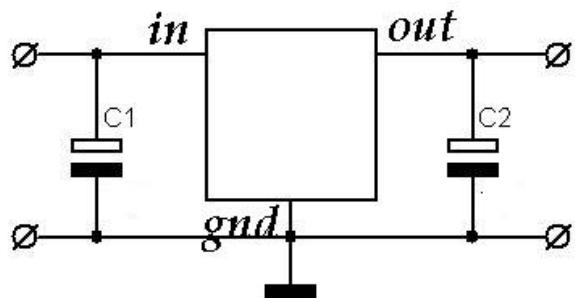
$$U_t \approx U_{st} \frac{R1 + R2}{R2}$$



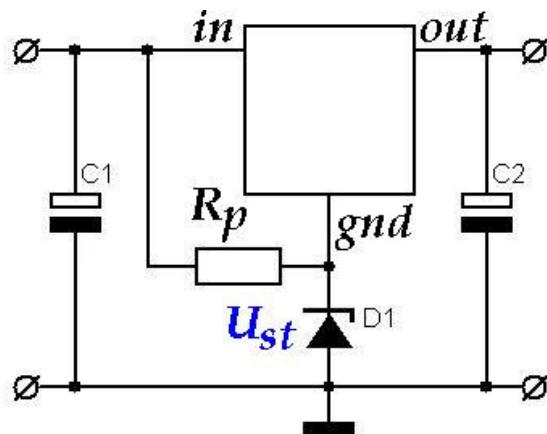
$$U_t = U_{st} \frac{R1 + R2}{R2}$$

3). Integraalpingestabilisaatorid.

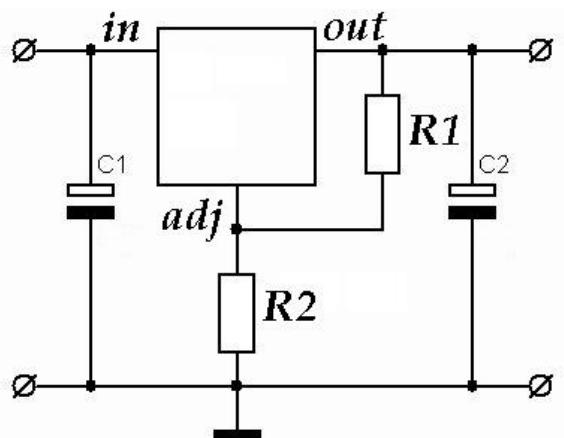
Fikseeritud väljundpingega.



78XX → positiivsetele pingetele
79XX → negatiivsetele pingetele



Reguleeritava väljundpingega.



317 337

$$U_{\text{välj}} = 1,25 \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right)$$

5.15. Filtrid

Kasutatakse elektrilise signaali töötlemiseks.

Perioodilise signaali esitamine Fourier'i reana:

$$u(t) = \underbrace{U_0}_{\text{ALALISKOMPONENT}} + \underbrace{U_{m1} \sin(\omega t + \varphi_1)}_{\text{PÖHIHARMOONILINE}} + \underbrace{U_{m2} \sin(2\omega t + \varphi_2)}_{\text{KÖRGEMADHARMOONILISED}} + U_{m3} \sin(3\omega t + \varphi_3) \dots$$

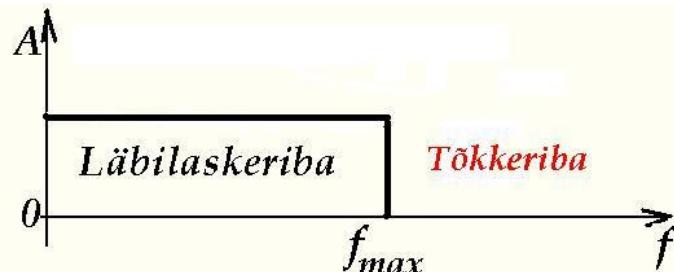
Mitteperioodilise signaali puhul:

$$u(t) = U_0 + U_{m1} \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + U_{m2} \sin(\omega_2 t + \varphi_2) + U_{m3} \sin(\omega_3 t + \varphi_3) \dots$$

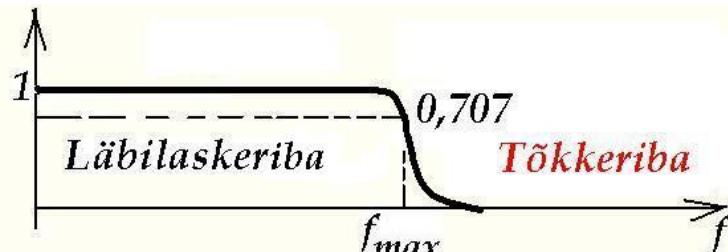
Eri grupp → silufiltrid → puhtalt U_0 eraldamiseks; kasutatakse toiteallikate ehitamiseks.

Ideaalfiltrid ja reaalfiltrid.

Ideaalfiltrid piir läbilaskeriba ja tõkkeriba vahel on järsk. Ideaalfilter füüsiliselt ei ole realiseeritav.



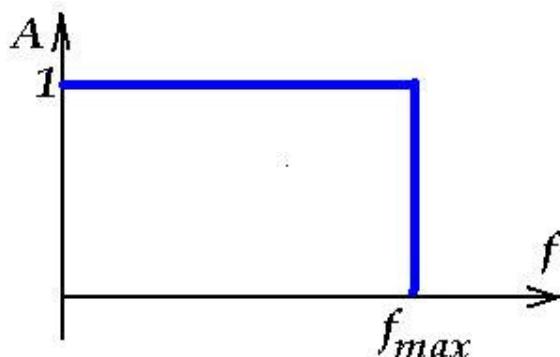
Reaalfilter on realiseeritav, aga üleminekud läbilaskeriba ja tõkkeriba vahel on alati sujuvad. Amplituudsageduskarakteristiku languse järskus sõltub R, L, C arvust filtri skeemist.

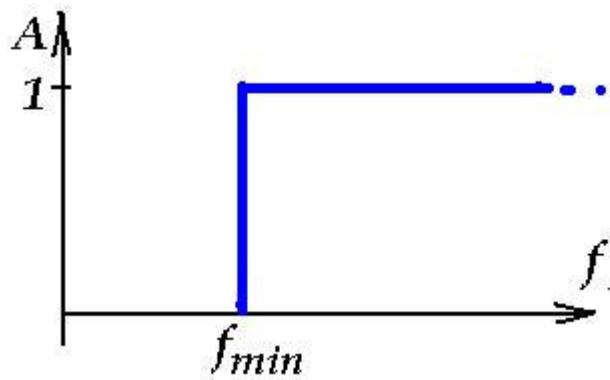


Filtrite liigitus läbilaskeriba järgi.

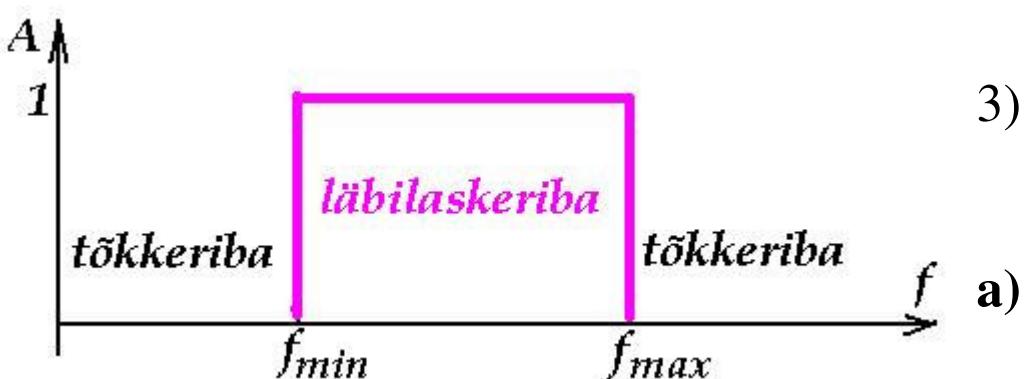
Üldjuhul eksisteerib neli põhitüüpi:

- 1) **MPF** → Madalpääsfilter, laseb läbi madalamad sagedused. Näit.: alaliskomponendi U_0 eraldamiseks $f_{max} < 50 \dots 150 \text{ Hz}$. Kõne ülekandmiseks piisab $f_{max} = 3000 \text{ Hz}$.

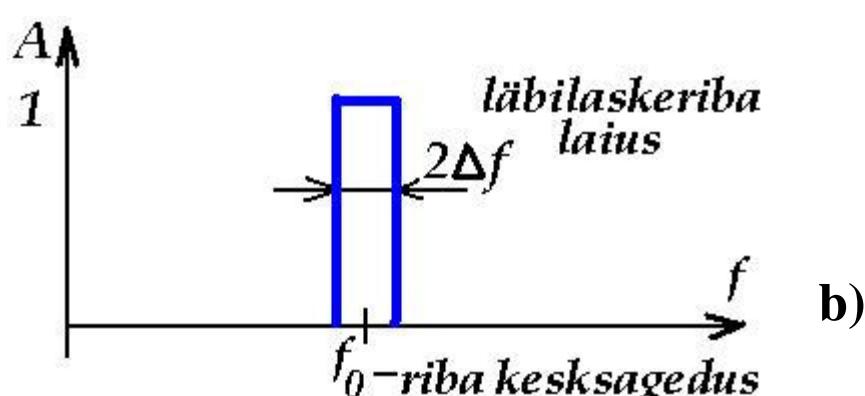




2) KPF → Kõrgpääsfilter.

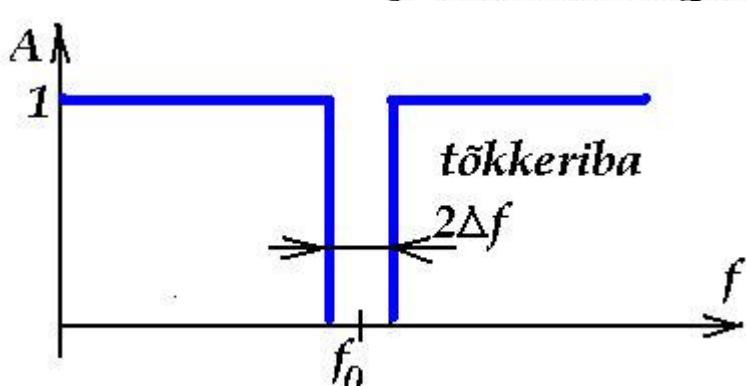


3) RLF →
→ Ribaläbivusfilter.



b)

4) RTF → Ribatõkkefilter.



Butterworth'i ja Tšebõševi filrid.

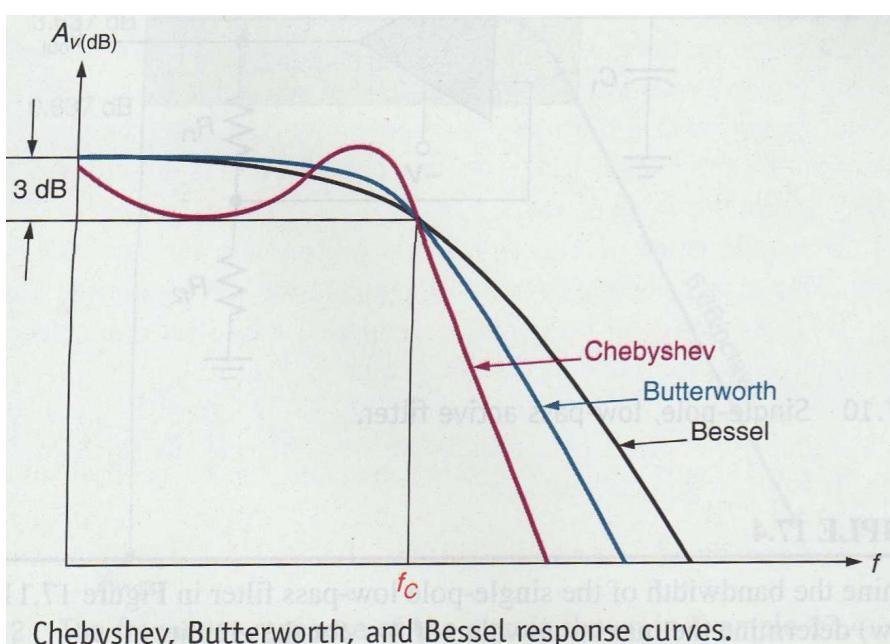
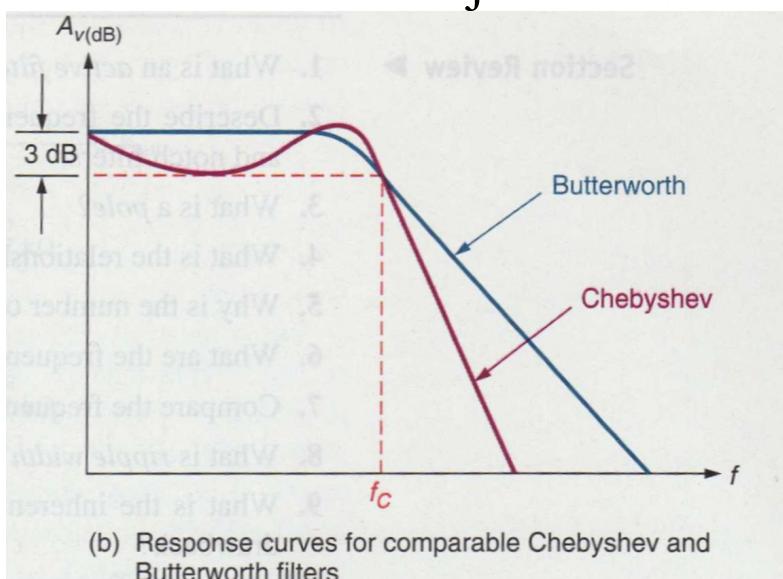
Filtri ülekandekarakteristik üldjuhul:

$$K(p) = \frac{K_0}{\prod_i (1 + a_i P + b_i P^2)} ; \text{ kus } P = p/\omega_g ; p = j\omega , \omega_g = 2\pi f_g$$

$f_g \rightarrow$ lõikesagedus.

Filtri järk n on P aste. Filtri tüüp on määratud a_i ja b_i .

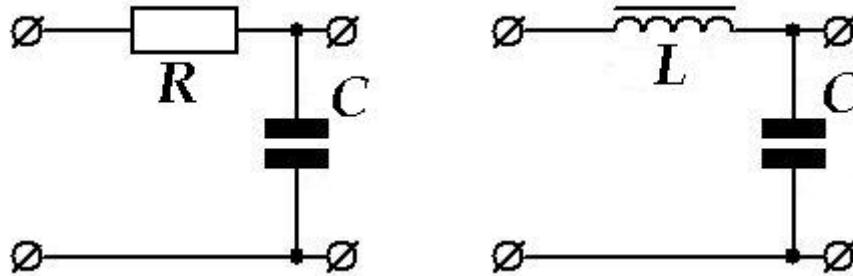
Esimese järu filtritel $a_i = 1$, ja see on kõikidele filtri tüüpidele – Butterworth'i, Tšebõševi, Besseli. Kõrgema järu filtritel sagedus- ja ülemineku karakteristikute kujud sõltuvad filtri tüübist.



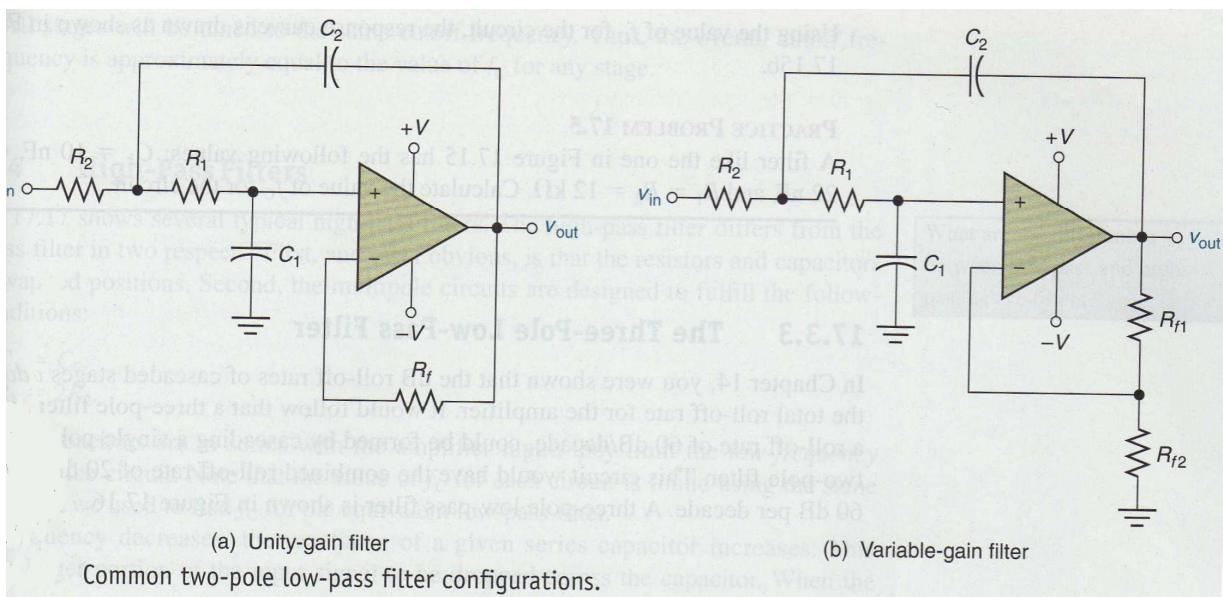
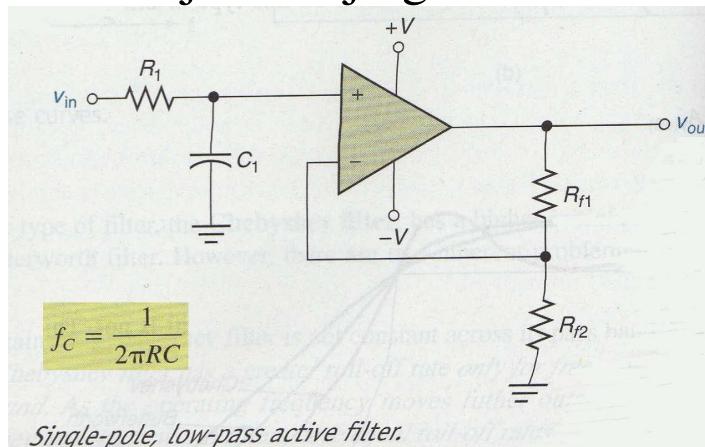
Passiiv- ja aktiivfiltrid

Passiivfilter ei sisalda võimenduselemente, On ehitatud puhtalt L,C,R baasil.

Esimese järgu passiiv MPF → integreerimisahel. Teise järgu passiiv MPF → LC – ahel.



Aktiivfiltrid: esimese ja teise järgu MPF`id:



$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

6. Digitaalelektronika põhilülitused

6.1. Nulli ja ühe esitamine

Eksisteerivad positsioonilised ja mittepositsioonilised arvusüsteemid. Digitaaltehnikas kasutatakse ainult positsioonilisi arvusüsteeme. Kui mingi arv on esitatud positsioonilises arvusüsteemis valitud alusega **q**, siis peab olema ka mingi elektronseade, mis on võimeline formeerima oma väljundis **q** erilisi elektrisignaale. Mida suurem **q**, seda vähem selliseid seadmeid läheb tarvis, aga ka seda raskem on sooritada diskreetsete nivoode identifitseerimist.

Aluse **q** valiku kriteeriumiks on aparatuursete kulutuste minimeerimine. Optimeerimisülesande lahendamise tulemuseks on **q = e = 2,71...** Sellise süsteemi loomine on äärmiselt keeruline ja tehnilisest küljest mitteotstarbekas. Selle tõttu digitaaltehnikas on kasutamist leidnud positsiooniline arvusüsteem alusega **q = 2** → kahendarvusüsteem. Selle süsteemi defiitsioonist lähtudes on juba selge, et siin võivad figureerida ainult kaks numbermärki: **0** ja **1**.

Nulli ja ühe esitamine:

- 1) Paberil: „0“ ; „,0“; „,1“ ; LOW, HIGH ; (L,H)
- 2) Seadmes: **Vooluga** → Mõnikord tehakse.

Pingega → Mugavam. Enamasti pingega!

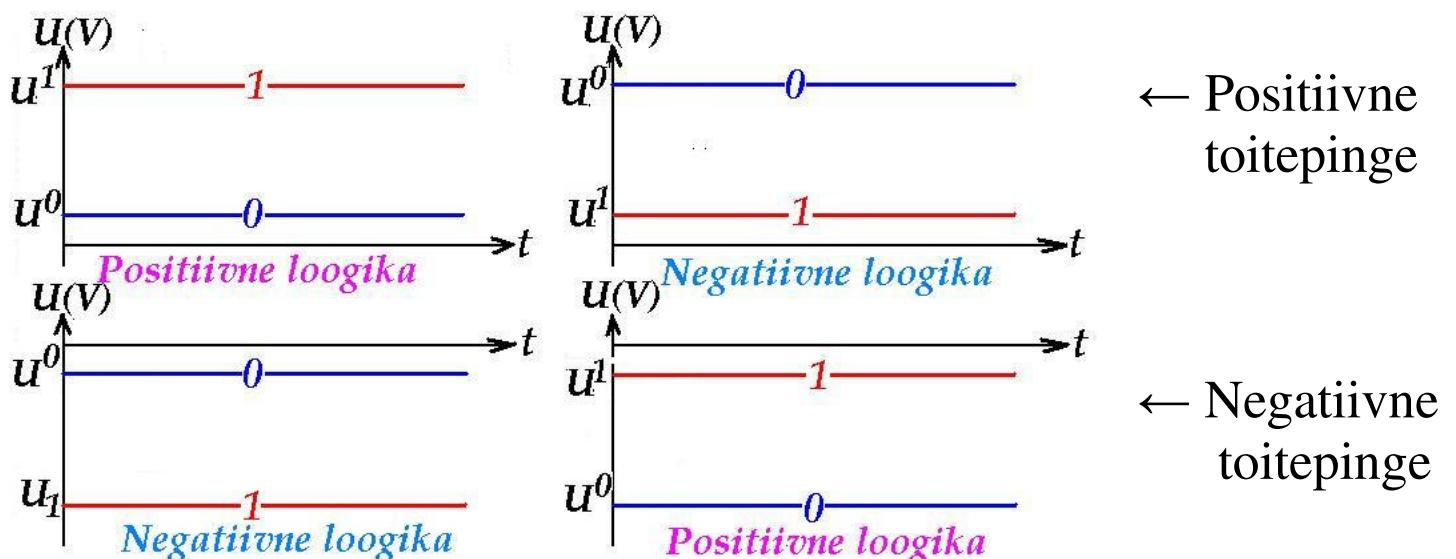
Voolusüsteemi näide: „1“ – 20mA, „0“ – 4mA. Kui vool puudub, siis on sidekaabel puruks läinud.

Kui pingega, siis vahelduvpinge, alalispinge.

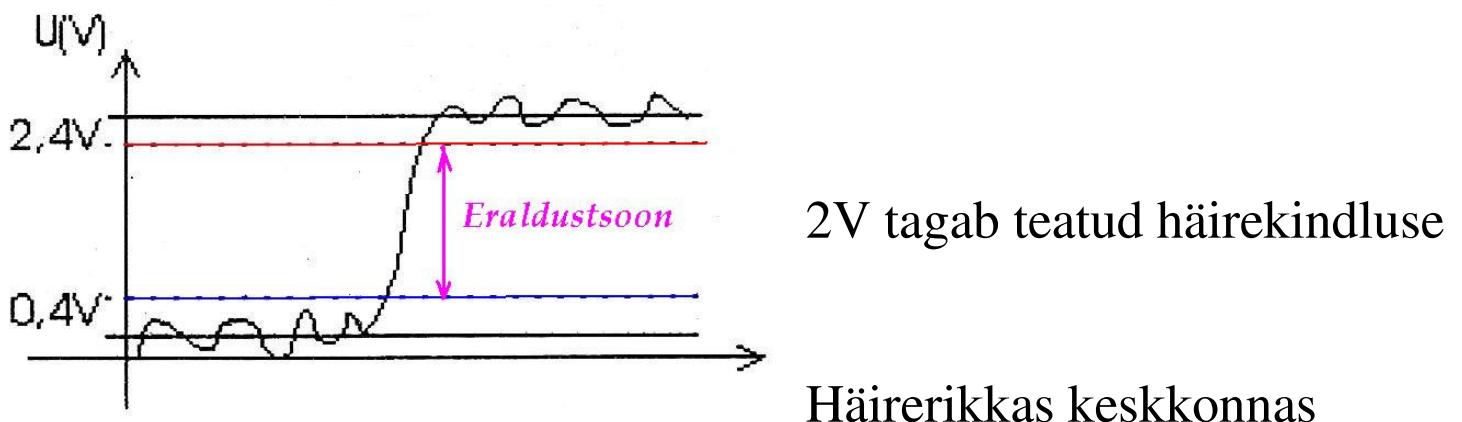
Vahelduvpinge puhul 0 ja 1 esitajaks võib olla:

- Amplituud;
- Sagedus;
- Algfaas;
- Kande signaali moduleerimine

Alalispinge puhul:



Nivoode valik: näiteks, TTL-nivood (+0,4V, +2,4V) kõlbavad väikeste häirete puhul.



kasutatakse bipolaarset loogikat:

1 → >> +5V; >> +24V; **0** → << - 5V; << - 24V .

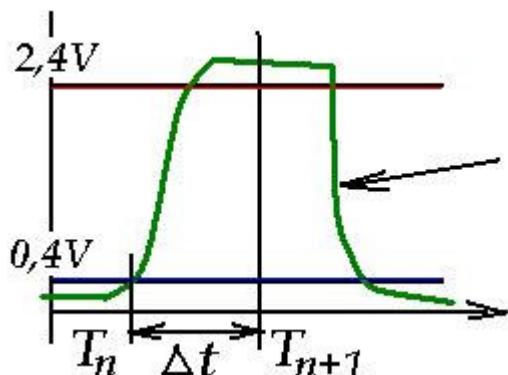
Digitaalelektronika süsteemid töötavad takteeritult.

Taktgeneraator → kogu töö selle taktis.

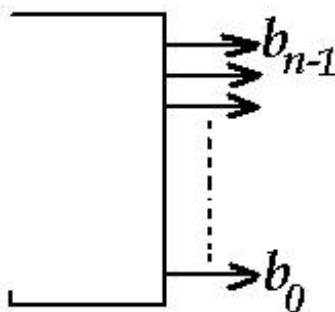
CLOCK = kell; CLC, C, „синхро”

Siire 1 → peab olema tunduvalt kiirem, kui Δt . Taktsagedus $F = 1/\Delta t$.

Kui $F = 100$ MHz, siis $\Delta t = 10^{-8}$ s = 10 ns.



Infoesitus ühe biti kaupa on kasutusel järjestikinterfeiside puhul (SCI – serial communication interface, SPI – serial periferial interfase). Nõuab 2 juhet: 1) infojuhe, 2) „maajuhe“. Väikestel vahemaaadel on tegu paralleelinterfeisidega.



Kokku on n bitti. Antakse edasi piki lintkaablit.

Kuidas valida n ?

1) Mõõtetäpsuse aspekt. n biti puhul on võimalik 2^n erinevat nivoold, s.o. mõõdetava suuruse täisskaala (täisulatus) jaguneb 2^n erinevaks diskreetseks väärтuseks. Seega samm ühelt diskreetselt väärтuselt teisele võrdub:

$$\frac{\text{täisskaala}}{2^n} \quad \text{Olgu } n = 8. \rightarrow 2^n = 256. \text{ Samm} = \frac{\text{täisskaala}}{256} \approx 0,4\%$$

Seega kvantimise (sammudeks jaotamise) viga on +/- 0,2%.

$$\text{Juhul kui } n = 10, \rightarrow 2^{10} = 1024; \text{ samm} = \frac{\text{täisskaala}}{1024} \approx 0,1\% ;$$

Kvantimise viga on +/- 0,05%.

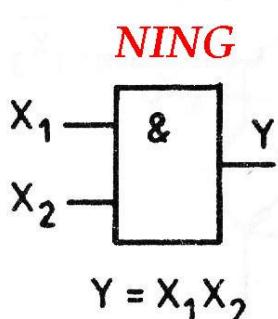
2) Täisarvude või aadresside (mälupesade arvu) diapasooni valik:
 $n = 8 \rightarrow$ võimaldab 256 erin. täisarvu või mälupesa aadressi.
 $n = 16 \rightarrow$ 65536 erin. täisarvu või mälupesa aadressi.

6.2. Loogika baaselementid.

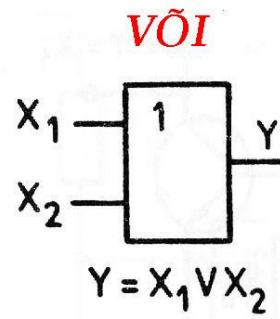
Loogikaelementide süsteem peab olema funktsionaalselt täielik. →

Inimese jaoks meeldivaim: **NING, VÕI, EI** («и» «или» «не»).

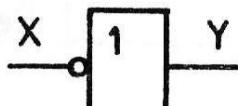
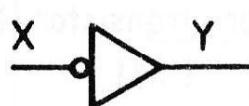
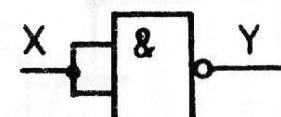
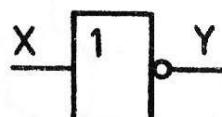
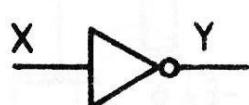
→ Tehnoloogia jaoks parimad. **NING-EI, VÕI-EI** («и-не» «или-не»)



| X_1 | X_2 | Y |
|-------|-------|-----|
| 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 1 |



| X_1 | X_2 | Y |
|-------|-------|-----|
| 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 1 |

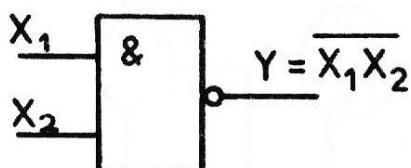


| X | $Y = \bar{X}$ |
|-----|---------------|
| 0 | 1 |
| 1 | 0 |

EI variandid

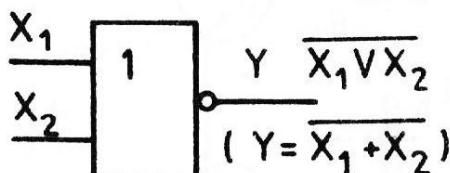
Loogika baaselementid NING, VÕI ja EI: tingmärgid ja töeväärtustabelid

NING-EI



| X_1 | X_2 | Y |
|-------|-------|-----|
| 0 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 0 |

VÕI-EI



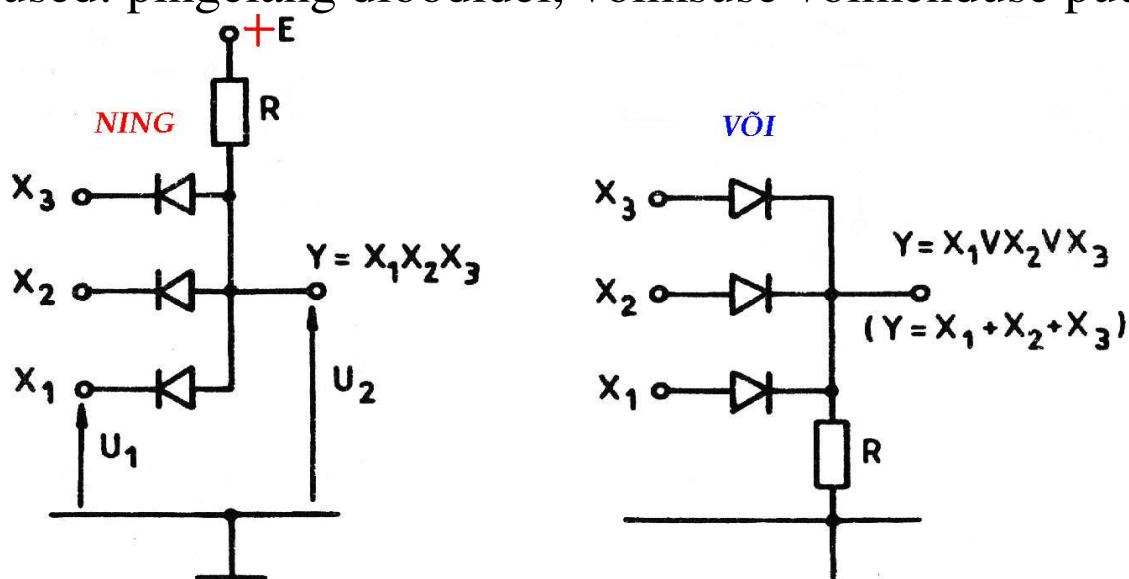
| X_1 | X_2 | Y |
|-------|-------|-----|
| 0 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 0 |

Transistoride kasutamisel kergesti realiseeritavad loogikaelementid NING-EI ja VÕI-EI

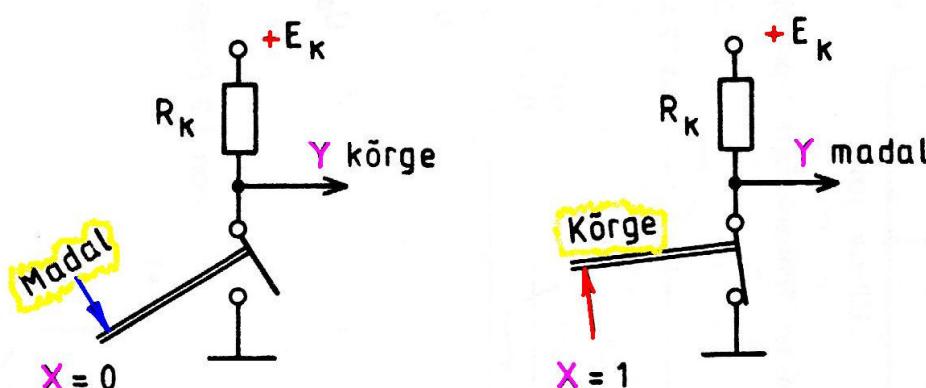
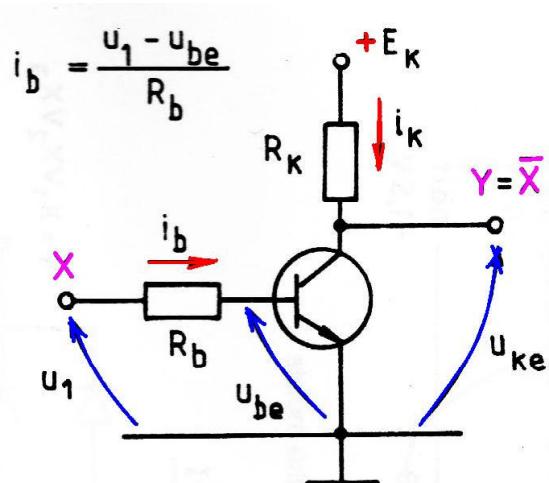
Dioodloogika

Realiseeritav NING, VÕI funksioonid. Eitust ei saa! Eituse saamiseks on vajalik transistor (võimendi).

Puudused: pingelang dioodidel, võimsuse võimenduse puudumine.



Bipolaartransistor kui lülit ja EI-element.



Transistorvõti kui element EI.
Sageli valitakse \$E_K = 5\$ V, \$R_k = 1\$ k\$\Omega\$, \$R_b = 10\$ k\$\Omega\$, \$u_1 = 0\$–5 V

Kui transistor ei ole küllastuses, siis $i_k = h_{21E} i_b$. Millal transistor pole küllastuses? Ei ole siis, kui $U_{KE} \geq 0,4 - 0,6V$. Küllastus → mõlemad siirded (B-E ja B-K) on avatud, nad on päripinge all. Sel juhul $U_{KE} \leq 0,2V$. Küllastuse ($S > 1,5 - 2$) puhul $i_k \approx E_K/R_K$ ja i_k enam ei sõltu i_b väärustusest.

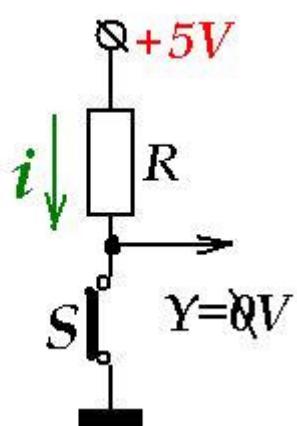
NB! Sügav küllastus teeb transistori väljalülitamise aeglaseks! $\rightarrow t_{off} = t_s + t_f$.

Kui u_1 positiivne ja küllalt suur (üle 2,4V), siis:

$$i_b = \frac{u_1 - 0,7V}{R_b} \quad \text{ja} \quad i_k \cong \frac{5V - 0,2V}{R_k} \quad \text{kus } 0,7V \rightarrow U_{BE\ sat}; \\ 0,2V \rightarrow U_{KE\ sat}.$$

Kui X on H \rightarrow Y on L \blacktriangleright normaalne EITUS.

Kui $u_1 \approx 0$ (alla 0,4V), siis i_b on praktiliselt null, ja $i_k = h_{21} i_b = 0$ ja $U_{KE} \approx 5V$. X on L \rightarrow Y on H \blacktriangleright normaalne EITUS.



Ebameeldiv nähtus: kui lülit S on sees, siis läbi takisti R voolab maksimaalne vool $i = (5V)/R$ ja takistil R muundub soojuseks võimsus $P = \frac{(5V)^2}{R}$ [W].

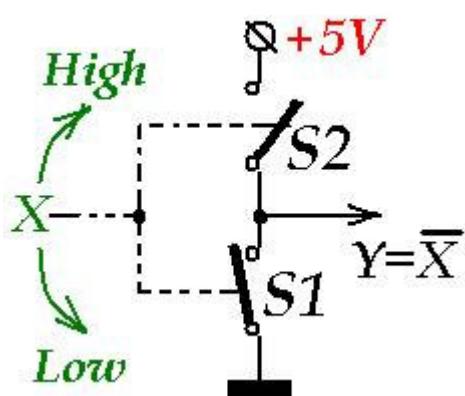
CMOS = KMOP võimaldavad selle vea ära parandada:

R asemel on nüüd lülit S2, mis on lahti siis, kui S1 on kinni. Toiteallikast +5V voolu maha ei lasta, kuna üks lülit on alati lahti.

S1-ks sobib nMOP – transistor.

S2-ks sobib pMOP – transistor.

Staatikas see lülit voolu ei tarbi. Dünaamikas tarbib, sest ümberlülitamisel on nad mingi lühikese aja jooksul korraga mõlemad sees.



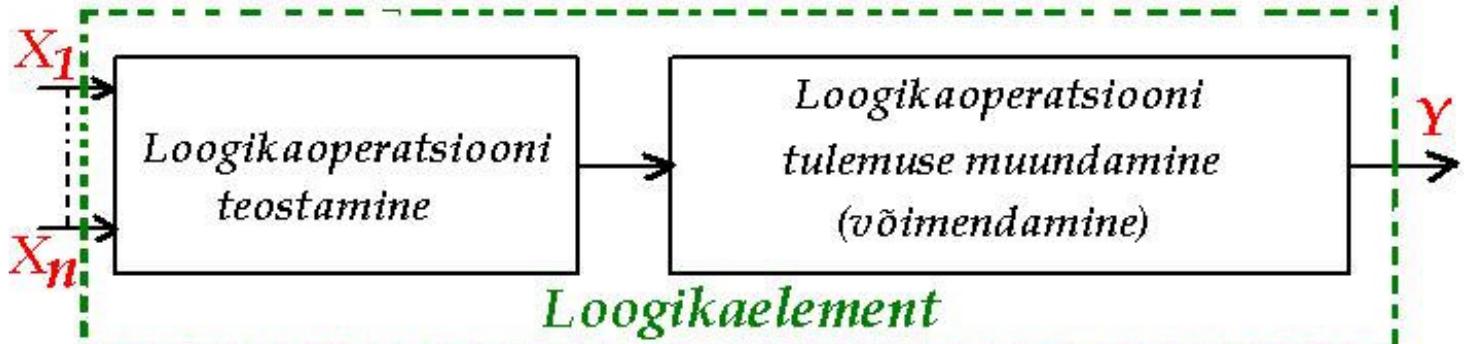
CMOS efektiivsus sagedustel 300 – 500 MHz praktiliselt kaob ära.

6.3. Loogikaelementide süsteemid.

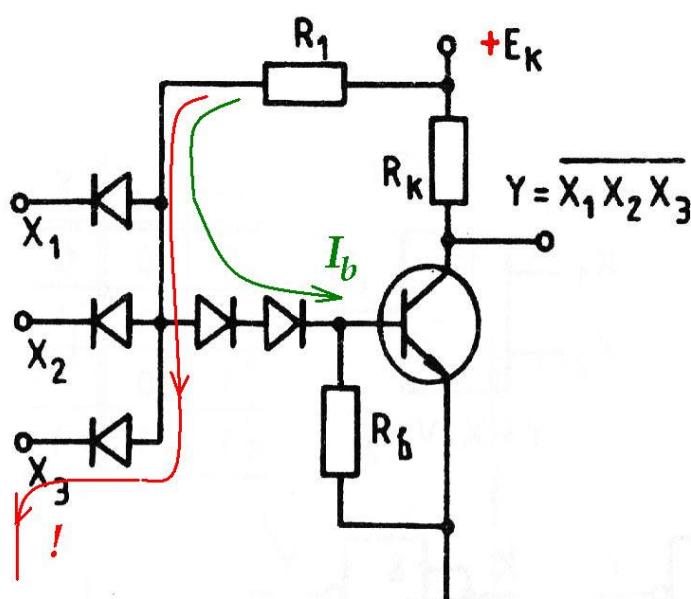
Süsteemi nimetus sõltub sellest, milliste elementide abil teostatakse loogikaoperatsioon. On olemas süsteemid:

DTL, TTLs, nMOP, pMOP, KMOP, ESL, I²L.

Täidetud hulka.



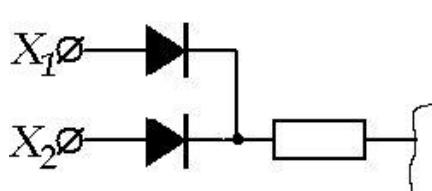
Diood-transistor-loogika (DTL)



Element 3NING-EI (3NAND, 3И-НЕ)

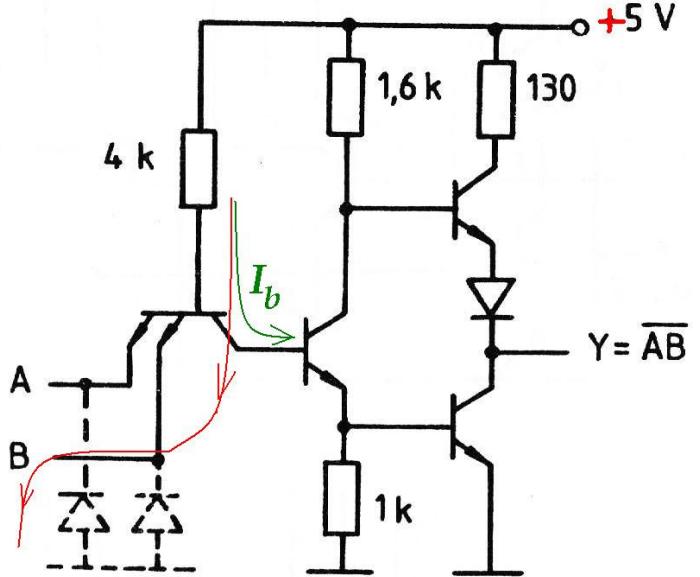
Juhul, kui kas või üks sisenditest $X_1 - X_3$ on null, baasi vool I_b läheb transistorist mööda; → transistor on kinni ja $Y \rightarrow H$.

2VÕI-EI (2NOR, 2ИЛИ-НЕ)



Juba ühest signaalist on piisav, et avada transistor.

Transistor-transistor-loogika (TTL)



Arvutustehnika perifeerias kasutusel
– hea koormatavus (talub suuri koormusvoolusid).
Standartne TTL 2N110-EI element (10 mW, 10ns). Mitme emitteriline transistor asendab dioodid eelmises skeemis (DTL); töötab nagu voolu I_b lülit. Kui kas või üks sisenditest on maandatud, siis vool I_b voolab trasistorist mööda. Ainult kui kõik sisendid on maandamata, siis vool I_b

läheb transistorisse. Võimendi transistorid võivad küllastuda, ja selle tõttu hakata aeglaselt ümber lülituma. Standartne TTL on suhteliselt aeglane → ümberlülitamis aeg 10ns.

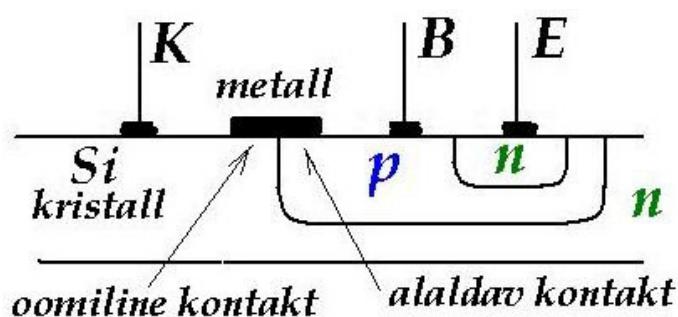
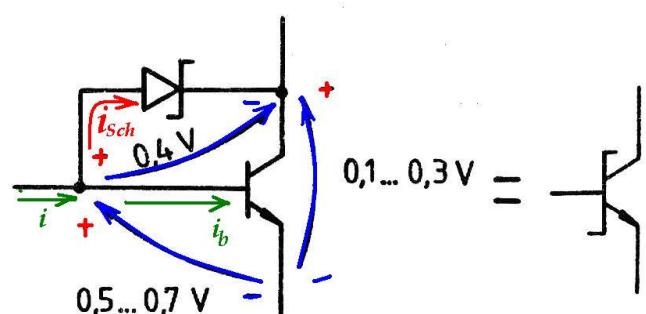
TTL – Schotkky (TTLs, ТТЛШ)

Selleks, et vältida bipolaarse transistori küllastusse minekut kasutatakse võtet nimega dioodne fiksatsioon. Selleks on vajalik diood väikese päripingelanguga. Ideaalselt sobib Schottky diood. Transistoril

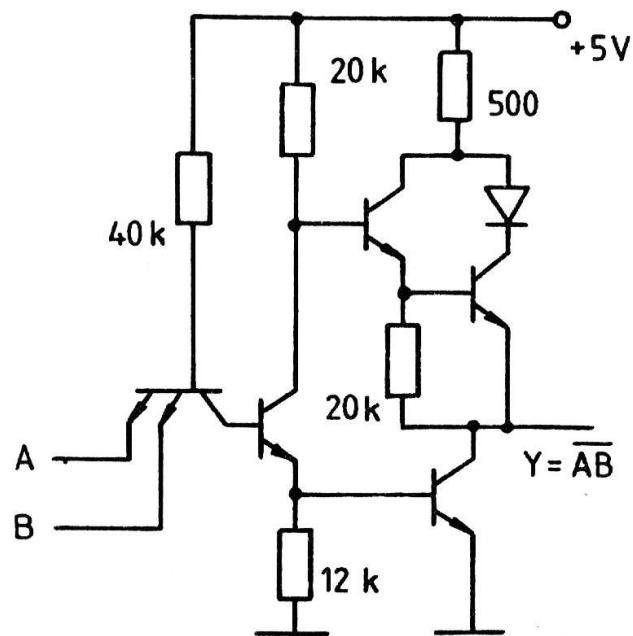
$$U_{BE} \approx 0,7V,$$

$$U_{BK} = U_{Sch.\text{diood}} \approx 0,5V;$$

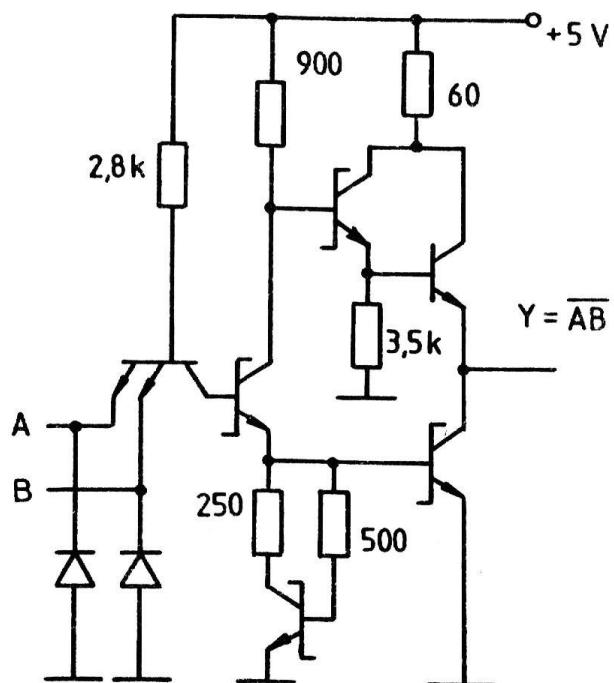
$$U_{KE} = U_{BE} - U_{BK} \approx 0,7 - 0,5 \approx 0,2V$$



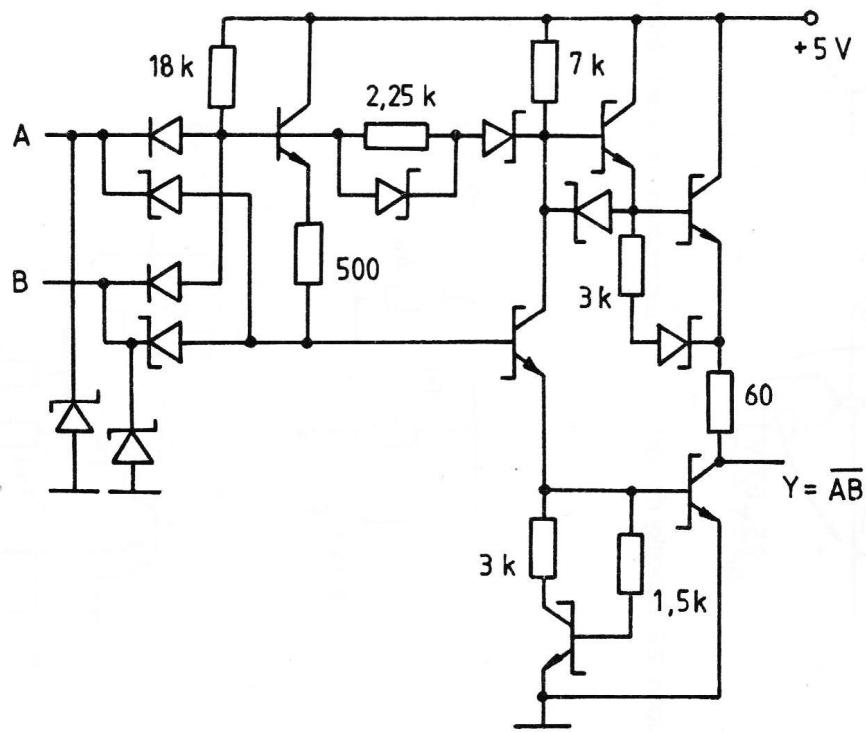
TTL-i areng.



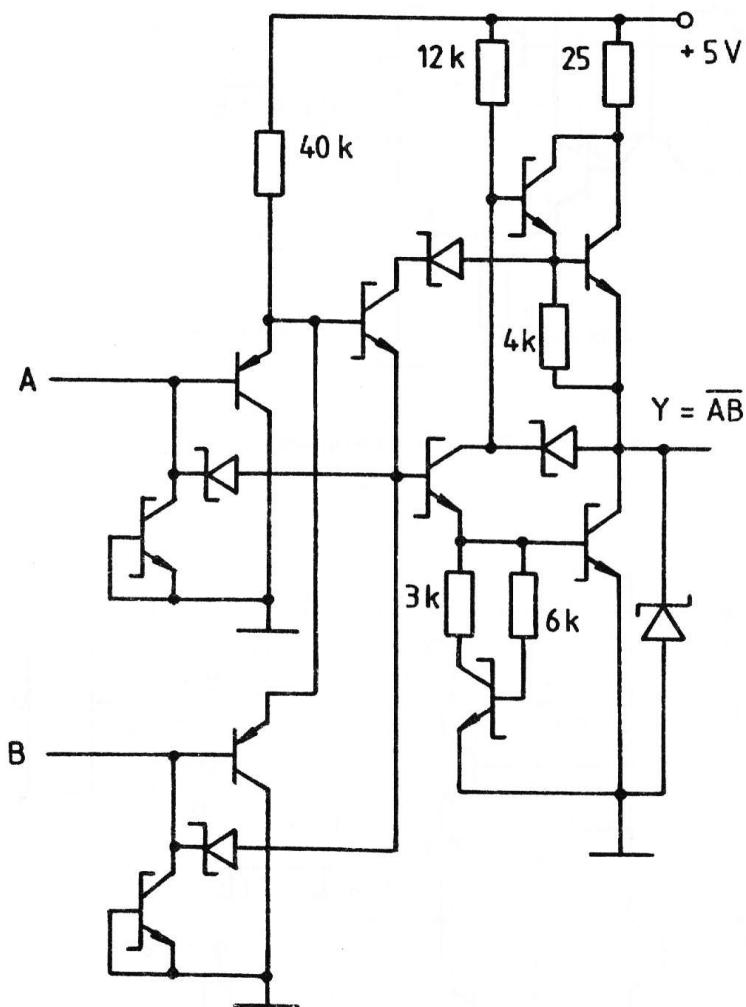
Väikese tarbega TTL-i NING-EI element (1 mW, 33 ns)



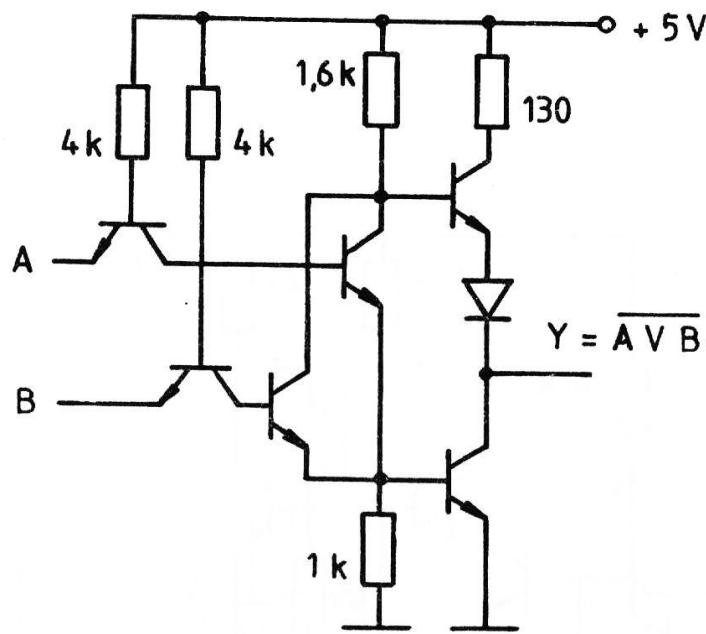
TTL-Schottky NING-EI element (20 mW, 3 ns)



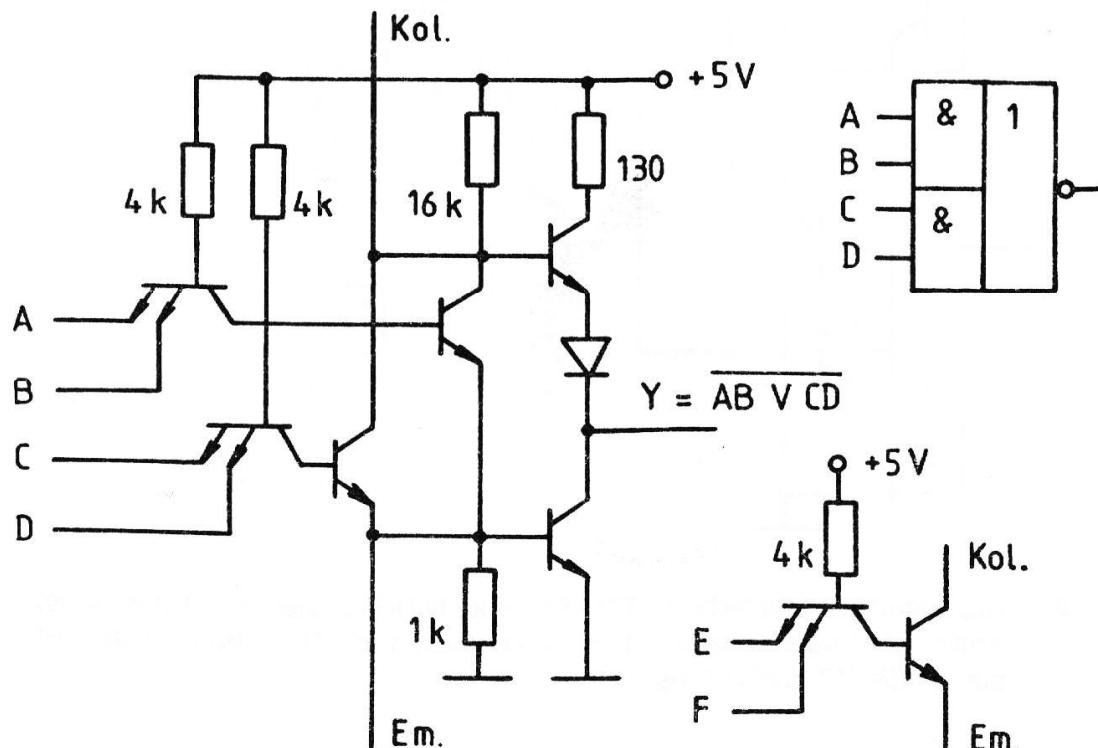
Väikese tarbega TTL-Schottky NING-EI element (2 mW, 10 ns)



Täiustatud väikese tarbega TTL-Schottky NING-EI element (1 mW, 4 ns). Analoogilist sisendosa kasutatakse ka täiustatud TTL-Schottky NING-EI elemendis (17 mW, 1,5 ns)

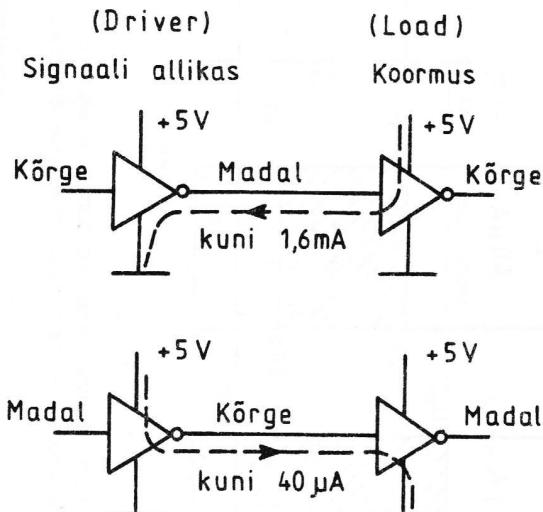


TTL-i VÕI-EI element



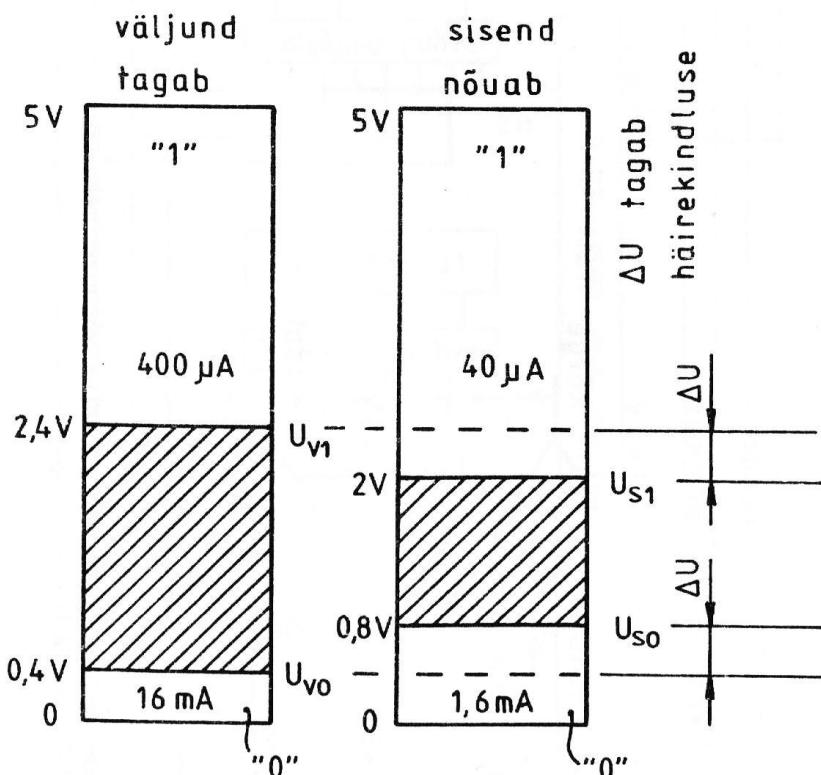
Laiendusvõimalusega TTL-i NING-VÕI-EI element ja selle laiendi

TTL-de ühendamine.



TTL-elementide ühendamisel tekkivad voolud (arvväärtused kehtivad standard-TTL-ile)

Standard -TTL



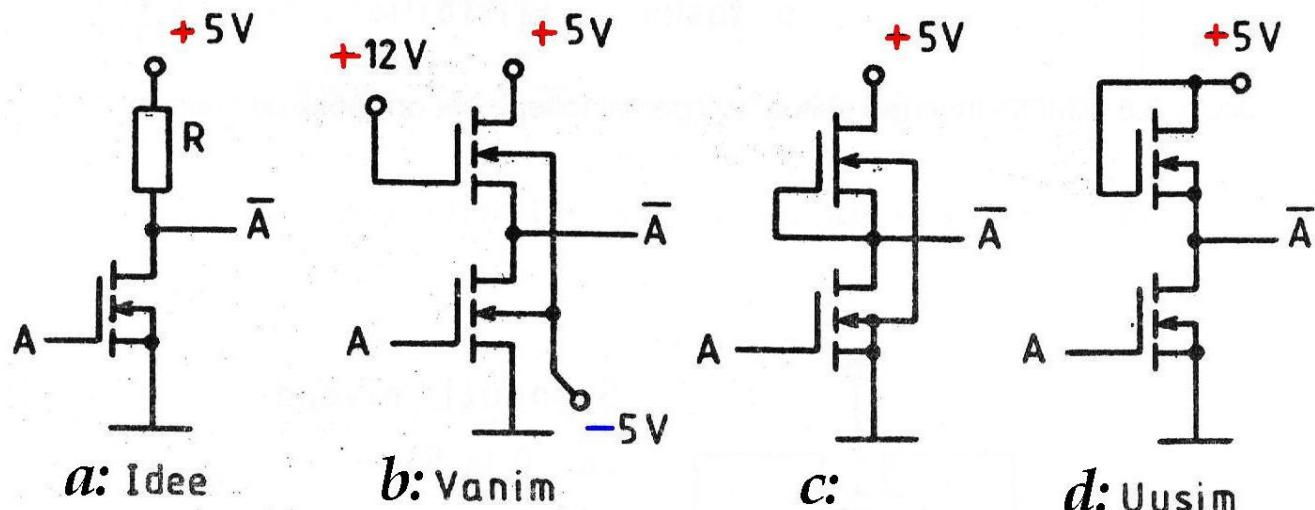
TTL-elementide omavahelisel ühendamisel ei teki sobitamise probleeme, kui ühele väljundile ei ühendata ülemäära palju sisendeid

| | Väljundi tagatud | Sisendil nõutav | |
|-------------------|---------------------|-----------------|------------------|
| Standard - TTL | 2,4 V – 400 μ A | 0,4 V – 16 mA | 2 V – 40 μ A |
| Väik. tarb. TTL | 2,4 V – 200 μ A | 0,4 V – 3,6 mA | 2 V – 10 μ A |
| Schottky TTL | 2,4 V – 1 mA | 0,4 V – 20 mA | 2 V – 50 μ A |
| Väik. t. Sch. TTL | 2,4 V – 400 μ A | 0,4 V – 8 mA | 2 V – 20 μ A |

MOP- transistoride kasutamine lülitina.

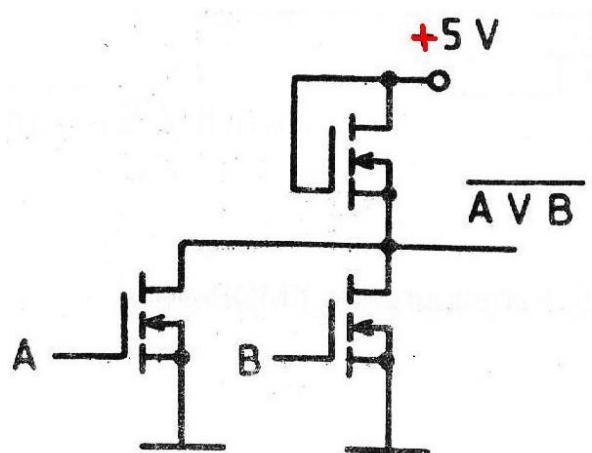
Võimalused:

pMOP – harvaesinev,
nMOP – sageli esinev;
KMOP – üldlevinud.



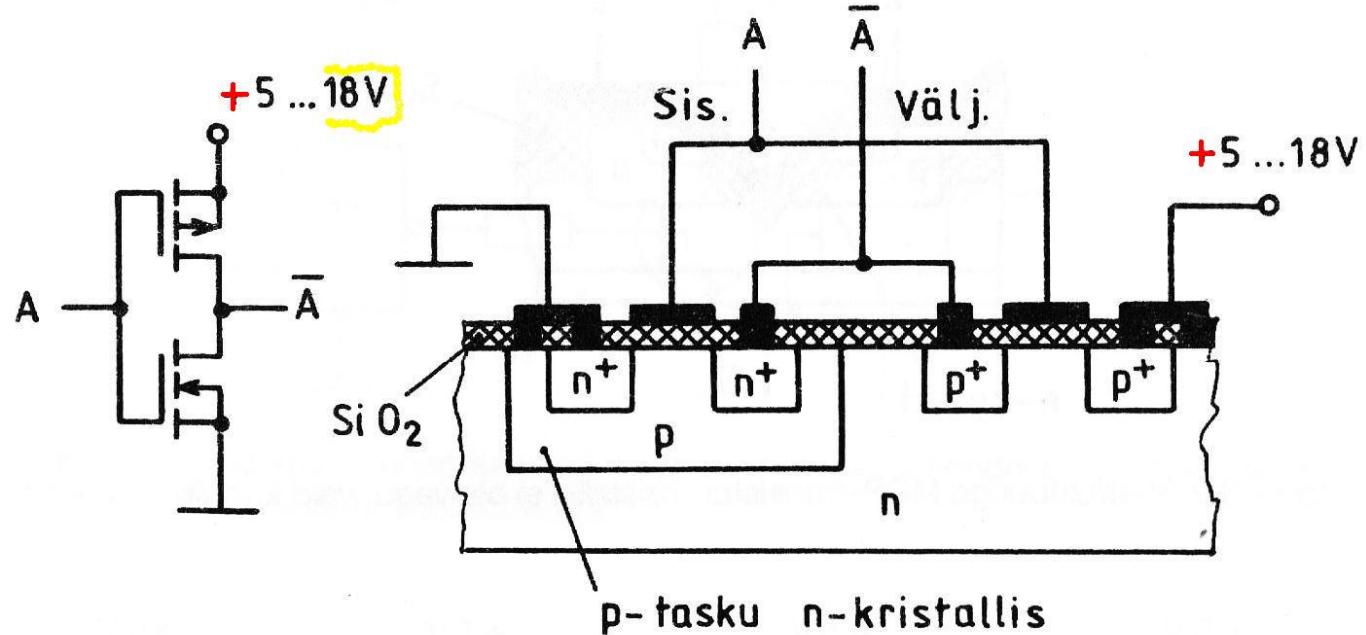
n-MOP-inverter ja selle evolutsioon integraallülitustes

- Esialgne lahendus. Pärast selgus, et tehnoloogiliselt on lihtsam;
- kuid olid probleemid pingestamisega; c) vahepealne lahendus – eritüüpi transistorid; d) lõplik variant.

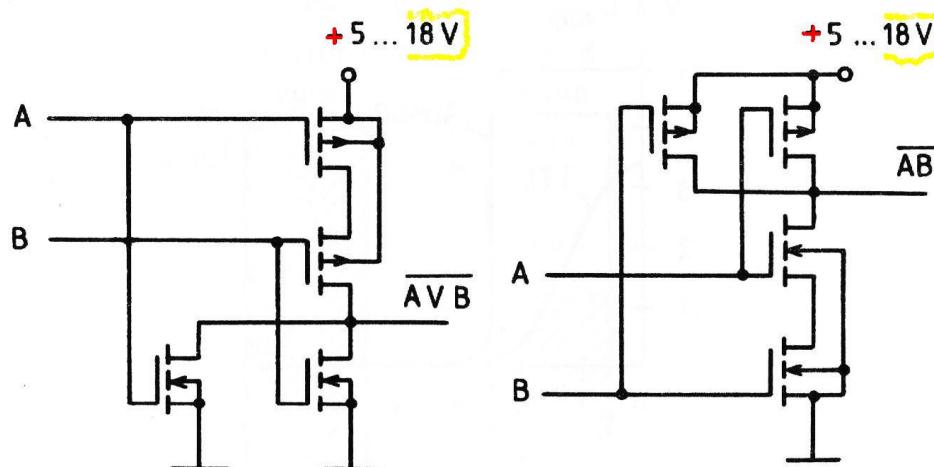


n-MOP-logickelement VÖI-EI

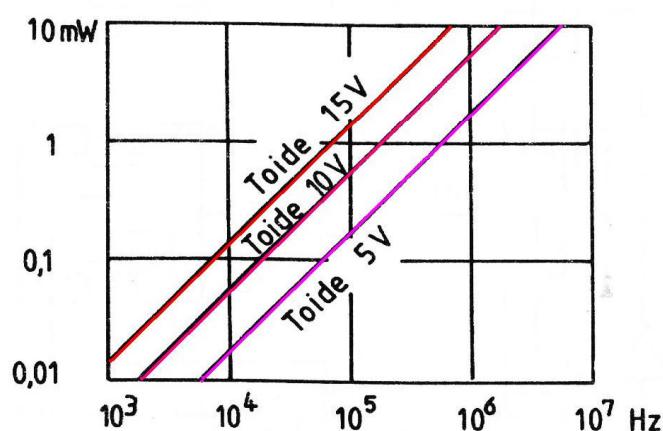
Lülitite optimaalne skeemiline lahendus → KMOP struktuurid!



KMOP-inverteeri ehitus. Kõrgemal toitepingel on töökiirus suurem

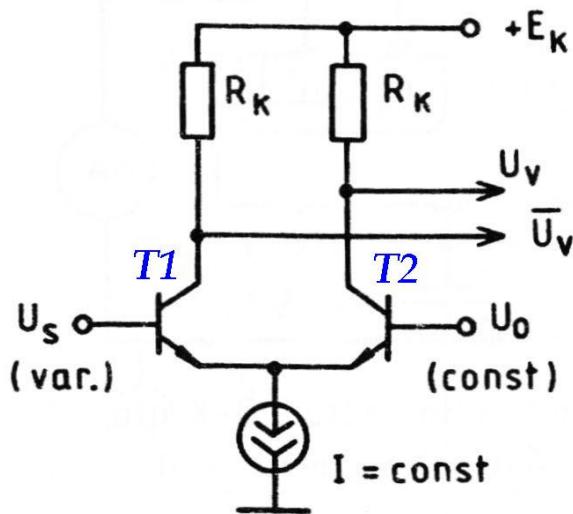


KMOP-loogikaelementid VÖI-EI ja NING-EI



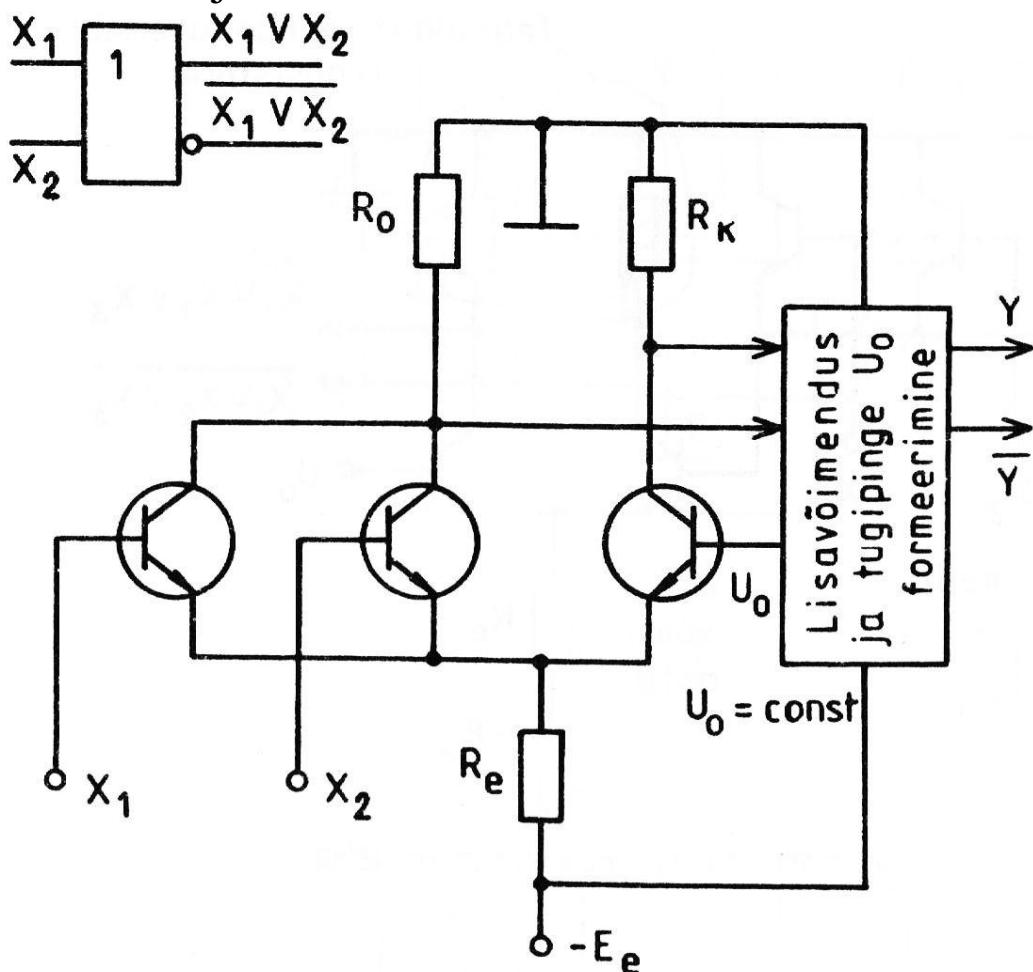
KMOP-elementide 74C00 kaovõimsuse sõltuvus lülitussagedusest

ESL (ECL, ЭСЛ) – emittersidestuses loogika.

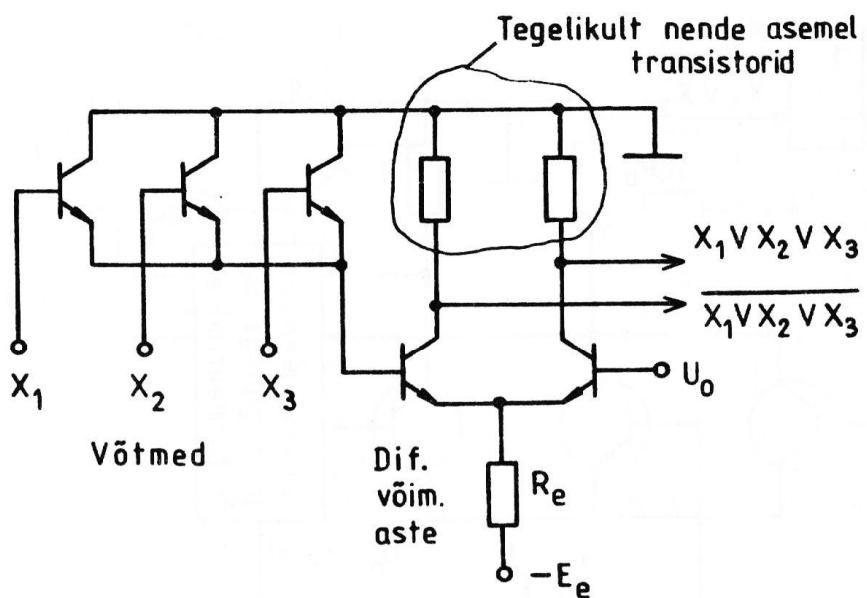


. Voolu ümberjaotamise printsip. Kasutatakse laialt analoogelektronikas võimendite ehitamisel. Digitaalelektronikas kasutatakse selle piirvormi – voolu ümberlülitamist. On ESL-loogikaelementide ja klassikalise Schmitti trigeri ehituse aluseks

Kui pinge $U_s > U_0$, siis juhib voolu T1, ja T2 on vooluta. Kui pinge $U_s < U_0$, siis juhib voolu T2, ja T1 on vooluta.



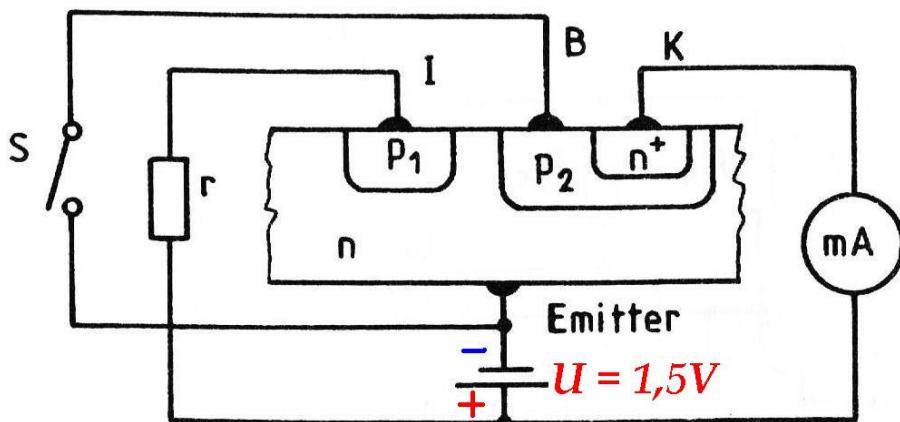
Emittersidestuses transistorloogiká (lühendatult ESL või ESTL)



ESL-i edasiarendus, nn. E²SL

I²L – integreeritud injektsiooniloogika.

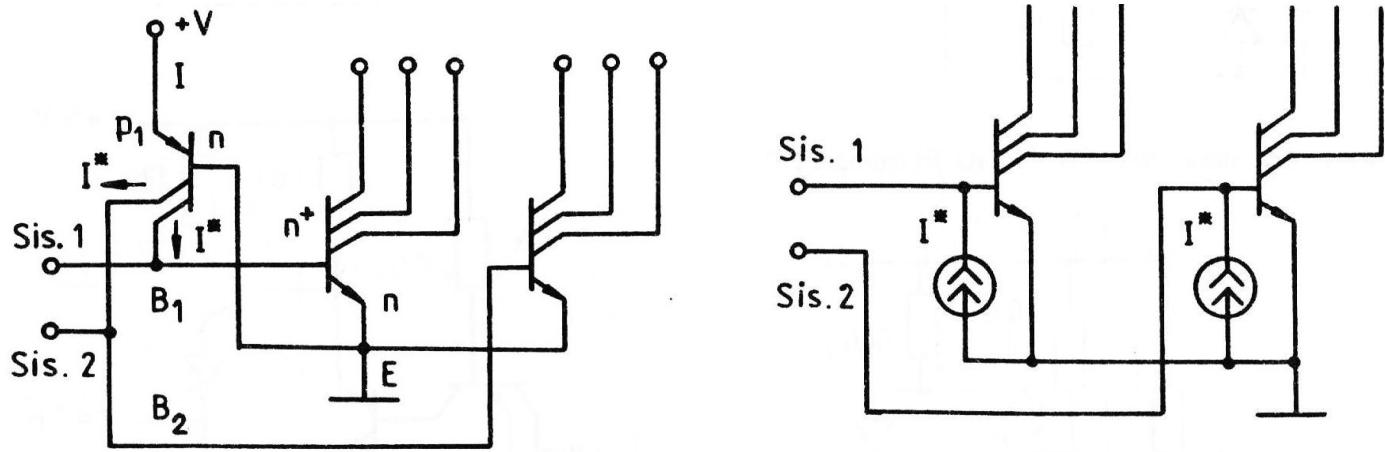
I – injektor B – baas K – kollektor



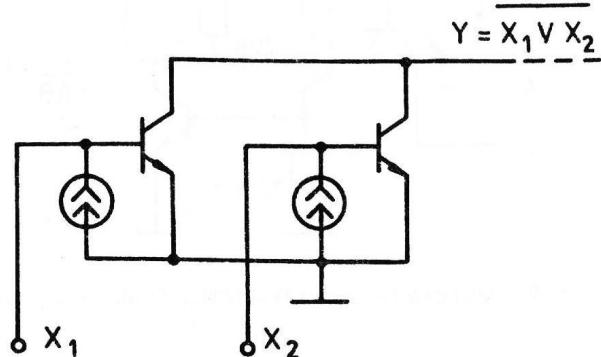
Ühe I juures võib olla mitu B-K ala
Igas B-K alas võib olla mitu K-d

I²L-tehnoloogia idee

Põhielement – bipolaarne transistor lisaeleketroodiga, mille nimi on injektor. Injektoris voolab kogu aeg vool. Transistor juhib või ei juhi, sõltuvalt sellest, kas injektori vool tuleb transistori baasi või lastakse sellest mööda (kohe maha). Kasutatakse seal, kus on vaja väikseid toitepingeid (1,5V).



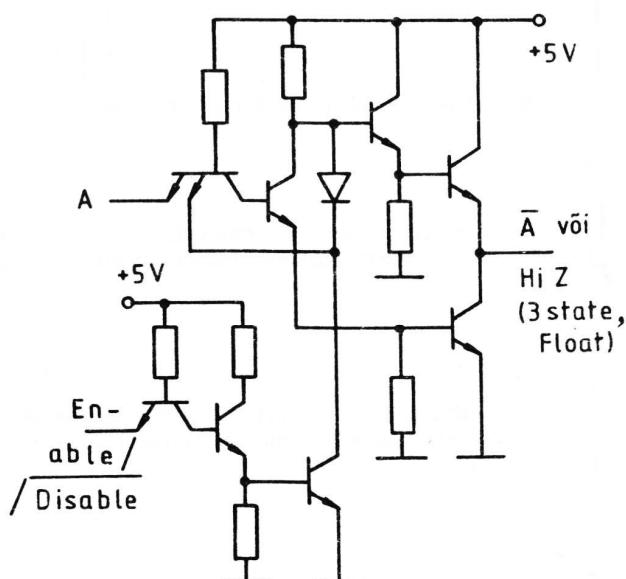
I²L-elementide skeemid



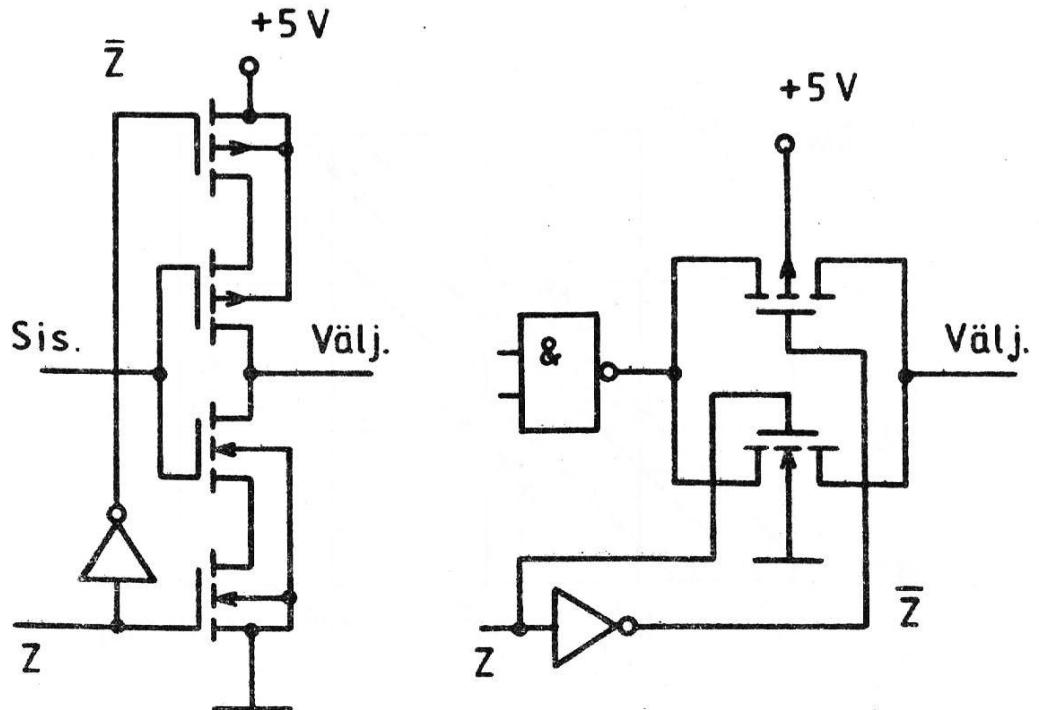
I²L-loogikaelement VÖI-EI

HighZ (HiZ, suur impedans, kolmas olek, 3d state, float state)

Teada, et dig.elektronika seadmel võib olla kaks olekut \rightarrow 1 ja 0. Kolmandaks olekuks on HiZ (ehk float state). HiZ tähendab, et antud element ei anna välja täpselt ei 0 ega 1! Float state \rightarrow "ujuv potentsiaal". Kasutatakse seal, kus on rakendatud siinisüsteem.



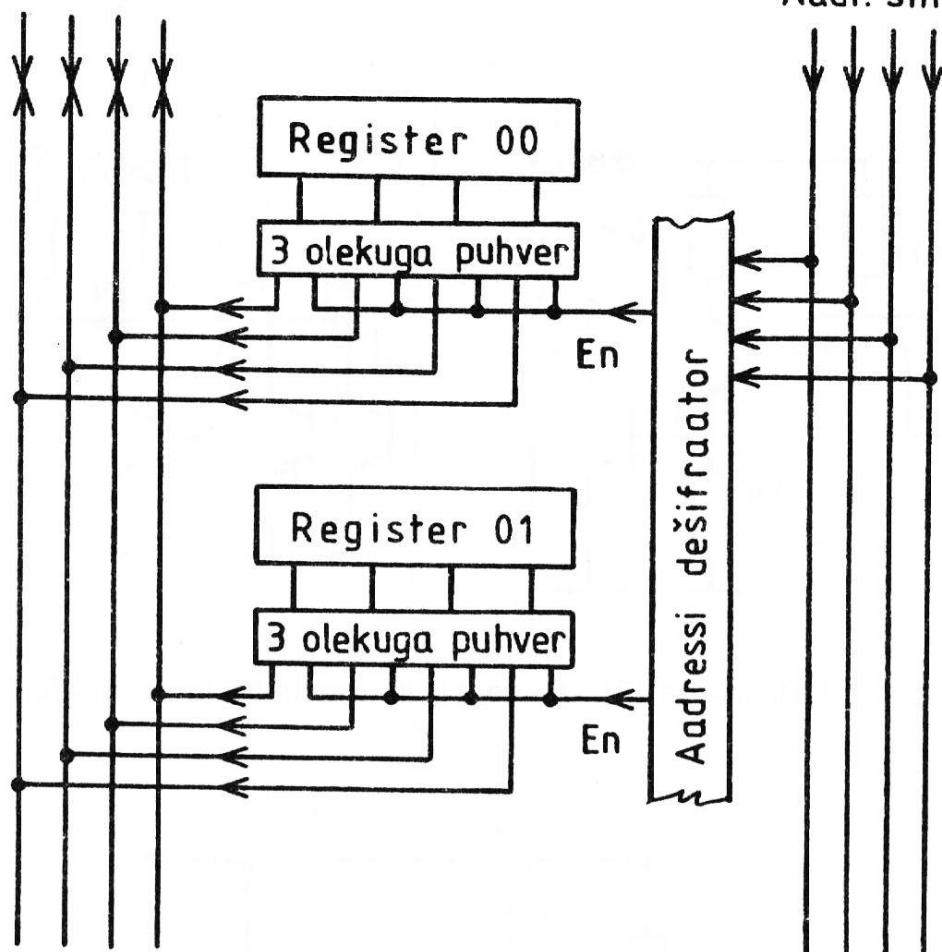
Kolme olekuga TTL-i inverter ehk eitusega puher



$Z = 0$ tingib Hi Z välj.

Kaks moodust koime olekuga väljundi loomiseks KMOP-elementidele

Andmesiin



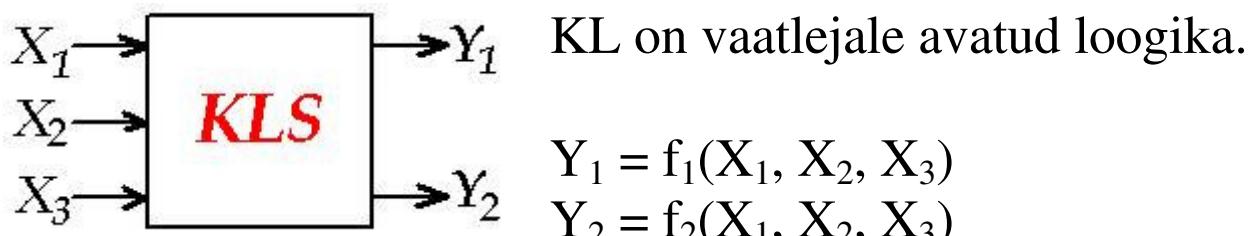
Kolme olekuga elemendid siinisüsteemis

Kui mõlemad puhvrid korraga hakkavad saatma andmeid andmesiinile, tekib siinikonflikt (üks saadab “1” ja teine “0”). See on lubamatu. Kõik puhvrid peale ühe peavad olema HiZ olekus. Ainult üks saab töötada info edastamise režiimis. Missugune nendest? – Seda määrab keskne kontroller (arbiter) aadr.siini kaudu läbi aadressi dešifraatori. Aadressi dešifraator lubab infot edastada vaid sellel puhvril, mille aadress on dešifraatori sisendil. Kõik teised puhvrid pannakse HiZ olekusse. Kui anda signaal En → HiZ.

6.4. Kombinatsioon- ja jadaloogika (järjestikloogika).

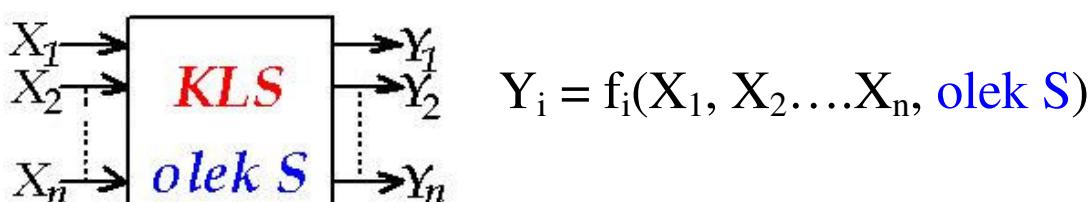
Kombinatsioonloogika (KL) puhul väljundsignaal on alati sisendsignaalide **ühene** funktsioon.

Kombinatsioon-loogiline skeem (KLS) on automaat ilma mäluta.



Jadaloogika (JL) omab mingit mälu. Mäletab, mis temaga oli varem tehtud. JL on varjatud loogika.

Jadaloogiline skeem (JLS) on automaat mäluga.

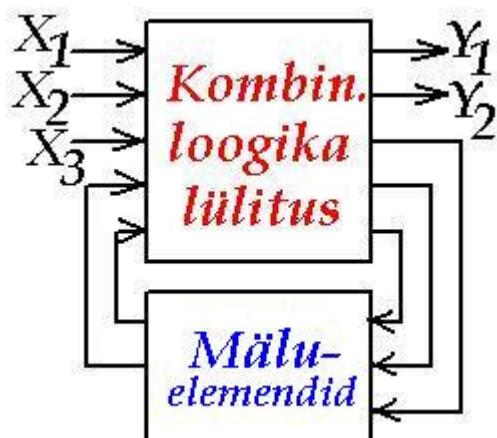


Väljundsignaal Y_i on kõikide nähtavate signaalide $X_1 \dots X_n$ ja mittenähtava sisemise oleku S ühene fuktsioon.

S esitatakse kahendarvuna!

$$Y_i = f_i \left(\underbrace{X_1, X_2, \dots, X_n}_{\text{sisendsignaalid}} ; \underbrace{T_1, T_2, \dots, T_n}_{\text{Solek}} \right)$$

$T \rightarrow$ sõnast „triger“. S oleku hoidmiseks kasutame trigerite komplekti.



Lülitusele lisandub nii palju väljundeid ja sisendeid, kui mitu järku on koodis.
Mäluelemendid on READ/WRITE tüüpi.
Töötab takteeritult!
→ Muidu tekib olekute võidujooks.

Loogikafunktsoonide esitamine

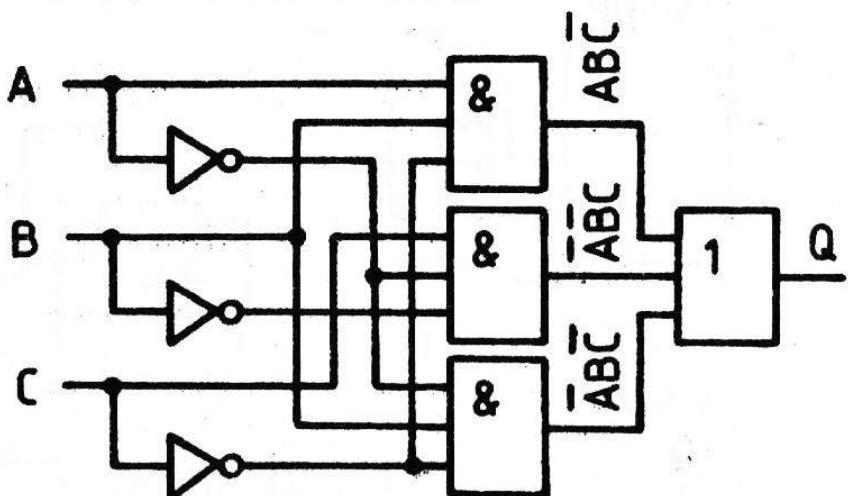
Võimalusi palju, aga üks võimalustest: → tabelesitlus. Olgu nõutav, näiteks selline loogikafunktsoon.

$X \rightarrow$ DON`T CARE; ükskõik, kas 0 või 1.

Tabeli alusel koostame loogikaseose. Tavaliselt koostatakse loogikaseose kujul: $Q =$ loogiliste korruistide summa (disjunktiivne vorm, „1“ järgi). X -d tõlgendame → „0“! – Vähem tööd! Me ei minimeeri selles kursuses, teeme triviaalse realisatsiooni.

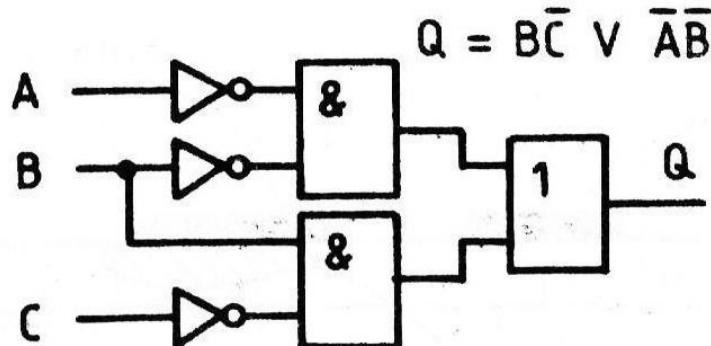
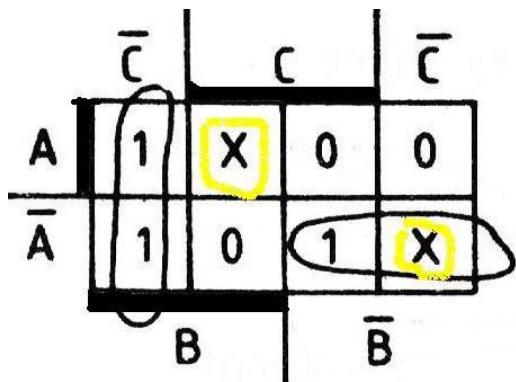
| A | B | C | Q |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | X |
| 0 | 0 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 0 |
| 1 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | X |

$$Q = \bar{A}\bar{B}C \vee \bar{A}B\bar{C} \vee A\bar{B}\bar{C}$$



Loogikafunktsooni esitamine tabelina ja selle triviaalne realisatsioon

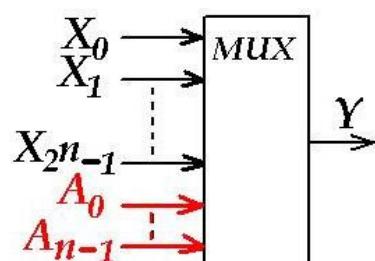
Kui on tahtmine minimeerida, siis kasutame n.n. Karnaugh kaardi:



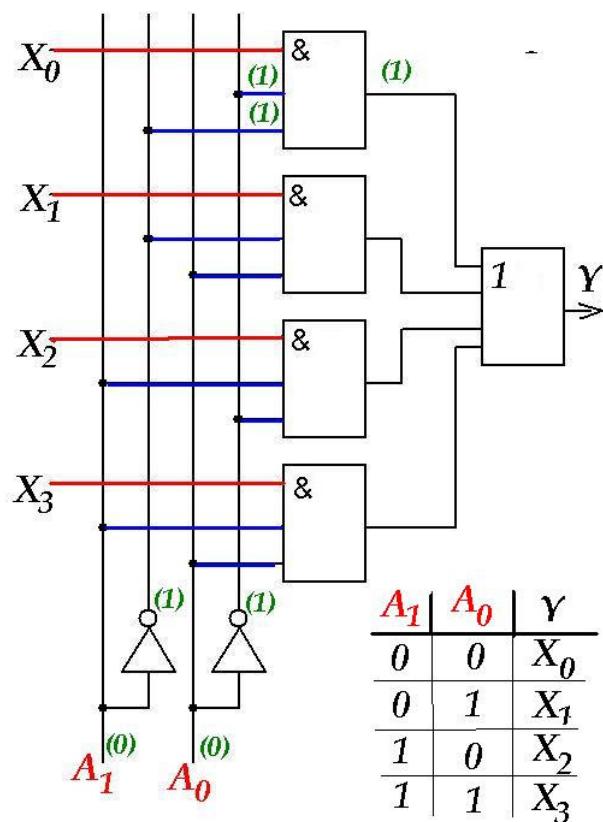
Karnaugh' kaart, minimeeritud loogikafunktsioon ja selle triviaalne realisatsioon

6.5. Kombinatsioonloogika tüüplülitused.

6.5.1. Multiplekser (MUX).



Omab 2^n infosisendit ja n aadressisisendit. Ühendab ühe oma sisenditest väljundiga. Ühendatava sisendi järjekorranumber on määratud aadressibittide kombinatsiooniga.



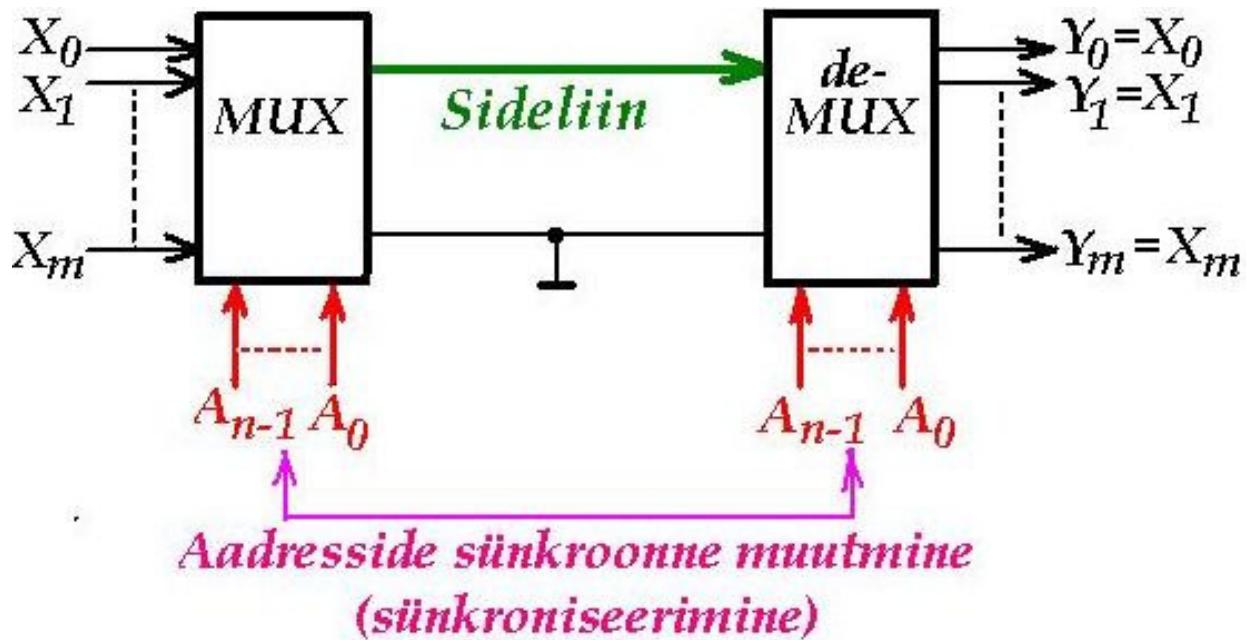
Oletame, et $n = 2$ (2 aadressisisendit). Infosisendeid on sell juhul $2^n = 2^2 = 4$

← Triviaalne realisatsioon (üks sideliin).

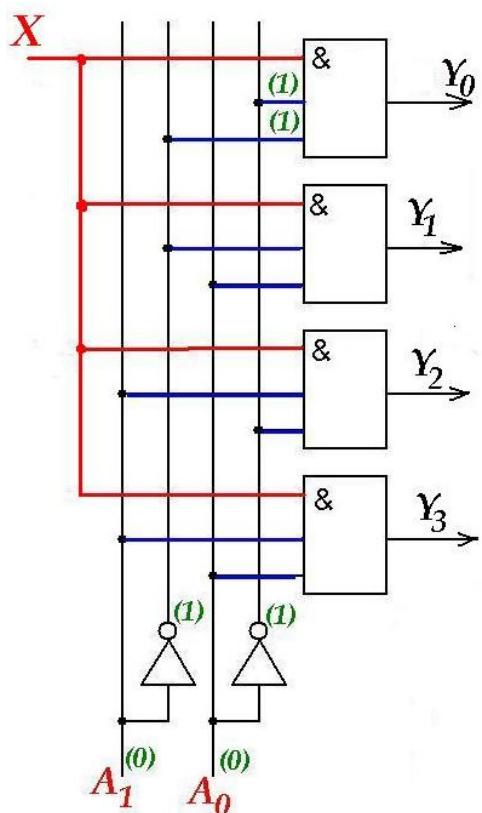
← Kui aadress 00, siis X_0 peab jõudma väljundile.

| A_1 | A_0 | Y |
|-------|-------|-------|
| 0 | 0 | X_0 |
| 0 | 1 | X_1 |
| 1 | 0 | X_2 |
| 1 | 1 | X_3 |

MUX on vajalik mitme allika bittide edastamiseks ühe liini kaudu.



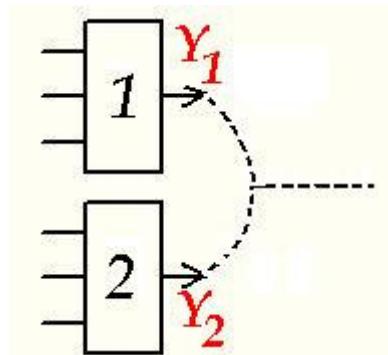
6.5.2. Demultiplexer (deMUX).



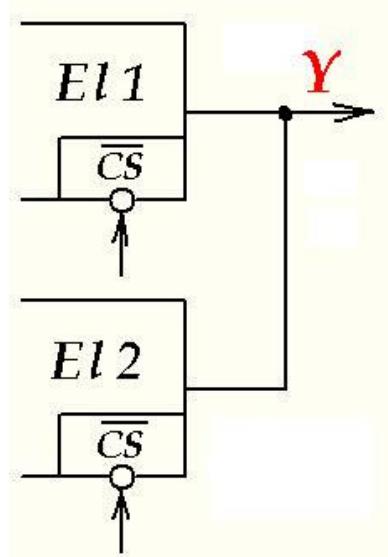
Üks sisend, 2^n väljundit, n aadressisisendit. Sisend ühendatakse selle väljundiga, mille järjekorra number on esitatud aadressibittidega.

← Kui, näit., $n = 2 \rightarrow$ väljundeid on 4.

Loogikalülituste väljundite ühendamine.



Signaalid vaja saata edasi mööda ühte juhet.

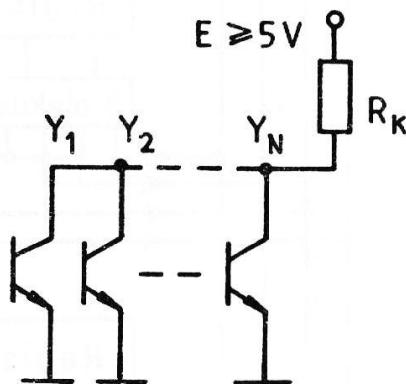
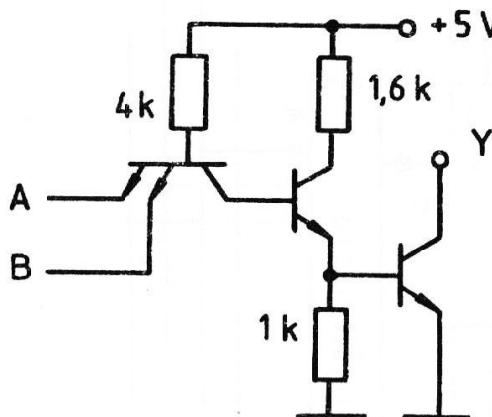


1) HiZ elementide kasutamine.

← Väljundsignaal Y on määratud sisselülitatud elemendiga. Üks elementitest on signaaliga CS või En sisselülitatud, kõik teised on aga väljalülitatud.

Elemendid võib vahetult kokku ühendada.

2) Lahtise kollektoriga (BT) või lahtise suudmega (MOP) loogikaelementide kasutamine.



kokku takisti

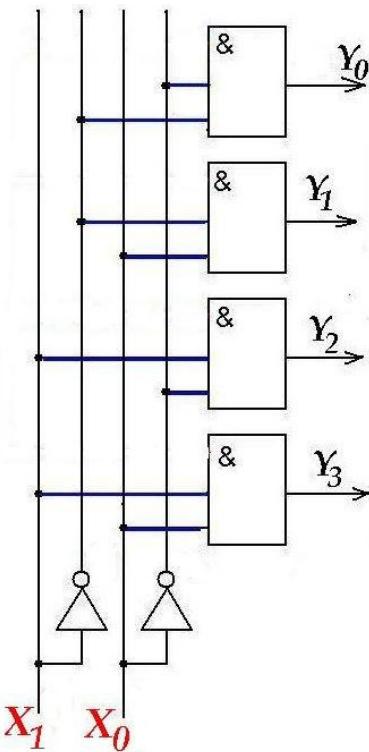
Lahtise kollektoriga TTL-element ja lahtiste kollektorite paralleellülitus

ühendatakse toiteallikaga. „Ning“ tehe!

3) Kui pole HiZ, ega lahtist kollektorit (suuet) → tuleb kasutada VÕI elementi, nagu MUX`i skeemis.

Väljundid pannakse vahetult ja ühise R kaudu

6.5.3. Dekooder (Dešifraator)



Omab n sisendit ja 2^n väljundit. Väljundesignaal (antaval skeemil „1“) ilmub ainult sellele väljundile, mille järjekorra number on määratud sisendbittide kombinatsiooniga. Kasutakse kõige rohkem aadressi dekodeerimiseks.

Oli valitud $n = 2$; → Väljundeid on $2^n = 2^2 = 4$

$Y_0 = 1$, kui $X_0 = 0, X_1 = 0$

$Y_1 = 1$, kui $X_0 = 1, X_1 = 0$

$Y_2 = 1$, kui $X_0 = 0, X_1 = 1$

$Y_3 = 1$, kui $X_0 = 1, X_1 = 1$

6.5.4. Koodimuundur.

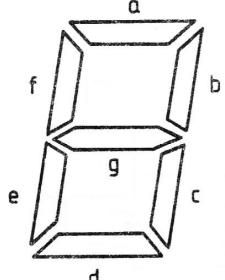
Koodimuundur muundab ühe kahendarvu teiseks kahendarvuks. Nende kahendarvude pikkused on üldjuhul teineteisest sõltumatud. Dekooder oli selline koodimuundur.

Tõelisi koodimuundureid:

- 1) Arvutist tuleb tähe ASCII-kood (American Standard Code for Information Interchange); ekraanile ilmub tähe kujutis. Vajalik vastav koodimuundamine.
- 2) Kassaaparaadist saame arvu BCD- koodis (Binary Coded Decimal), indikaatorile ilmub vastav arv. Vajalik koodimuundamine BCD → 7-segmendikood.

7-segmendiline indikaator.

Kümmendnumbri BCD- kood on 4-bitine.



Koostame koodimuundamise tabeli: ↓

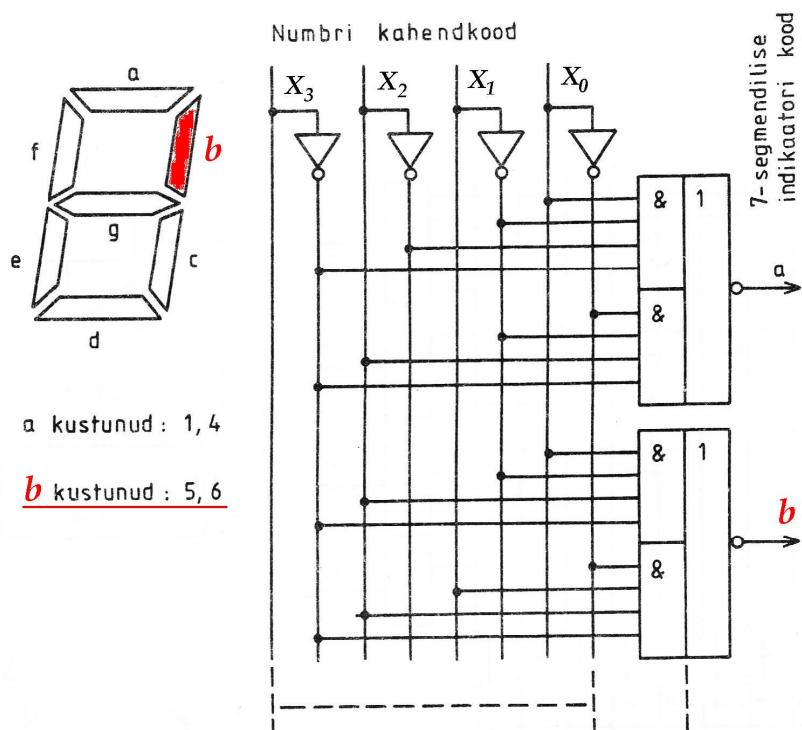
| | <u>Sisendsignaalid</u> | | | | <u>Väljundesignaalid</u> | | | | | | | | |
|--|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------------|--|
| | <u>X_3</u> | <u>X_2</u> | <u>X_1</u> | <u>X_0</u> | <u>a</u> | <u>b</u> | <u>c</u> | <u>d</u> | <u>e</u> | <u>f</u> | <u>g</u> | <u>Number</u> | |

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 2 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 3 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 4 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 5 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 6 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 8 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 9 |

Väljundil "1" tähistab helendust, "0" – pimendatust.

Segment **b** on kasulikum kustutada 5 ja 6 puhul:

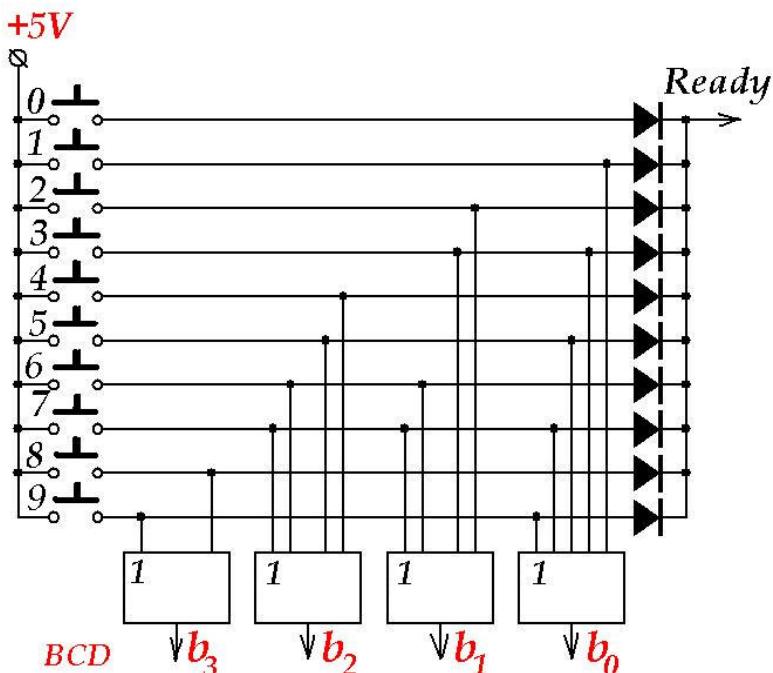
$$\bar{b} = \overline{X}_3 \cdot X_2 \cdot \overline{X}_1 \cdot X_0 \vee \overline{X}_3 \cdot X_2 \cdot X_1 \cdot \overline{X}_0$$



6.5.5. Kooder (šifraator).

Oleks vaja muundur → „klahvile vajutus → BCD-kood“.

Tahame saada: vajutades klahvile X ($X = 0, 1, \dots, 9$) saame väljundil numbri X BCD-koodi ja protsessori jaoks teate, et klahvile on vajutatud.

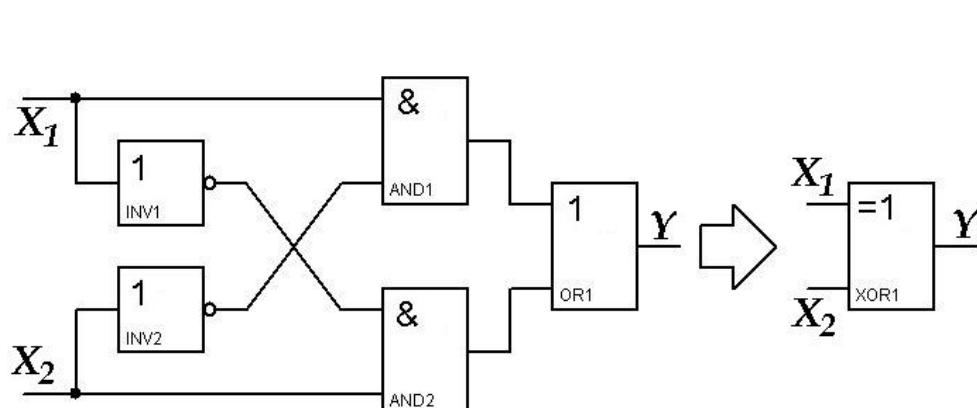


Tulemus: näit. → „7“ – 0111; „5“ – 0101; „8“ – 1000. Klahvile vajutades dioodloogika abil genereeritakse signaal „Ready“ – teade protsessorile: „Loe BCD-väljund“

Välistav „VÕI“ (exclusivne „OR“)

$Y = X_1 \oplus X_2 \leftarrow$ Liitmine ilma ülekannet arvestamata.

X_1 X_2 Y



| | | |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 0 |

$$Y = X_1 \overline{X}_2 \vee \overline{X}_1 X_2$$

6.6. Jadaloogika lülitused.

Jadaloogika olemus.

Jadaloogika lülitusel iga väljundsignaal Y_i on sisendsignaalide $X_1 \dots X_n$ ja oleku S ühene funktsioon.

Väljundbitt (0 või 1) $\rightarrow Y_i = f(X_1, X_2 \dots X_n; \underline{\text{state}})$

lülituse olek, состояние ↑

State esitakse oleku bittide kombinatsiooniga. Oleku muutudes muutuvad oleku bitid.

Reaalne lülitus on kombinatsioonloogika skeem + **trigerite kogum**.

Iga triger on elementaarne mäluelement 1biti hoidmiseks.

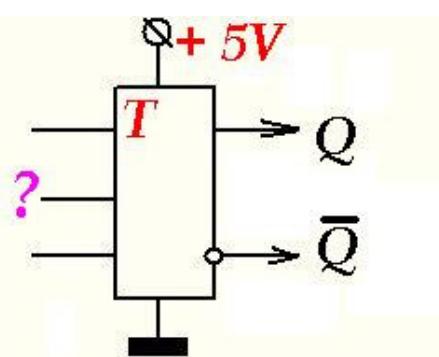
6.6.1. Trigerid.

Triger on 2 olekuga jadaloogika lihtelement. Oleku tähistatakse 0,1.



Trigeri olek on väljaloetav tema väljundilt.

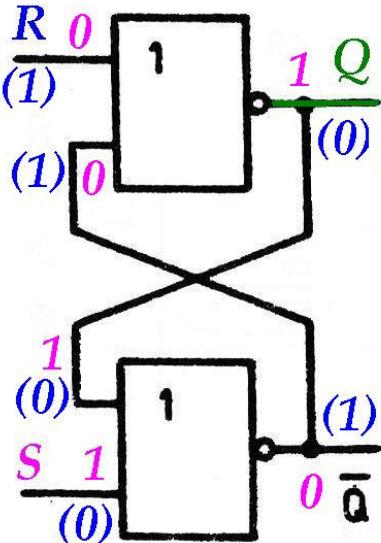
Praktikas on igal pool vaja signaale koos eitustega. Seepärast tootjad toodavad trigereid, millel igaühel on 2 väljundit. $\rightarrow Q; \bar{Q}$.



Trigerit on vaja ühest olekust teise ümber lüldida. Selleks peavad sisendid olema. Palju? Võib olla 1,2, 3 sisendit.

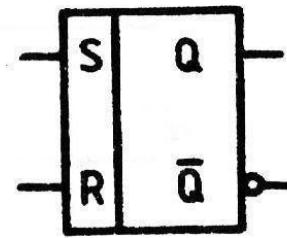
Asünkroonne RS-triger.

Ajalooliselt oli esimene.



| R | S | Q |
|---|---|-----------|
| 0 | 0 | ei muutu |
| 1 | 0 | 0 (reset) |
| 0 | 1 | 1 (set) |
| 1 | 1 | ? |

R = S = 1 on keelatud



Tingmärk

Asünkroonne RS-triger

$R = \text{reset} \rightarrow$ panema olekusse 0, (сброс)

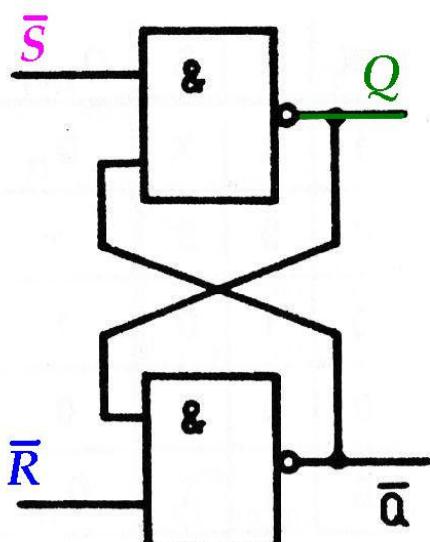
$S = \text{set} \rightarrow$ sättima, panema olekusse 1, (установка)

Tõesus- ehk funktsioneerimise tabeli parem esitus:

$\begin{array}{lll} R & S & Q(t + \Delta t) \\ \hline 0 & 0 & Q(t) \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ \hline 1 & 1 & * \end{array}$ $\Delta t \rightarrow$ aeg trigeri ümberlülitamiseks.

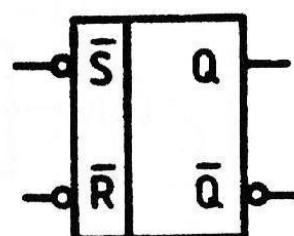
| R | S | Q(t + Δt) |
|---|---|-----------|
| 0 | 0 | Q(t) |
| 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | * |

* → triger on informatsiooniliselt hävitatud



| R-bar | S-bar | Q |
|-------|-------|-----------|
| 1 | 1 | ei muutu |
| 0 | 1 | 0 (reset) |
| 1 | 0 | 1 (set) |
| 0 | 0 | ? |

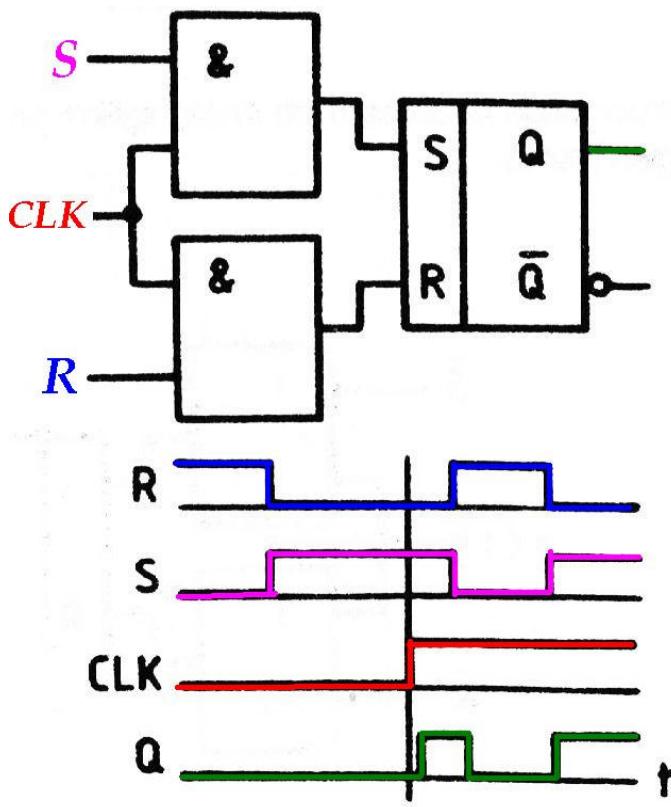
R-bar = S-bar = 0 on keelatud



Tingmärk

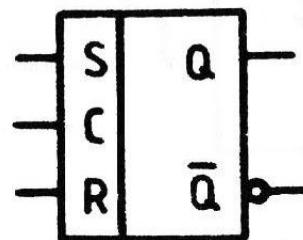
Vaadeldud trigerid on asünkroonsed. Lülitavad ennast ringi siis, kui signaale R,S, muudetakse. Puudub takteerimine, CLOCK.

Sünkroonne (takteeritav) RS-triger ($RS_{(t)}$)



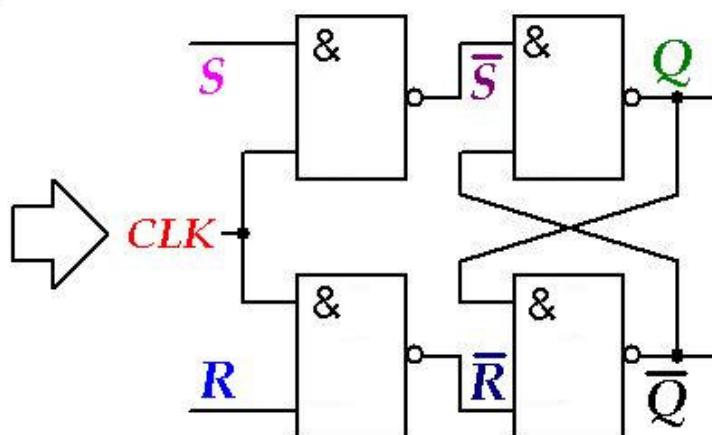
Ajadiagrammid

| CLK | R | S | Q_{n+1} |
|-----|---|---|-----------|
| 0 | X | X | Q_n |
| 1 | 0 | 0 | Q_n |
| 1 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | - |



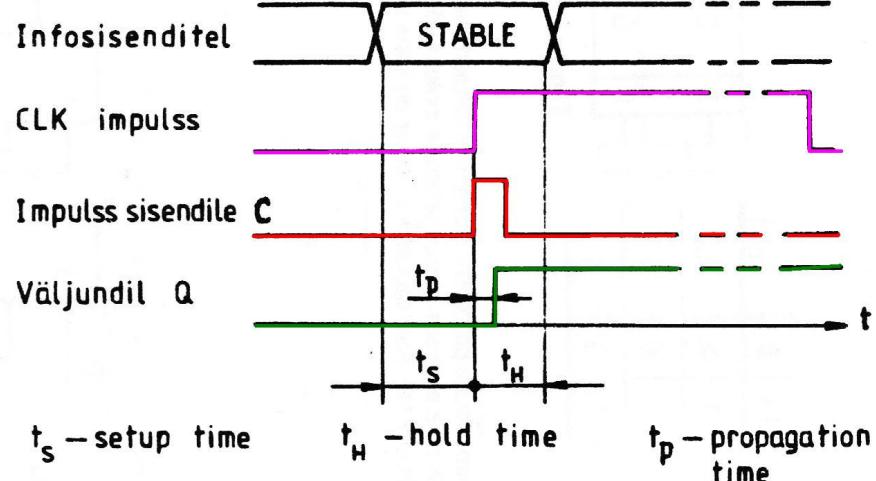
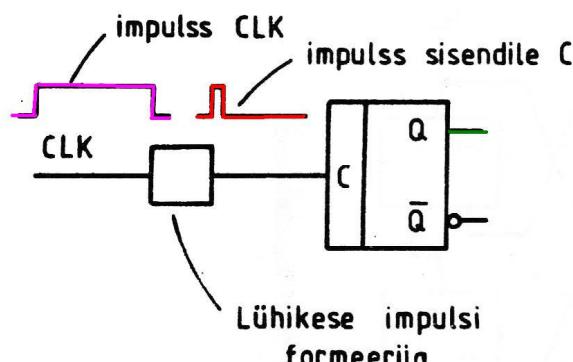
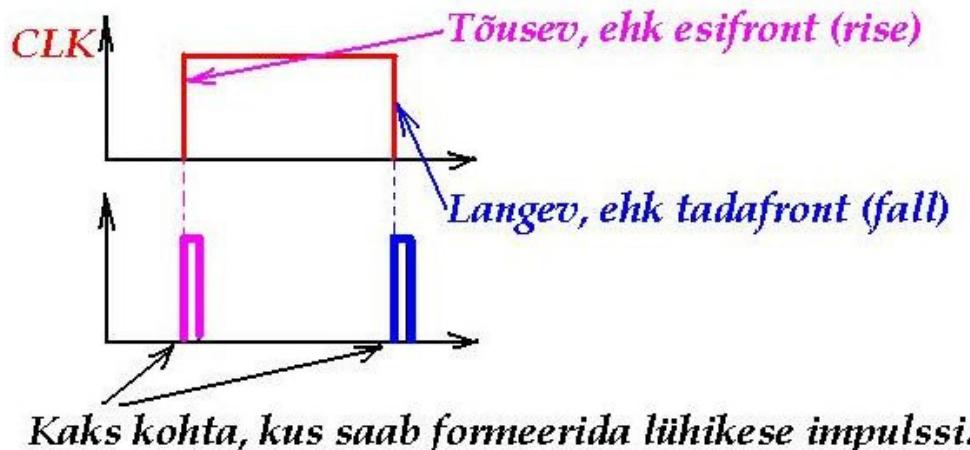
Tingmärk

Takteeritav (ka sünkroonne) RS-triger. Töelise sünkroontrigerina saab töötada vaid siis, kui $CLK = 1$ ajal on välistatud signaalide muutumine infosisenditel R ja S



Takteeritav RS- triger NING-EI loogikaelementide basil.

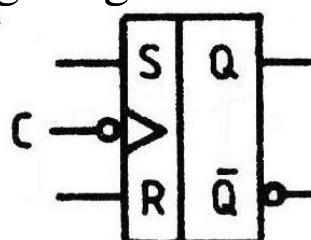
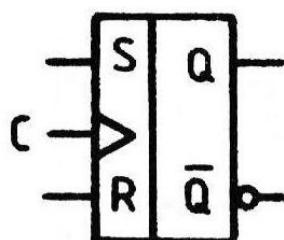
Sünkroimpulsi aeg peab olema minimaalne, mis trigeri ümberlülitamiseks vaja (näit.: 3-10 ns).



Näide: $t_s = 15 \text{ ns}$, $t_H = 5 \text{ ns}$

Takteeritavate trigerite muutmine töelisteks sünkroontrigeriteks. Ümberlülitamine toimub CLK-impulsi frondiga, sõltumata CLK-impulsi kestusest. Sellega väljastatakse trigeri mitmekordne ümberlülitamine CLK-impulsi keskel

Tingmärgid



I variant:

ümberlülitav CLK
esifrondigas
 $\uparrow 0 \rightarrow 1$

II variant:

ümberlülitav CLK
tagafrondigas
 $\downarrow 1 \rightarrow 0$

Seega tõelise sünkroonse RS-trigeri puhul:

| C | R | S | Q_{n+1} |
|---|---|---|-------------|
| 0 | X | X | Q_n |
| 1 | X | X | Q_n |
| [| X | X | Q_n |
| [| 0 | 0 | Q_n |
| [| 1 | 0 | 0 |
| [| 0 | 1 | 1 |
| [| 1 | 1 | * keelatud! |

Aeg on niiüd diskreetne,
seda loetakse CLOCK`i
aktiivsete frontide järgi.

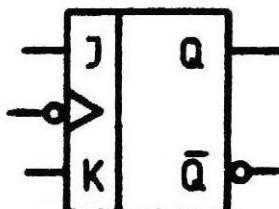
*

↑ see RS-trigeri viga on parandatud JK- trigeris.

JK- triger

JK- trigeri funktsioneerimine:

| clock | J | K | Q_{n+1} |
|-------|---|---|-------------|
| 0 | X | X | Q_n |
| 1 | X | X | Q_n |
| [| X | X | Q_n |
| [| 0 | 0 | Q_n |
| [| 0 | 1 | 0 |
| [| 1 | 0 | 1 |
| [| 1 | 1 | \bar{Q}_n |



Täiuslik 2 infosisendiga
ja 1 sünkro- (CLOCK)
sisendiga triger.

J on nagu S
K on nagu R

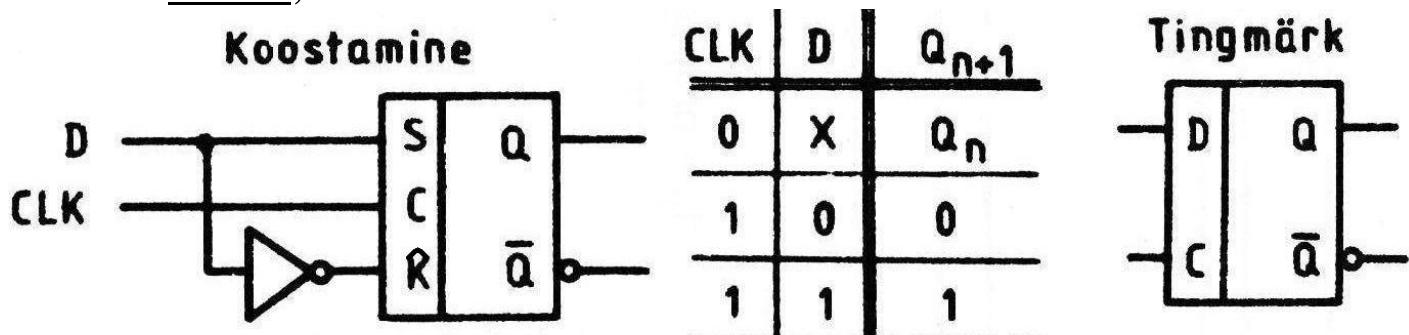
Trigeri infosisendid näitavad, kuidas ümber lülitada; CLK (C)- sisend on ümberlülitamise momendi määramiseks.

D-triger (delay) → viitetriger.

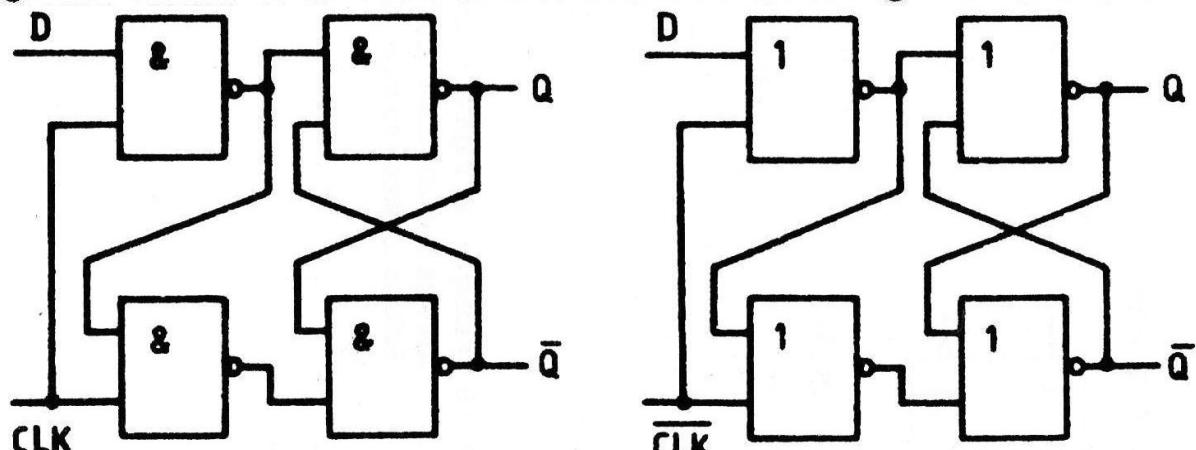
Omab 1 infosisendit. Mäluelement mahuga 1bitt.

→ Kui D = 1, siis CLOCK`i aktiivne front lülitab ta alati olekusse 1.

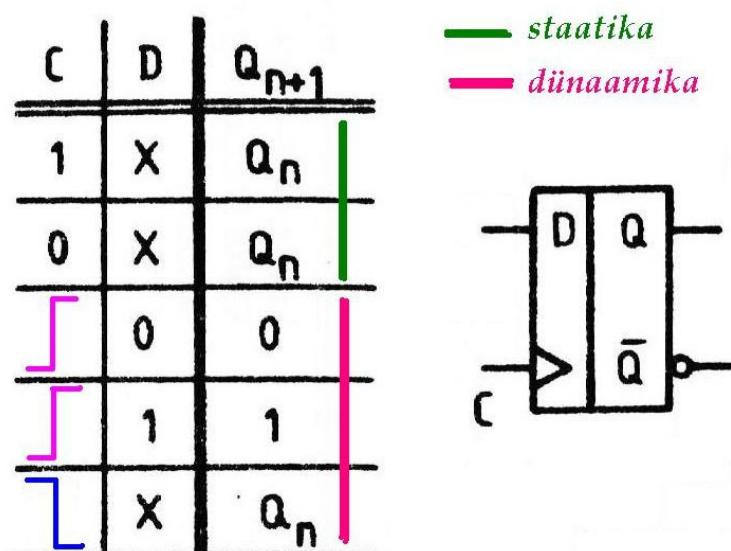
→ Kui D = 0, siis CLOCK`i aktiivne front lülitab ta olati olekusse 0.



Takteeritav D-triger. Sünkroonsuse probleem sama, mis takteeritava RS- ja RS-trigeri puhul – CLK pikaa aktiivses olekus väljimise jooksul võib triger mitu korda ümber lülituda.



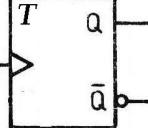
Skeemitehniliseks lihtsamad viisid D-trigeri koostamiseks

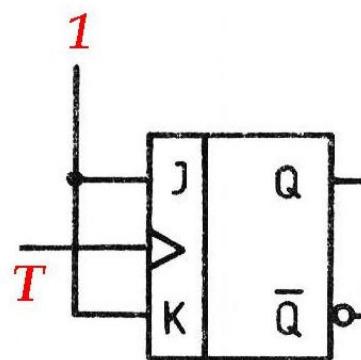
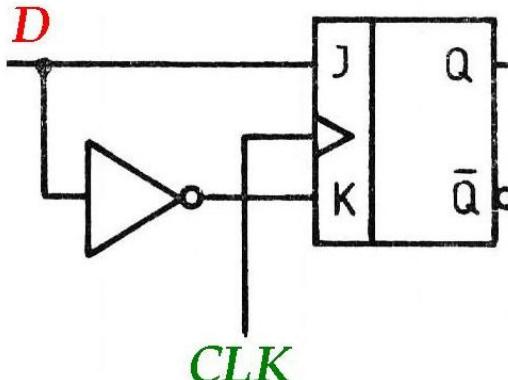


Frondigas ümberlülitatava D-trigeri funktsioneerimine

Viide on täpselt 1 takt!

T- triger (toggle) – loendustriger.

 Loendab $0 \rightarrow 1 \rightarrow 0 \rightarrow 1$. Lülitub vastasolekusse kui tuleb ümberlülitussignaal. Iga impulss T lülitab trigeri ümber.
JK- trigeri kasutamine.

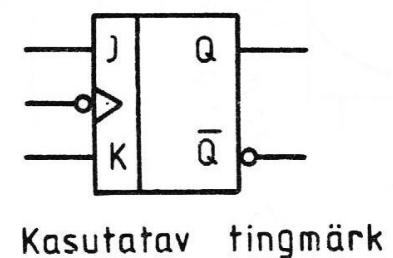
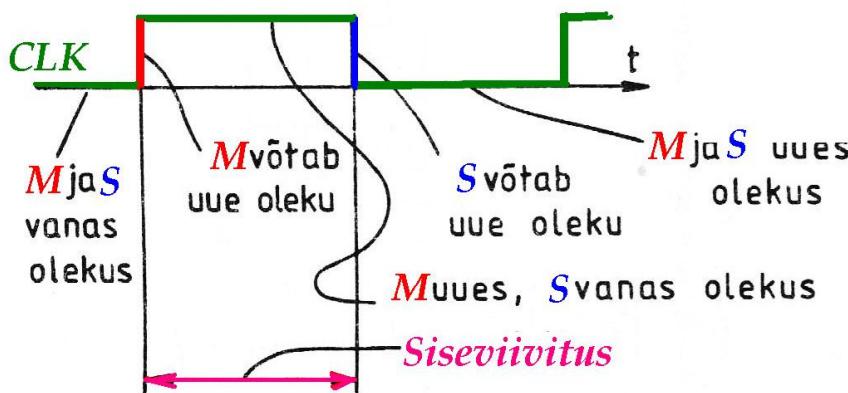
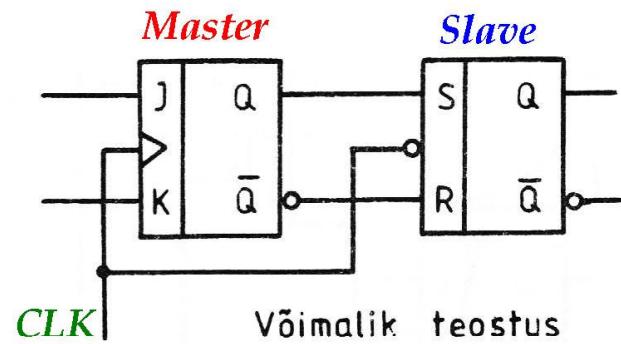
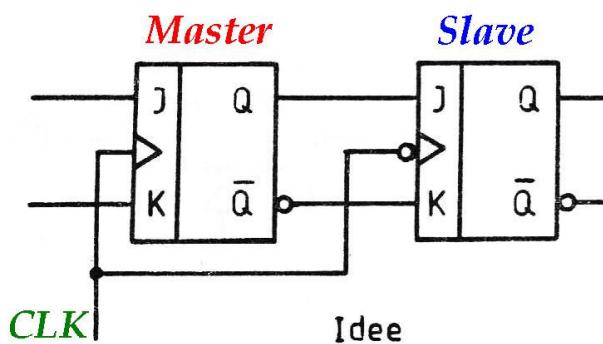


| T | Q_{n+1} |
|--------|-------------|
| High | \bar{Q}_n |
| Low | Q_n |
| Stable | Q_n |

JK-trigeri kasutamine D-trigerina ja T-trigerina (loendustrigerina)

MS- struktuur (siseviivitusega triger).

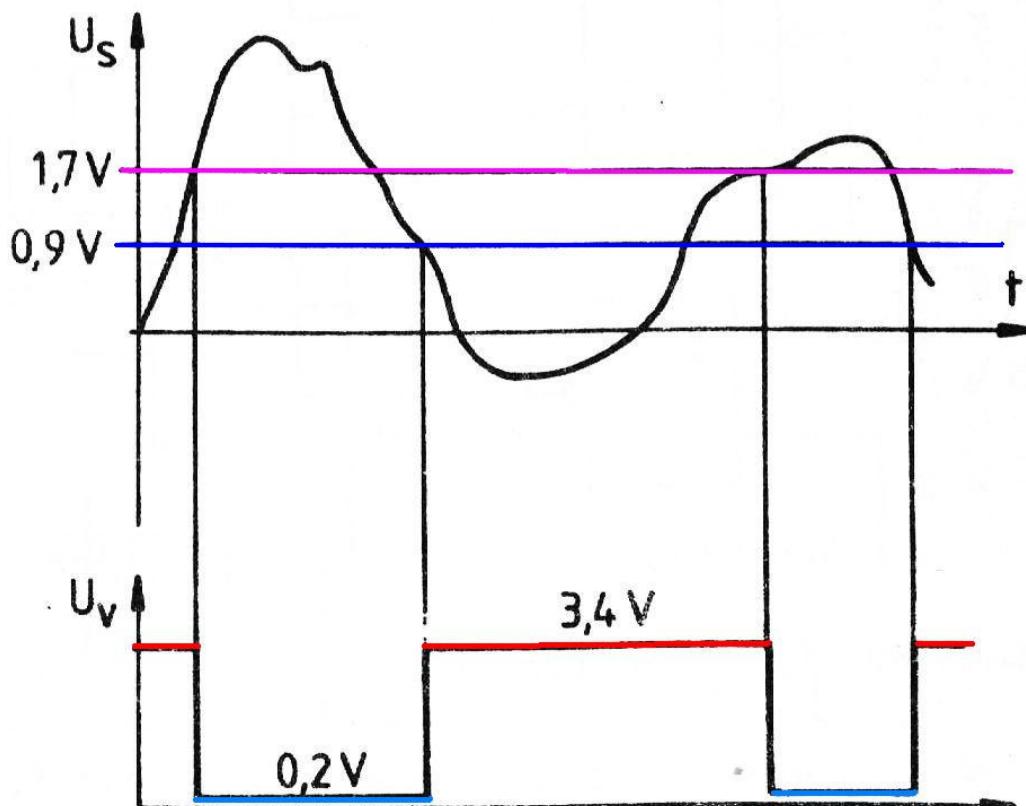
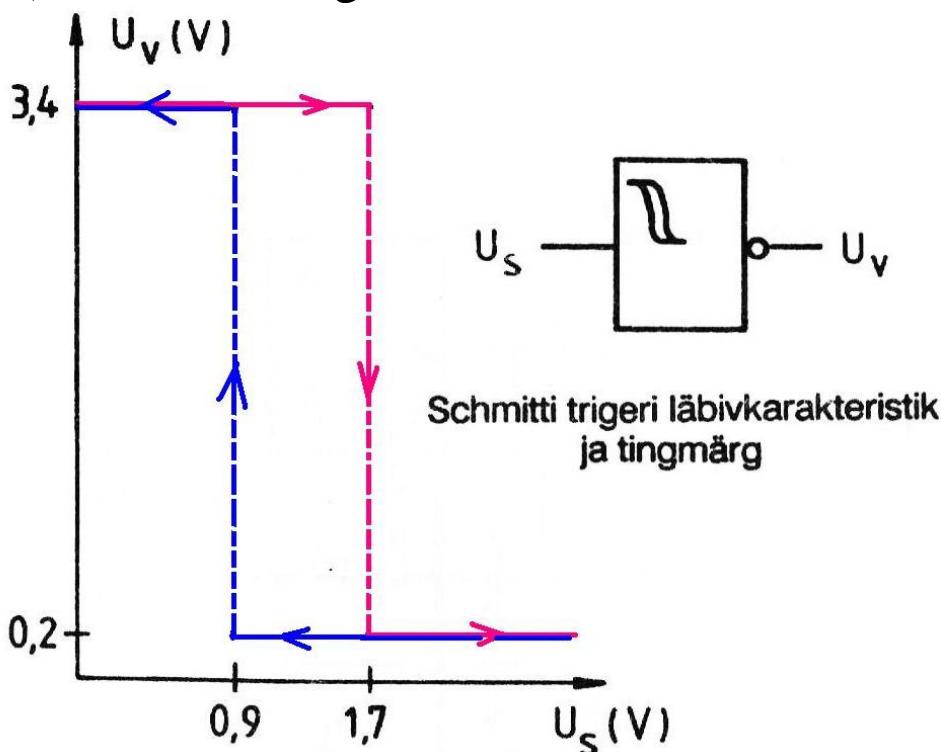
„Master – Slave“. → Toppeltriger – suurepärane konstruktivne lahendus. Tavaliselt → universaalne JK- triger.



MS-printsibil valmistatud siseviivitusega sünkroonne JK-triger. Tingmärk konstateerib, et väljundil on uus olek fikseeritud CLK langeva frondi ajal. MS-printsibil võib realiseerida ka RS- ja D-trigeri

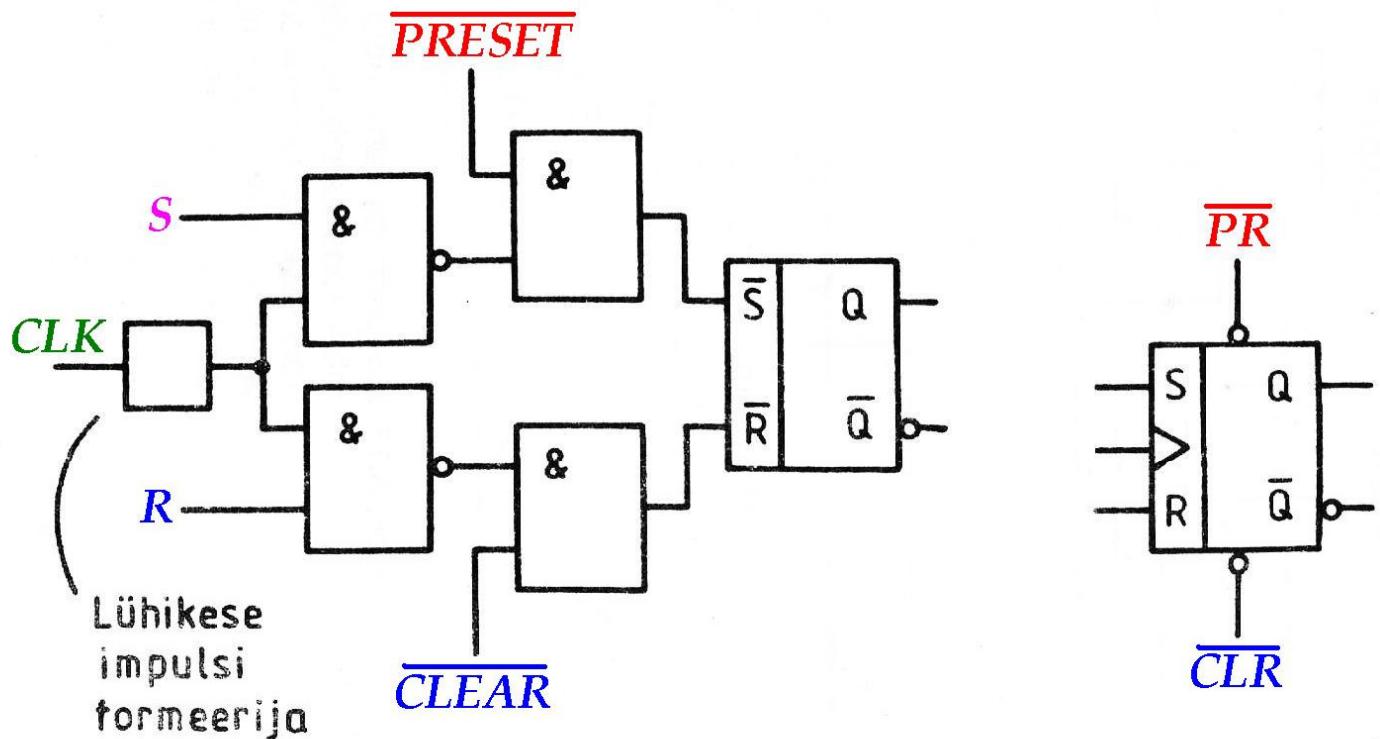
Schmitt`i triger.

Rikutud frontidega kahendsignaali kantimiseks (frontide järsuks tegemiseks). Schmitt`i triger omab hüstereesi!



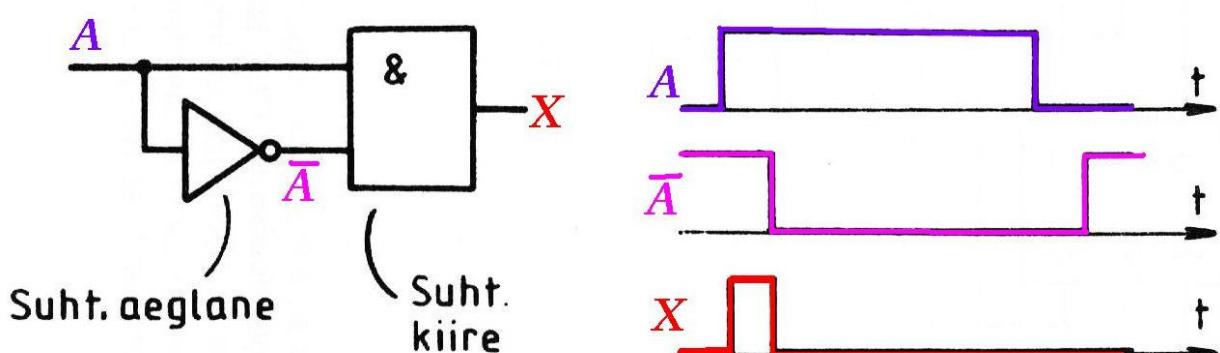
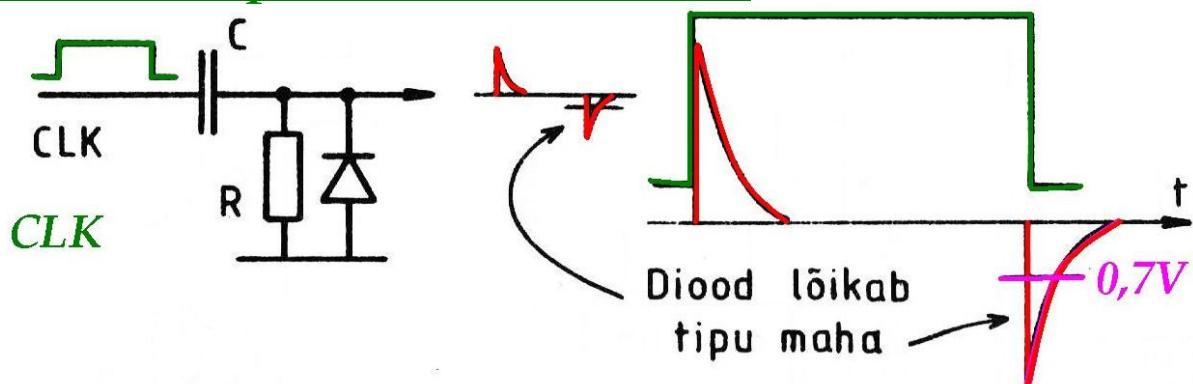
Schmitti triger kui korrektse kahendsignaali formeerija. Hüsterees hoiab ära kahendsignaali võbelemise ka U_s aeglase ja võbeleva muutumise korral

Trigeri eelseadmine



Tõelised sünkroontrigerid varustatakse asünkroonse PRESET (laadimise) või CLEAR (nullimise) sisendiga või mõlemaga. Võib koostada lülituse, milles laadimise ja nullimise signaal on kõrge

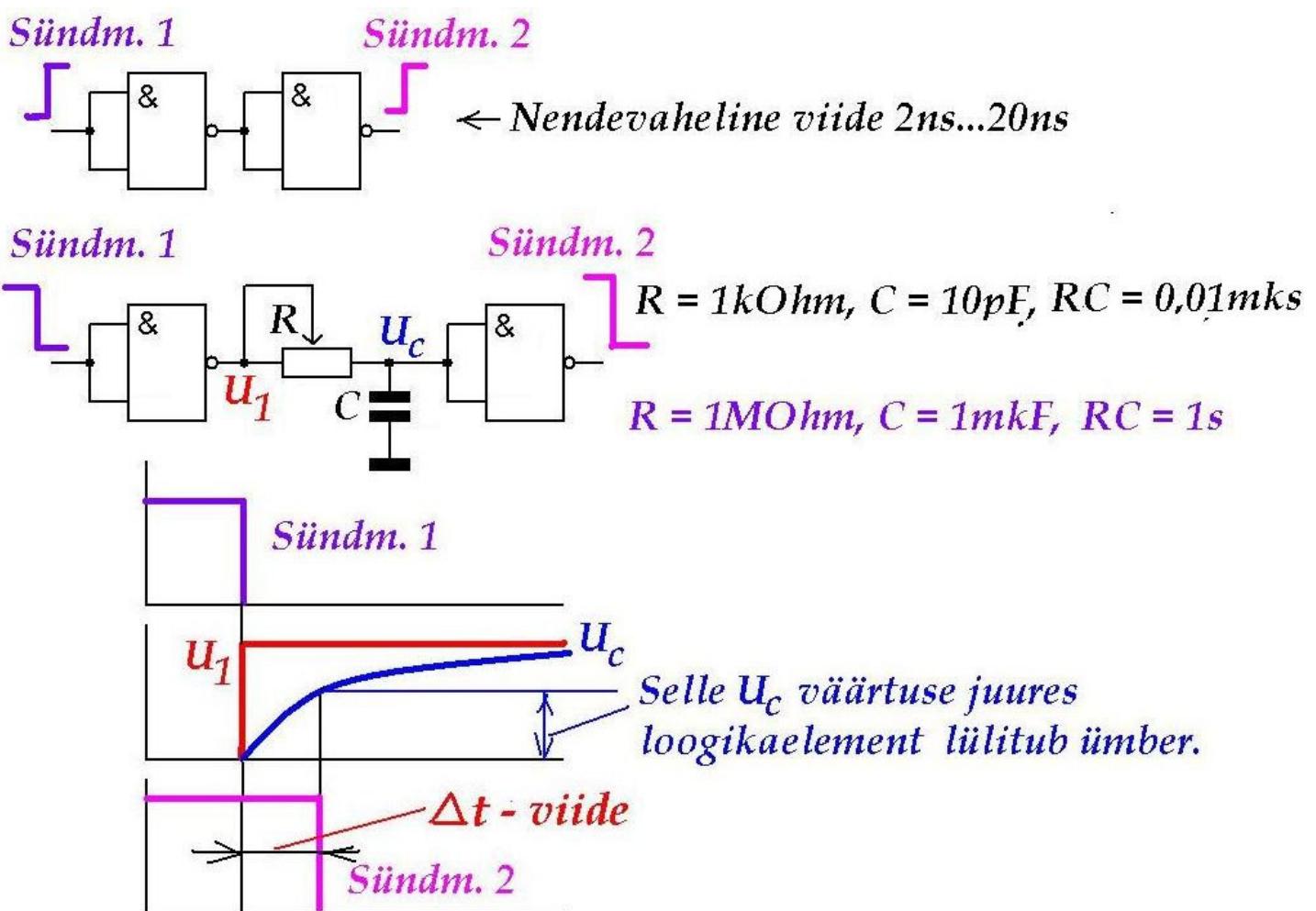
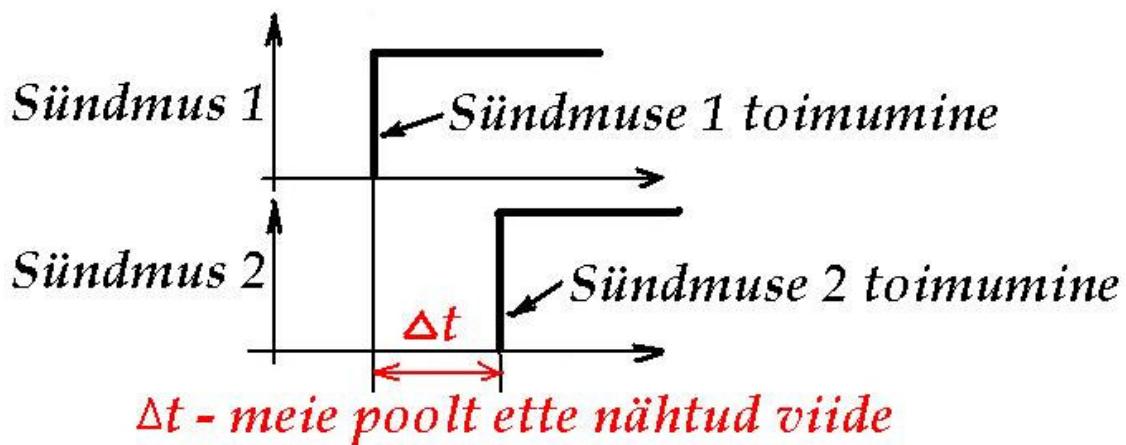
Lühikese impulsi formeerimine.



Võimalus lühikese impulsi formeerimiseks. Diferentseeriv ahel sobib diskreetses tehnikas, A & \bar{A} lülitus aga integraaltehnikas

Viitelülid.

Viitelülid on skeemid ettenähtud kehtivusega ajalise viite tekitamiseks.

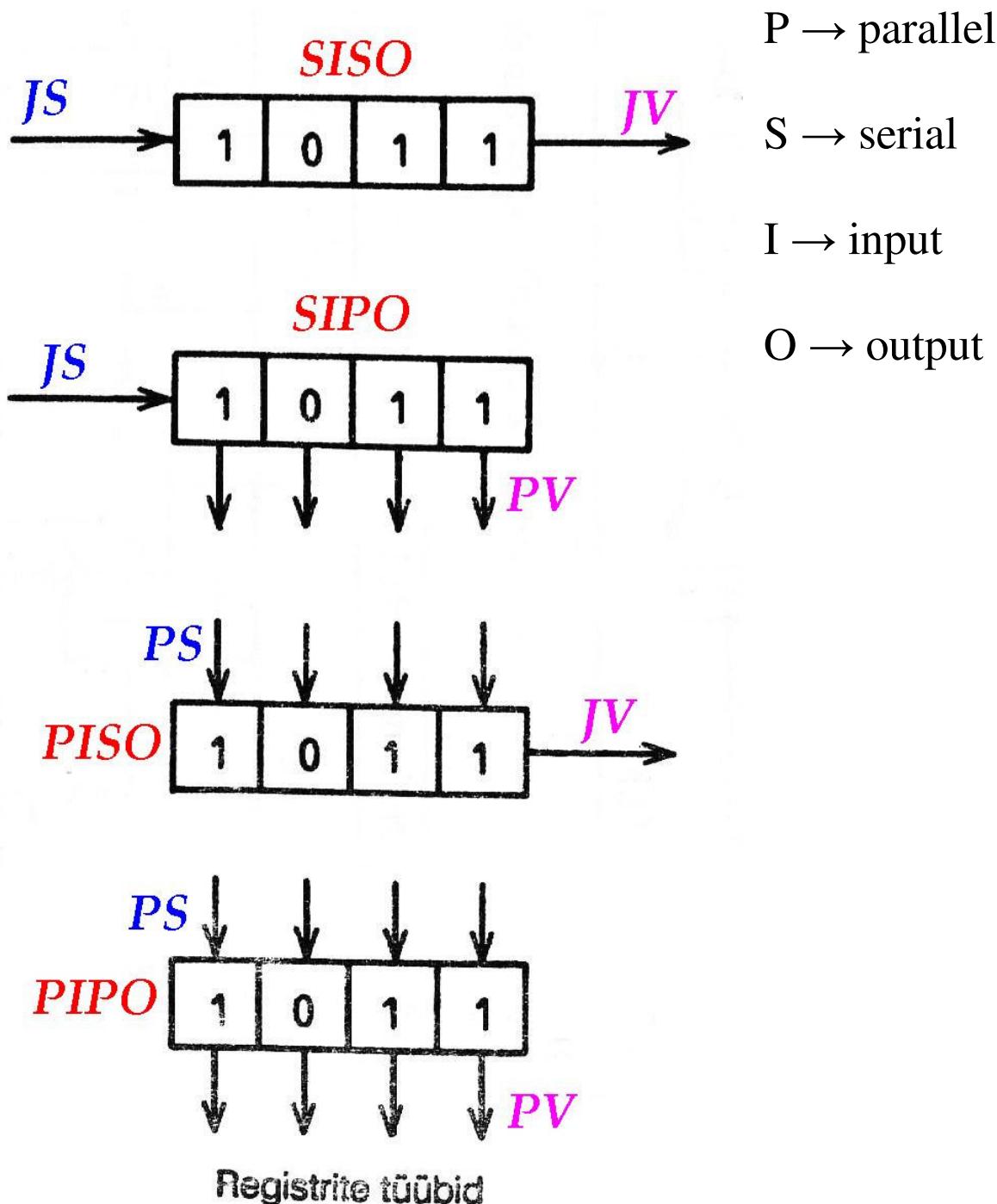


6.6.2. Registrid.

Register on mäluelement mitmebitiste kahendarvude **ajutiseks** hoidmiseks. Pikaks hoidmiseks on mälud. Register koosneb trigeritest. Iga biti jaoks on 1 triger.

Kokku on 4 varianti: 3 var. \rightarrow nihkeregistrid (shift registers)
1 var. \rightarrow tavaregistrid.

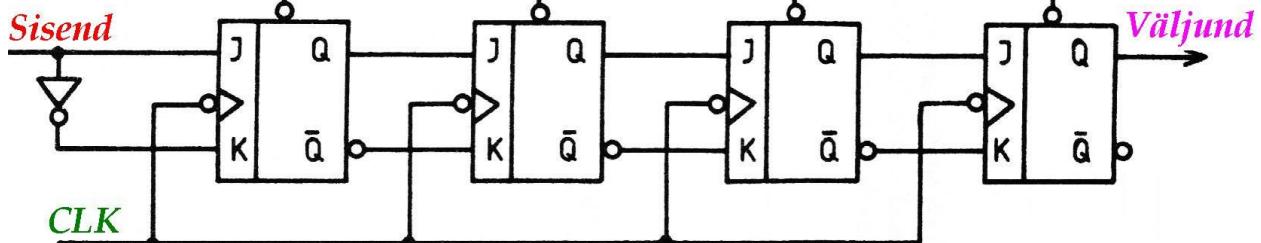
Neli registrivarianti:



SISO- register.

Serial in, serial out. Ühine CLK. Ajalise viite loomiseks. Viide on $n\Delta t$, kui on n trigerid.

Nullimine (\overline{CLR})

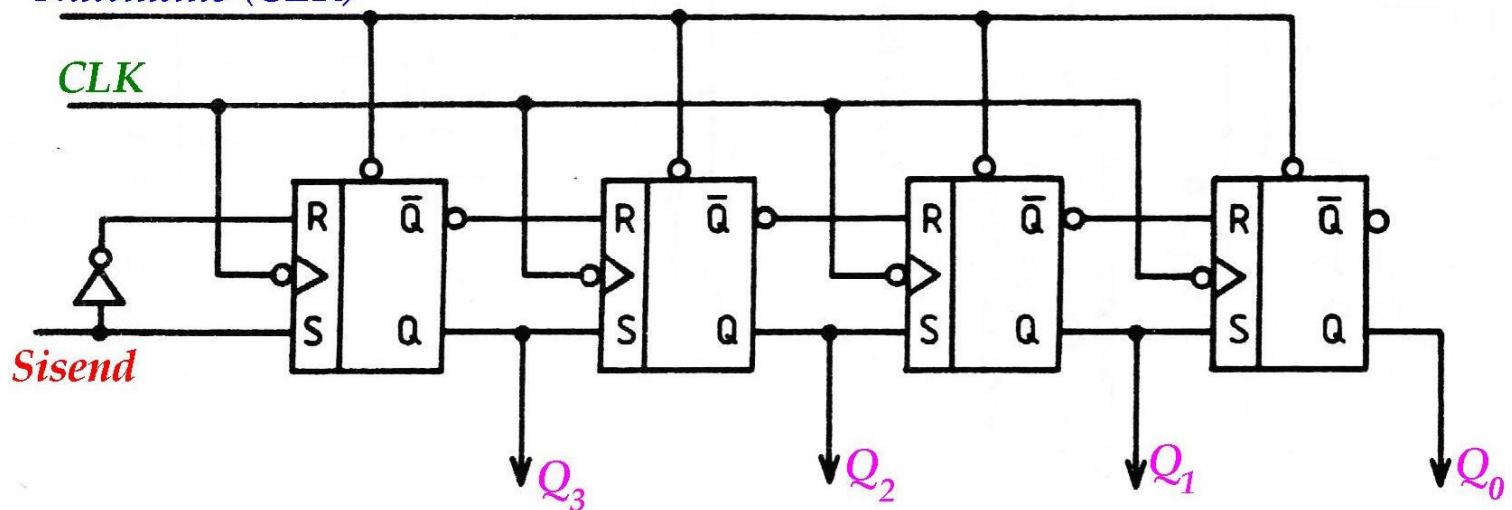


Järjestiksisendiga ja järjestikväljundiga nihkeregister

SIPO- register.

Serial in, parallel out. Ühine CLK. SIPO ühendatakse COMPORT sisendile.

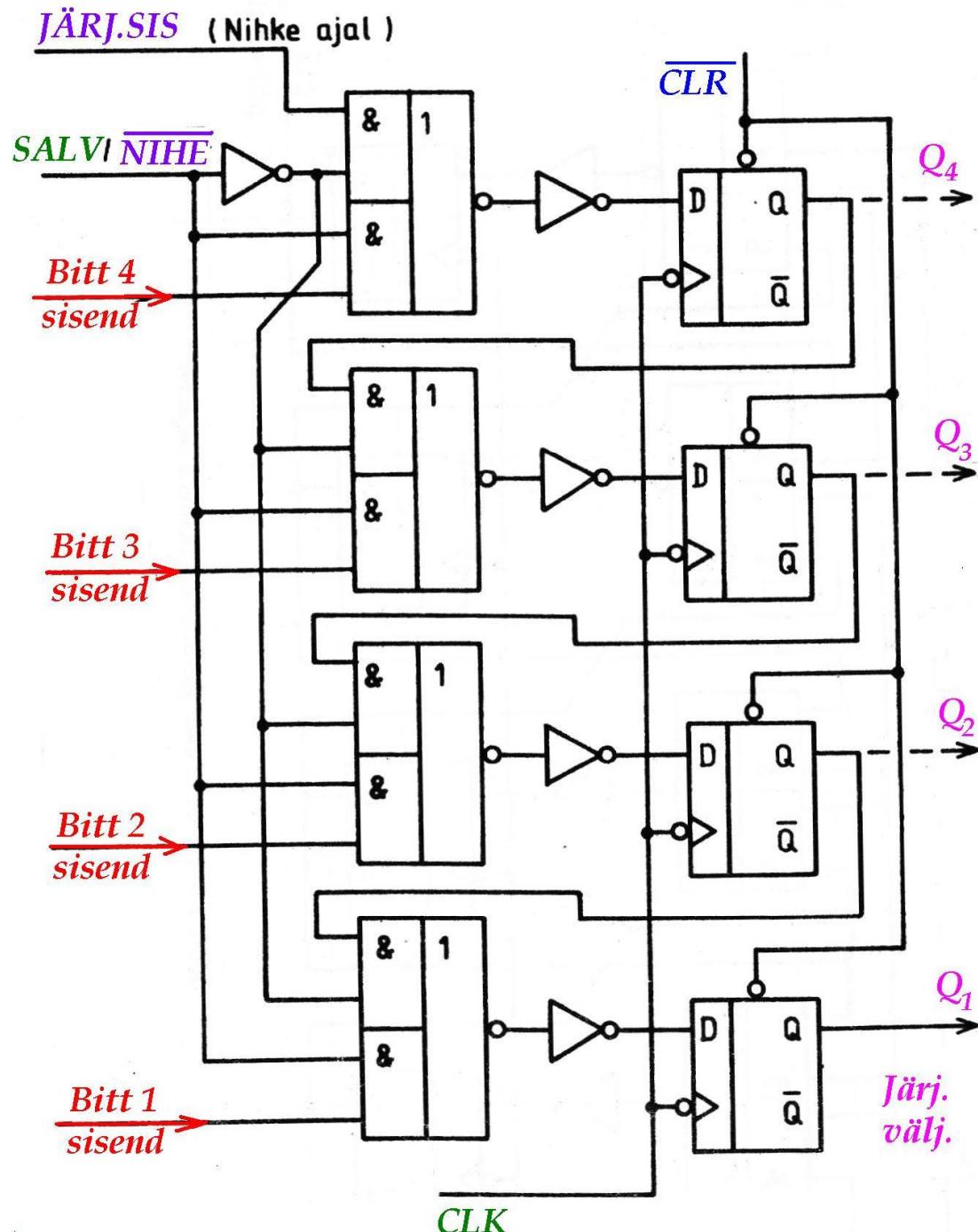
Nullimine (\overline{CLR})



Järjestiksisendiga ja parallelväljundiga nihkeregister

PISO- register.

Kasutakse järjestiku infoedastuse korral.



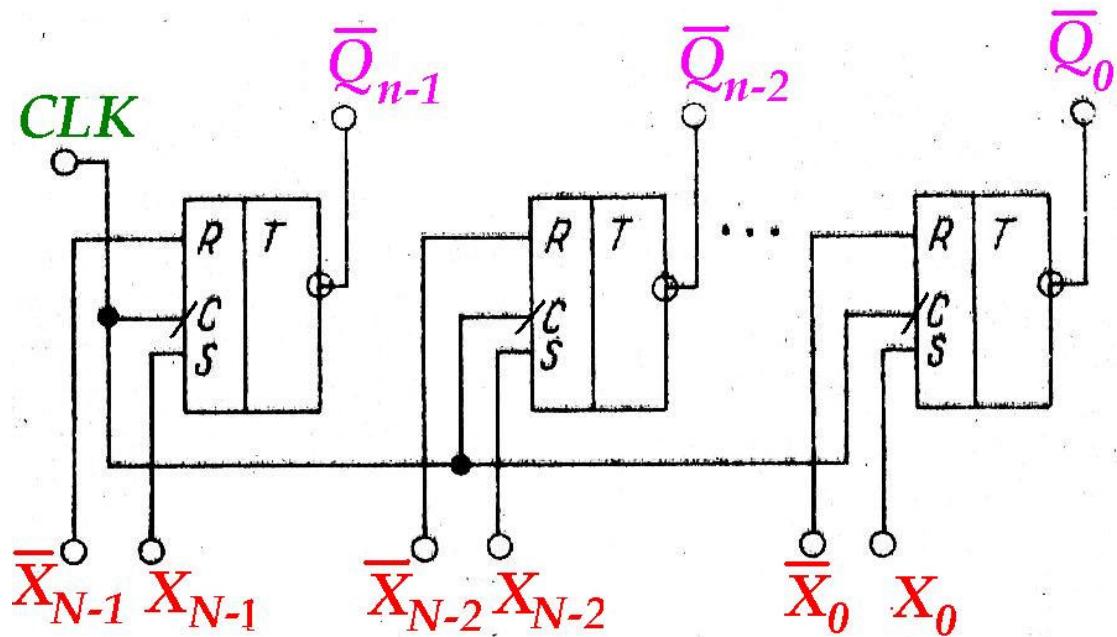
Paralleelsisendiga ja järjestikväljundiga register. Sellel moodustub ka järjestiksisend; võib moodustada ka paralleelväljundi (joonisel punktiiriga).

Sissekirjutus **1010. 0** kohe välja. **1** väljundile peale esimest nihet. **0** peale teist nihet. **1** peale kolmandat nihet. Nihked CLOCK`iga!

PIPO- register.

N- täiesti eraldi töötavad trigerid, ühine on vaid takteerimine CLOCK.

Info siserekirjutus X_i, \bar{X}_i sisenditelt CLOCK`i impulsiga aktiivse frondiga. Muul ajal register LATCH (hoidmise) olekus.



6.6.3. Loendurid. Loendid. Counters. Счётки.

Kõik loendurid on kahendloendurid, opereerivad 0- de ja 1- dega. Loendurid on impulsside loendamiseks. Liigitus: kahend- või mittekahendloendur käib loenduri täissaamise (täitumise) kohta.

3-bitine kahendloendur:

0 0 0 → algolek

0 0 1 → peale 1. impulssi,

← 8 erinevat olekut

0 1 0 → peale 2. impulssi.

(**n** biti puhul 2^n

0 1 1

erinevat olekut)

1 0 0

1 0 1

1 1 0

1 1 1 → loendur on **täis** (loomulik üleminek) peale 7. impulssi.

0 0 0 → peale 8. impulssi,

0 0 1 → peale 9. impulssi.

Kümmendloendur:

loendab 0...9, → vajab 10 erinevat olekut. → Peab olema 4-bitine.

0 0 0 0 → algolek

0 0 0 1 → peale 1. imp.

← 10 erinevat olekut

0 0 1 0 → peale 2. imp.



0 0 0 0 → peale 10. imp.

Kolmendloendur:

loendab 0...2

0 0 → algolek

0 1 → peale 1. imp.

← 3 erinevat olekut

1 0 → peale 2. imp.

0 0 → peale 3. imp.

Loendurid võivad olla:

Summeerivad:

0 0 0

0 0 1

0 1 0



1 1 1

Lahutavad:

1 1 1

1 1 0

1 0 1

Reversiivsed:

Reversiivne, (reverseeritav)
loendur loendab ükskõik
kumba pidi.



0 0 0

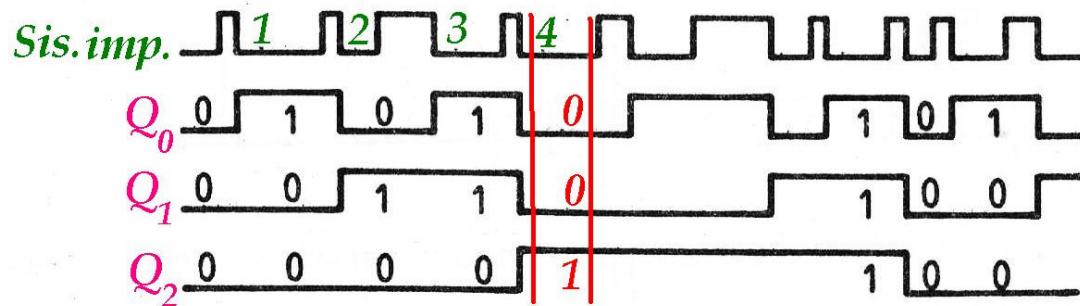
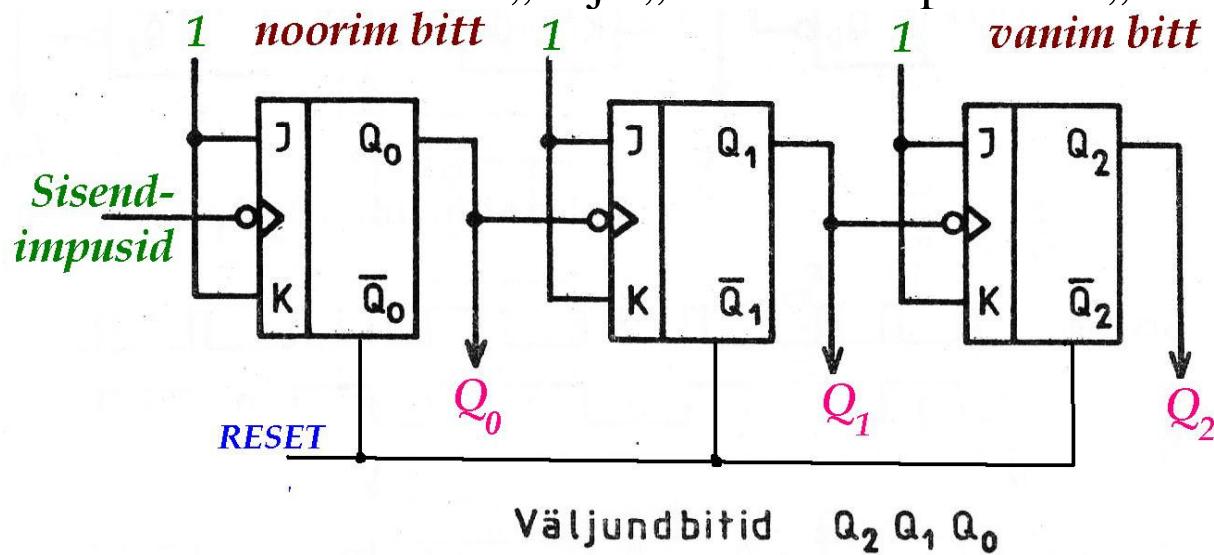
Loendurid võivad olla:

Asünkroonsed → muudavad olekut **kohe** info muutusel, trigerid lülitavad järjestikku.

Sünkroonsed → trigerid lülituvad kõik korraga.

Asünkroonse summeeriv kahendloendur. (RIPPLE COUNTER, Асинхронный последовательный счётчик)

Kõige lihtsam → “T” -trigerite alusel. Teeme „T“-trigerit „JK“-trigerist. Selleks sisenditele „J“ ja „K“ anname pidevalt „1“.

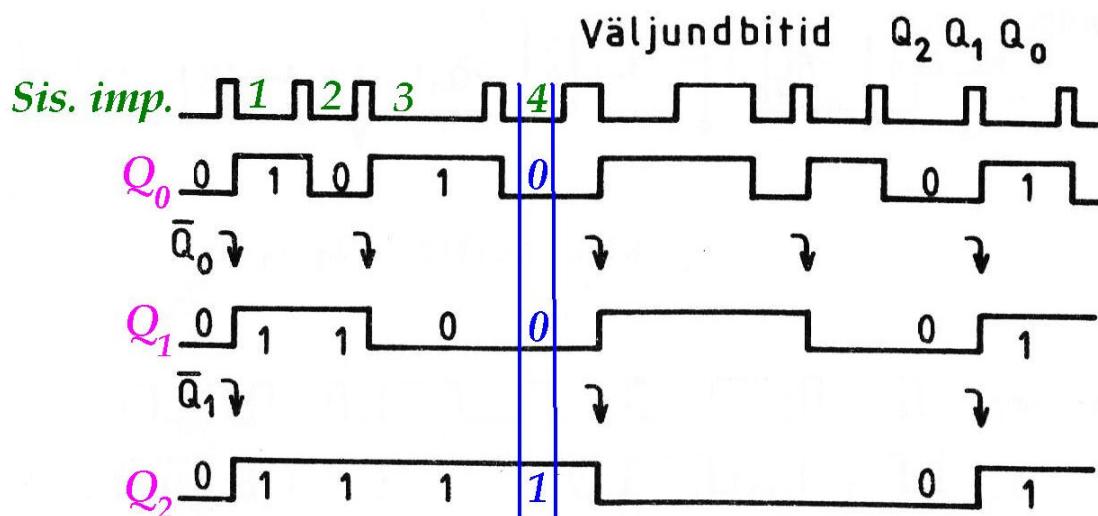
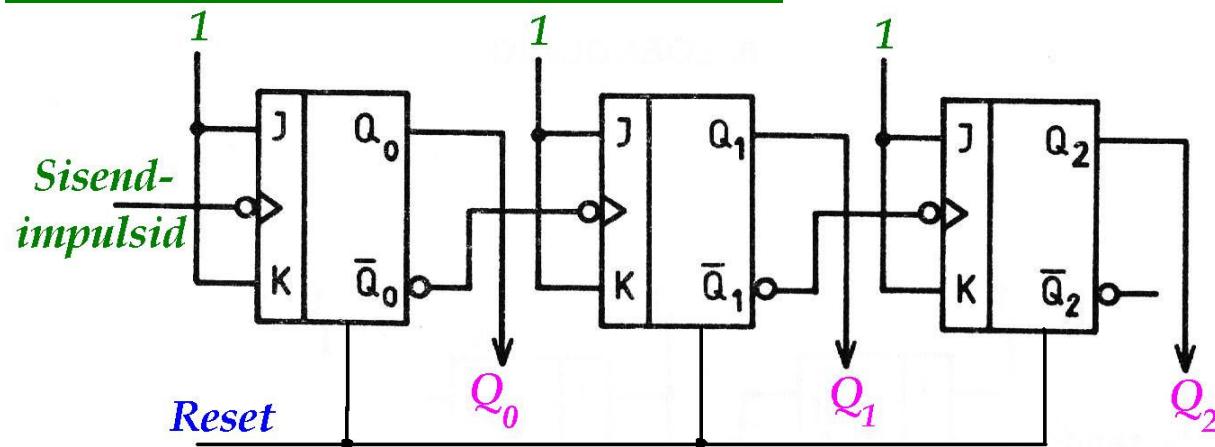


Asünkroonse (e. trigerite jadalülituses) summeeriv kahendloendur

NB! Asünkroonne loendur annab väljundil vale infot niikaua, kuni kõik trigerid pole ümber lülitunud.

Lähteseis: $0111 \rightarrow 0110 \rightarrow 0100 \rightarrow 0000 \rightarrow 1000$ lõppseis.

Asünkroonne lahutav loendur.

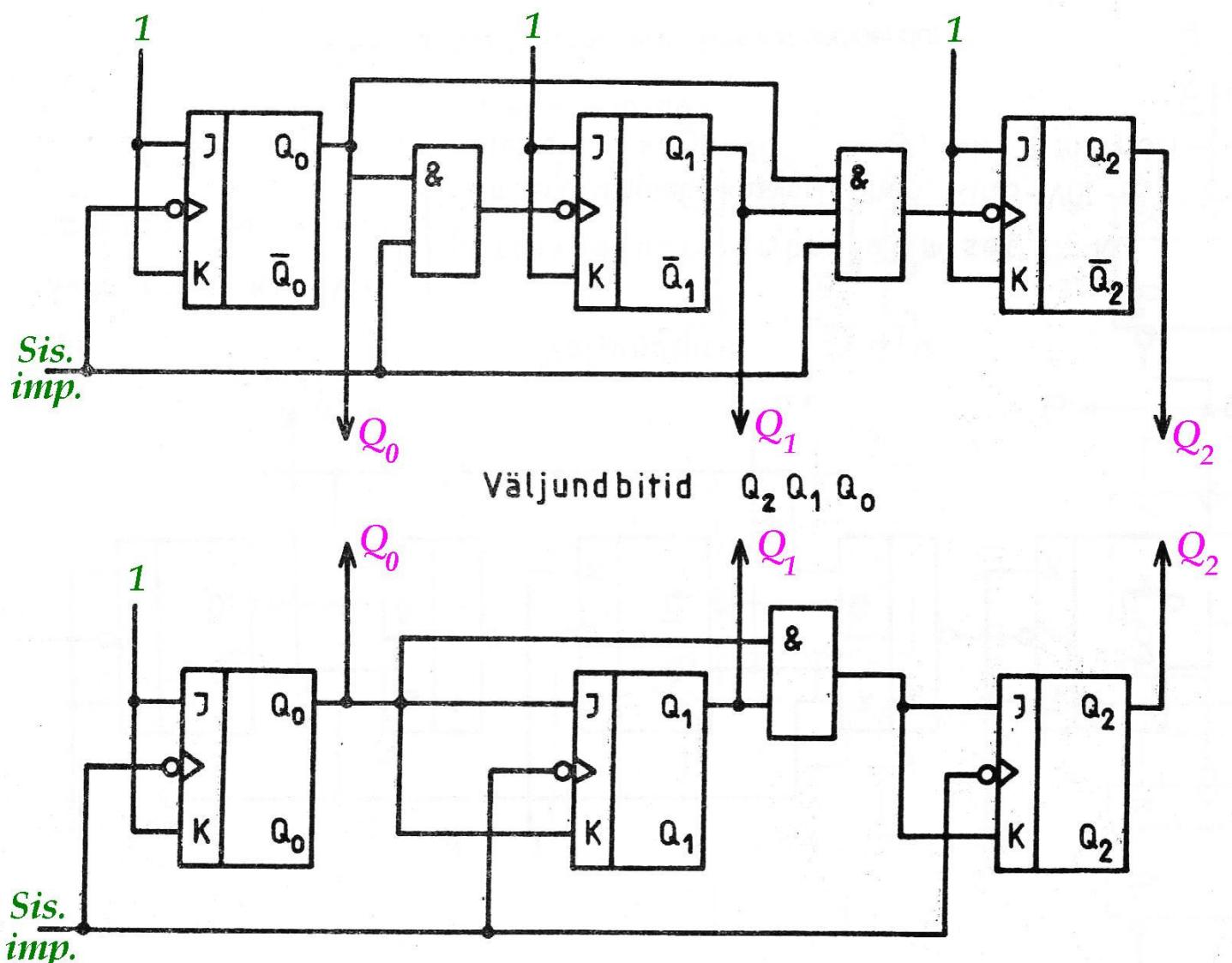


Asünkroonne (e. trigerite jadalülituses) lahutav kahendloendur

| Sisend-impulsi | Summeeriv loendur | | | Lahutav loendur | | |
|----------------|-------------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|
| | Q ₂ | Q ₁ | Q ₀ | Q ₂ | Q ₁ | Q ₀ |
| | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1. | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2. | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 3. | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 4. | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 5. | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 6. | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 7. | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 8. | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Sünkroonloendur (paralleelne ülekanne)

- 1) Sisendimpulss saabub korraga kõigi trigerite „T“- sisendile.
- 2) Noorim triger peab alati ümber lülituma.
- 3) Vanimate trigerite ümberlülitamise määrab kõige nooremate trigerite väljundsignaalide (Q-de) kombinatsioon.



Sünkroonse (e. trigerite rööplülituses) summeeriva kahendloenduri kaks skeemivarianti

Lähteseis 000 ← impulss lülitab ümber noorima trigeri.

siis 001 ← imp. lülitab ümber noorima ja teise trigeri.

siis 010 ← imp. lülitab ümber noorima, teise mitte!

siis 011 ← lül. ümber noorim, teine, kolmas.

siis 100 j.n.e.

Mittekahendloendurid.

Mittekahendloendurid → kahendloendurid, mis jätavad osa olekuid vahele.

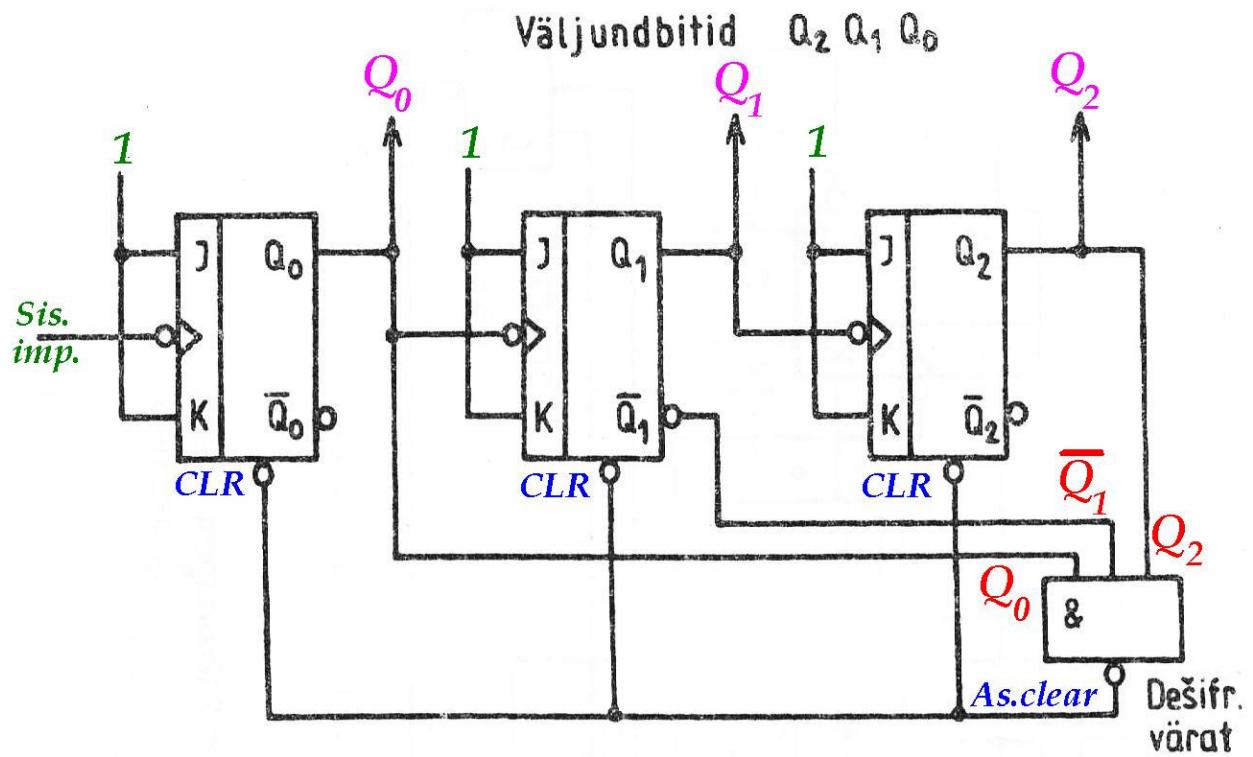
Kaks võimalust: 1) asünkroonne nullimine (asünkroonsetes loendurites); 2) sünkroonne nullimine (sünkroonloedurites).

Teeme **viiendloenduri**: Loendab: **000** → **algseis**.

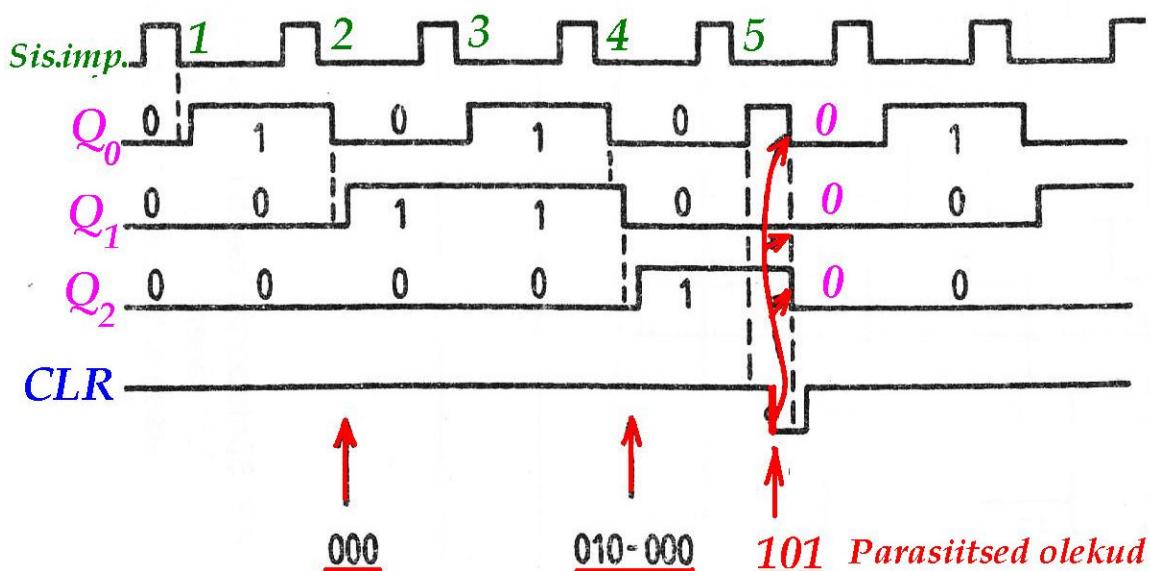
1. imp. 001
2. imp. 010
3. imp. 011
4. imp. 100

5. imp. peaks tulema **101**; meile on aga vaja **000!**

Järelalus: kombinatsioon 101 peab kõik trigerid nullima!
(управляемый сброс)



$000 \rightarrow 001 \rightarrow 010 \rightarrow 011 \rightarrow 100$ Stabiilsed olekud
 $(101) \leftarrow$ Ebastiilne olek



Asünkroonne loodur, mille stabiilsete olekute koguarv erineb 2 täisastmest. Loenduri asünkroonse nullimise printsip

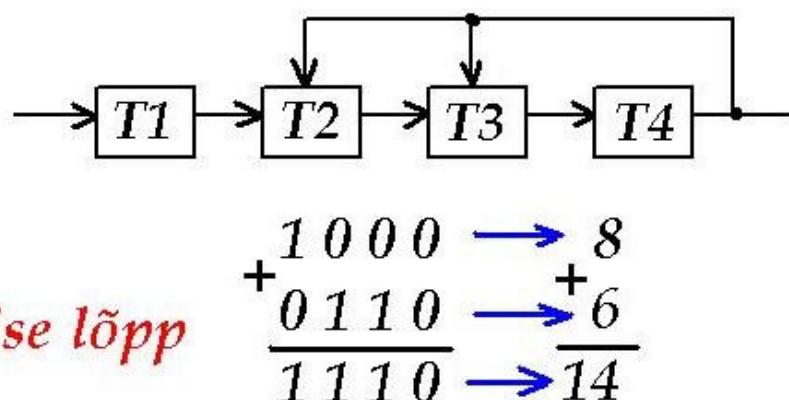
Sunniviisilise juurdeloendamise meetod. (метод принудительного счёта).

On vaja teha kümmendloendur:

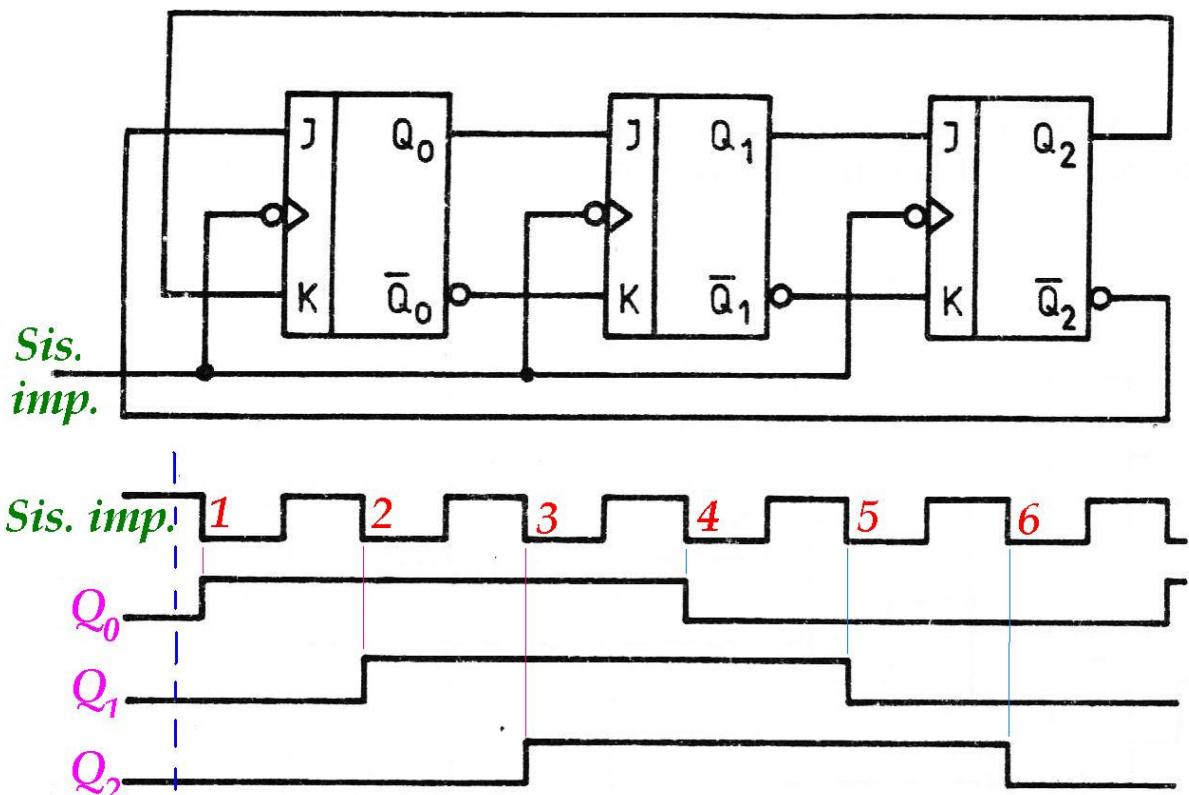
| impulss | T4 | T3 | T2 | T1 |
|---------|----|----|----|----|
| 8 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 8* | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 9 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 |

uus "8"

loendamise lõpp



Johnsoni loendur.



NB! Välistada olekud 010 ja 101, mis võivad tekkida sisselülimisel.

Nihkeloendur e. Johnsoni loendur

6.7. Mälud.

6.7.1 Püsimälu. ROM (read only memory), ПЗУ.

Info väljalugemine ROM`is toimub arvuti rutiinse protseduurina. Vanim on lihtsalt **ROM** → info kirjutakse sisse valmistamise käigus, muuta infot ei saa.

PROM – üks kord programmeritav tarbija poolt.

EPROM – info salvestus elektriline, kustutamine – UV-kiirtega.

Kustutamine nõuab aega minutites.

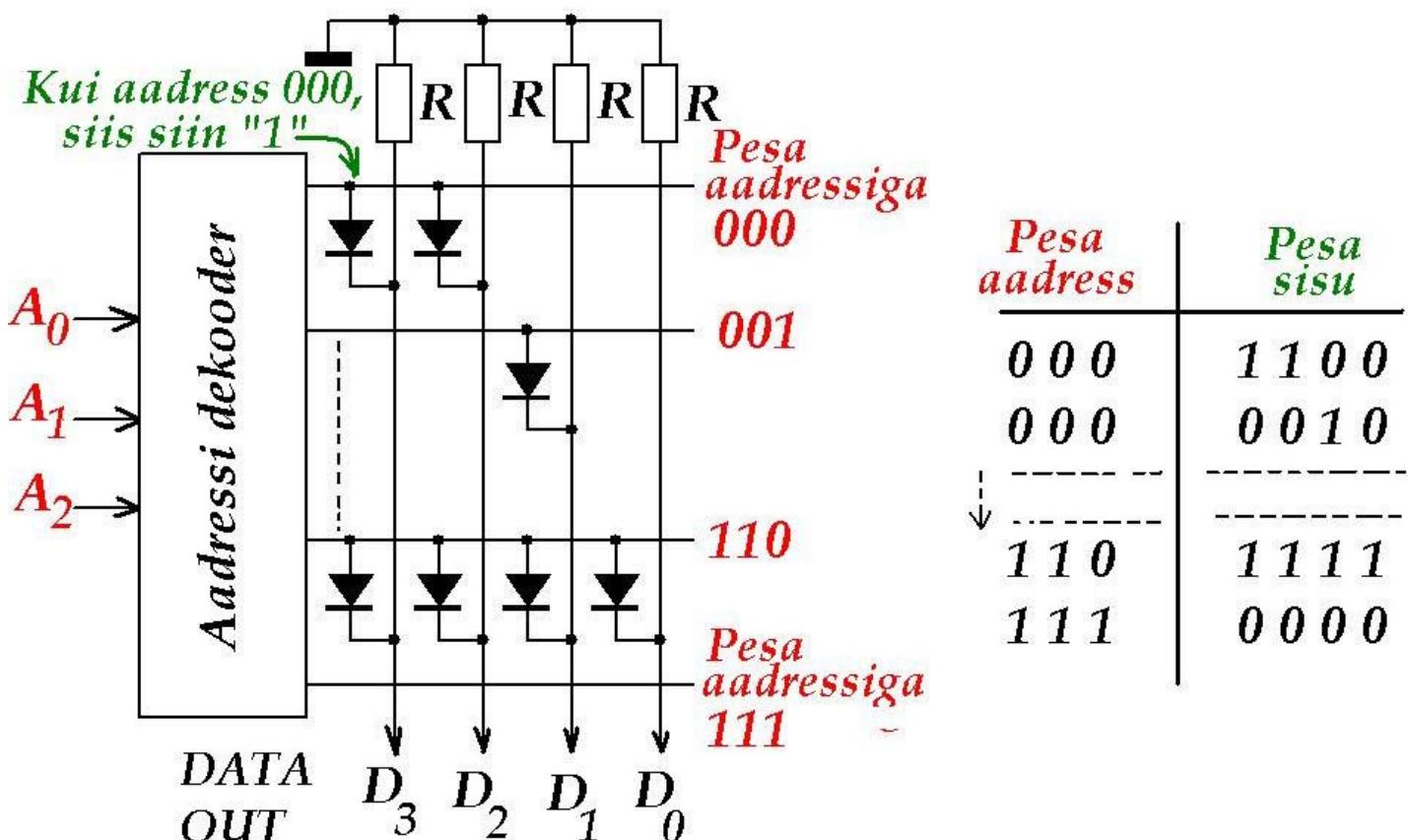
EEPROM – info salvestus ja ka kustutamine toimub elektriliselt. Aeg – millisekundites.

ROM

Vanim variant. Sisaldab: 1) pesaid, igas pesas **n** bitti.

2) aadressi dekooder. Suvapöördusega mälud – Random Access Memory (kõik aadressid on hetkega kätesaadavad).

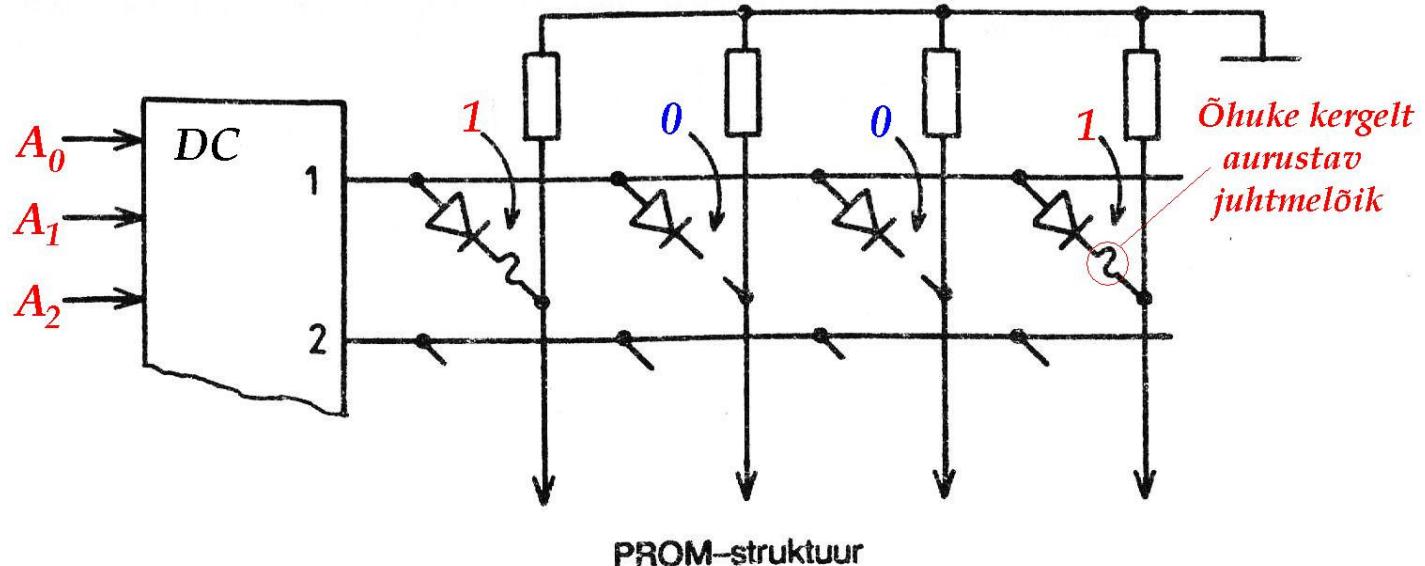
..... Olgu igas pesas 4 bitti. Pesi on $2^3 = 8$



PROM

Programmeeritav ainult üks kord Valmistamisel pandi kõikidesse sõlmedesse dioodid või transistorid.

→ kirjutati sisse kõikjale (näiteks) 1-d.



Nullid tuleb sisse programmeerida – liigsed dioodid või transistorid kõrvaldada. Kõrvaldamine tähendab dioodi ühenduse läbipõletamist. Vooluimpulsiga mittevajalikud dioodid lülitatakse välja → aurustatakse juhtmelõik. Seda tehakse programmaatori abil.

EPROM, EEPROM.

→ Paljukordsest ümberprogrammeeritavad ROM`id.



SiN-ga isolatsioonikihti saab sisse ajada paiksed elektrilaengud, mis püsivad seal muutumatuna sadu aastaid. Selleks laengute sisseajamiseks on vaja pinget umbes $\approx 20V$.

Laengust sõltub, kas transistor juhib või ei.

EPROM – kustutamine → laengute mosaiigi viimine niisuguseks, et kõigis pesades on vaid 1-d (mälu kustutatud). Toimub UV- kiirtega.

EEPROM – kustutamine (kõikidesse pesadesse 1-de kirjutamine) toimub ka elektriga.

Programmeeritav loogikamaatriks (PLM), PLA (array), PLD (device), ПЛМ.

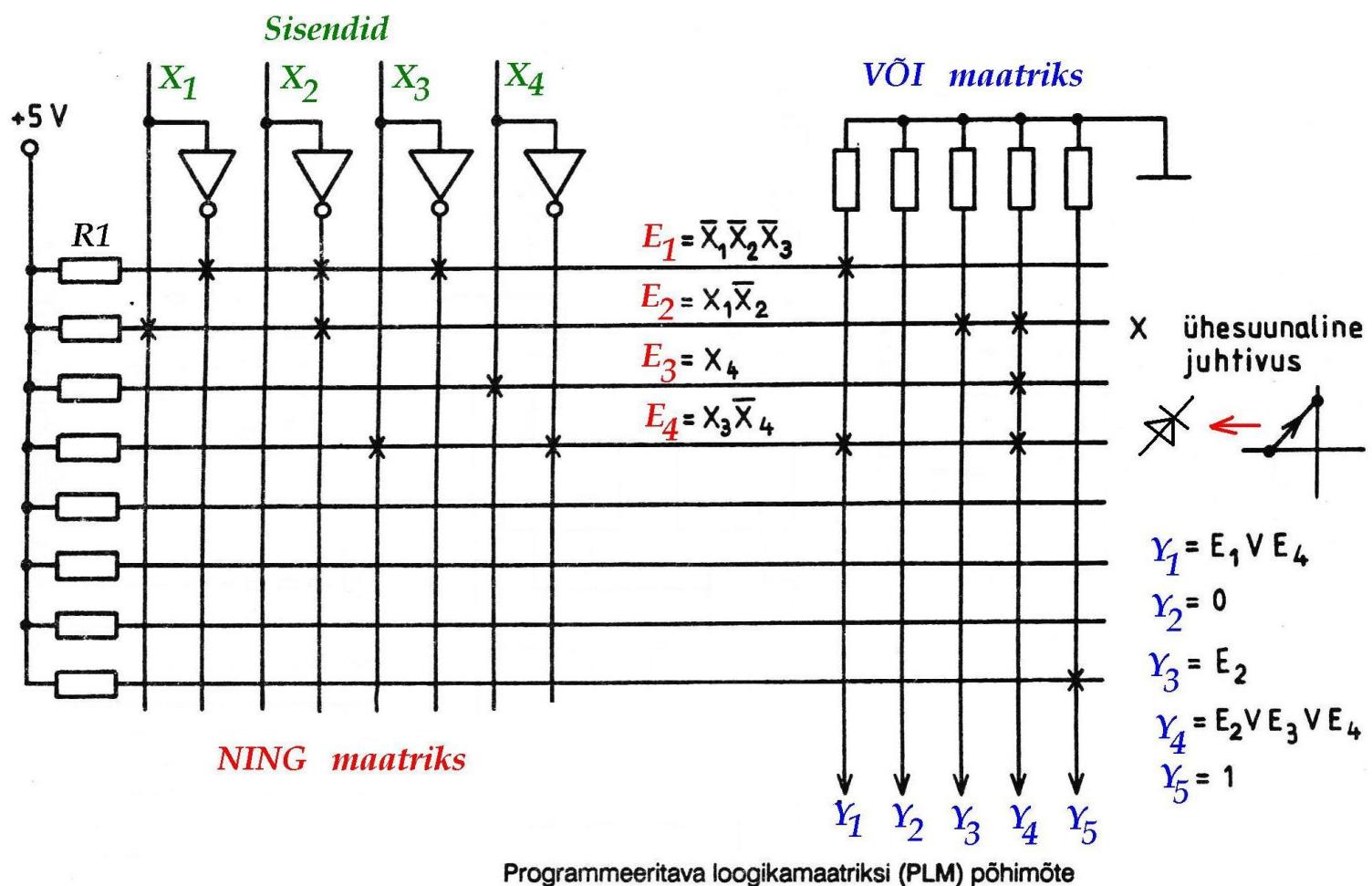
Programmeeritavad EEPROM põhimõttel.

FPGA → field programmable gate array.

sisend - EI - maatriks - maatriks - EI - väljund

IN - NO - AND - OR - NO - OUT

Üldjuhul **n** – sisendit ja **m**- väljundit. **n** ja **m** on sõltumatud suurused.



E_i → on mingi loogiline korrutis.

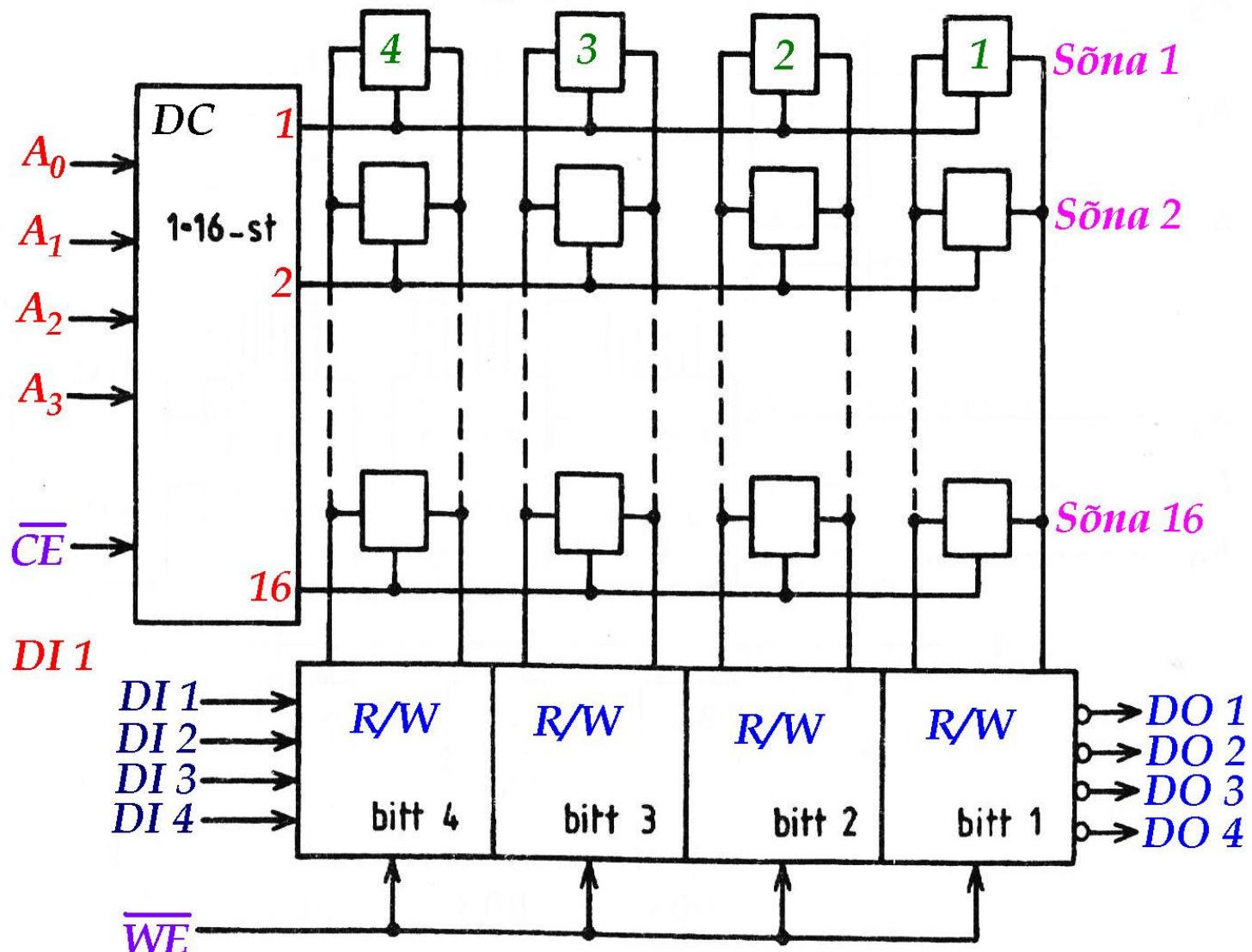
Ühesuunaline juhtivus → horisontaaljuhtmelt vertikaaljuhtmele.

$$Y_1 = E_1 \vee E_4 = \overline{X}_1 \overline{X}_2 \overline{X}_3 \vee X_3 \overline{X}_4$$

6.7.2 Muutmälu (operatiivmälu) (RAM)

Eksisteerivad staatilised (sRAM) ja dünaamilised (dRAM) variandid. Staataliste mälude pesades iga biti jaoks on ettenähtud üks triger. Staatalistel mäludel on enamasti lineaarne adresserimine – adresseeritakse üks sõna korraga.

Trigerimaatriks 16 × 4



Väiksema muutmälu (16 pesa à 4 bitti, s.o. 16*4) lineaarse adresseerimise põhimõte

Dünaamilises (dRAM) mälus iga biti pesaks on väike kondensaator. Biti väärust näitab laeng kondensaatoris. Reaalselt püsib laeng kondensaatoris väga lühikest aega, umbes 2 ms. Selle tõttu dünaamiline mälu vajab pidevat värskendamist, ca 500 korda sekundis. Mälu värskendamine seisneb laengu taastamises. Dünaamilised mälud on enamasti realiseeritud maatriks adresseerimisena. Dekooderi aadressi osa aktiveerib korraga terve gruvi pesasid ja aadressi teine osa valib gruivist õige pesa välja. Mälu värskendamist võib teha nii ridade kui veergude kaupa. Dünaamiline mälu võtab kristallil vähem ruumi, kui staatiline, kuid staatilist ei ole vaja värskendada. Mõlemad mälu tüübhid peavad olema koguaeg toitepinge all.

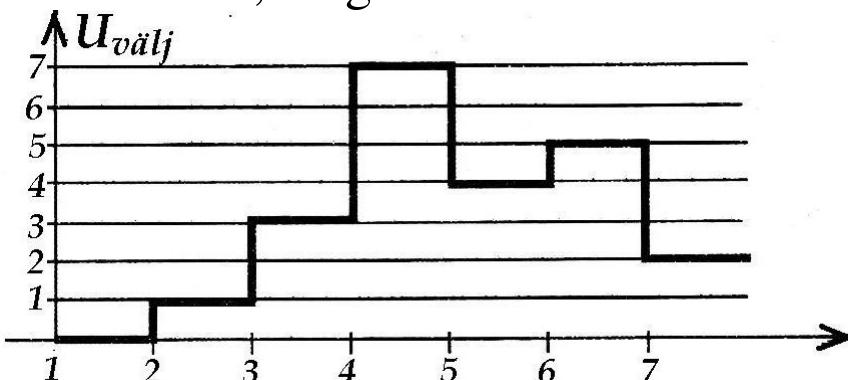
6.8. Digitaal-analoogmuundurid (DAM) ja analoog-digitaalmuundurid (ADM).

6.8.1. DAM. (ЦАП).

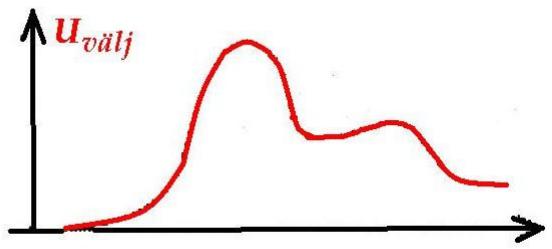
DAM-i keerukus on määratud sisendile tuleva bittide arvuga (n). Väljundsignaal saab olla vaid astmeline ping.

Näide: Oletame, et $n = 3$, ja sisendile järjest tulevad sellised kombinatsioonid: $000 \rightarrow 001 \rightarrow 011 \rightarrow 111 \rightarrow 100 \rightarrow 101 \rightarrow 010 \rightarrow \dots$

Kui eeldada, et igale kahendarvule vastab vastav arv "volte" →



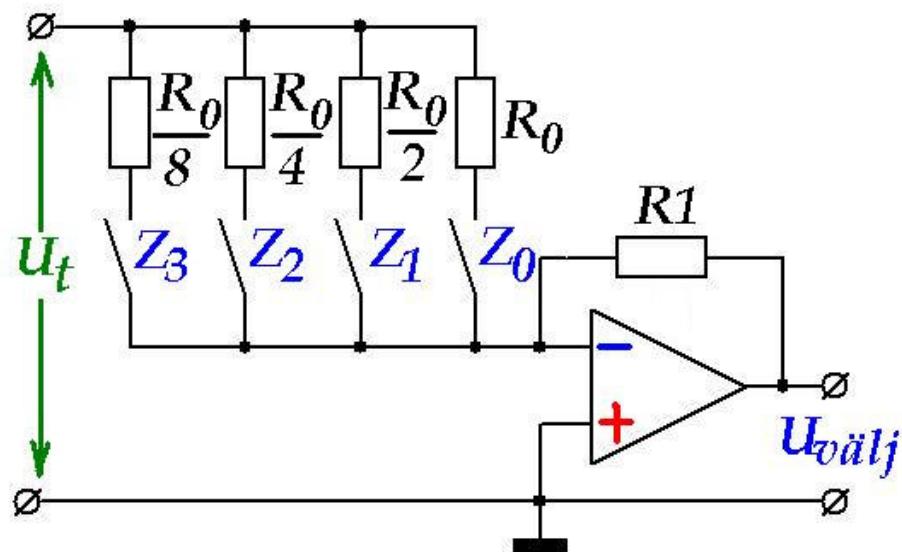
Õige pinge võib olla sellisel kujul:



Selleks et saada analoogsignaali tuleb DAM-i väljundpinge lasta läbi siluva toimega filtri. Filter võib olla elektriline või näiteks elektromehhaniline (kõlarikast).

Lihtsad DAM-d voolude summeerimisega.

Voolude summeerimine toimub "kaalude" järgi. Voolude "kaalud" määrame kahendkoodis:



Sisendite järgi:

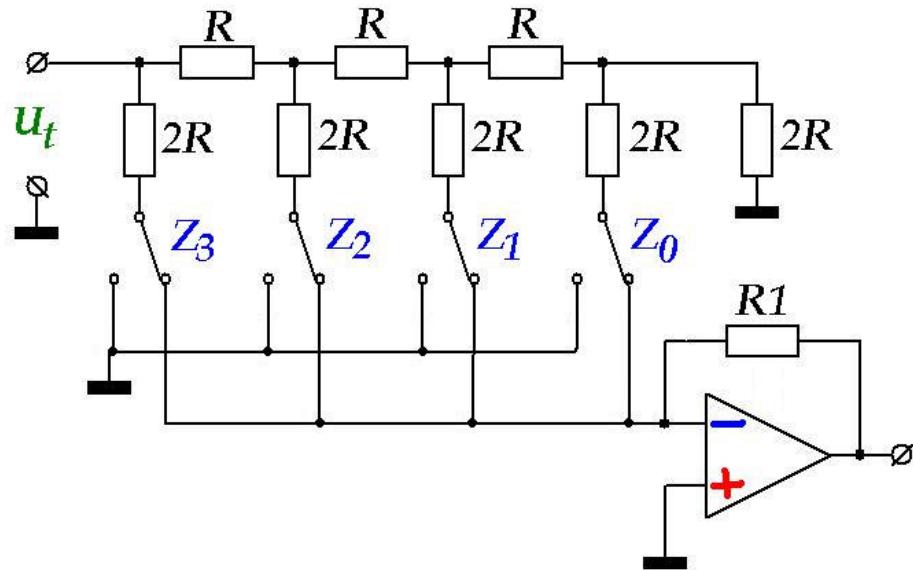
$$K_0 = -\frac{R1}{R_0} Z_0 \dots K_3 = -\frac{8R1}{R_0} Z_3 \quad \text{Kus } Z_0, Z_1, Z_2, Z_3 \rightarrow (0 \text{ või } 1)$$

$$U_{välj} = -U_t (K_0 + K_1 + K_2 + K_3) = -U_t \frac{R1}{R_0} (Z_0 + 2Z_1 + 4Z_2 + 8Z_3)$$

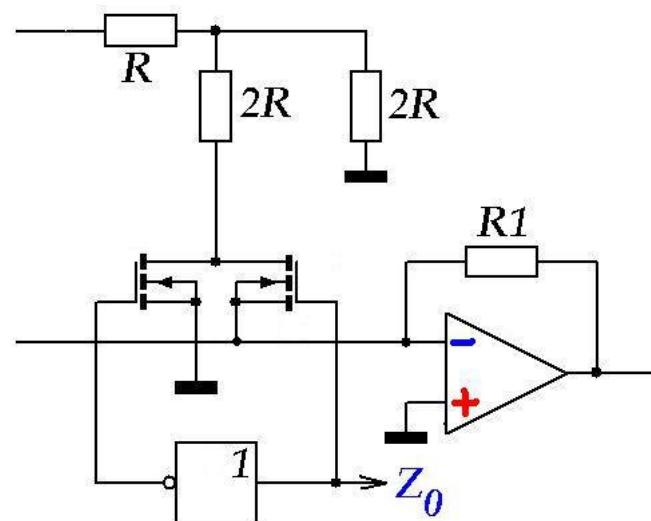
Skeemilise lahenduse puudused:

- 1) raskused täppistakistitega väiksemate "kaalutegurite" puhul $\rightarrow R/8$
- 2) tugipingeallika pinge sõltub koormusest.

Püsiva impedansiga maatriksi kasutamine.



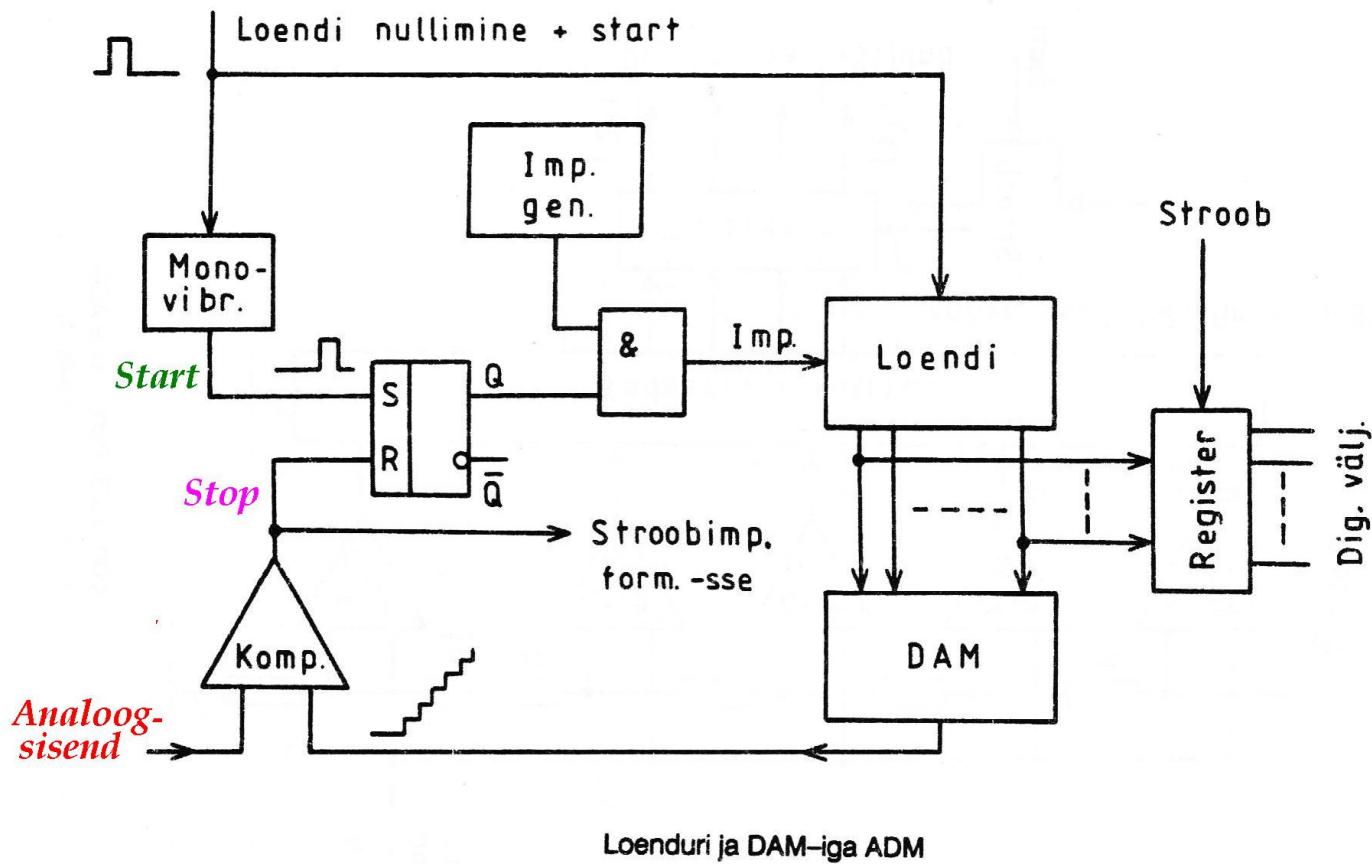
$$U_{välj} = -U_t \frac{R1}{16R} (Z_0 + 2Z_1 + 4Z_2 + 8Z_3)$$



6.8.2 ADM. (АЦП).

Loenduriga ADM.

Kõige aeglasem meetod, saab kasutada siis, kui sisendsignaal ei muudu liiga kiiresti.



Loenduri ja DAM-iga ADM

Paralleelne ADM (FLASH).

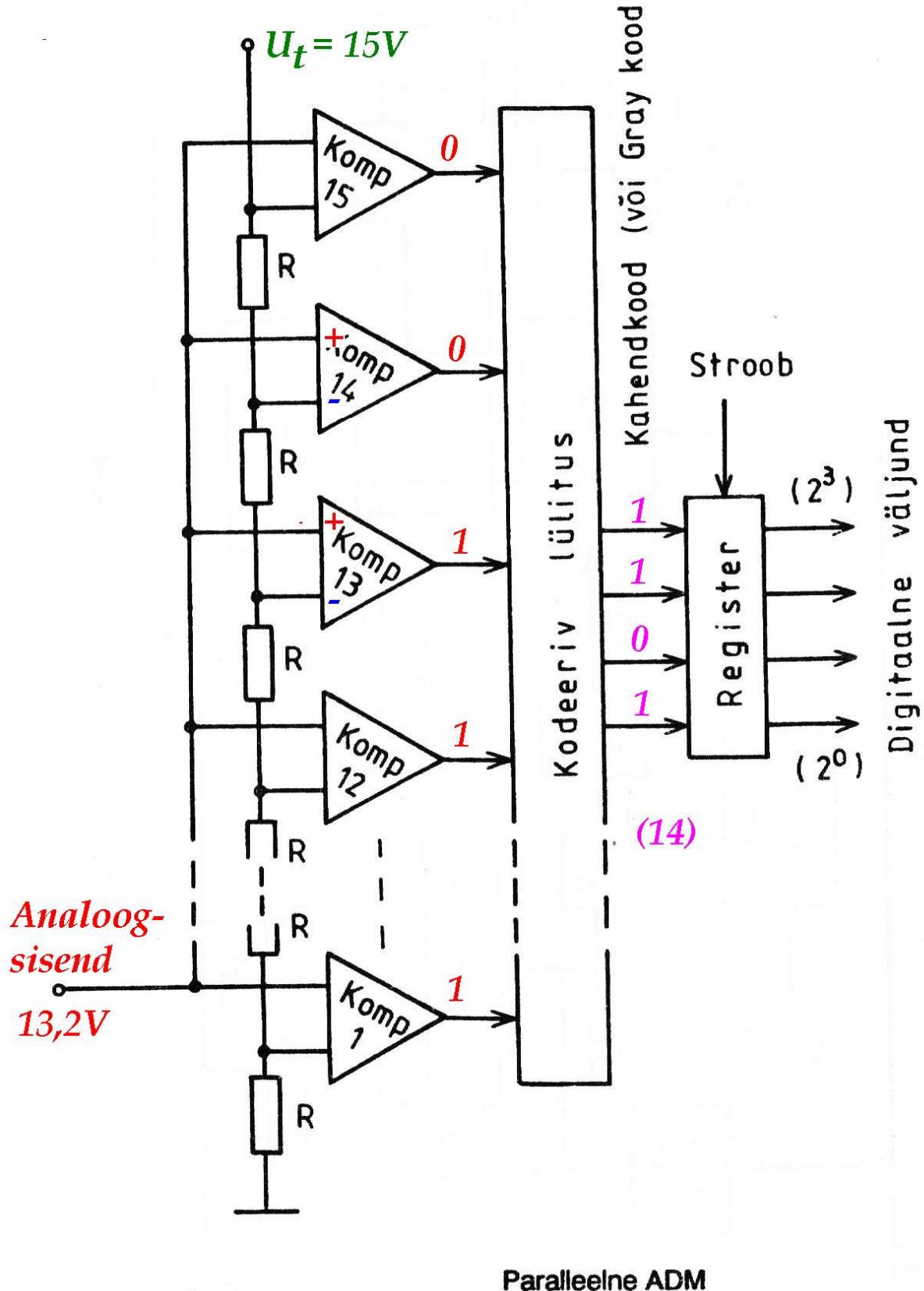
Kõige kiiretoimelisem meetod. Kulutused on aga suured. Läheb tarvis mitu komparaatorit. Kui tahame tulemuseks saada **n**-bitilist väljundkoodi, siis on vaja $2^n - 1$ komparaatorit.

Alltoodud näites $n = 4$, vastavalt komparaatorite arv: $2^4 - 1 = 16 - 1 = 15$.

Kui on vaja tõsta muundamise täpsust, siis kasutame n n mitmekordset FLASH muundamist. Idee:

- 1) Viime läbi „jäme“ ehk esialgse FLASH muundamise;
- 2) Jämeda FLASH muundamise tulemust töötleme DAM-ga.
- 3) Varem fikseeritud sisendsignaali ja DAM-i väljundsignaali vahe allutame järjekordsele FLASH muundamisele.

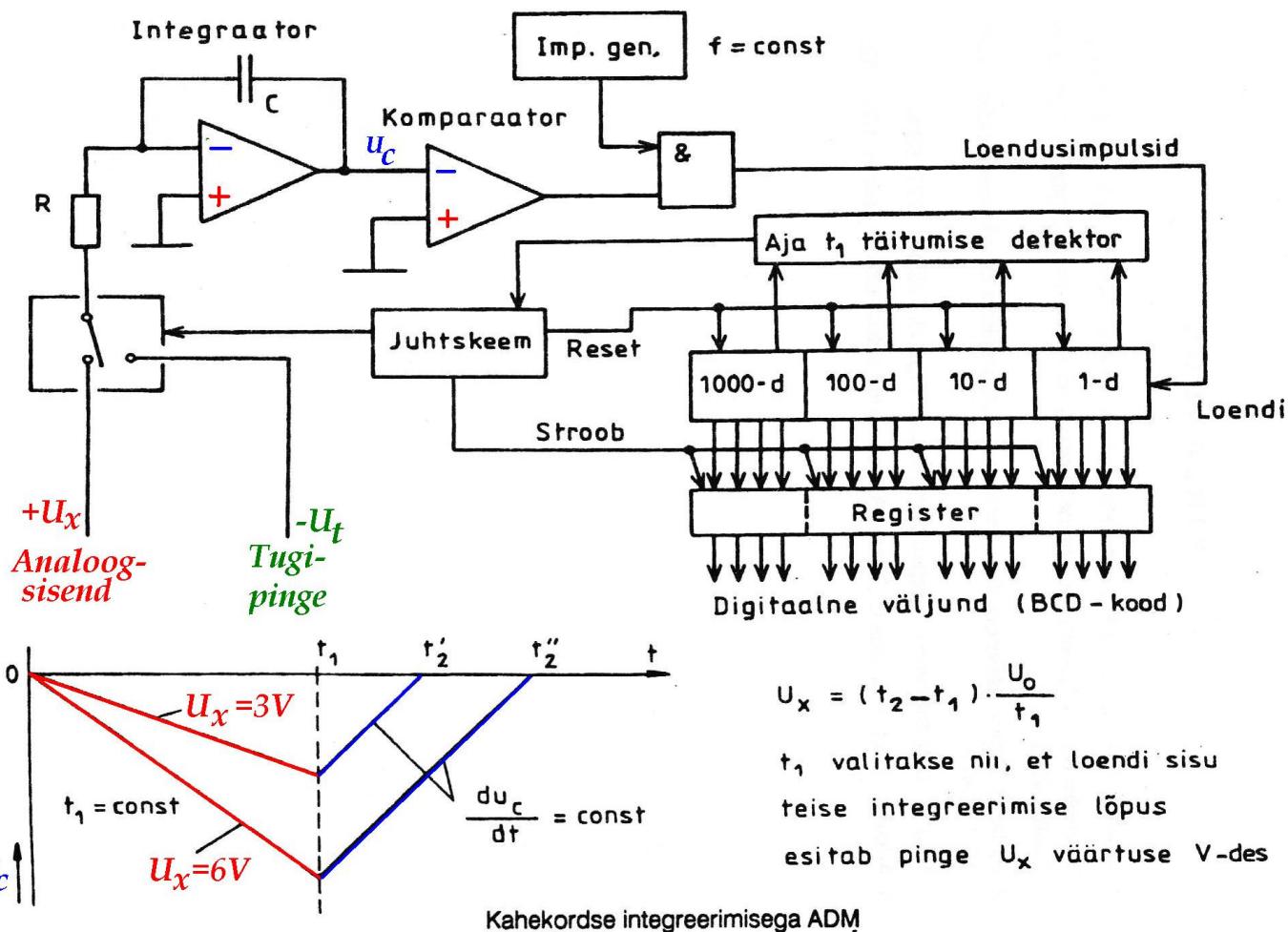
See on täpne meetod, aga aega kulub umbes 2,5 korda rohkem.



Paralleeline ADM

Kahekordse integreerimisega ADM.

Suhteliselt aeglane, aga samas väga täpne meetod.



Konstanse kestusega ajavahemikus $0 - t_1$ (antakse ette aja t_1 täitumise detektori abil) toimub sisendpinge U_x integreerimine (**esimene integreerimine**). **Teine integreerimine** toimub püsiva kiirusega dU_C/dt . Muundamise tulemus – aja intervall $\Delta t = t_2 - t_1$ on proporsionaalne sisendpingele U_x . Ajamoment t_2 määratakse komparaatori (null-detektori) abil. Ajavahemik Δt muudetakse arvuks sel teel, et kogu teise integreerimise ajal täidetakse loendurit püsiva sagedusega loendusimpulssidega. Ajavahemiku $0 - t_1$ alguses strobeerimisimpulsiga loenduri väljundkood satub registrisse. Registri digitaalne väljund on muundamise lõpp tulemus.

Kirjandus

- 1. Horowitz P., Hill W.** The art of Electronics. Cambridge University Press , 1998, 1999, 2000, 2001.
- 2. Maddok R.J., Calcutt D.M.** Electronics for Engineers. Longman Sc & Tech., 1994.
- 3. Paynter R.** Introductory electronic devices and circuits: electron flow version. – 6th ed., Prentice Hall, 2003.
- 4. Crecraft D.I., Gergely S.** Analog Electronics: Circuits, Systems and Signal Processing. Butterworth-Heinemann, 2002.
- 5. Green D.C.** Digital Electronics. – 5th ed., Longman Sc & Tech., 1999.
- 6. Tietze U., Schenk Ch.** Halbleiter Schaltungstechnik Springer - Verlag., Berlin, 1980.
- 7. Хоровиц П., Хилл У.** Искусство схемотехники. I, II, III, „Мир“ , 1993.
- 8. Титце У., Шенк К.** Полупроводниковая схемотехника. М., „Мир“ , 1982.
- 9. Прянишников В.А.** Электроника. Курс лекций. Корона прнт, СПБ., 2000.
- 10. Забродин Ю.С.** Промышленная электроника. М., „Высшая школа“, 1982.

- 11. Горбачев Г.Н. , Чаплыгин Е.Е.** Промышленная электроника. М., Энергофотомиздат, 1988.
- 12. Jssakov J., Platonov A. , Rudenko V.S jt.** Tööstuselektronika alused. Tallinn, “Valgus” , 1982.
- 13. Исаков Ю.А., Платонов А.П., Руденко В.С.** Основы промышленной электроники. Киев, „Техника“, 1976.
- 14. Kaganov J.** Tööstuselektronika. Tallinn, „Valgus“, 1972.
- 15. Основы промышленной электроники. Под ред. В.Г. Герасимова,** М., „Высшая школа“ , 1986.
- 16. Moorlat O.** Analoogintegraallülitused. – Tln. : Valgus, 1988.
- 17. Pihlau J.** Digitaalelektronika käsiraamat: Integraalsed loogikaelemendid. – Tln.: Valgus, 1985.
- 18. Abo L.** Raadiosedmete üksikosad. – Tln.: Valgus, 1981.
- 19. Abo L.** Raadiolülitused. – Tln.: Valgus, 1990.

Elektronika ja jõupooljuhttehnika / Valery Vodovozov, Raik Jansikene ; [tõlkinud Olaf Terno ; kaane kujundanud Ann Gornischeff] ; Tallinna Tehnikakõrgkool, elektriajamite ja jõuelektronika instituut
Tallinn : Tallinna Tehnikakõrgkooli Kirjastus, 2008 ([Tallinn] : Infotrükk)
139, [1] lk. koos kaanega : ill., portr. ; 30 cm
ISBN/ISSN: 9789985598252
EMUR, KMAR, RR, SKA, Tartu LR, TLÜAR, TTKR, TTÜR, TÜR

Elektrotehnika ja elektroonika / Raivo Pütsep ; [toimetanud Helen Kõrgesaar]
Tallinn : Ilo, 2008 ([Tallinn] : iloprint)
256 lk. : ill. ; 24 cm
ISBN/ISSN: 9789985578803
EMUR, KMAR, KV, RR, SKA, Tartu LR, TInKR, TLÜAR, TTKR, TTÜR, TÜR

Elektroonika [Võrguteavik] / [eessõna autor: Andres Taklaaja]
[Tallinn] : SA Innotest, 2007
E-ressurssid

Elektroonika : elektrooniline õpik / Raivo Pütsep
Tallinn : Tallinna Tehnikakõrgkool, 2005
120 lk. : ill. ; 20 cm + 1 CD-ROM
TTKR