

11. RS võimendi väikese signaali režiimis

IEE2560 – Raadiosageduslik elektroonika

Aktiivelemendi valik

„The more time you spend shopping prior to the start of the actual design, the less hair-pulling there will be later.“

C. Bowick

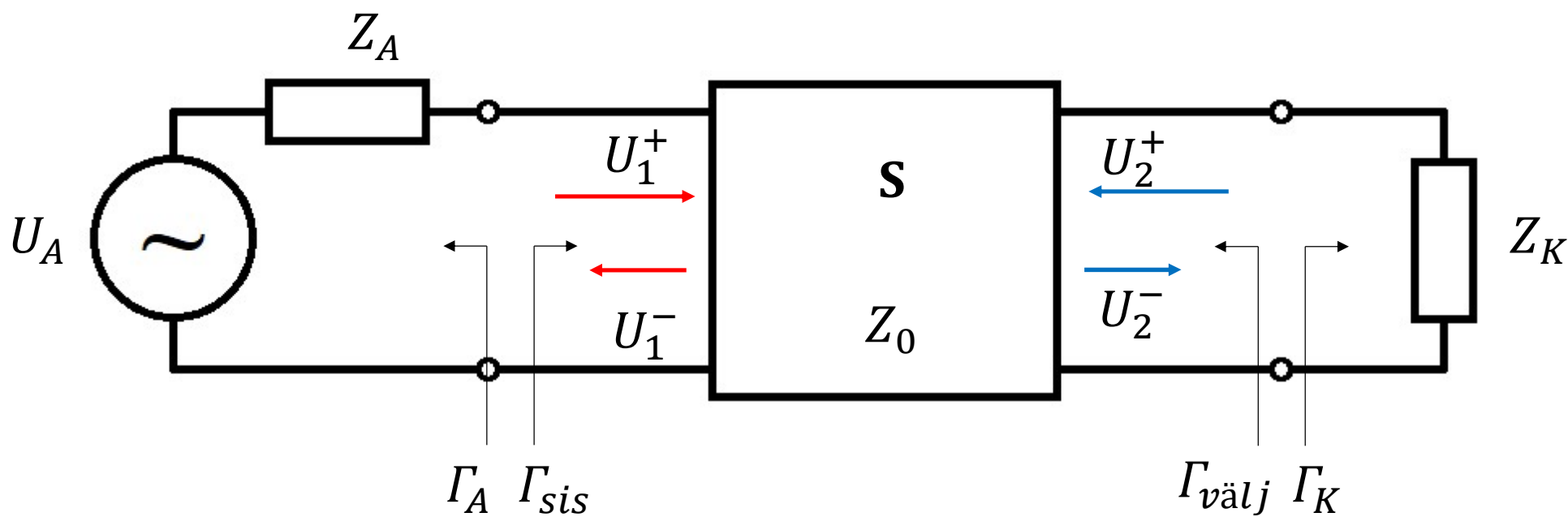


RS- võimendi disain hajuparameetrite baasil

- Disain algab sobiva transistori valikuga ja lähtetööpunkti määramisega.
- Järgnevalt on vaja teada transistori hajuparameetrite väärtuseid valitud tööpunktis:
 - Leida andmelehelts;
 - Laadida alla s-parameetrite fail (.s2p);
 - Koostada makett ja leida parameetrid mõõtmise teel.
- Edasiste arvutuste jaoks on vaja leida transistori S-parameetrite maatriksi determinant

$$D_s = \begin{vmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{vmatrix} = s_{11}s_{22} - s_{12}s_{21}.$$

Kakspordi ülekanne



$$\Gamma_A = \frac{Z_A - Z_0}{Z_A + Z_0}$$

$$\Gamma_K = \frac{Z_K - Z_0}{Z_K + Z_0}$$

Astme võimendus

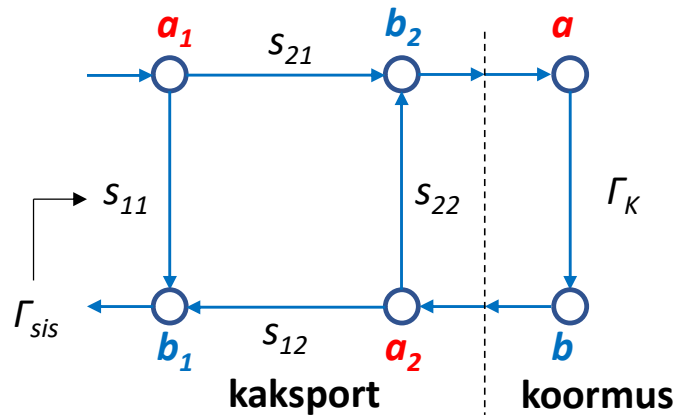
- Raadiosagedusliku kaksporti võimenduse kirjeldamiseks on kasutusel mitmeid erinevaid suuruseid.
- **Võimsusvõimendus** (*Power Gain*) on defineeritud kui koormusele Z_K antava võimsuse P_K suhe kaksporti sisendisse antavasse võimsusesse P_{sis} :

$$G = \frac{P_K}{P_{sis}} = \frac{|s_{21}|^2(1 - |\Gamma_K|^2)}{(1 - |\Gamma_{sis}|^2)|1 - s_{22}\Gamma_K|^2}.$$

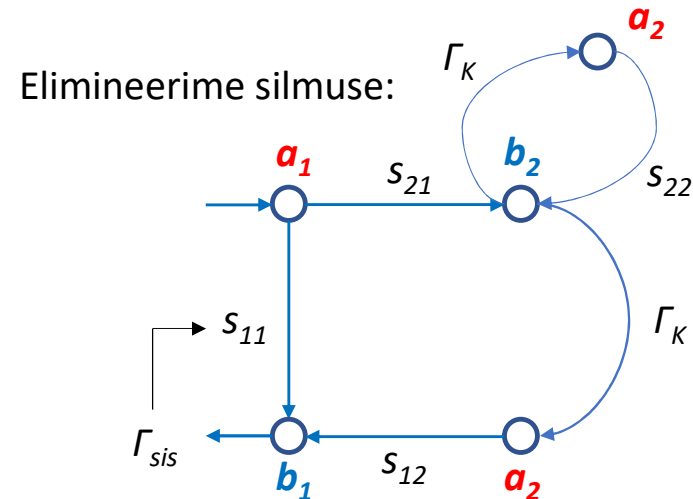
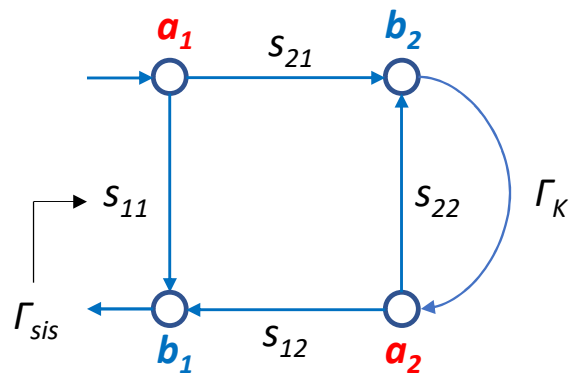
- Koormatud kaksporti sisendi peegeldustegur Γ_{sis} on signaaligraafi põhjal üsna hõlpsasti leitav kui

$$\Gamma_{sis} = s_{11} + \frac{s_{12}s_{21}\Gamma_K}{1 - s_{22}\Gamma_K}.$$

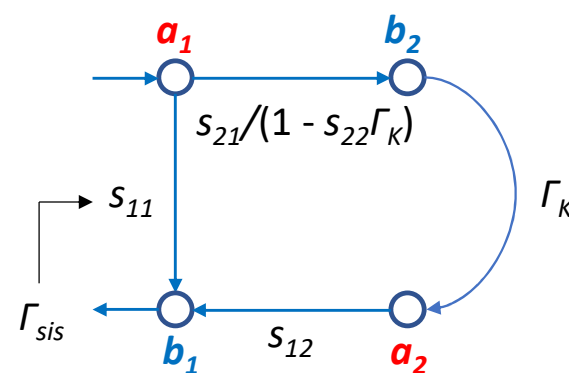
Koormatud kakspordi sisendi peegeldustegur



Rakendame jadareeglit:

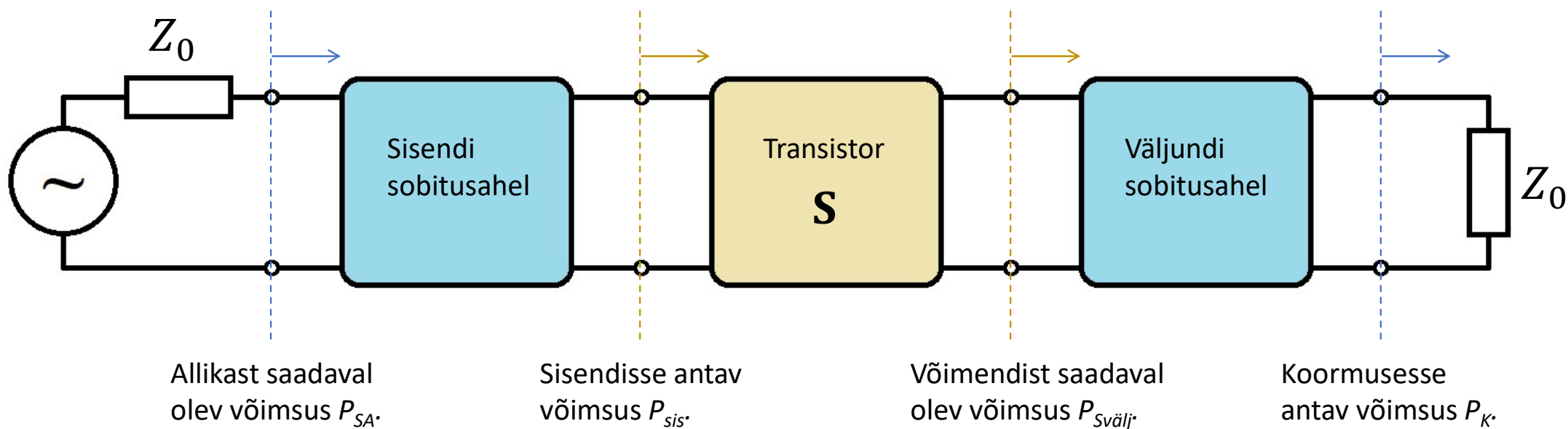


Rakendame rööpreeglit:



$$\Gamma_{sis} = s_{11} + \frac{s_{12}s_{21}\Gamma_K}{1 - s_{22}\Gamma_K}$$

Transistorvõimendi üldistatud skeem



Astme võimendus

- **Võimalik võimendus** (*Available power gain*) G_A on kakspondist **saadaval oleva võimsuse** (*available power*) $P_{Svälj}$ suhe allikast saadaval olevasse võimsusesse P_{SA} . Ehk teisisõnu võimendus olukorras kus nii allikas kui koormus on võimendiga sobitatud ($Z_{sis} = Z_A^*$ ja $Z_{välj} = Z_K^*$):

$$G_A = \frac{P_{Svälj}}{P_{SA}} = \frac{|s_{21}|^2(1 - |\Gamma_A|^2)}{(1 - |\Gamma_{välj}|^2)|1 - s_{11}\Gamma_A|^2}.$$

- Koormatud kakspondi väljundi peegeldustegur $\Gamma_{välj}$ on sarnaselt sisendi omale:

$$\Gamma_{välj} = s_{22} + \frac{s_{12}s_{21}\Gamma_A}{1 - s_{11}\Gamma_A}.$$

Astme võimendus

- **Ülekandevõimendus** (*Transducer power gain*) G_T on koormusele Z_K antava võimsuse P_K suhe allikast saadaval olevasse võimsusesse P_{SA} . Ehk võimendus olukorras kus allikas on sobitatud aga koormus mitte:

$$G_T = \frac{P_K}{P_{SA}} = \frac{|s_{21}|^2 (1 - |\Gamma_A|^2) (1 - |\Gamma_K|^2)}{|1 - \Gamma_A \Gamma_{sis}|^2 |1 - s_{22} \Gamma_K|^2}.$$

- Kui allikas ja koormus on sobitatud peegelduste puudumiseks (*Reflectionless matching*): ($Z_{sis} = Z_A$ ja $Z_{välj} = Z_K$ ehk $\Gamma_K = \Gamma_A = 0$), siis eelmine avaldis lihtsustub kujule:

$$G_T = |s_{21}|^2.$$

Astme võimendus

- Tihtipeale võib lihtsustatult eeldada, et transistori sisemine vastuside s_{12} on praktiliselt null. Sellisel juhul pakub huvi **ühepoolne ülekandevõimendus** (*unilateral transducer power gain*)

$$G_T = \frac{P_K}{P_{SA}} = \frac{|s_{21}|^2 (1 - |\Gamma_A|^2)(1 - |\Gamma_K|^2)}{|1 - s_{11}\Gamma_A|^2 |1 - s_{22}\Gamma_K|^2}.$$

- Ülekandevõimendus sõltub nii allika- kui koormuse impedantsidest ja on seega praktikas kõige kasulikum viis võimenduse defineerimiseks.

Astme võimendus

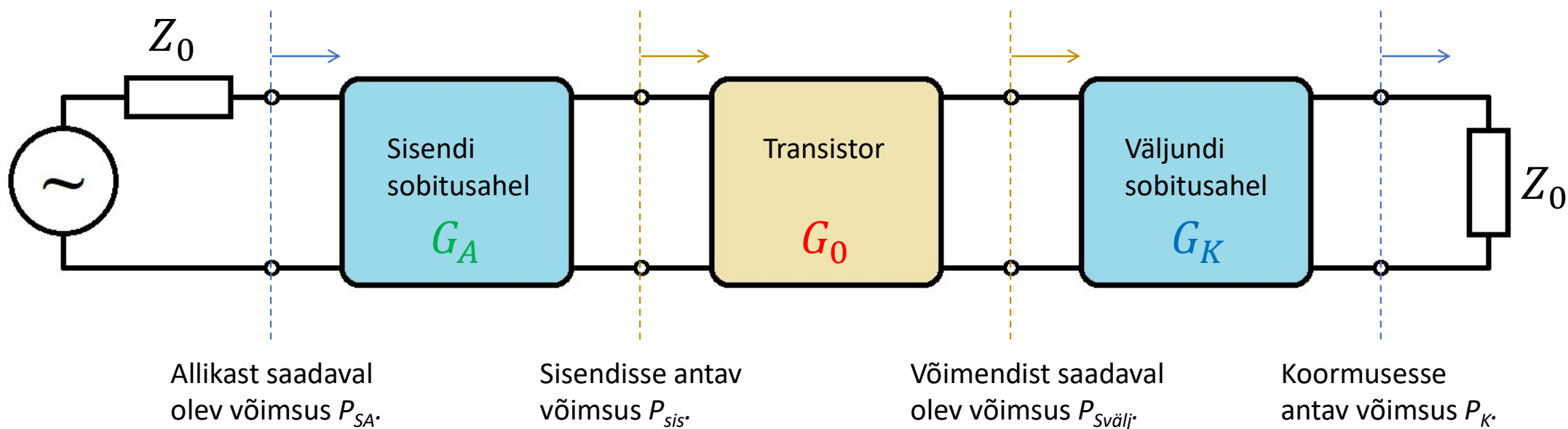
- Üheastmeline võimendusaste koosneb sisendi ja väljundi sobitusahelatest ning nende vahel olevast aktiivelemendist (võimendustransistor). Kõigi kolme panuse ülekandevõimendusse saab eraldi välja tuua:

$$G_A = \frac{1 - |\Gamma_A|^2}{|1 - \Gamma_A \Gamma_{sis}|^2}, \quad G_0 = |s_{21}|^2, \quad G_K = \frac{1 - |\Gamma_K|^2}{|1 - s_{22} \Gamma_K|^2}.$$

- Kogu ülekandevõimendus

$$G_T = G_A G_0 G_K = \frac{|s_{21}|^2 (1 - |\Gamma_A|^2) (1 - |\Gamma_K|^2)}{|1 - \Gamma_A \Gamma_{sis}|^2 |1 - s_{22} \Gamma_K|^2}.$$

Transistorvõimendi üldistatud skeem



Astme võimendus

- Ühesuunalise transistori korral ($s_{12} = 0$) on $\Gamma_{sis} = s_{11}$ ja :

$$G_A = \frac{1 - |\Gamma_A|^2}{|1 - s_{11}\Gamma_A|^2}, \quad G_0 = |s_{21}|^2, \quad G_K = \frac{1 - |\Gamma_K|^2}{|1 - s_{22}\Gamma_K|^2}.$$

- Kogu ühesuunaline ülekandevõimendus

$$G_{T\ddot{u}} = G_A G_0 G_K = \frac{|s_{21}|^2 (1 - |\Gamma_A|^2) (1 - |\Gamma_K|^2)}{|1 - s_{11}\Gamma_A|^2 |1 - s_{22}\Gamma_K|^2}.$$

Ühesuunalisuse eeldusest põhjustatud viga

- Ülekandevõimenduse viga, mis tekib transistor ühesuunalisuse eeldusel on piiratud järgmiselt:

$$\frac{1}{(1+U)^2} < \frac{G_T}{G_{Tü}} < \frac{1}{(1-U)^2}.$$

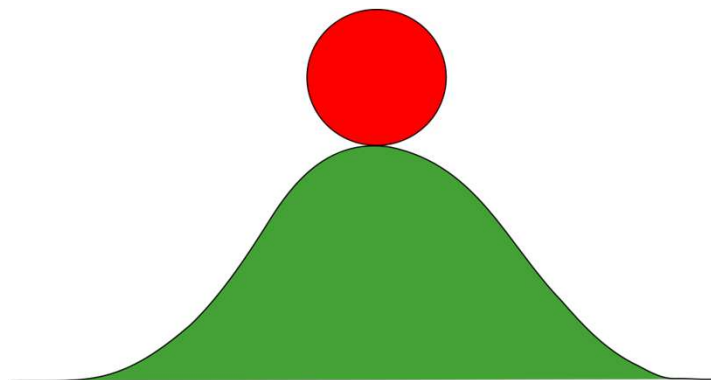
- Kus (*unilateral figure of merit*)

$$U = \frac{|s_{12}||s_{21}||s_{11}||s_{22}|}{(1-|s_{11}|^2)(1-|s_{22}|^2)}.$$

Võimendi stabiilsus

„It has been said that one of the easiest methods of building an oscillator is to design an amplifier. “

C. Bowick



Rolleti stabiilsustegur

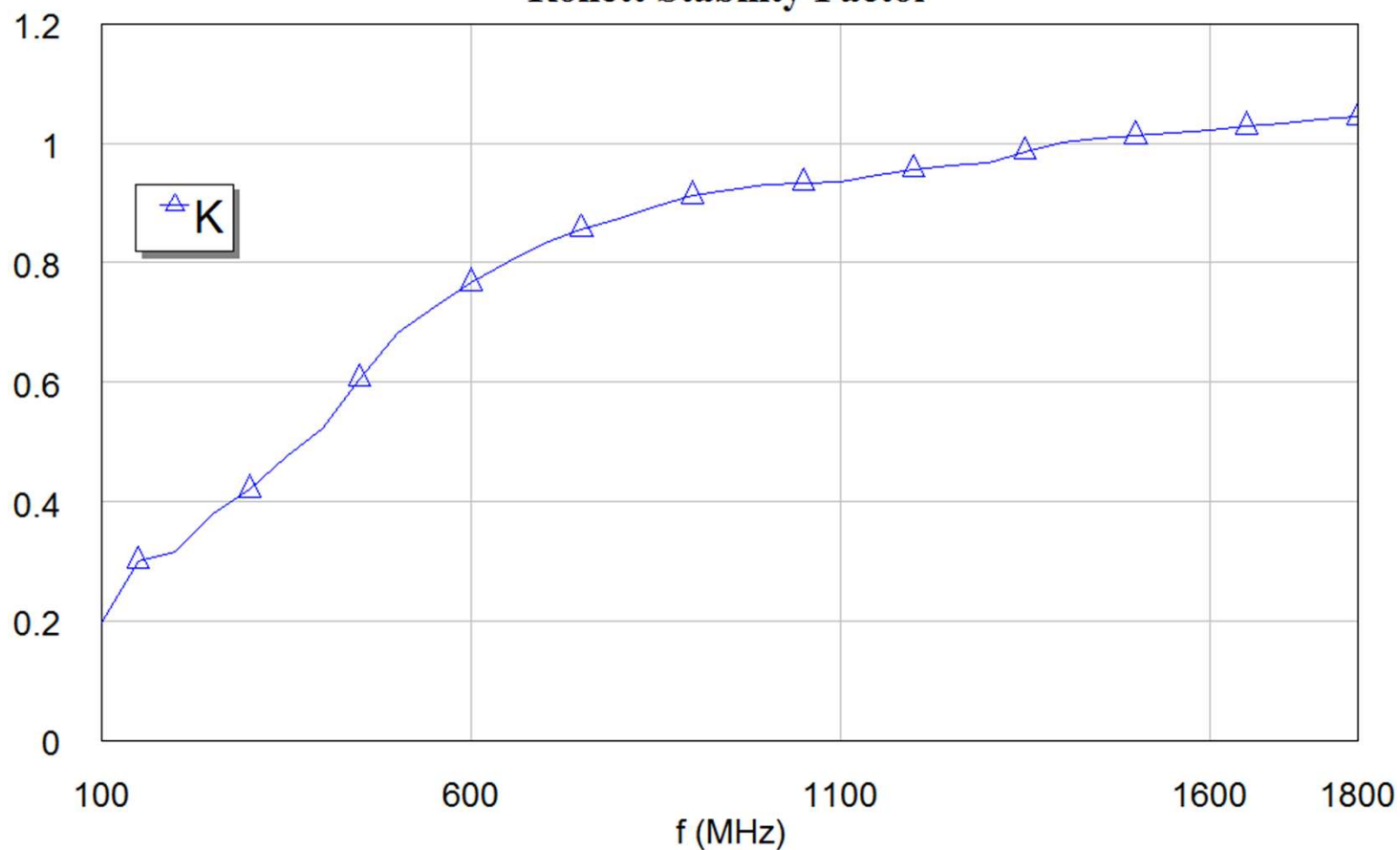
- **Rolleti stabiilsustegur:**

$$K = \frac{1 + |D_s|^2 - |s_{11}|^2 - |s_{22}|^2}{2|s_{12}||s_{21}|}.$$

- Kui K väärtus on suurem kui üks ($K > 1$), siis on transistor **tingimusteta stabiilne** (*Unconditionally stable*) mistahes allika- ja koormuse impedantside väärtuste juures.
 - Täiendavalt **peab olema täidetud ka tingimus**, et $|D_s| < 1$.
- Vastupidisel juhul ($K \leq 1$) on transistor **tingimisi stabiilne** (*conditionally stable*) ja võib teatud allika- ning koormuse väärtuste korral ostsilleerima minna. Sellisel juhul:
 - Valida teine transistor;
 - Muuta lähtetööpunkti;
 - Kolmandat võimalust vaatame mõne hetke pärast.

Rolleti stabiilsustegur – näide

Rollett Stability Factor



Transistor: ATF-50189
Lähtetööpunkt: $U_{N0} = 4,5 \text{ V}$;
 $I_{N0} = 0,28 \text{ A}$.



Transistori stabiilsus

- Transistor kui kaksport on tingimusteta stabiilne kui $|\Gamma_{sis}| < 1$ ja $|\Gamma_{välj}| < 1$ mistahes passiivse allika- ja koormuse korral ($|\Gamma_A| < 1$ ja $|\Gamma_K| < 1$).
- Transistor on tingimis stabiilne ehk **potentsiaalselt ebastabiilne** (*potentially unstable*) kui tingimused $|\Gamma_{sis}| < 1$ ja $|\Gamma_{välj}| < 1$ on täidetud ainult mingite (passiivsete) allika ja koormuse impedantside juures:

$$|\Gamma_{sis}| = \left| s_{11} + \frac{s_{12}s_{21}\Gamma_K}{1 - s_{22}\Gamma_K} \right| < 1,$$
$$|\Gamma_{välj}| = \left| s_{22} + \frac{s_{12}s_{21}\Gamma_A}{1 - s_{11}\Gamma_A} \right| < 1.$$

Stabiilsusringid

- Eelmisel slaidil toodud esimese võrratuste lahendiks on **sisendi stabiilsusring** (*input stability circle*) Smithi diagrammil keskpunktiga C_A ning raadiusega R_A :

$$C_A = \frac{C_1^*}{|s_{11}|^2 - |D_s|^2}, \quad R_A = \left| \frac{s_{12}s_{21}}{|s_{11}|^2 - |D_s|^2} \right|.$$

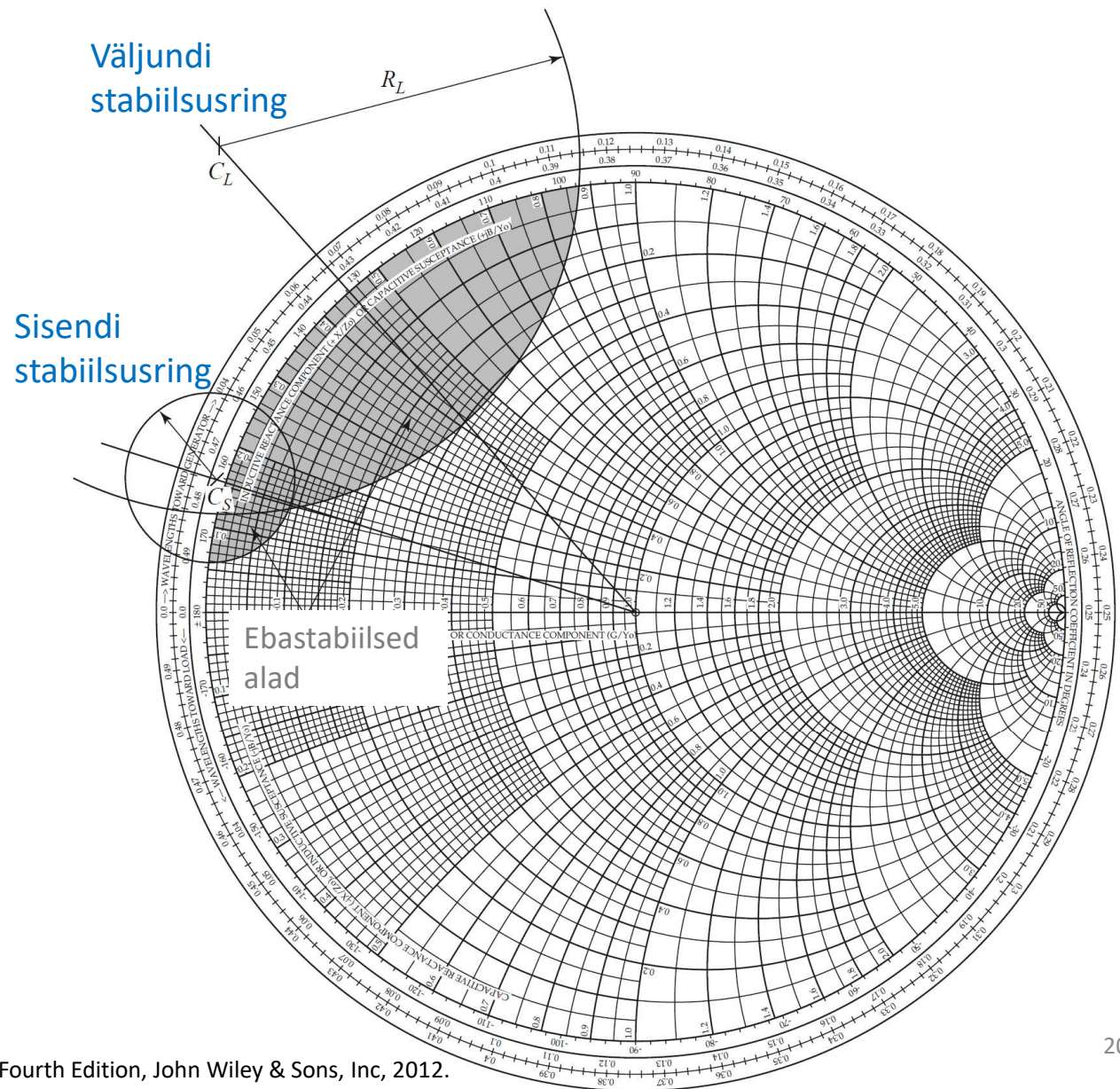
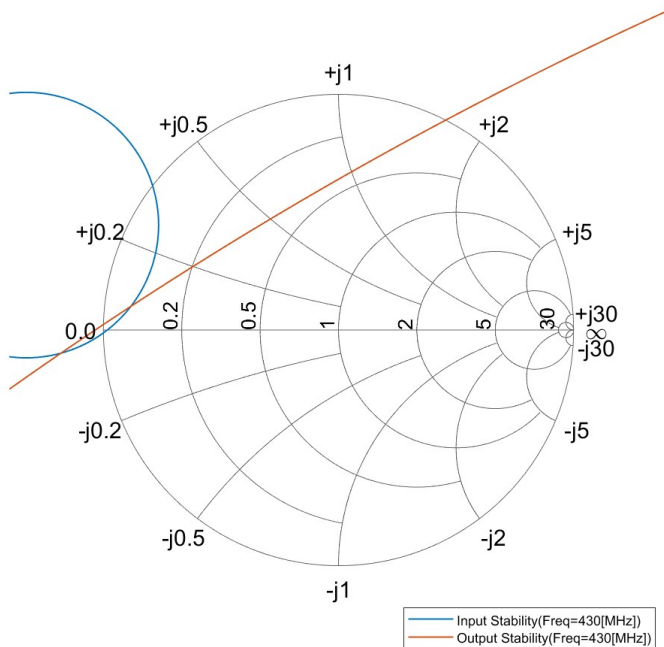
- Sarnaselt on teise võrrandi lahendiks **väljundi stabiilsusring** (*output stability circle*) keskpunktiga C_K ning raadiusega R_K :

$$C_K = \frac{C_2^*}{|s_{22}|^2 - |D_s|^2}, \quad R_K = \left| \frac{s_{12}s_{21}}{|s_{22}|^2 - |D_s|^2} \right|.$$

- Kus abimuutujad C_1 ja C_2 on vastavalt:

$$C_1 = s_{11} - D_s s_{22}^*, \quad C_2 = s_{22} - D_s s_{11}^*.$$

Stabiilsusringid



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

Stabiilsed alad.

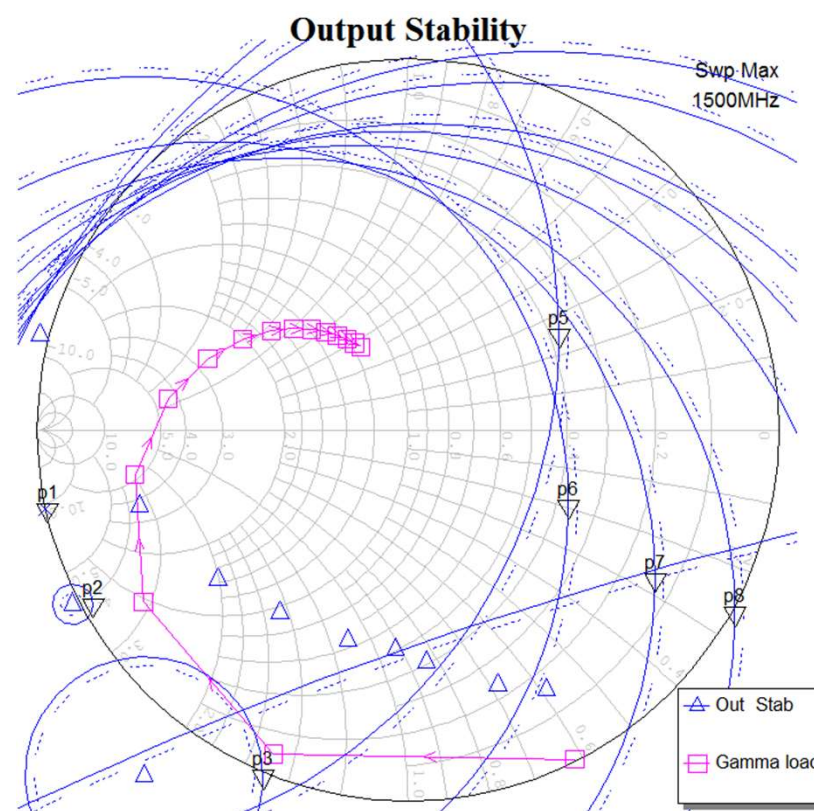
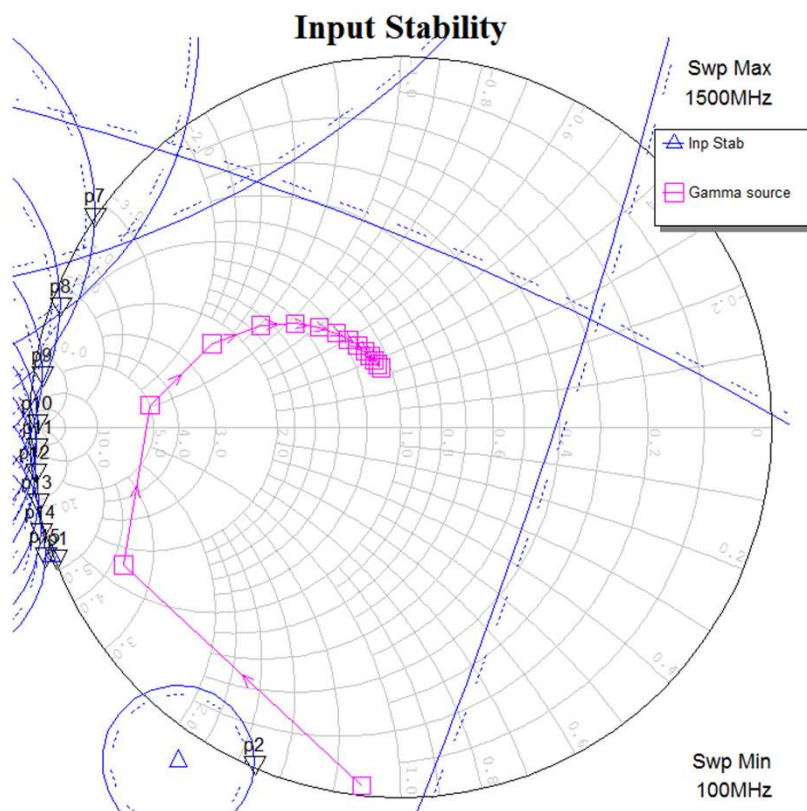
- Stabiilsusring määrab piiri stabiilse- ja ebastabiilse ala vahel.
- Väljundi stabiilsusringi korral:
 - Juhul kui sisendi peegeldusteguri moodul on väiksem ühest ($|s_{11}| < 1$) asub Smithi diagrammi keskpunkt stabiilses alas.
 - Vastupidisel juhul ($|s_{11}| \geq 1$) asub Smithi diagrammi keskpunkt ebastabiilses alas.
- Sisendi stabiilsusringi korral sarnaselt:
 - Kui väljundi peegeldusteguri moodul on väiksem ühest ($|s_{22}| < 1$) asub Smithi diagrammi keskpunkt stabiilses alas.
 - Vastupidisel juhul ($|s_{22}| \geq 1$) asub Smithi diagrammi keskpunkt ebastabiilses alas.

Stabiilsusringid - näide

Transistor: ATF-50189

Lähtetööpunkt: $U_{N0} = 4,5 \text{ V}$;

$I_{N0} = 0,28 \text{ A}$.



Maksimaalse võimendusega võimendi

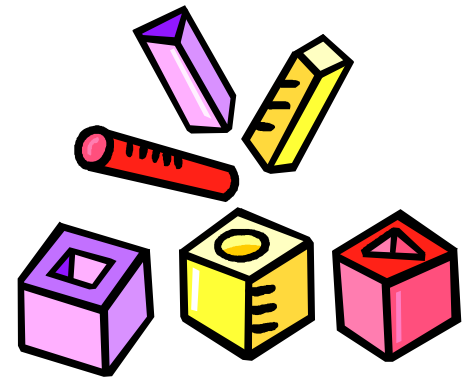
- Transistori enda võimendus G_0 on konkreetse seadme (ja lähtetööpunkti) korral fikseeritud. Seega kogu astme ülekandevõimendust G_T saab seadistada sobitusahelate parameetreid (G_A ja G_K) valides.
- Võimendus on maksimaalne, kui nii allikas- kui ka koormus on transistoriga sobitatud: ($Z_{sis} = Z_A^*$ ja $Z_{välj} = Z_K^*$ ning seega $\Gamma_{sis} = \Gamma_A^*$ ja $\Gamma_{välj} = \Gamma_K^*$).
- Sellisel juhul on **Maksimaalne saavutatav võimendus** MAG (*Maximum Available Gain*)

$$G_{Tmax} = \frac{1}{1 - |\Gamma_A|^2} |s_{21}|^2 \frac{(1 - |\Gamma_K|^2)}{|1 - s_{22}\Gamma_K|^2}.$$

Sisendi- ja väljundi üheaegne sobitus

- Üldjuhul (kui $s_{12} \neq 0$) mõjutab koormuse impedants transistori sisendi impedantsi ja allika oma vastavalt väljundi impedantsi.
- Seetõttu tuleb sisend- ja väljund sobitada samaaegselt (*Simultaneous conjugate match*). Selleks tuleb lahendada võrrandsüsteem

$$\Gamma_A^* = s_{11} + \frac{s_{12}s_{21}\Gamma_K}{1 - s_{22}\Gamma_K},$$
$$\Gamma_K^* = s_{22} + \frac{s_{12}s_{21}\Gamma_A}{1 - s_{11}\Gamma_A}.$$



Sisendi- ja väljundi üheaegne sobitus

- Lahendina saame

$$\Gamma_A = \frac{B_1 \pm \sqrt{B_1^2 - 4|C_1|^2}}{2C_1}, \quad \Gamma_K = \frac{B_2 \pm \sqrt{B_2^2 - 4|C_2|^2}}{2C_2}.$$

- Lisaks varasemalt defineeritud suurustele C_1 , C_2 ja D_S on:

$$B_1 = 1 + |s_{11}|^2 - |s_{22}|^2 - |D_2|^2,$$

$$B_2 = 1 + |s_{22}|^2 - |s_{11}|^2 - |D_2|^2.$$

- Tingimusteta stabiilset transistorit ($K > 1$) saab alati samaaegselt sobitada. Potentsiaalselt ebastabiilset ($K \leq 1$) ainult siis kui $|D_S| < 1$.

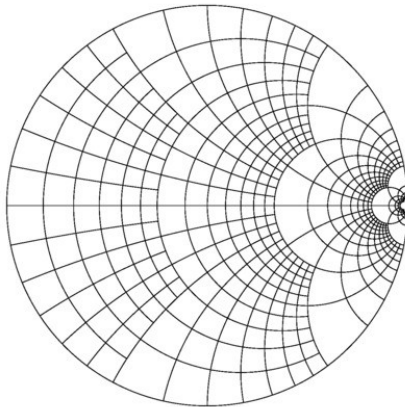
Kuidas tagada vajalikud impedantsid?

- Olles leidnud vajaliku allika peegeldustegur Γ_A saame selle teisendada vajalikuks allika impedantsiks Z_A' mida siis võimendi enda sisendis „näha soovib.“
- Teisenduse saab teha kas Smithi diagrammil või avaldisega
$$Z_A' = Z_0 \frac{1 + \Gamma_A}{1 - \Gamma_A}.$$
- Järgmisena tuleb koostada sobitusahel mis teisendab tegeliku allika impedantsi, mis on enamasti 50Ω , soovitud impedantsiks.
- Ülesanne on ekvivalentne sobitusahela koostamisega tegeliku allika impedantsi Z_A sobitamiseks soovitava impedantsi kaaskomplese väärtusega $(Z_A')^*$.

Sobitus ühesuunalise transistori korral

- Ühesuunalise transistori (kui $s_{12} = 0$) korral on $\Gamma_A = s_{11}^*$ ja $\Gamma_K = s_{22}^*$ ning sisendi- ja väljundi võib sobitada eraldi, teineteisest sõltumatult.
- Ühesuunaline ülekandevõimendus on siis

$$G_{T\ddot{u}} = \frac{1}{1 - |s_{11}|^2} |s_{21}|^2 \frac{1}{1 - |s_{22}|^2}.$$



Astme võimendus

Maksimaalne saavutatav võimendus, juhul kui transistor on tingimusteta stabiilne ($K > 1$), on leitav

$$G_{Tmax} = \frac{|S_{21}|}{|S_{12}|} \left(K - \sqrt{K^2 - 1} \right).$$

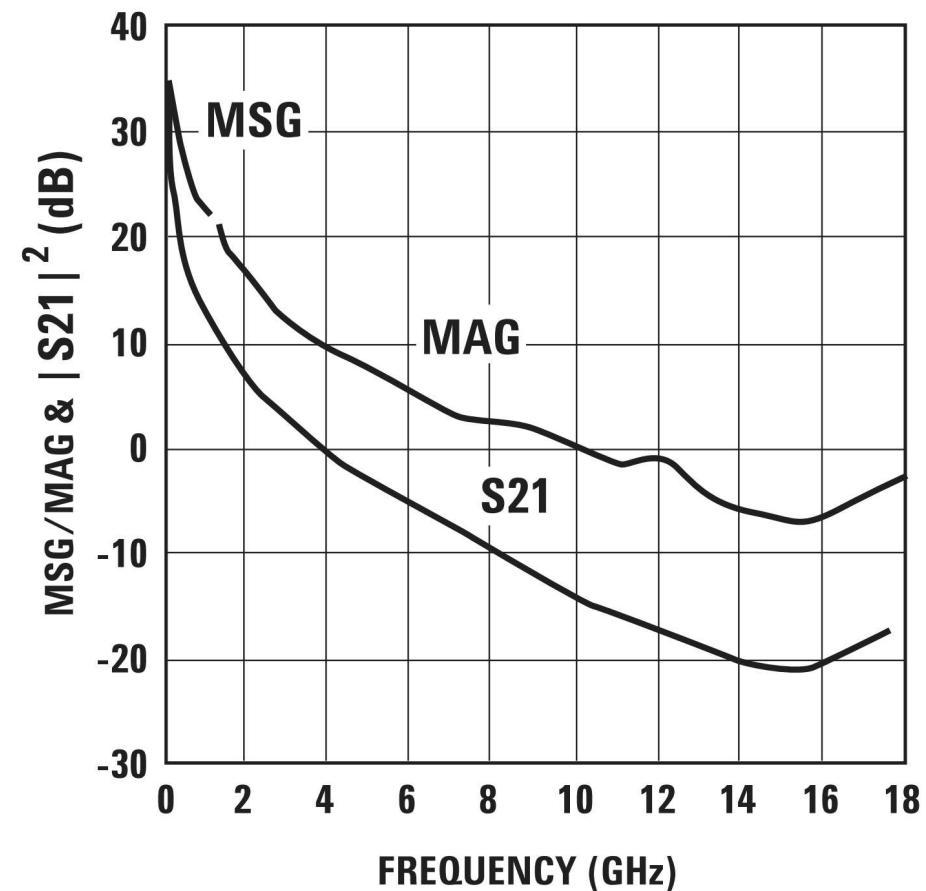
Maksimaalne stabiilne võimendus ($K = 1$) on

$$G_{msv} = \frac{|S_{21}|}{|S_{12}|}.$$

Transistor: ATF-50189

Lähtetööpunkt: $U_{NO} = 4,5 \text{ V};$

$I_{NO} = 0,28 \text{ A}.$



Disain spetsiifilise võimenduse korral

- Tihtipeale ei ole praktikas maksimaalse võimaliku võimenduse realiseerimine otstarbekas:
 - Lihtsalt on vaja väiksemat võimendust;
 - Vaja on suuremat ribalaiust;
 - Probleemid stabiilsusega.
- Võimenduse vähendamiseks kasutatakse **selektiivset lahusobitust** (*selective mismatching*). Sobitusahelate võimendused (G_A ja G_K) valitakse meelega sellised, et üldine võimendus oleks väiksem kui maksimaalne võimalik.
- Vaatleme lihtsustatud, ühesuunalist juhtu ($s_{12} = 0$).

Selektiivne lahkusobitus

- Ühesuunalise transistori korral olid võimendused G_A ja G_K :

$$G_A = \frac{1 - |\Gamma_A|^2}{|1 - s_{11}\Gamma_A|^2}, \quad G_K = \frac{1 - |\Gamma_K|^2}{|1 - s_{22}\Gamma_K|^2}.$$

- Viimased saavutavad maksimaalse väärtuse kui $\Gamma_A = s_{11}^*$ ja $\Gamma_K = s_{22}^*$:

$$G_{A_{max}} = \frac{1}{1 - |s_{11}|^2}, \quad G_{K_{max}} = \frac{1}{1 - |s_{22}|^2}.$$

- Normeeritud võimendused (vahemikus 0...1) oleks seega:

$$g_A = \frac{G_A}{G_{A_{max}}} = \frac{1 - |\Gamma_A|^2}{|1 - s_{11}\Gamma_A|^2} (1 - |s_{11}|^2),$$
$$g_K = \frac{G_K}{G_{K_{max}}} = \frac{1 - |\Gamma_K|^2}{|1 - s_{22}\Gamma_K|^2} (1 - |s_{22}|^2).$$

Konstantse võimenduse ringid

- Sisendi sobitusahela **konstantse võimenduse ringid** (*constant gain circles*):

$$C_A = \frac{g_A s_{11}^*}{1 - (1 - g_A) |s_{11}|^2}, \quad R_A = \frac{\sqrt{1 - g_A} (1 - |s_{11}|^2)}{1 - (1 - g_A) |s_{11}|^2}.$$

- Väljundi sobitusahela konstantse võimenduse ringid:

$$C_K = \frac{g_K s_{22}^*}{1 - (1 - g_K) |s_{22}|^2}, \quad R_K = \frac{\sqrt{1 - g_K} (1 - |s_{22}|^2)}{1 - (1 - g_K) |s_{22}|^2}.$$

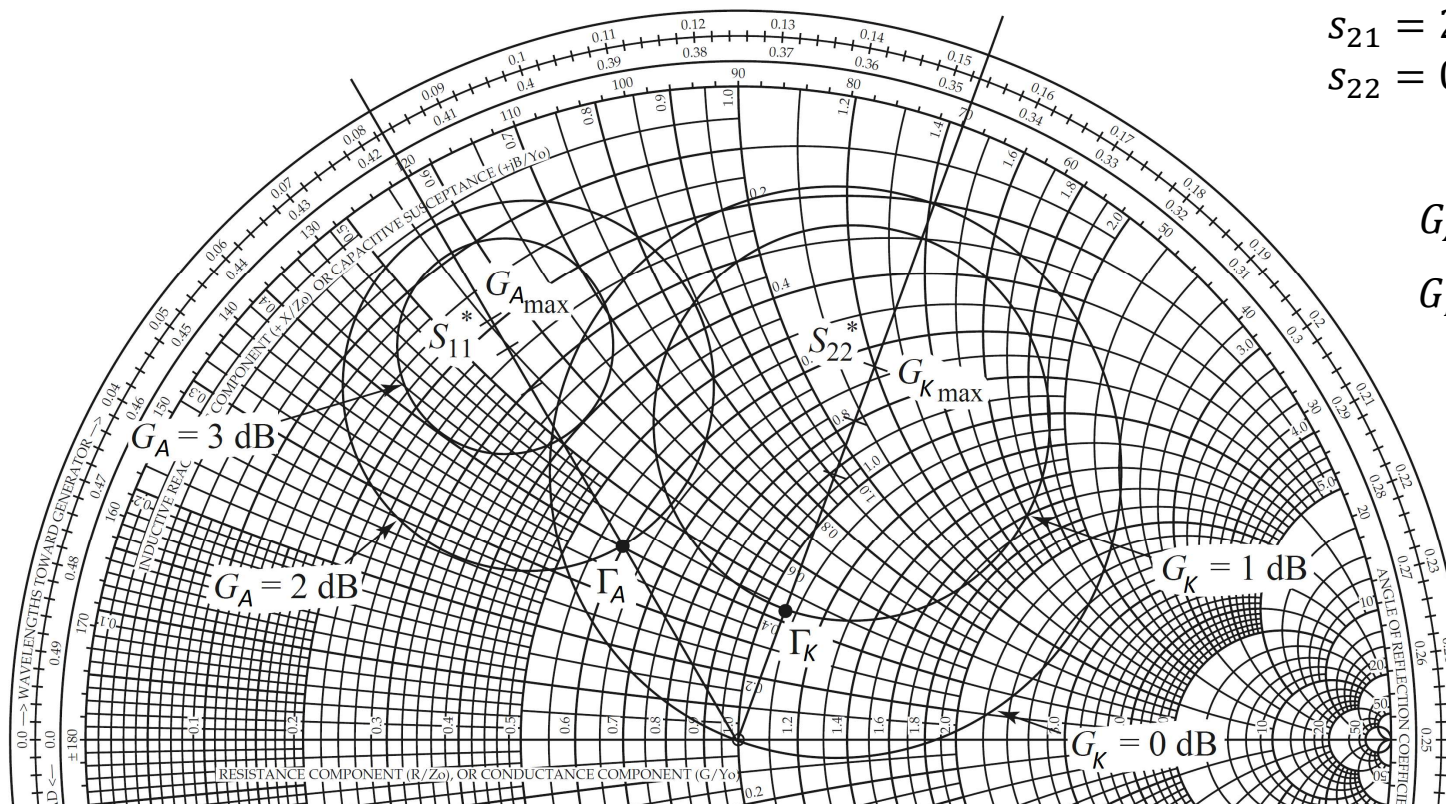
- Ühe portidest võib täielikult (allika- või koormusega) sobitada ja võimendust reguleerida ainult teise pordi selektiivse lahusobitamise teel.

Konstantse võimenduse ringid

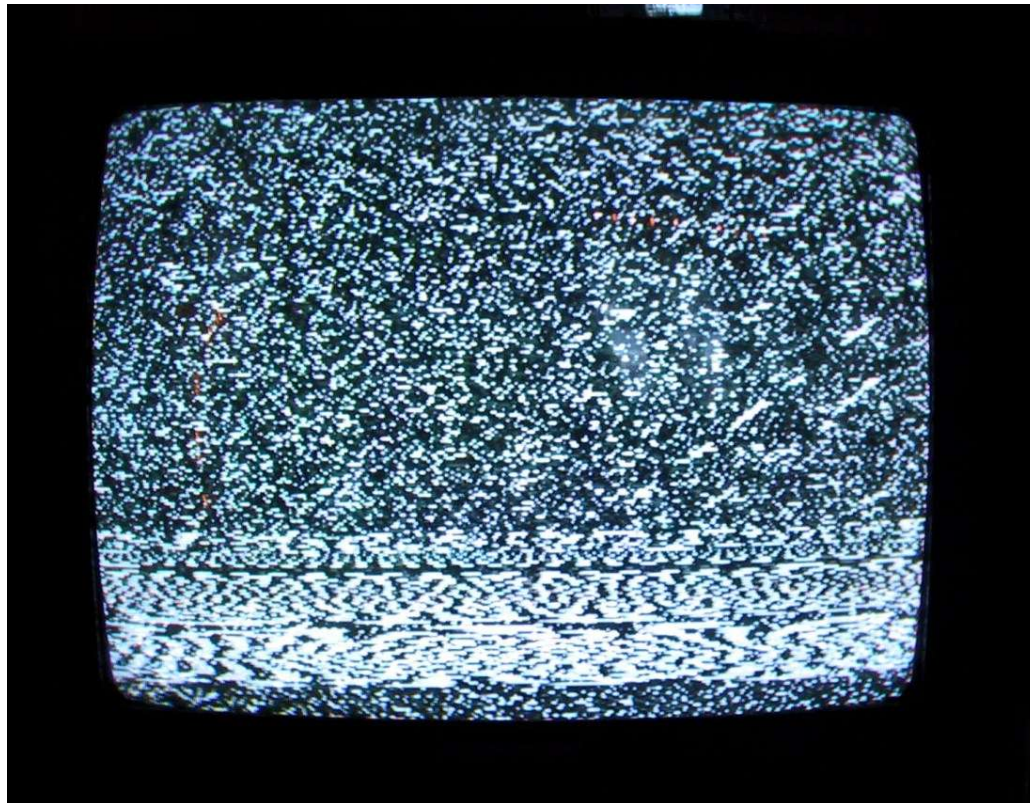
$$\begin{aligned}s_{11} &= 0,75 \angle -120^\circ \\ s_{21} &= 2,5 \angle 80^\circ \\ s_{22} &= 0,60 \angle -70^\circ\end{aligned}$$

$$G_{A_{max}} = 3,6 \text{ dB}$$

$$G_{K_{max}} = 1,9 \text{ dB}$$



Mürad



Soojusmüra

- Temperatuur on keha mikroosakeste soojusliikumise keskmise kineetilise energia mõõt.
- Laetud osakeste juhusliku soojusliikumise (Browni liikumise) tulemuseks on juhuslik elektrisignaal ehk **soojusmüra**.
- Müraallika pinge efektiivväärtus sagedusvahemikus $f_1 \dots f_2$ on leitav kui

$$U^2 = 4kT \int_{f_1}^{f_2} R(f)df ,$$

kus $k = 1,380\,649 \cdot 10^{-23}$ J/K on Boltzmanni konstant, T allika absoluutne temperatuur ja R allika impedantsi reaalosa ehk takistus.

Soojusmüra

- Enamasti on takistus huvipakkuvas sagedusribas konstante ja mürapinge efektiivväärtus seega

$$U = \sqrt{4kTBR},$$

kus $B = f_2 - f_1$ on süsteemi ribalaius.

- Müraallikast saadaval olev võimsus sobitatud koormuse $R_K = R$ korral on

$$P = \frac{U^2}{4R} = kTB.$$

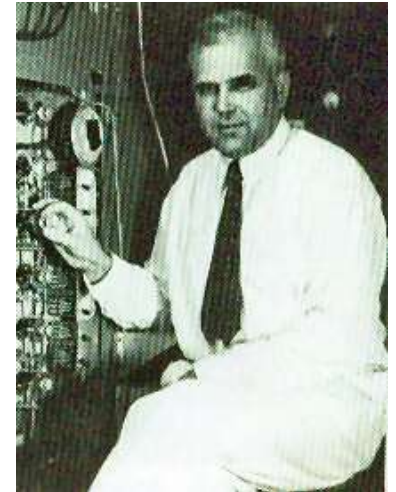
- Soojusmüra spektraaltihedus on ühtlane – tegemist on **valge müraga** (*white noise*).

Mürafaktor

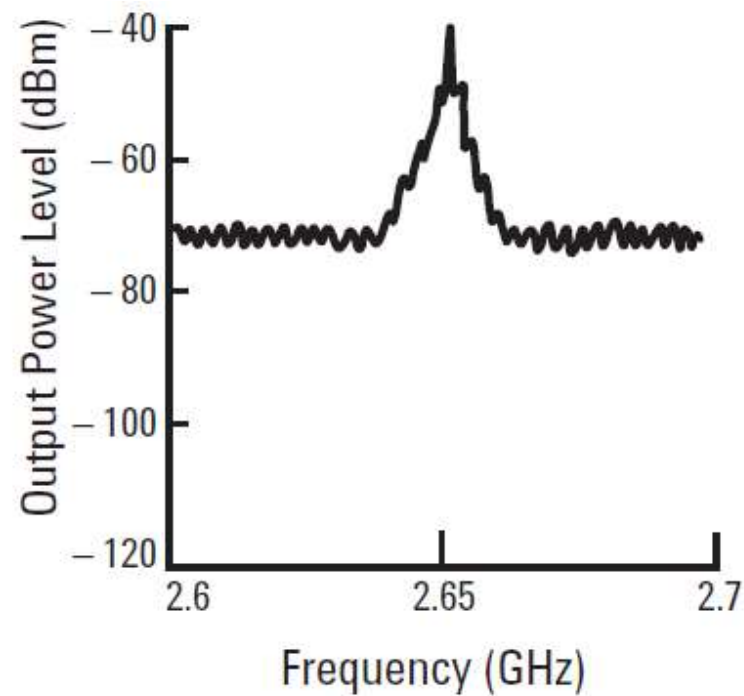
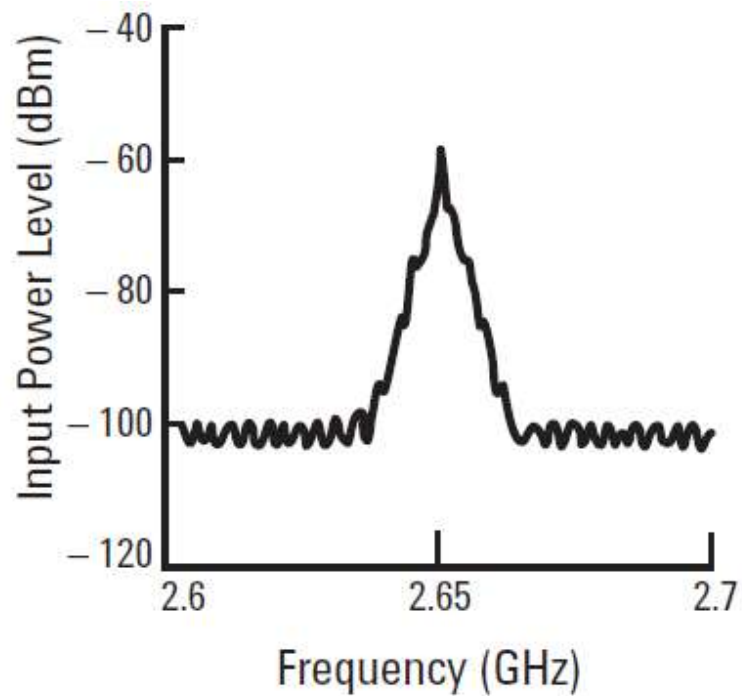
- Kõik süsteemid lisavad ülekantavale signaalile müra mistõttu on signaal-müra suhe süsteemi väljundis väiksem kui selle sisendis.
- Signaal-müra suhte halvenemist iseloomustatakse **mürafaktoriga** (*Noise factor*)

$$F = \frac{S_{sis} / N_{sis}}{S_{välj} / N_{välj}} .$$

- Mõiste pärineb Harald T. Friisilt eelmise sajandi neljakümnendatest.



Mürafaktor



Mürafaktor

- Signaali võimsus võimendi väljundis $S_{välj}$ on sisendsignaali S_{sis} omast suurem võimendus G korda:

$$S_{välj} = GS_{sis}.$$

- Täpselt sama palju kordi võimendatakse võimendi sisendis olevat müra N_{sis} . Täiendavalt lisandub väljundisse aga veel ka seadme enda poolt genereeritav (aditiivne) müra N_a :

$$N_{välj} = GN_{sis} + N_a.$$

- Seega mürafaktor

$$F = \frac{N_a + GN_{sis}}{GN_{sis}}.$$

Mürafaktori IEEE definitsioon

- Sisendmüra võimsust saame väljendada müratemperatuuri kaudu. Eeldades, et Maa keskmine temperatuur on $T_0 = 290^\circ\text{K}$ saame IEEE definitsiooni mürafaktori kohta

$$F = \frac{N_a + GkT_0B}{GkT_0B}.$$

- Viimasest on näha, et süsteemi poolt lisandunud müra võimsus on

$$N_a = GkT_0B(F - 1).$$

- Väljundmüra oma aga

$$N_o = GkT_0BF.$$

Mürategur

- Raadiotehnikas kasutatakse tavaliselt logaritmilisi mõõtühikuid ka mürafaktor ei ole siin erandiks.
- Mürafaktor logaritmilisel kujul kannab nime **mürategur** (*Noise Figure*):

$$NF[\text{dB}] = 10 \cdot \log(F) = SNR_{sis} - SNR_{välj}.$$

- Tegemist on, eriti just nõrkade signaalide võimendamisel, olulise kvaliteedinäitajaga.
- Mida väiksem mürateguri väärtus seda parem.

Kaskaadi mürafaktor (Friisi müravalem)

- Saab näidata, et mitme (n) järjestiku ühendatud astme summaarne mürafaktor avaldub üksikute astmete oma kaudu kui:

$$F_{kogu} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_1 G_2 \dots G_{n-1}}.$$

- Olulised tähelepanekud:
 - Võimendused avaldises on lineaarsetes ühikutes (kordades);
 - Süsteemi summaarsed müraomadused määrab peamiselt esimene (võimendus) aste;
 - Seega peaks esimese astme mürafaktor F_1 olema võimalikult väike ning samas selle võimendus G_1 võimalikult suur;
 - Sellistele nõuetel vastavat võimendit nimetatakse **madala müraga eelvõimendiks** (*Low Noise Amplifier*) LNA.

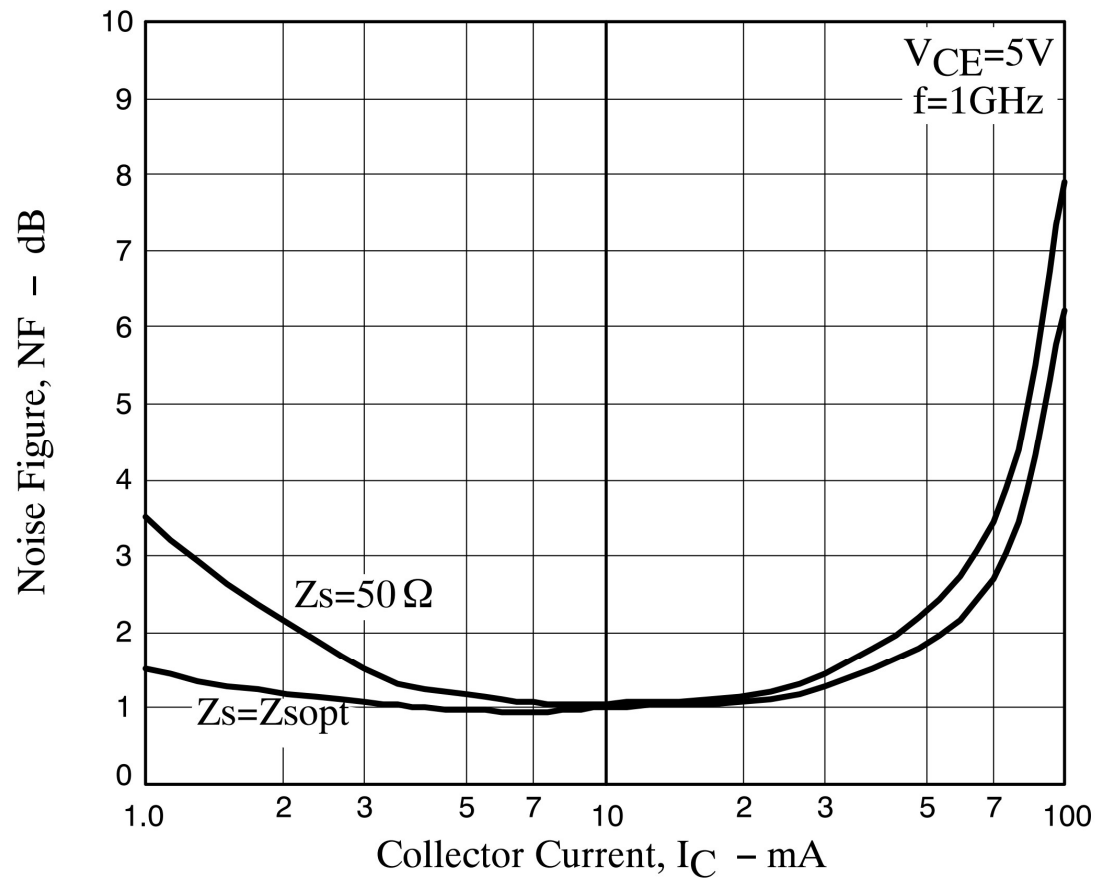
Disain soovitud mürateguri alusel

- Transistorvõimendi mürateguri määrab allika takistus R_A (Z_A reaalosa).
- Iga transistori jaoks leidub viimase optimaalne väärtus (R_{opt}) mille korral, antud tööpunktis, on astme mürategur minimaalne .
Kõrvalekalle sellest väärtusest suurendab astme mürategurit.
- Saab näidata, et see sõltuvus on kujul:

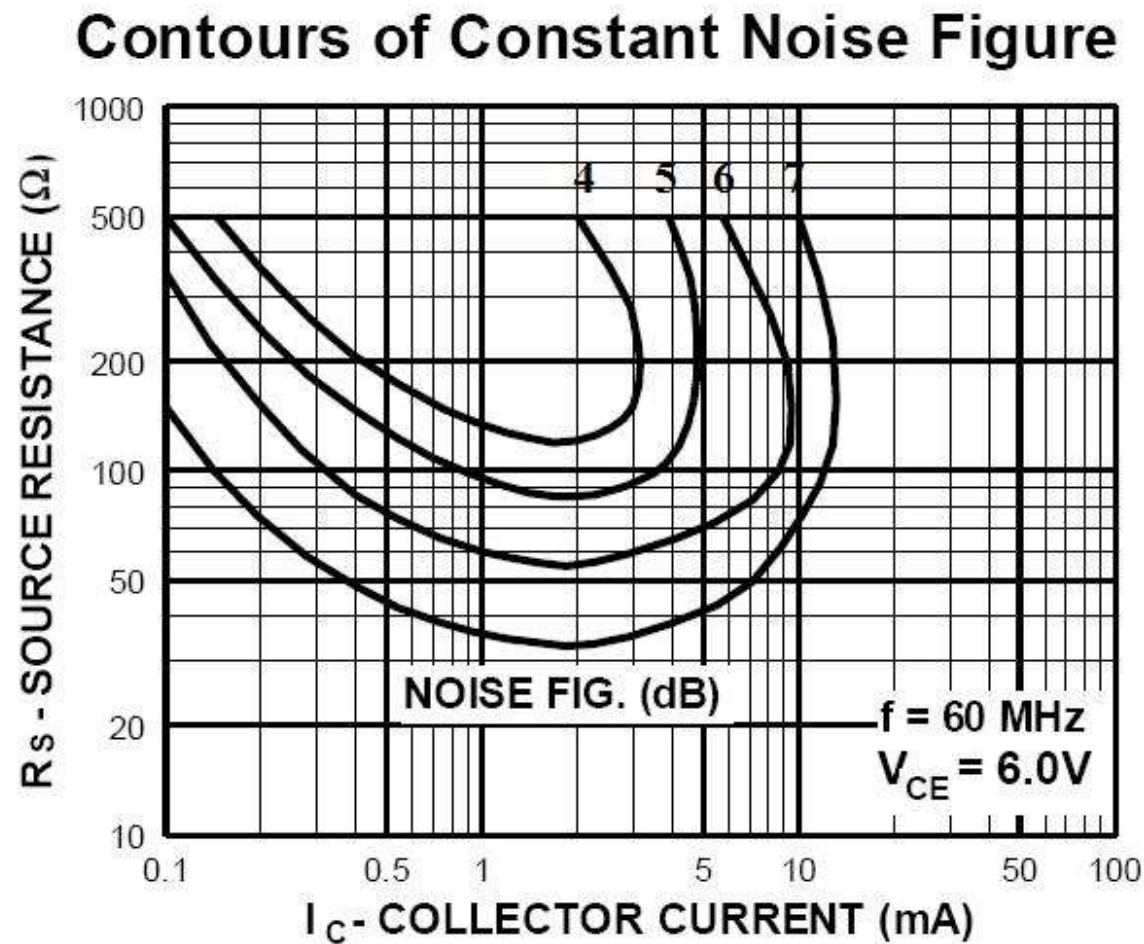
$$F = F_{min} + \frac{R_N}{G_A} |Y_A - Y_{opt}|^2.$$

- Viimase põhjal saab Smithi diagrammil koostada konstantse mürateguri ringid.

Transistori mürategur - näide



Konstantse mürateguri kontuurid - näide

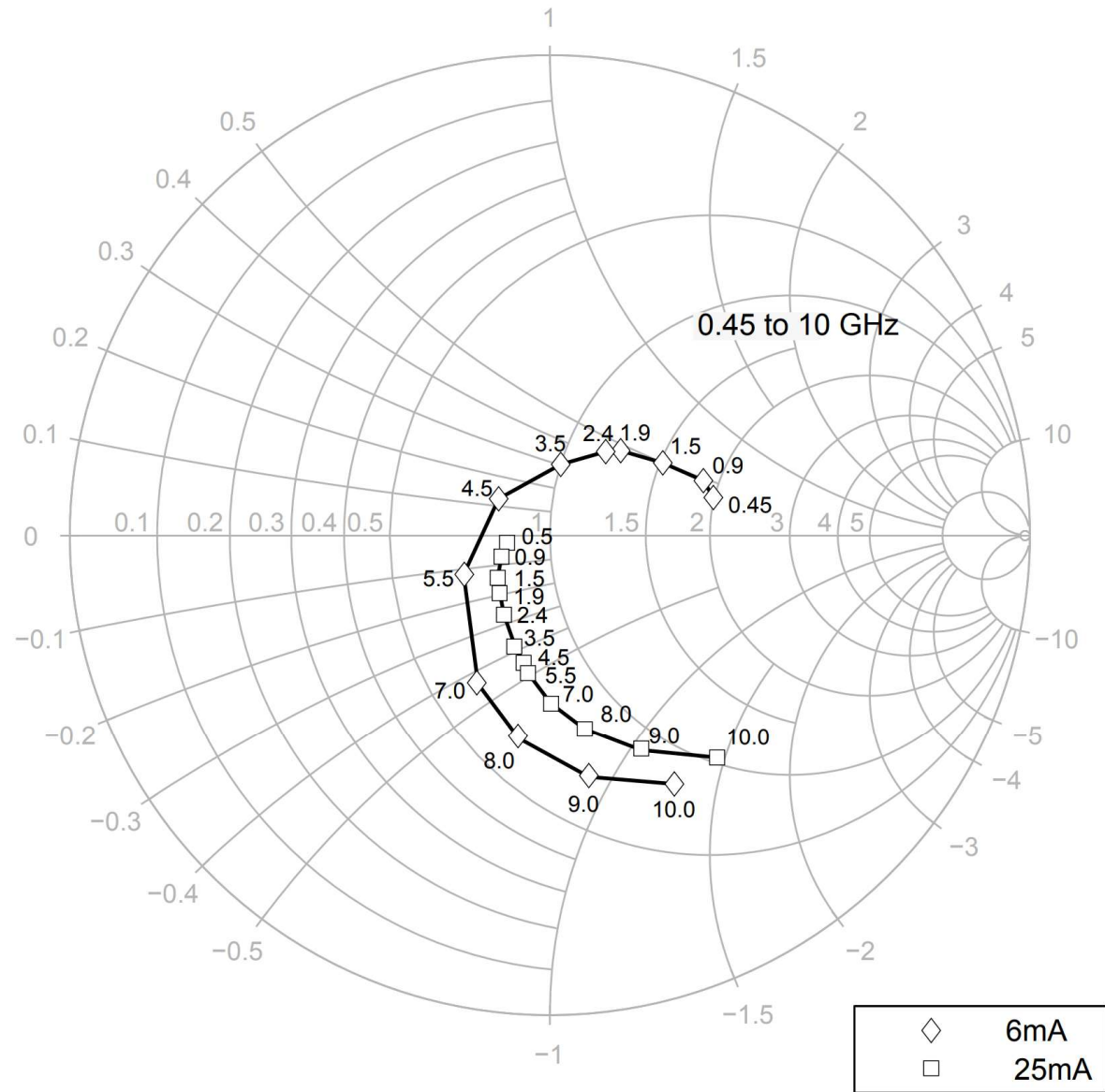


Optimaalne allika impedants

Transistor: BFP640

Lähtetööpunkt: $U_{KE0} = 3V$;

$I_{K0} = 6\text{ mA} / 25\text{ mA}$



Andmeleht: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BFP640-DS-v03_00-EN.pdf?fileId=5546d462689a790c01690f03a9ca3928

Mürateguri ringid

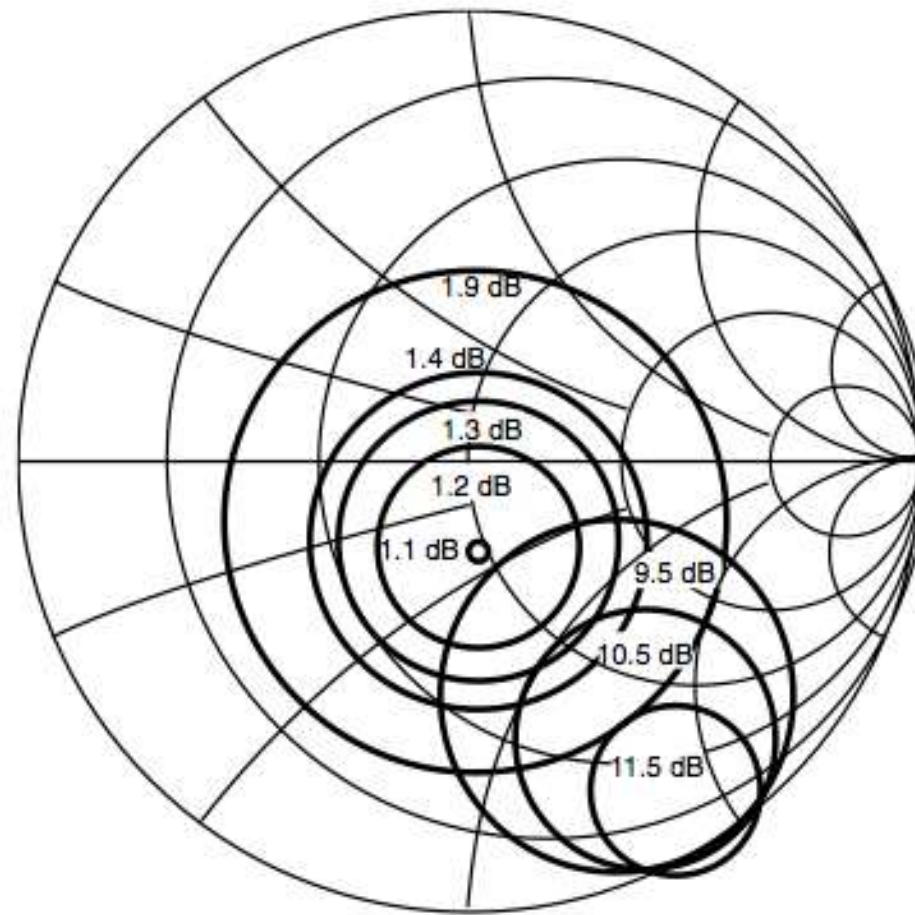
- Konstantse mürateguri ringi keskpunkti koordinaadid ja raadius on

$$C_F = \frac{\Gamma_{opt}}{N + 1}, \quad R_F = \frac{\sqrt{N(N + 1 - |\Gamma_{opt}|^2)}}{N + 1}$$

- Abisuurus (*noise figure parameter*):

$$N = \frac{|\Gamma_A - \Gamma_{opt}|^2}{1 - |\Gamma_A|^2} = \frac{Z_0(F - F_{min})}{4R_N} |1 + \Gamma_{opt}|^2.$$

Konstantse mürateguri ringid



Transistor: ATF-36163
Töösagedus: $f = 12\text{GHz}$;
Lähtetööpunkt: $U_{N0} = 1,5\text{ V}$;
 $I_{N0} = 10\text{ mA}$

Lisamaterjale

- Vik's Newsletter. **Understanding Two Port Amplifier Power Gains.**
<https://www.viksnewsletter.com/p/understanding-two-port-amplifier>,
10.11.2025.



Lisa A: Signaaligraafi dekompositsiooni reeglid

- 1. **Jadareegel** (*series rule*): Kui kahe järjestikuse serva vahel on üks, ainult nende kahe jaoks ühine, tipp siis saab need kaks serva asendada ühega mille ülekanne on võrdne algsete servade ülekanne korrutisega.



- 2. **Rööpreegel** (*parallel rule*): Kui ühest tipust teise läheb paralleelselt kaks haru, siis võib nad asendada ühega, mille ülekanne on esialgsete ülekannete summa.



Lisa A: Signaaligraafi dekompositsiooni reeglid

- 3. **Silmuse elimineerimine** (*self-loop rule*): Kui tippul on silmus, ehk serv mis nii algab kui lõppeb sellesamas tipus, ülekandega s siis selle võib eemaldada kui jagada tippu sisenevate servade ülekanded läbi kordajaga $(1-s)$.



- 4. **Sisetipu elimineerimine** (*splitting rule*): Tipu võib jaotada kaheks, kui saadud signaaligraaf sisaldab ainult ühe koopia kõikidest sisend- ja väljundtippudest mis olid algse tipuga ühendatud.

