10. Atenuaatorid ja RS-lülitid

IEE1560 – Raadiosageduslik elektroonika

Atenuaator

- **Atenuaator** (*attenuator*) on seade mille peamiseks funktsiooniks on seda läbiva signaali võimsuse vähendamine.
- Atenuaator leiab kasutamist:
  - Signaalinivoode balansseerimisel;
  - Süsteemi dünaamilise diapasooni laiendamiseks (AVR);
  - Impedantsi sobitamisel (takistuslik hargmik);
  - RS mõõtmistel;
  - …



- Atenuaatori sumbumus võib olla fikseeritud või muudetav. Sumbumust saab muuta saab kas pidevalt või astmeliselt. Tavaliselt toimub muutmine automaatselt kuid vajadusel saab teostada ka käsitsi.

Fikseeritud sumbumusega atenuaatorid

- Madalamatel sagedustel realiseeritakse fikseeritud sumbumusega atenuaatoreid takistite baasil.
- Kasutust leiab kolm peamist topoloogiat: П-, T- ja sillatud T (kujulised) atenuaatorid.
- Atenuaator peab summutama ülekantavat signaali ettenähud määral ning samal ajal tagama nii sisendi- kui väljundi sobituse. Seega on atenuaatori disaini lähteparameetriteks soovitav sumbumus $IL = -|S_{21}|$[dB] ning allika- ja koormuse takistused R_A ja R_K.
- Täiendavalt tuleb arvestada, et kogu sumbunud võimsus muudetakse atenuaatori komponentides soojuseks.

Näide – 50 W atenuaator



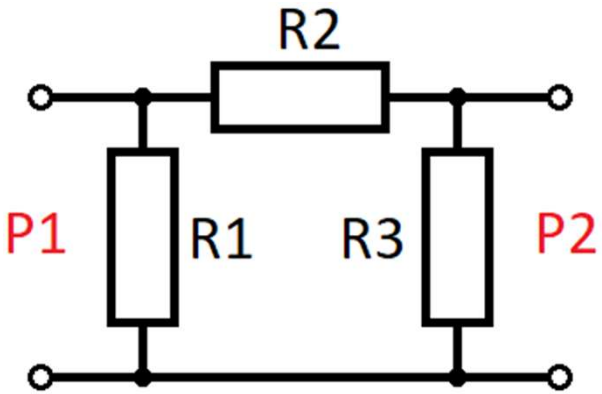
- Tootja: Rantelon;
- Sagedusriba: 0 – 3,5 GHz;
- Sisend- ja väljundimpedants: 50 Ω;
- Sumbumus: 30 +/- 1 dB;
- Maksimaalne sisendvõimsus: 50 W;
- Mõõtmed: 11,5 x 8,5 x 7,5 cm;
- Kaal 1,2 kg;
- Hind 250 EUR.

Joonis: https://rantelon.ee/en/product/rfa-30-50nn/

Π-atenuaator

- Joonisel kujutatud põhimõtteskeemiga atenuaatorit nimetatakse **Π-atenuaatoriks** (*Pi-pad attenuator*).
- Juhul kui allika ja koormuse takistused on võrdsed $R_A = R_K$ on atenuaator sümmeetriline: *R1* = *R3*.
- NB! Takistused on võrdsed, aga seda ei pruugi olla komponentide poolt talutavad võimsused!
- Arvutuste lihtsustamiseks teisendame esmalt vajaliku sumbumuse lineaarsetesse ühikutesse

$$K = 10^{\frac{IL}{20}}.$$



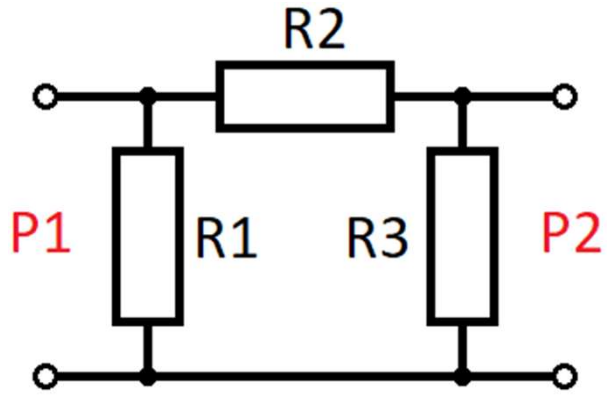
Π-atenuaator

- Nüüd leiame rööptakistuste väärtused

$$R1 = R3 = R_K \frac{K+1}{K-1}.$$

- Jadatakisti suurus

$$R2 = R_K \frac{K^2+1}{2K}.$$



- Sümmeetrilist versiooni pii-atenuaatorist, balansseeritud ahelates kasutamiseks, nimetatakse **O-atenuaatoriks** (*O-pad attenuator*).
- Sellisel seadmel jaotatakse R2 kaheks võrdseks osaks ja paigutatakse sümmeetriliselt portide ülemiste ja alumiste klemmide vahele.

Π-atenuaator

- Lisaks signaali summutamisele saab atenuaatoriga täiendavalt teostada ka sobitamist.
- Kui allika ja koormuse takistused ei ole võrdsed, siis on erinevad ka kõigi kolme atenuaatori takisti väärtused:

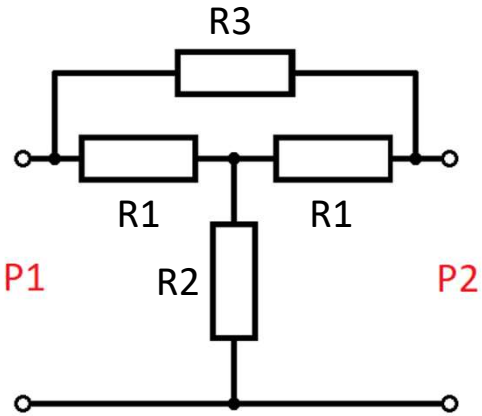
$$R1 = R_A \frac{K^2 - 1}{K^2 - 2K\sqrt{\frac{R_A}{R_K}} + 1}; \quad R3 = R_K \frac{K^2 - 1}{K^2 - 2K\sqrt{\frac{R_K}{R_A}} + 1}.$$

- Jadatakisti väärtus on nüüd:

$$R2 = \sqrt{R_A R_K}\,\frac{K^2 - 1}{2K}.$$

Sillatud T-atenuaator

- Neljast takistist koosnev **sillatud T-atenuaator** (*bridged-T attenuator*).
- Saab kasutada ainult võrdsete allika- ja koormuse väärtuste korral ($R_A = R_K$).
- Kaks komponenti tagavad sobituse, kaks ülejäänut määravad sumbumuse.
- Kahte parameetrit saab muuta teineteisest sõltumatult.
- Sobib muudetava sumbumusega atenuaatorite realiseerimiseks.



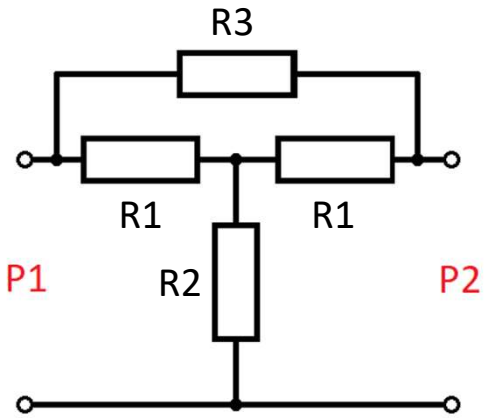
Sillatud T-atenuaator

- Takisti R1 takistus on lihtsalt võrdne allika ja koormuse omaga:

$$R1 = R_A = R_K.$$

- Ülejäänud kaks takistust leiame kui

$$R2 = \frac{R1}{K-1},$$
$$R3 = R1(K-1).$$

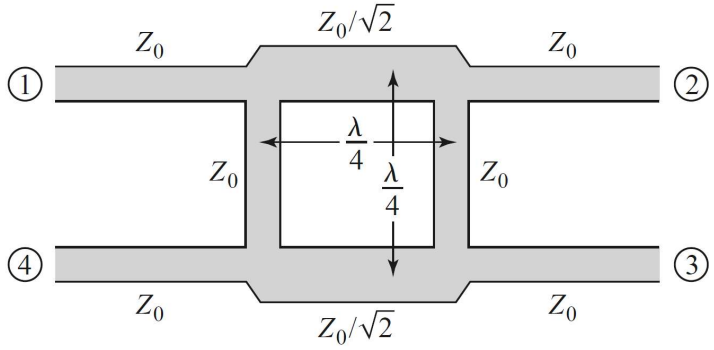


Teisi atenuaatorite topoloogiaid

- Kõige lihtsam on kahest takistist koosnev **L-atenuaator** (*L-pad attenuator*). ehk lihtsalt pingejagur. Puudusena ei saa tagada korraga allika- ja koormuse sobitust. Sümmeetrilist, balansseeritud, versiooni tuntakse **U-atenuaatorina** (*U-pad attenuator*).
- Pii-atenuaatori asemel võib kasutada **T-atenuaatorit** (*T-pad attenuator*). millel on kaks jada- ja üks rööptakisti. Saab samuti koostada balansseeritud versioonina ehk nn **H-atenuaatorina** (*H-pad attenuator*).

Peegelduspõhine atenuaator

- Atenuaatoreid saab realiseerida ka kvadratuursete hargmike põhjal.
- Kaks võimaliku versiooni on ühe hargmikuga **peegelduspõhine atenuaator** (*reflection attenuator*) ja kahe hargmikuga **balansseeritud atenuaator** (*balanced attenuator*).
- Meenutame kvadratuurse hargmiku ehitust ja hajuparameetreid:



$$\mathbf{S} = \frac{-1}{\sqrt{2}}\begin{bmatrix} 0 & \mathrm{j} & 1 & 0 \\ \mathrm{j} & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & \mathrm{j} \\ 0 & 1 & \mathrm{j} & 0 \end{bmatrix}.$$

Joonis: D. M. Pozar, Microwave Engineering, Fourth Edition, John Wiley & Sons, Inc, 2012.

Peegelduspõhine atenuaator

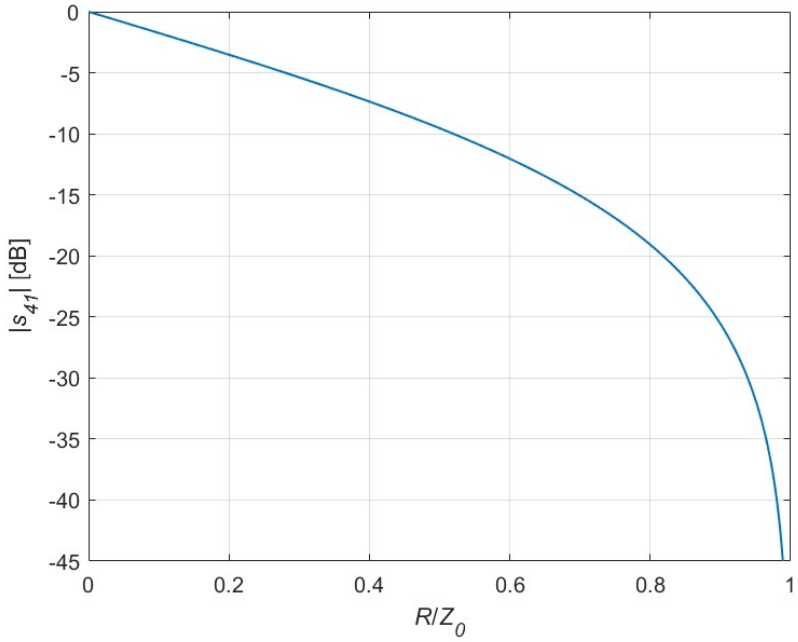
- Nii läbiva- kui sidestatud pordi külge ühendatakse võrdsed takistid *R*. Summutatud väljundsignaal võetakse isoleeritud pordist *P4*.
- Kui takistite väärtus erineb hargmiku lainetakistusest Z_0 siis peegeldub mõlemast väljundist osa signaali tagasi, peegeldustegur

$$\Gamma = \frac{R - Z_0}{R + Z_0}.$$

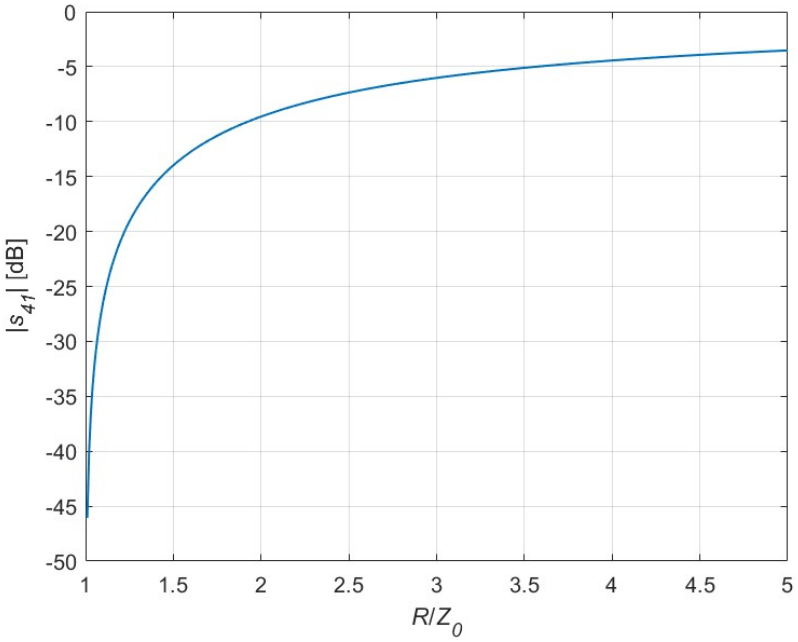
- Saab näidata, et ülekanne $T = S_{41} = j\Gamma$ ja sumbumus on seega $-20\log(|\Gamma|)$.
- Muutes *R* väärtust saame muuta atenuaatori sumbumust.

Peegelduspõhine atenuaator

$R < Z_0$



$R > Z_0$



Peegelduspõhine atenuaator

- Soovitud peegeldusteguri moodulit saab realiseerida kahe erineva *R* väärtuse juures. Kui $R < Z_0$ siis

$$R = Z_0 \frac{K-1}{K+1}.$$

- Kui aga $R > Z_0$

$$R = Z_0 \frac{K+1}{K-1}.$$

- Mõlemal juhul

$$K = 10^{\frac{-|S_{41}|\,[\mathrm{dB}]}{20}}.$$

- Skeem sobib hästi muudetava sumbumusega atenuaatorite realiseerimiseks.
- Puuduseks on kasutatava hübriidsilla piiratud ribalaius.

Lainejuht atenuaatorina



Lainejuht

- **Lainejuht** (*waveguide*) on struktuur lainete, minimaalsete ülekandekadudega, suunatud juhtimiseks.
- Elektromagnetlainete suunamiseks kasutatav lainejuht võib koosneda ühest või mitmest juhist või ka ainult dielektrilistest materjalidest.
- Analüüsi seisukohast koosneb kõige lihtsam lainejuht kahest paralleelsest juhtivast plaadist millede vahet täidab dielektrik.

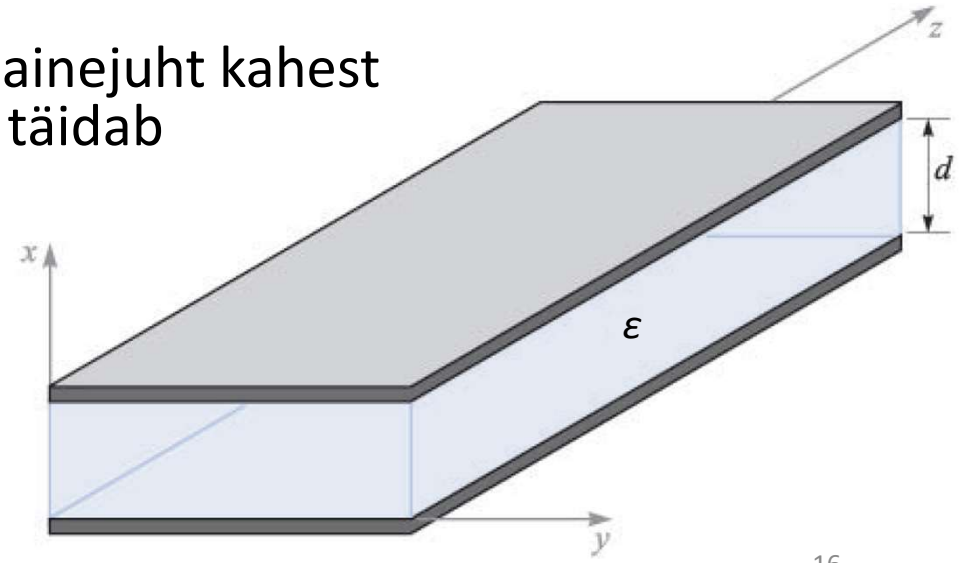


Figure: W.H. Hayt, J.A. Buck. Engineering Electromagnetics, 6th edition.

Lainejuhi lõikesagedus

- Paljudel lainejuhtidel eksisteerib alumine sageduspiir, millest madalama sagedusega signaal lainejuhis levida ei saa. Vaadeldava lainejuhi korral on see piir – **lõikesagedus** leitav kui

$$f_{lm} = \frac{mc}{2nd}.$$

- Avaldises kasutatavad muutujad on: *c* – valguse kiirus vaakumis, *m* – moodi number $m \in \mathbb{N}$, *d* lainejuhi plaatide vahekaugus ja *n* plaatide vahelise dielektriku murdumisnäitaja

$$n = \sqrt{\varepsilon_r}.$$

Lainejuhi faasikonstant

- Vaadeldava lainejuhi faasikonstant

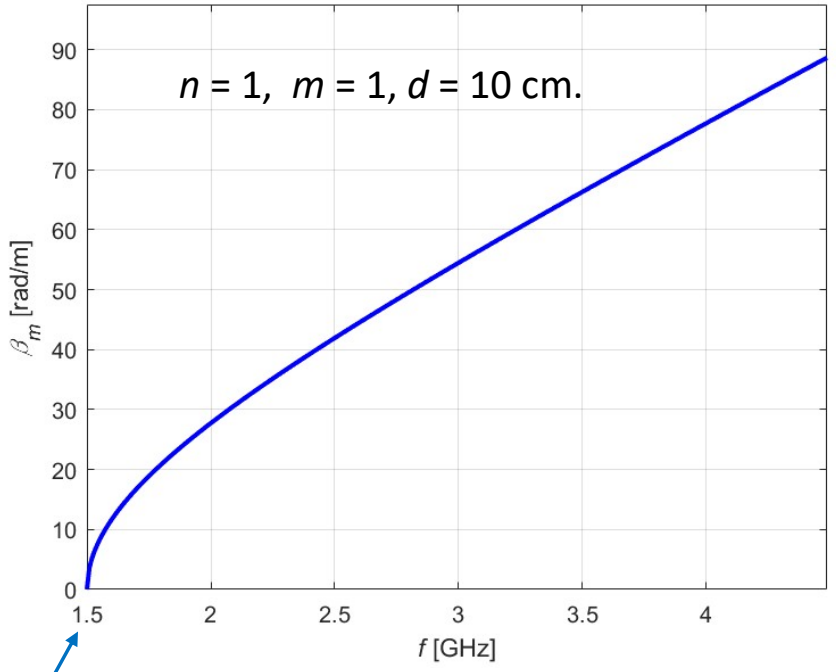
$$\beta_m = \frac{2\pi n f}{c}\sqrt{1-\left(\frac{f_{lm}}{f}\right)^2}\,.$$

- Grupikiirus

$$v_{gm} = \frac{c}{n}\sqrt{1-\left(\frac{f_{lm}}{f}\right)^2}\,.$$

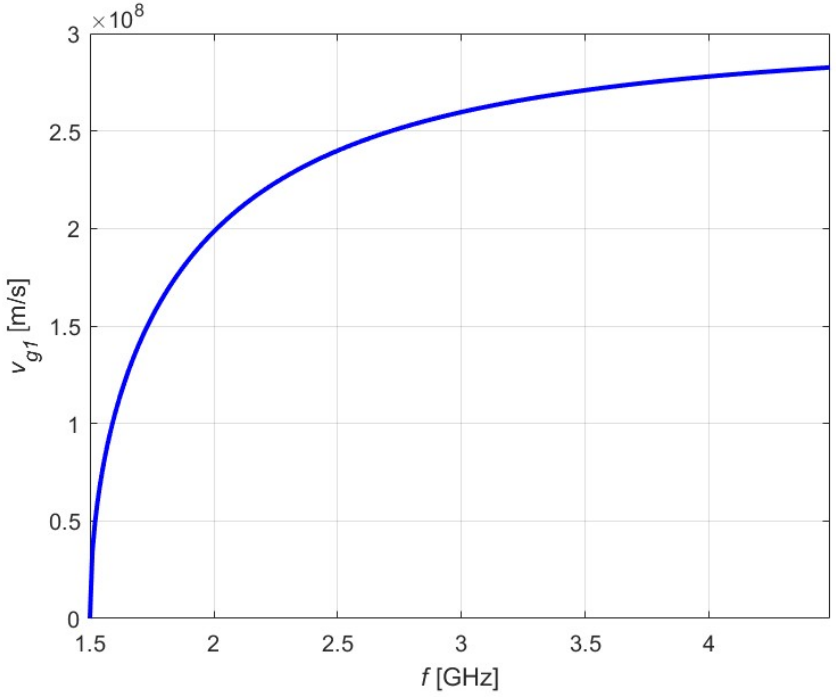
- Grupihilistus lainejuhis pikkusega L:

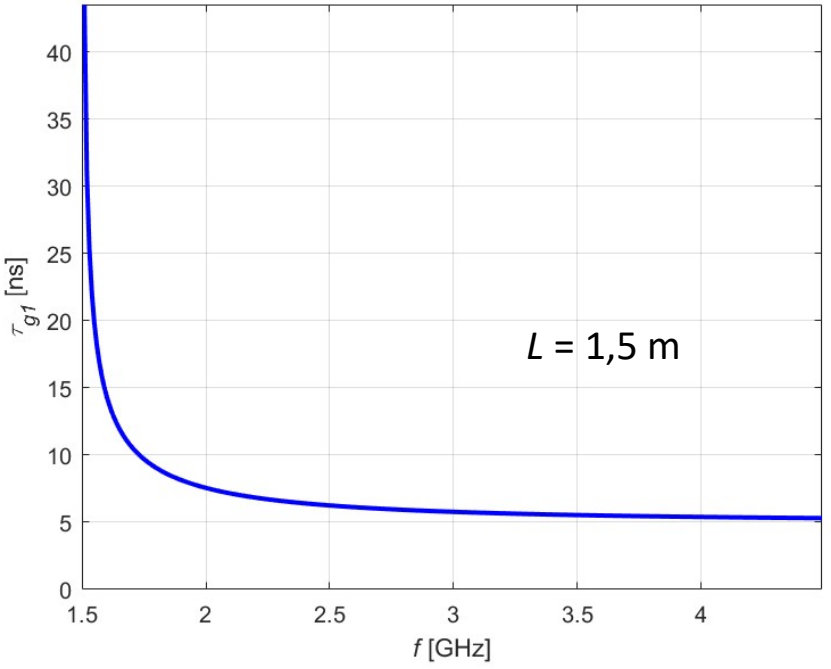
$$\tau_{gm} = \frac{L}{v_{gm}}.$$



f_{l1} = 1,5 GHz

Grupikiirus- ja grupihilistus





Lainejuht atenuaatorina

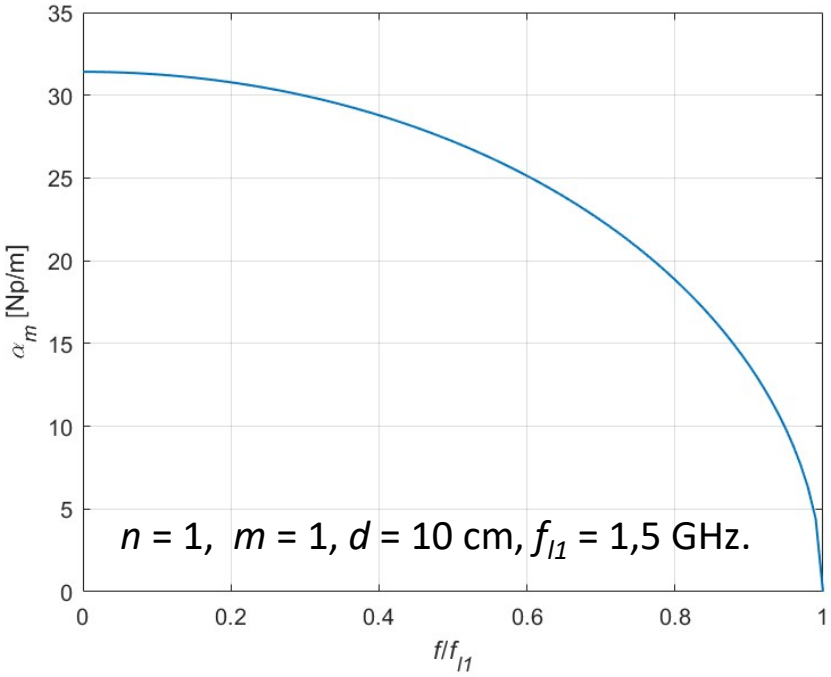
- Kui signaali sagedus f on lõikesagedusest f_{l1} madalam ($f < f_{l1}$) muutub faasikonstandi β_m väärtus imaginaarseks.
- Viimane on ekvivalentne mittenullise sumbeteguriga: $-j|\beta_m| = -j\alpha_m$.
- Seega sellisel juhul on lainejuhi sumbetegur

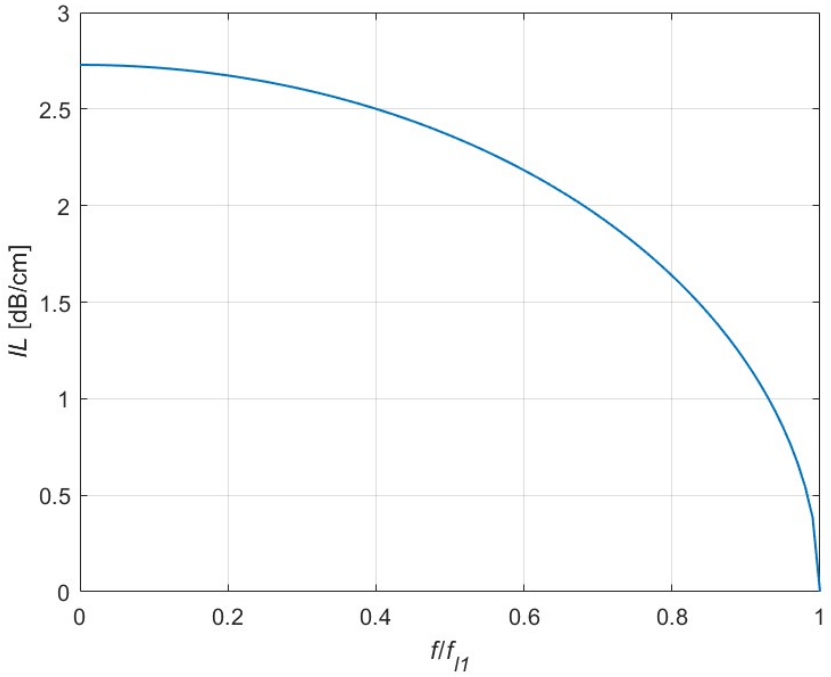
$$\alpha_m = \frac{2\pi n f_{lm}}{c}\sqrt{1-\left(\frac{f}{f_{lm}}\right)^2}.$$

- Pikkusega L lainejuhi sumbumus on seega $L\alpha_m$ Np, või detsibellides

$$IL = 8{,}686 L\alpha_m.$$

Lainejuht atenuaatorina





Kõrgsageduslülitid

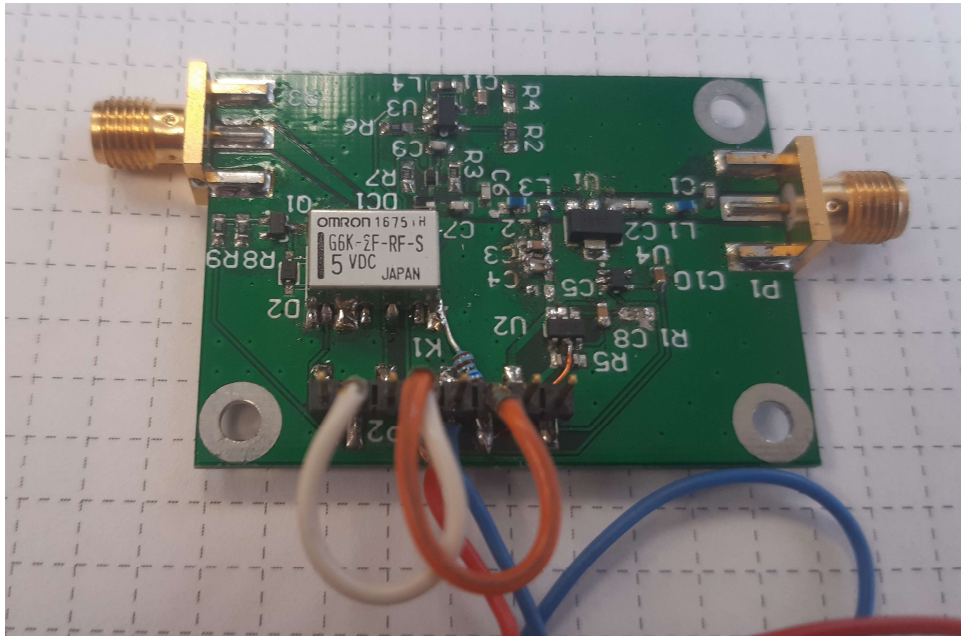


Foto: https://static.rapidonline.com/

Kõrgsageduslülitid

- Kõrgsagedusahelates võib tekkida vajadus signaalide või komponentide ümberlülitamiseks:
  - Antenni jagamine saatja- ja vastuvõtja vahel;
  - Filtrite- või filtrikomponentide ümberlülitamine;
  - Elektrooniliselt tüüritavate antennide suunadiagrammide muutmine;
  - Testseadmetes ahelate ümberlülitamine;
  - …
- Manuaalne ümberlülitamine ei ole enamasti sobilik lahendus.
- Automaatseks ümberlülitamiseks saab kasutada kas elektromehaanilisi (releed) või elektroonilisi RS-lüliteid.

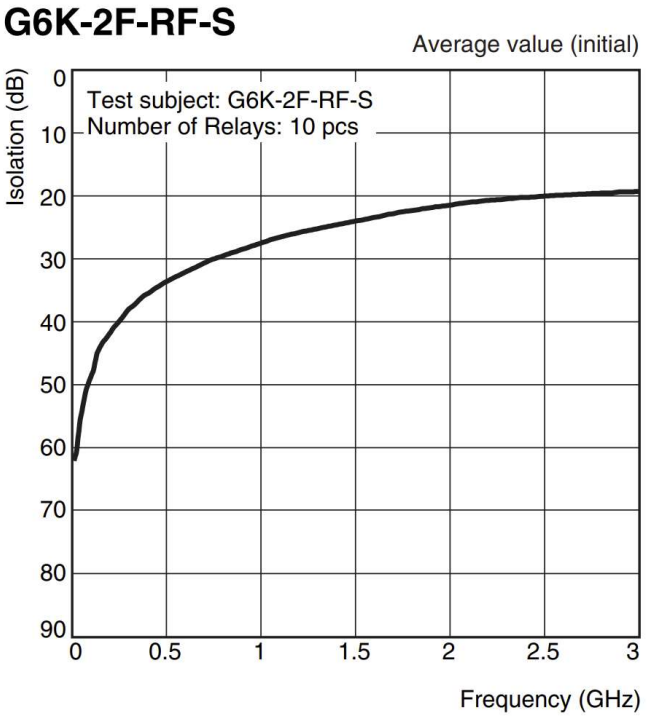
Näide – RS relee G6K-2F-RF-TR03

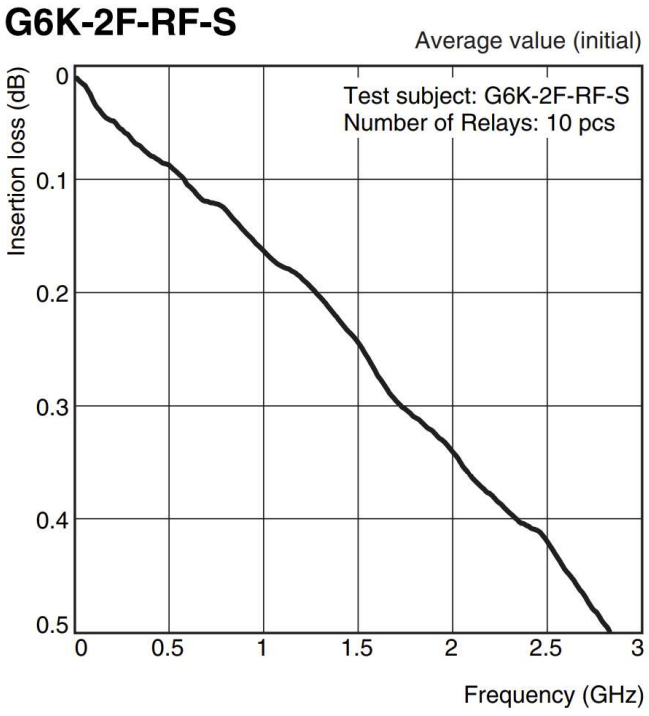


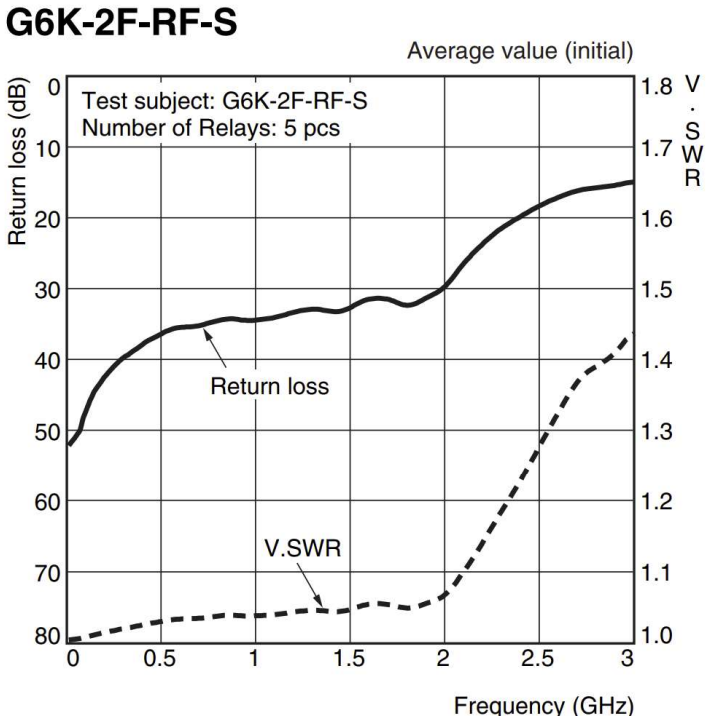
- Sagedusvahemik: 0 - 3 GHz;
- Maksimaalne sisendvõimsus: + 3 W;
- Toitepinge: 3…24 V;
- Võimsustarve: ≈ 100 mW;
- Mõõtmed: 10,3 x 6,9 x 5,4 mm;
- Isolatsioon vähemalt 20 dB;
- Ümberlülitumiseks kuluv aeg: 3 ms.

Andmeleht: https://www.mouser.ee/datasheet/2/307/en-g6k_2f_rf-536501.pdf

Näide – RS relee G6K-2F-RF-TR03

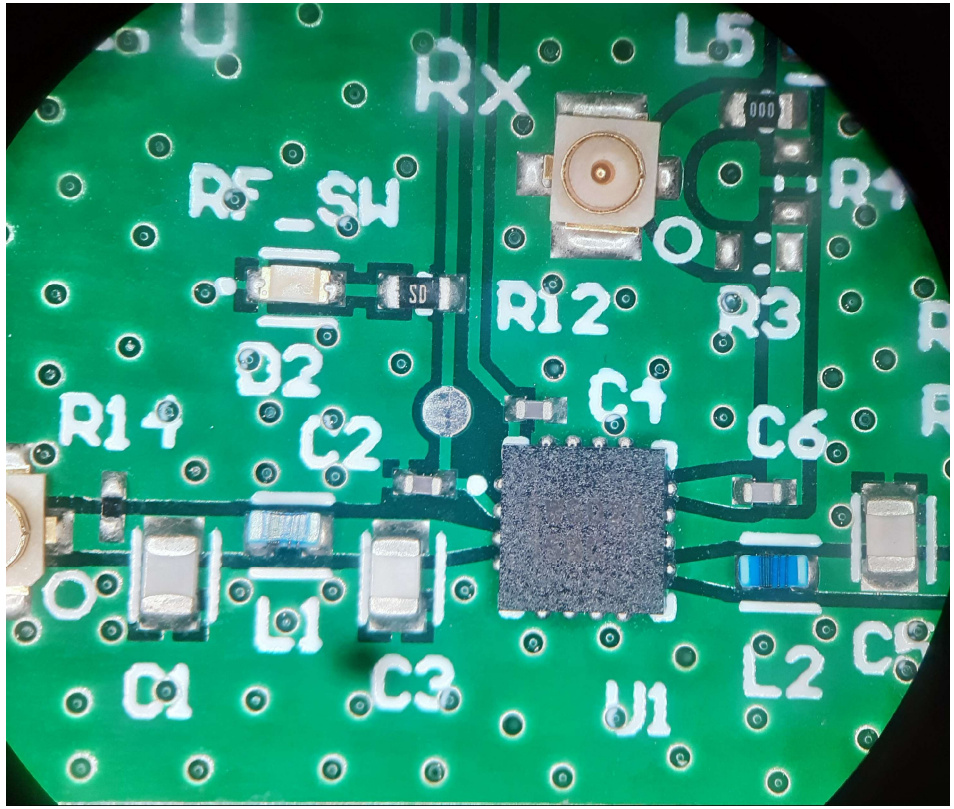


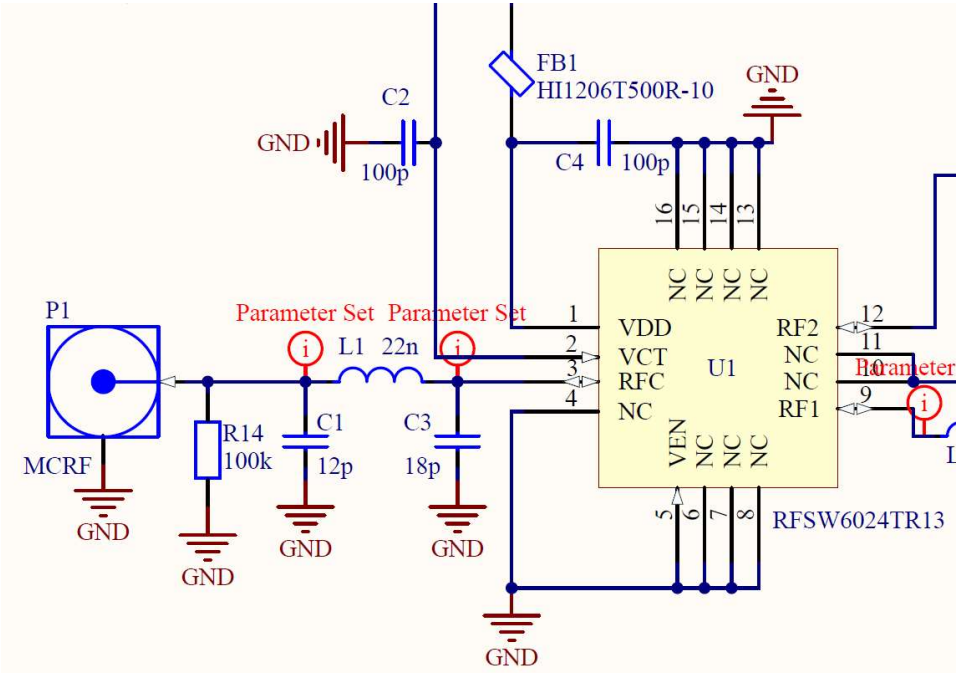




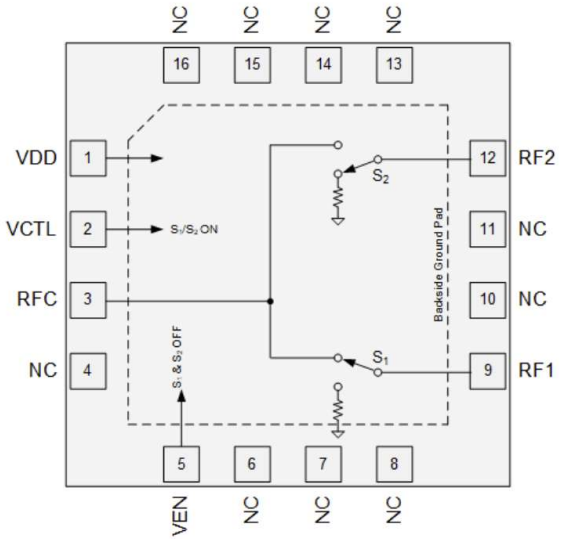
Andmeleht: https://www.mouser.ee/datasheet/2/307/en-g6k_2f_rf-536501.pdf

Näide – RS lüliti RFSW6024TR13





Näide – RS lüliti RFSW6024TR13

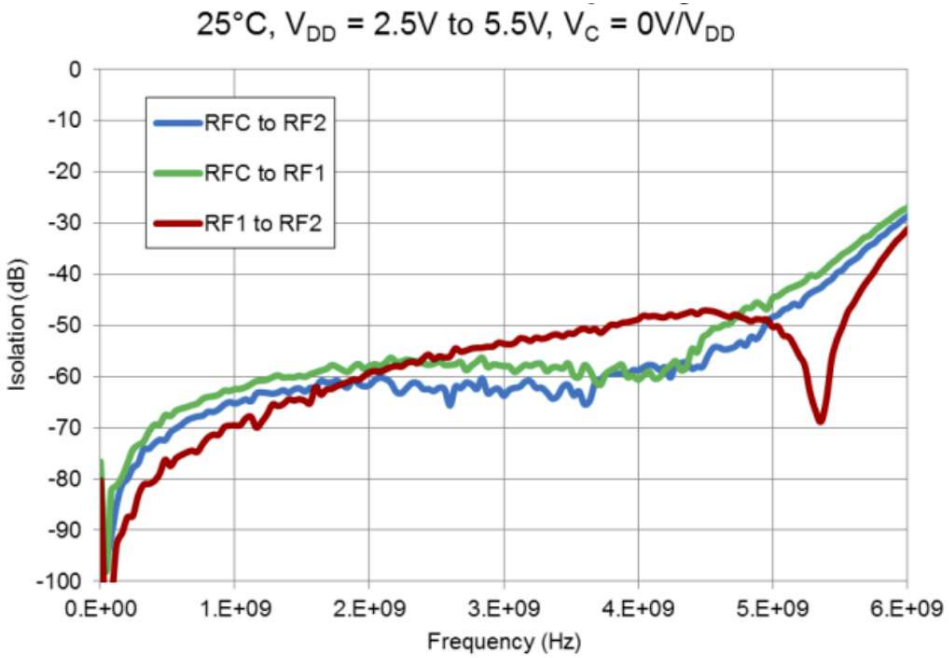


- Sagedusvahemik: 5 -6000 MHz;
- Maksimaalne sisendvõimsus: + 36 dBm;
- Toitepinge: 2,5…5,5 V;
- Toitevool (5 V toide): 200 µA;
- Sisendi IP3: + 66 dBm;
- Isolatsioon kuni 60 dB;
- Sisestuskadu: 0,55 ja 1,1 dB vahel;
- Ümberlülitumiseks kuluv aeg: 250..600 ns.

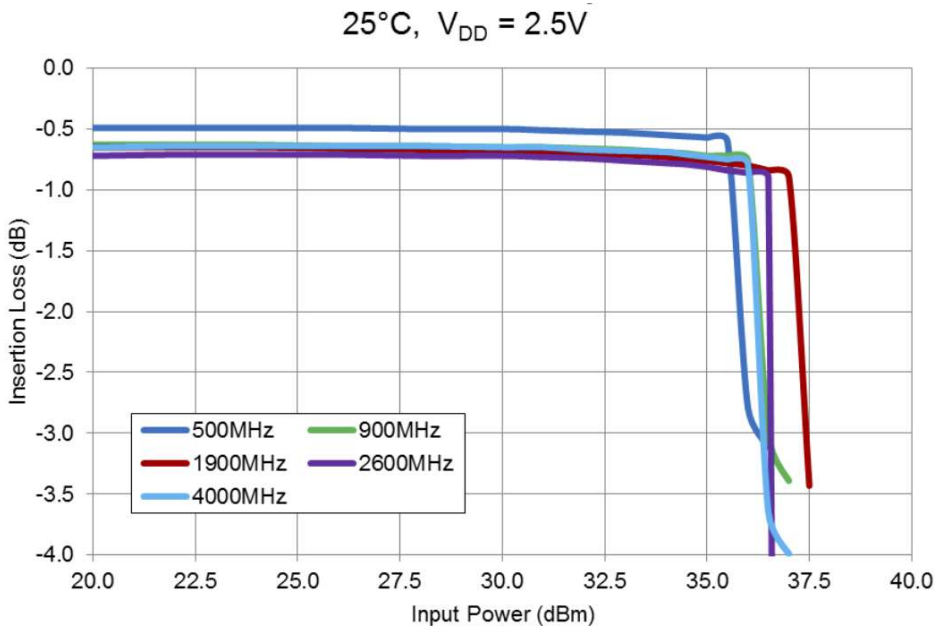
Andmeleht: https://www.mouser.ee/datasheet/2/412/RFSW6024_Data_Sheet-1500569.pdf

Näide – RS lüliti RFSW6024TR13

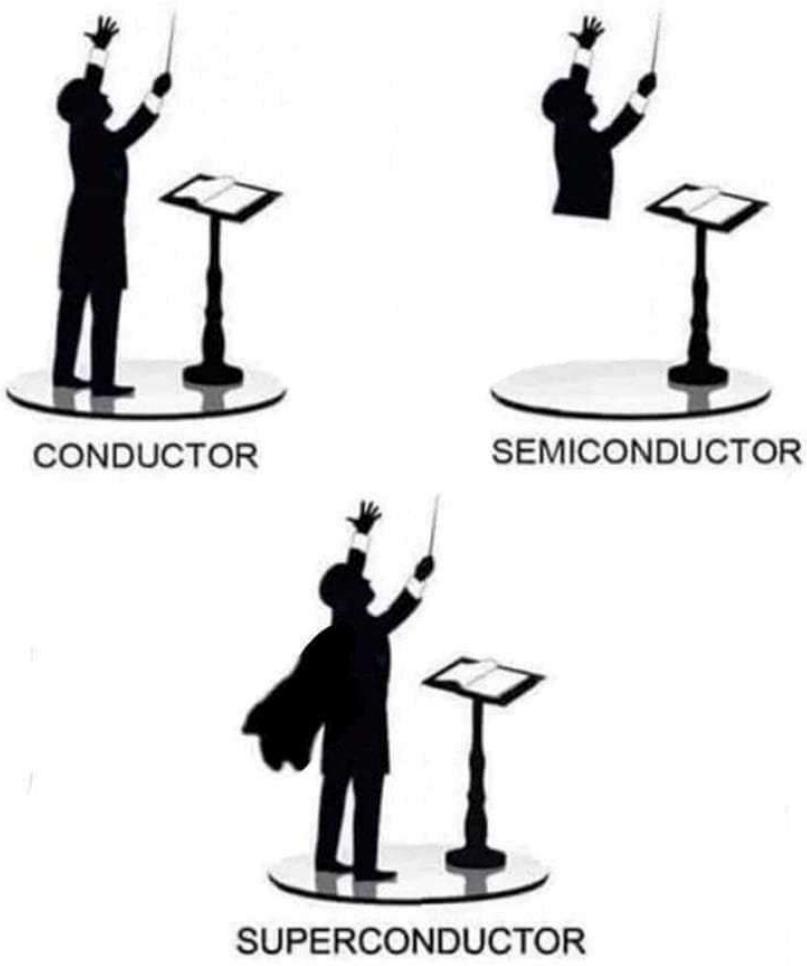
Isolatsioon



Sisestuskadu *IL*



Andmeleht: https://www.mouser.ee/datasheet/2/412/RFSW6024_Data_Sheet-1500569.pdf


CONDUCTOR
SEMICONDUCTOR
SUPERCONDUCTOR

Pooljuhtdioodid



Foto: https://www.agsdevices.com/types-of-diodes/

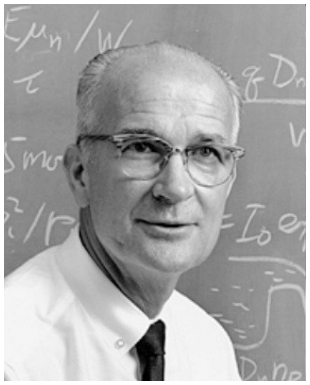
Pooljuhtdioodide liigid ja rakendused

- Alaldusdiood;
- Piiramisdiood;
- Stabilitron ehk zenerdiood;
- Schottky diood;
- PIN diood;
- Mahtuvdioodid (varikapid) ja varaktorid;
- Gunn’i diood;
- Tunneldiood;
- Valgusdiood (LED);
- Fotodiood;
- …



- Pinge alaldamine;
- Pinge stabiliseerimine;
- Moduleerimine- ja demoduleerimine;
- Sageduse kordistamine ja sagedusmuundus;
- Lülitamine;
- Vooluga tüüritav takistus (atenuaatorid ja lülitid);
- Pingega tüüritav mahtuvus (filtrid- ja ostsillaatorid);
- Signaalide genereerimine ja võimendamine;
- …

Shockley dioodi valem



William Bradford Shockley Jr.

- Dioodi pinge-voolu (UI) karakteristik

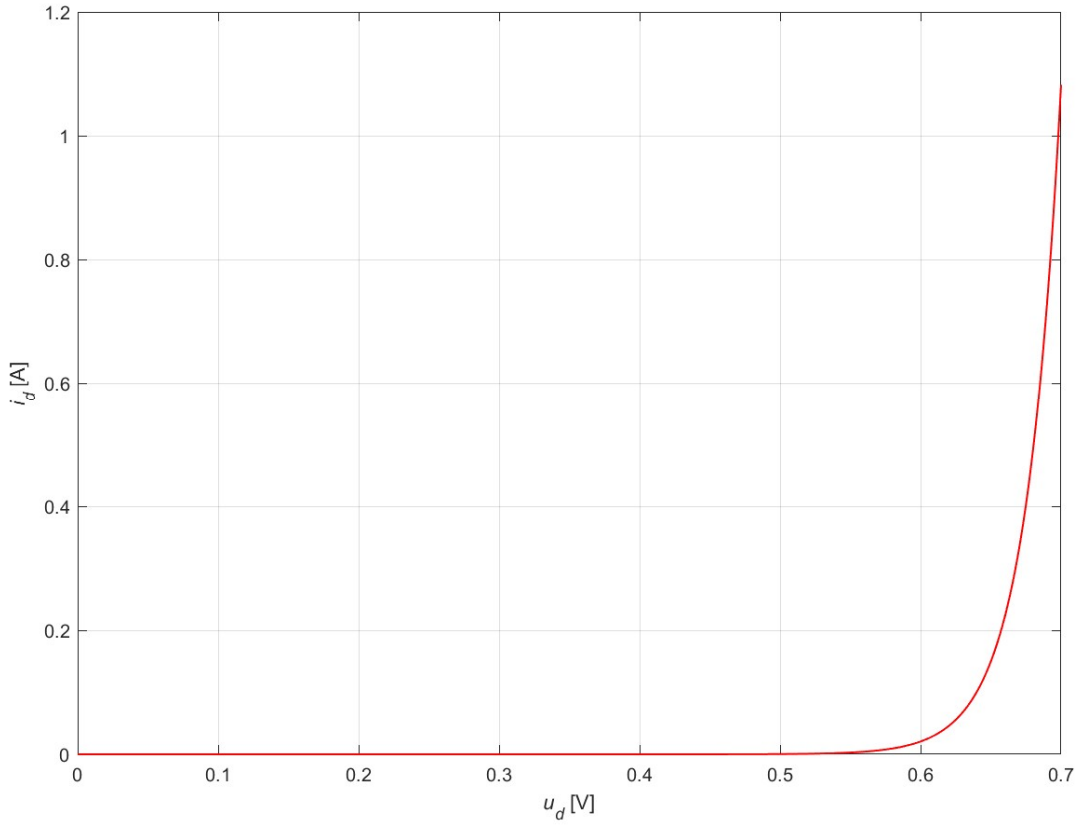
$$i_D = I_{küll}\left(e^{\frac{u_D}{nU_T}} - 1\right) = I_{küll}\left(e^{\frac{q_e u_D}{nkT}} - 1\right).$$

- Avaldises tähistab:
  - i_D dioodi läbiva voolu tugevust dioodi otstel oleva pinge u_D korral;
  - n – on ideaalsustegur (*ideality factor*), tavaliselt on väärtus vahemikus ühest kaheni, ideaalse dioodi korral võrdne ühega;
  - $I_{küll}$ on vastupingestatud dioodi küllastusvool, pikoamprite suurusjärgus;
  - U_T on termopinge (toatemperatuuril u 25 mV):

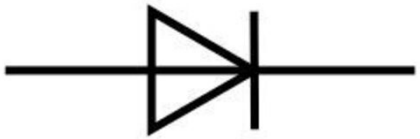
$$U_T = \frac{kT}{q_e},$$

  - kus k = 1,38·10^{-23} J/K on Boltzmanni konstant, T dioodi absoluutne temperatuur K ja q_e on elementaarlaeng 1,6·10^{-19} C.

Shockley dioodi valem



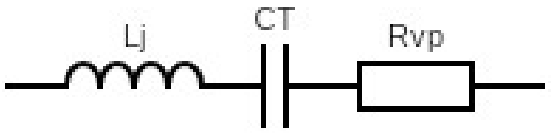
PIN diood



- **PIN diood** (*PIN diode*) erineb tavalisest pn-dioodist selle poolest, et p ja n juhtivusega kihtide vahel on täiendavalt, ilma lisanditeta, puhas pooljuht (*intrinsic semiconductor*).
- Täiendava i-kihi tõttu on vastupingestatud olekus taolise dioodi siirete vaheline parasiitmahtuvus väga väike.
- Päripingestatud PIN dioodi aktiivtakistus kõrgsageduslikule vahelduvvoolule sõltub pärivoolust. Tegemist on **vooluga tüüritava takistiga**.
- Neid PIN dioodi omadusi saab kasutada nii RS atenuaatorite kui ka lülitite koostamiseks.

PIN dioodi aseskeem

- Vastupingestatud PIN diood on oma olemuselt väikese mahtuvusega kondensaator.

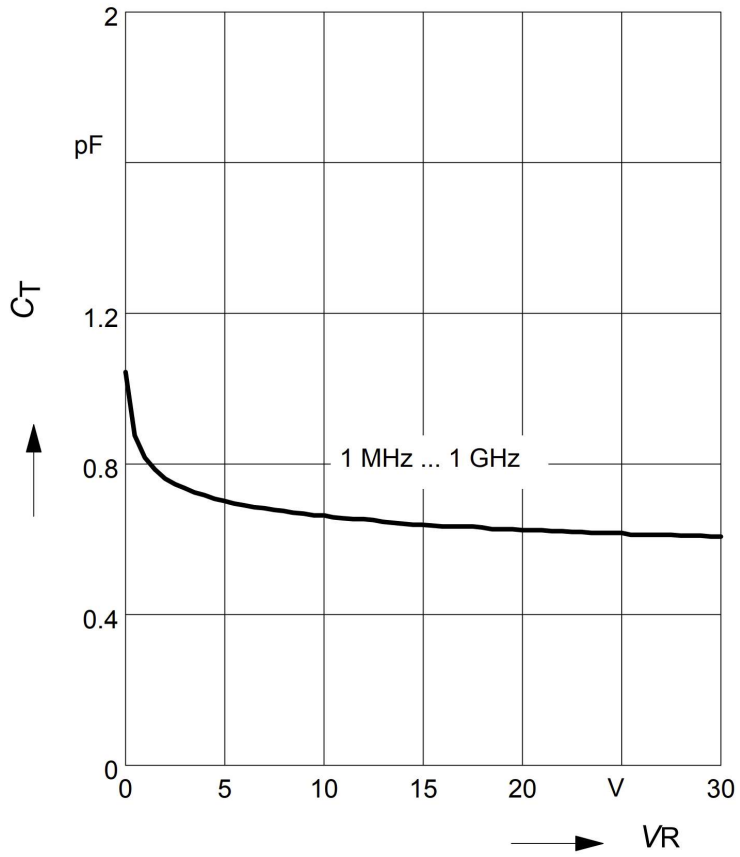


- Päripingestatud PIN diood on väikese takistusega takisti.

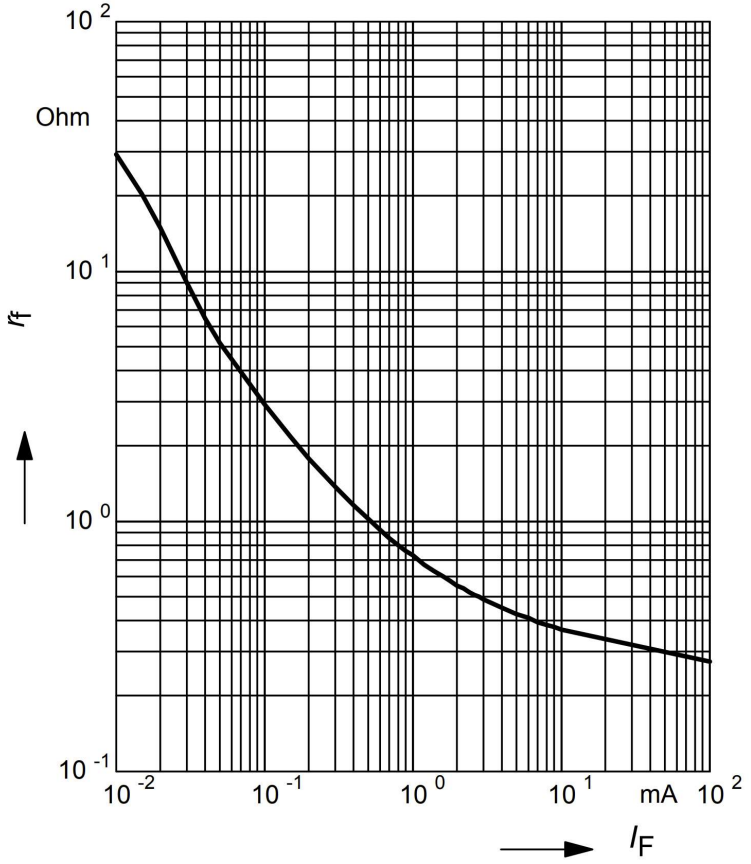


Näide – PIN diood BA592

Siirde mahtuvus

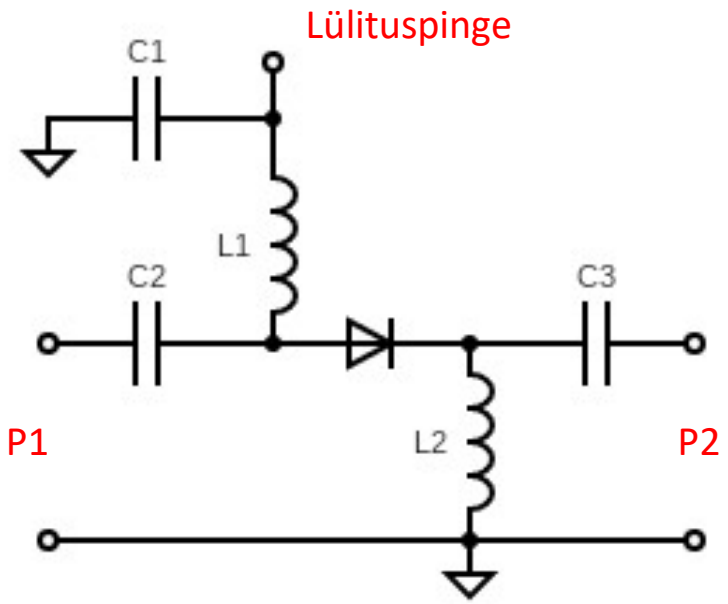


Päritakistus f = 100 MHz



Andmeleht: https://www.mouser.ee/datasheet/2/196/ba592_ba892series-87652.pdf

Jadamisi PIN dioodiga RS lüliti



- Lülitusdiood on sisendi (P1) ja väljundi (P2) vahel jadamisi.
- Tüürpinge kõrge väärtuse korral on diood avatud ja lüliti suletud olekus. Sisestuskadu on minimaalne.
- Tüürpinge negatiivse väärtuse korral on diood suletud ja lüliti avatud olekus. Sisestuskadu on maksimaalne.

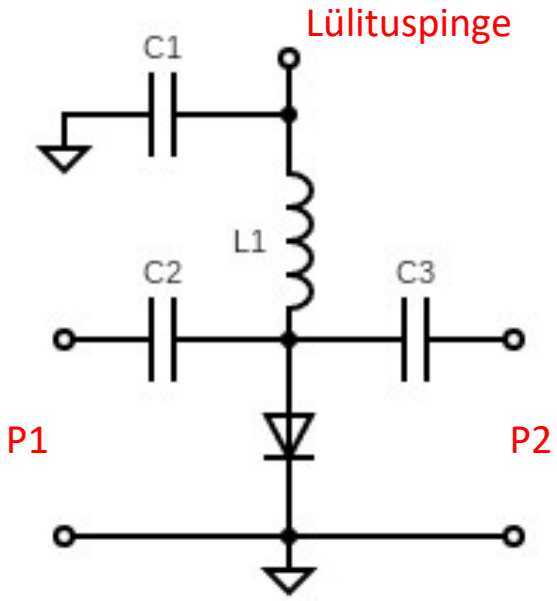
PIN dioodiga lüliti

- Ühte lülitusdioodi on võimalik ühendada allika ja koormuse vahele nii jadamisi kui ka rööbiti.
- Lüliti peamisteks parameetriteks on sisestuskadu *IL* avatud- ja suletud lüliti korral. Esimesel juhul on tegemist **isolatsiooniga** ja teisel juhul **ülekandega**.
- Sisestuskadu jadakonfiguratsioonis lüliti korral

$$IL = -20\log\left|\frac{2Z_0}{2Z_0 + Z_d}\right|,$$

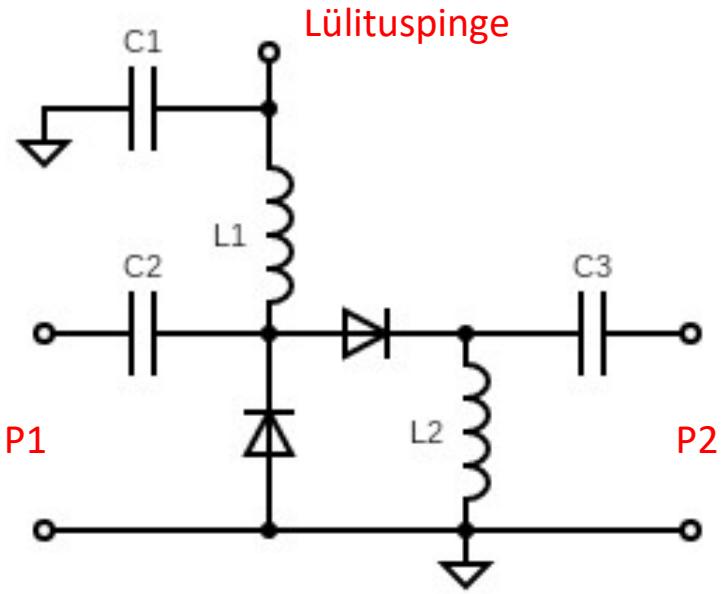
kus Z_d on dioodi impedants. Avatud lüliti korral on siis tegemist päripingestatud- ja suletud lüliti korral vastupingestatud dioodi omaga.

Rööbiti PIN dioodiga RS lüliti



- Lülitusdiood on sisendi (P1) ja väljundi (P2) vahel rööbiti.
- Tüürpinge kõrge väärtuse korral on diood avatud ja sisendsignaal maaga lühistatud. Sisestuskadu on maksimaalne.
- Tüürpinge negatiivse väärtuse korral on diood ja lüliti mõlemad suletud olekus. Sisestuskadu on minimaalne.

Kahe PIN dioodiga RS lüliti



- Kahe varasemalt vaadeldud lahenduse kombinatsioon.
- Tagab avatud lüliti korral suurema isolatsiooni.

Lisamaterjal

- Electronics Tutorials, Passive Attenuators. https://www.electronics-tutorials.ws/attenuators/attenuator.html, 04.11.2026
- EverythingRF, RF Attenuator Calculator | Pi and Tee Attenuator Calculator - everything RF, 04.11.2026
- Electronics Tutorials, Bridged-T Attenuator Tutorial for Passive Attenuators, 04.11.2026
- Infineon, PIN diodes in RF switch applications, https://www.infineon.com/assets/row/public/documents/30/42/infineon-an-1809-pl32-1810-172154-pin-diodes-in-rf-sw-applications-applicationnotes-en.pdf, 04.11.2026
- DigiKey, How and Why to Use PIN Diodes for RF Switching | DigiKey, 04.11.2026
- Avago. AN 1048 A Low-Cost Surface Mount PIN Diode π Attenuator. AN1048.pdf, 04.11.2026

