5. Sobitusahelad

IEE2560 – Raadiosageduslik elektroonika

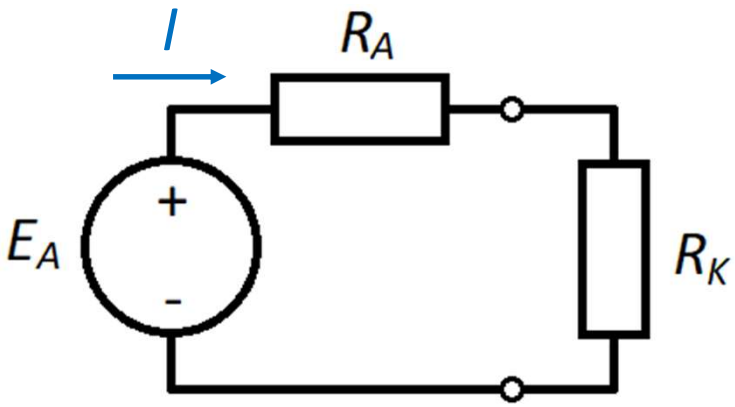
Võimsuse ülekanne allikast koormusesse

- Vaatleme esmalt erijuhtu kus nii allika- kui koormuse impedantsid on puhtalt aktiivsed – mõlemal on ainult aktiivtakistus, vastavalt R_A ja R_K.
- Ahelat läbiva voolu tugevus

$$I = \frac{E_A}{R_A + R_K}.$$

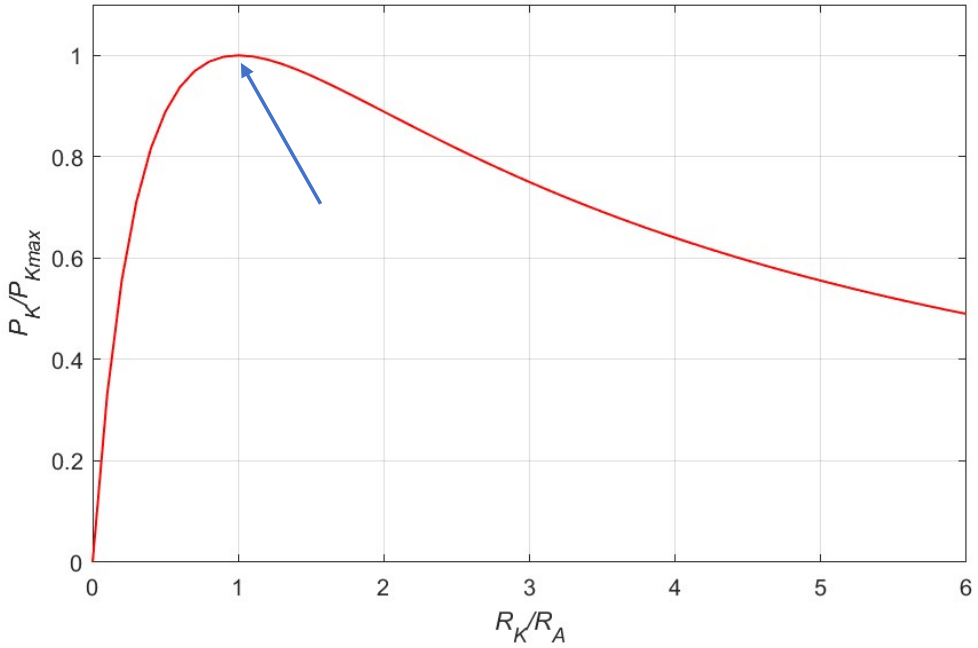
- Koormusele antav võimsus

$$P_K = I^2 R_K = \frac{E_A^2 R_K}{(R_A + R_K)^2}.$$



Jakobi’ seadus

- Võimsuse ülekanne allikast koormusesse on maksimaalne juhul, kui allika- ja koormuse takistused on omavahel võrdsed: $R_A = R_K$.





Moritz von Jacobi

Võimsuse ülekanne allikast koormusesse

- Üldjuhul ei ole ei allika ega koormuse impedantsid puhtalt reaalarvulised vaid neil on mingi mittenulline imaginaarosa.
- Sellisel juhul on maksimaalne võimsuse ülekanne allikast koormusesse tagatud juhul kui on täidetud tingimused

$$\begin{cases} R_K = R_A \\ X_K = -X_A \end{cases}.$$

- Kokkuvõtlikult

$$Z_K = Z_A^*,$$

kus * tähistab kaaskompleksarvu.

Allika ja koormuse sobitamine

- Üldjuhul ei ole maksimaalse võimuse ülekande tingimused täidetud.
- Sellisel juhul peegeldub osa langevast signaalist ühenduskohast tagasi, peegeldunud laine osakaalu näitas peegeldustegur

$$\Gamma = \frac{Z_K - Z_A}{Z_K + Z_A}.$$

- Tagasipeegeldanud võimsuse osakaalu väljendati peegelduskaona

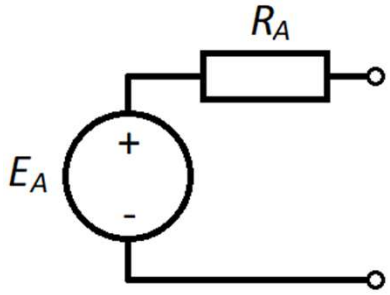
$$\mathrm{RL} = -20\log|\Gamma|.$$

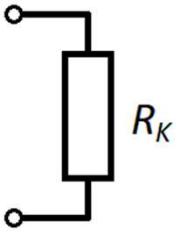
- Seega edasi koormusesse jõuab ainult sobituskaoga (*Mismatch Loss*) määratud osa

$$\mathrm{ML} = (1 - |\Gamma|^2).$$

Sobitusahelad

- Energiaülekande maksimeerimiseks saab kasutada erinevaid skeemitehnilisi võtteid.
- Selleks kasutatavaid elektriahelaid nimetatakse **sobitusahelateks** (*Matching Circuit*):
  - Veerandlainetraafo;
  - L - kujuline sobitusahel;
  - T - ja Π kujulised sobitusahelad;
  - Sobitamine ülekandeliini lõikudega (*stub matching*);
  - Sobitustraafo;
  - …





L-kujuline sobitusahel

- Lihtsaim sobitusahel diskreetelementidel. Vajab ainult kahte passiivkomponenti – **ühte mahtuvust** ja **ühte induktiivsust**.
- Suurim puudus seisneb selles, et me ei saa ise valida ahela ribalaiust *B* (hüvetegurit *Q*).
- Arvutuste lähteandmeteks on
  - Allika impedants $Z_A = R_A + jX_A$;
  - Koormuse impedants $Z_K = R_K + jX_K$ ning
  - ahela töösagedus *f.*
- Valime järgneva näite jaoks: Z_A = 40 Ω, Z_K = 200 Ω ja f = 75 MHz.

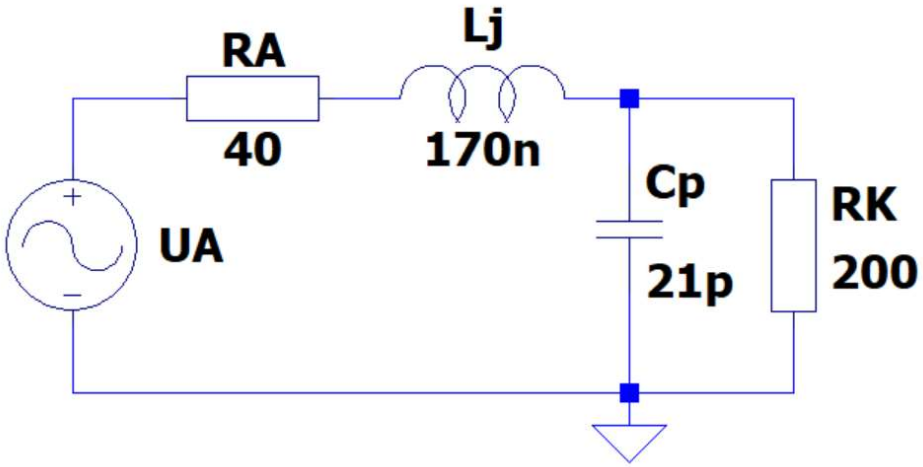
L-ahela arvutused

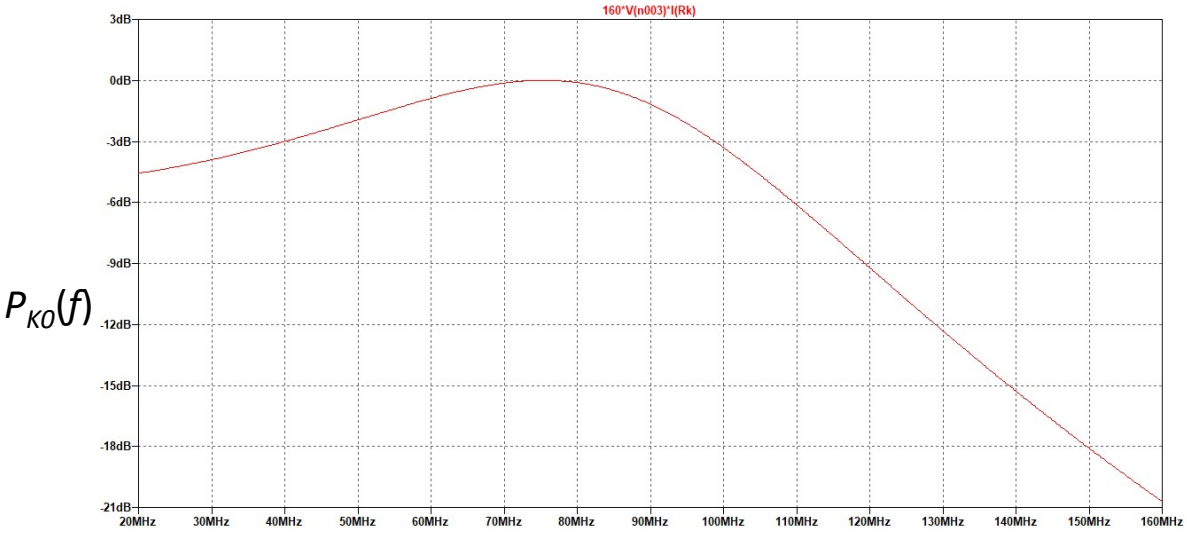
- Ahela hüvetegur:

$$Q = \sqrt{\frac{R_{max}}{R_{min}} - 1}\,.$$

- Jada-reaktiivtakistus $|X_j| = Q \cdot R_{min}$. Ühendatakse **alati jadamisi väiksema** takistusega $R_{min} = \min(R_A, R_K)$.
- Paralleel-reaktiivtakistus $|X_p| = R_{max}/Q$. Ühendatakse **alati rööbiti suurema** takistusega $R_{max} = \max(R_A, R_K)$.
- Sobituse seisukohast ei ole vahet millist tüüpi reaktiivelement on jadamisi- ja milline rööbiti ühendatud.

L-ahela arvutused





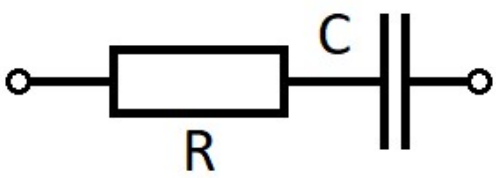
$P_{K0}(f)$

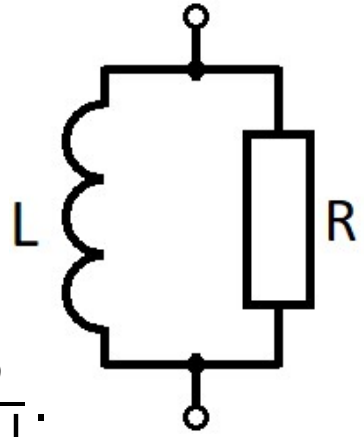
f

Ahela hüvetegur

- Elektriahela (komponendi) **hüvetegur** (*Quality factor*) *Q* näitab ahelasse (ajutiselt) salvestunud ja selles kulutatud (muuks energialiigiks muundatud) elektrienergia hulkade suhet.
- Jadaahela hüvetegur

$$Q_j = \frac{|X_j|}{R_j}.$$





- Rööpahela hüvetegur:

$$Q_p = \frac{B_p}{G_p} = \frac{R_p}{|X_p|}.$$

- Süsteemi ribalaius *B* ja hüvetegur *Q* on omavahel seotud:

$$Q = \frac{f_0}{B},$$

kus f_0 on süsteemi kesk-sagedus.

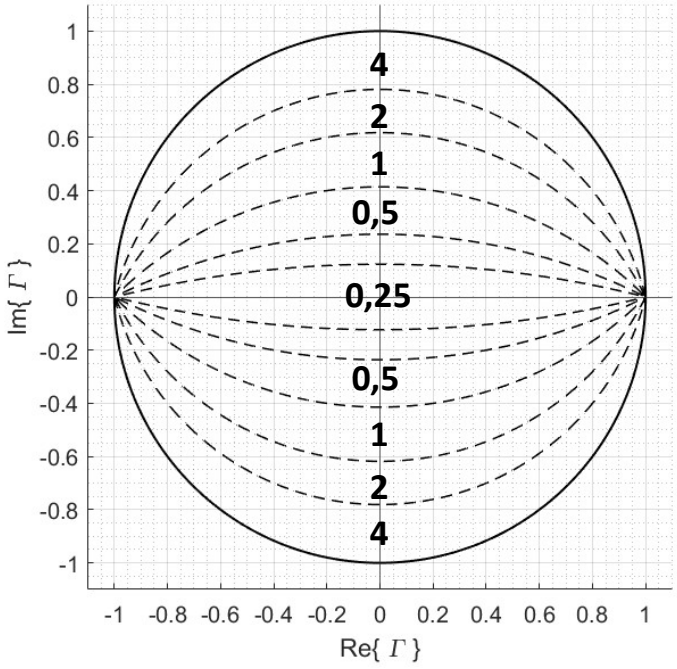
Hüveteguri kujutamine Smithi diagrammil

- Konstantse hüveteguri *Q* väärtusele vastavad Smithi diagrammil kõik punktid mille *r*/*x* = *Q*.
- Graafiliselt on tegemist kaartega mis asuvad ringjoontel keskpunktiga

$$\left(0, \pm\frac{1}{Q}\right)$$

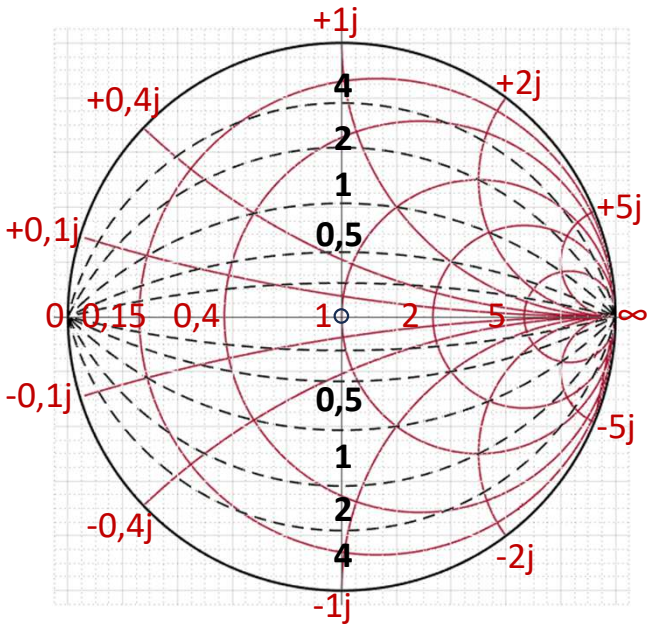
ja raadiusega

$$r = \sqrt{1 + \frac{1}{Q^2}}.$$



Hüveteguri kujutamine Smithi diagrammil

- Hüveteguri väärtusele $Q = 0$ vastab reaaltelg.
- Lõputule hüveteguri väärtusele $Q = \infty$ aga diagrammi ümbritsev ühikring.
- Konstantse hüveteguri kujutamine juhtivuse teljestikus annab tulemuseks täpselt samad kaared.

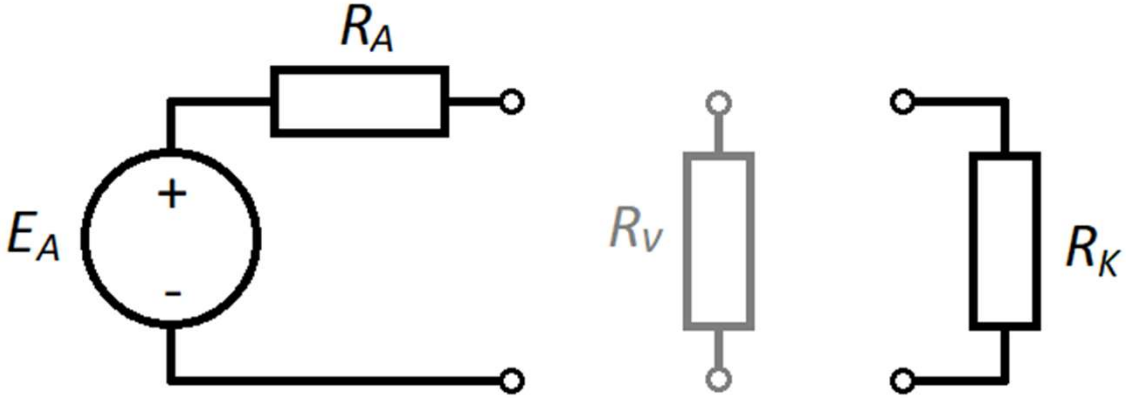


Kitsaribalised sobitusahelad

- Kahe elemendiga sobitusahelad (L-ahelad) on väiksed, odavad, minimaalsete kadudega ja kergesti arvutatavad.
- Ainsa puudusena sõltub nende ribalaius *B* ainult allika- ja koormuse impedantside reaalosadest. Ahela koostajal puudub võimalus ribalaiuse mõjutamiseks.
- Kitsaribaliste süsteemide puhul võime soovida sobitusahelat täiendavalt filtreerimiseks kasutada.
- Järgnevalt vaadeldavad ahelad võimaldavad realiseerida suuremat hüveteguri väärtust kui see oleks võimalik L-ahelaga sobitamise korral.

П- kujuline sobitusahel

- Arvutuste lähteandmeteks on
  - Allika impedants $Z_A = R_A + jX_A$;
  - Koormuse impedants $Z_K = R_K + jX_K$,
  - töösagedus *f* ning
  - Soovitav hüvetegur *Q*.



- Etteantud hüveteguri väärtuse põhjal leiame juba tuttavast seosest

$$Q = \sqrt{\frac{R_{max}}{R_v} - 1}$$

virtuaalse takistuse R_v vääruse

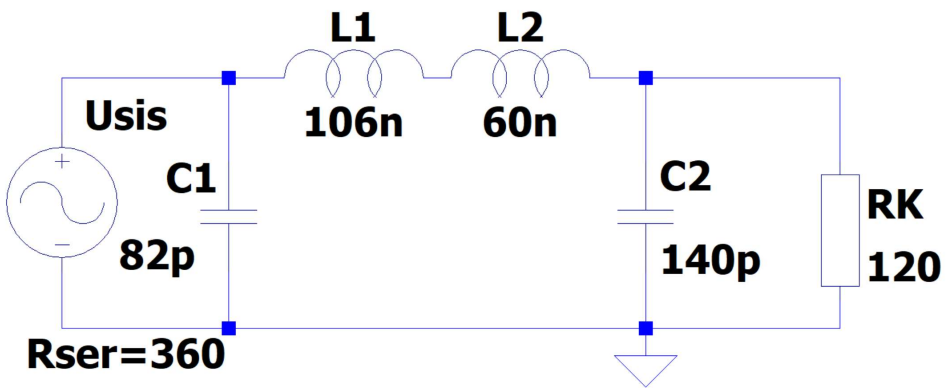
$$R_v = \frac{R_{max}}{Q^2 + 1}.$$

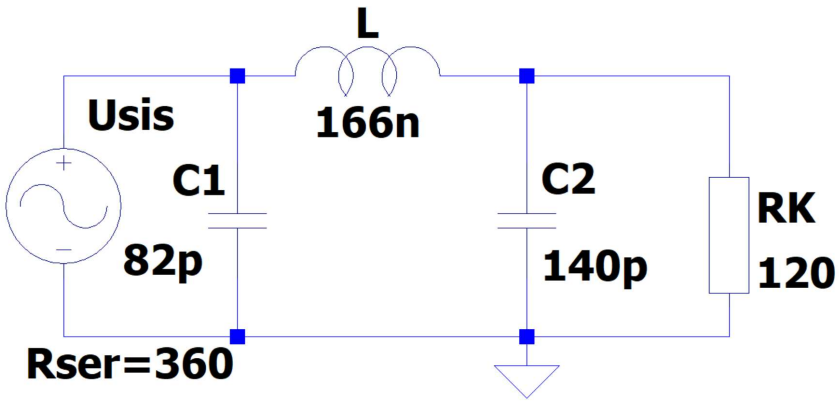
Π-kujulise ahela arvutused

- Järgnevalt koostame kaks L-kujulist ahelat.
  - Esimese neist allika ja virtuaalse takistuse sobitamiseks,
  - Teise aga virtuaalse takistuse ja koormuse sobitamiseks.
- Kuna virtuaalne takistus on väiksem nii allika- kui koormuse takistusest on Π ahela korral üks sobitusahela komponent paralleelne allikaga- ja teine koormusega.
- Mõlemad valitakse samatüübilised, ehk mõlemad on kas kondensaatorid või induktiivsused.
- Virtuaalse takistiga jadamisi olevad komponendid saab asendada üheainsaga.

Π- kujulise sobitusahela näide

Töösagedus f = 54 MHz, R_A = 360 Ω, R_K = 120 Ω ja soovitud hüvetegur Q = 10.



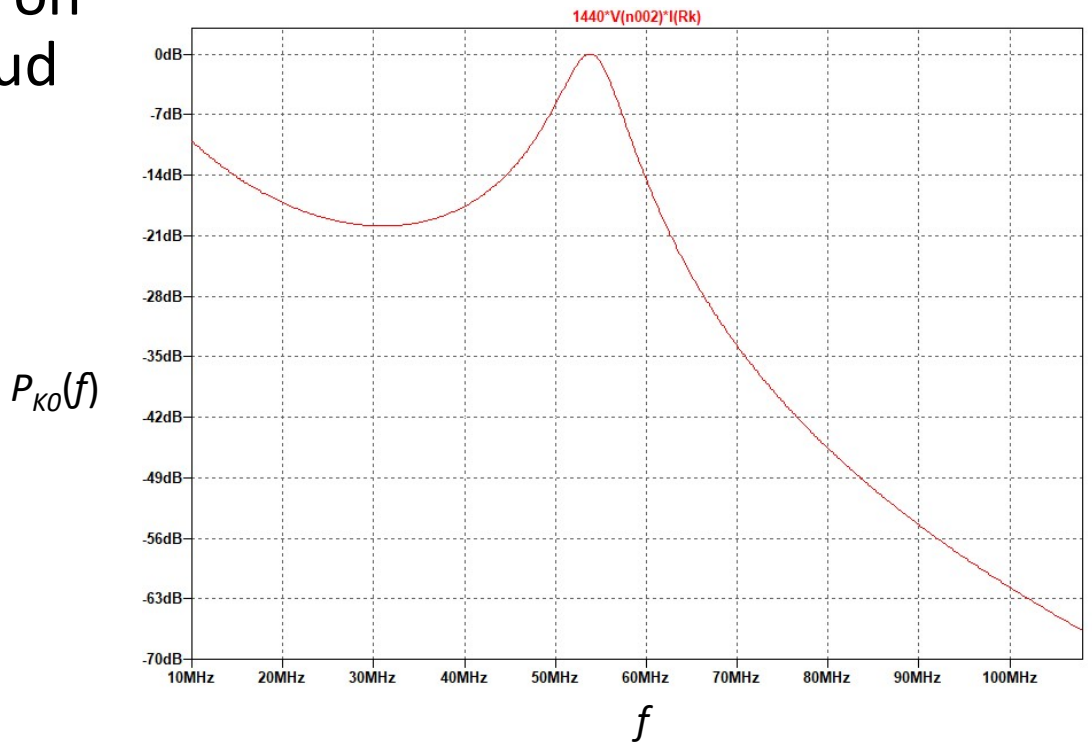


L-ahelaga sobitamisel oleks saavutatav hüvetegur ainult Q = 1,41.

Π-kujulise sobitusahela näide

- Maksimaalne väljundvõimsus on tõepoolest saavutatud soovitud töösagedusel 54 MHz.
- Ribalaius *B*, -3 dB nivool, on ligikaudu 4,5 MHz.
- Tegelik hüvetegur on seega

$$Q = \frac{f}{B} = 12.$$



T-kujuline sobitusahel

- Väikeste impedantsidega allika- ja koormuse sobitamiseks.
- Lähteandmed ja üldine arvutamise põhimõte on sama mis Π-ahela korral. Virtuaalse takistuse R_v vääruse on nüüd:

$$R_v = (Q^2 + 1)R_{min}.$$

- Järgnevalt koostatakse kaks L-kujulist ahelat, vastavalt allika- ja koormuse sobitamiseks virtuaalse takistusega.
- Lõpliku sobitusahela kuju meenutab T - tähte.

Laiaribalised sobitusahelad

- Moodsates side- ja infohankesüsteemides kasutatakse tihtipeale suure ribalaiusega signaale.
- Sellisel juhul võib tekkida vajadus allika- ja koormuse vahelise sobituse tagamiseks suures sagedusvahemikus. Teisisõnu tekib vajadus madala hüveteguriga sobitusahelate järele.
- Järgnevalt vaadeldavad, laiaribalised (*wideband*) sobitusahelad, võimaldavad realiseerida väiksemat hüveteguri väärtust kui see oleks saavutatav lihtsalt L-ahelaga sobitades.

Laiaribalised sobitusahelad

- Arvutuste lähteandmed on samad mis eelnevalt: allika- ja koormuse impedantsid Z_A ja Z_K, kesk-sagedus f ja soovitav hüveteguri väärtus Q.
- Virtuaalse takisti väärtus R_v valitakse nüüd R_A ja R_K vahel. Ehk suurem kui R_{min} ja samas väiksem kui R_{max} ehk: $R_{min} < R_v < R_{max}$.
- Kõige madalam hüvetegur ja seega suurim võimalik ribalaius saavutatakse, kui virtuaalse takisti taksitus on võrdne allika ja koormuse takistuste geomeetrilise keskmisega

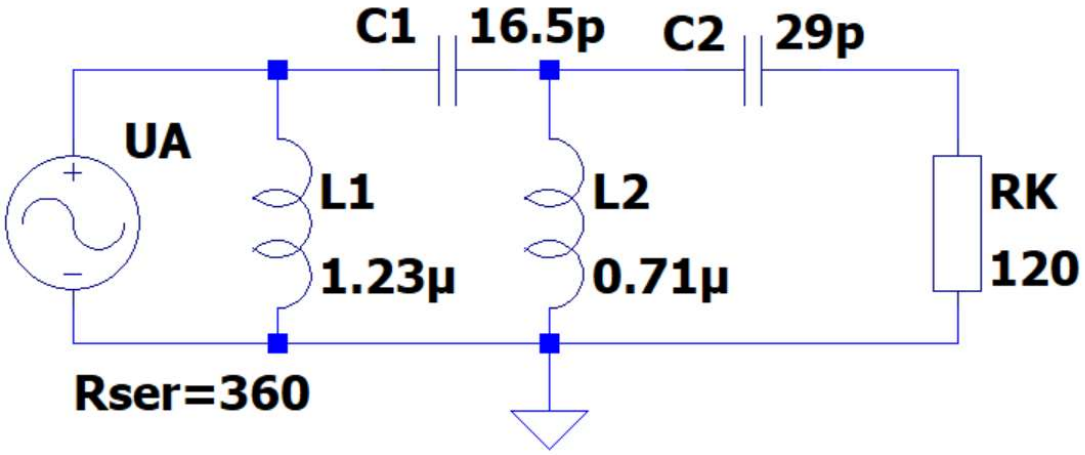
$$R_v = \sqrt{R_A R_K}.$$

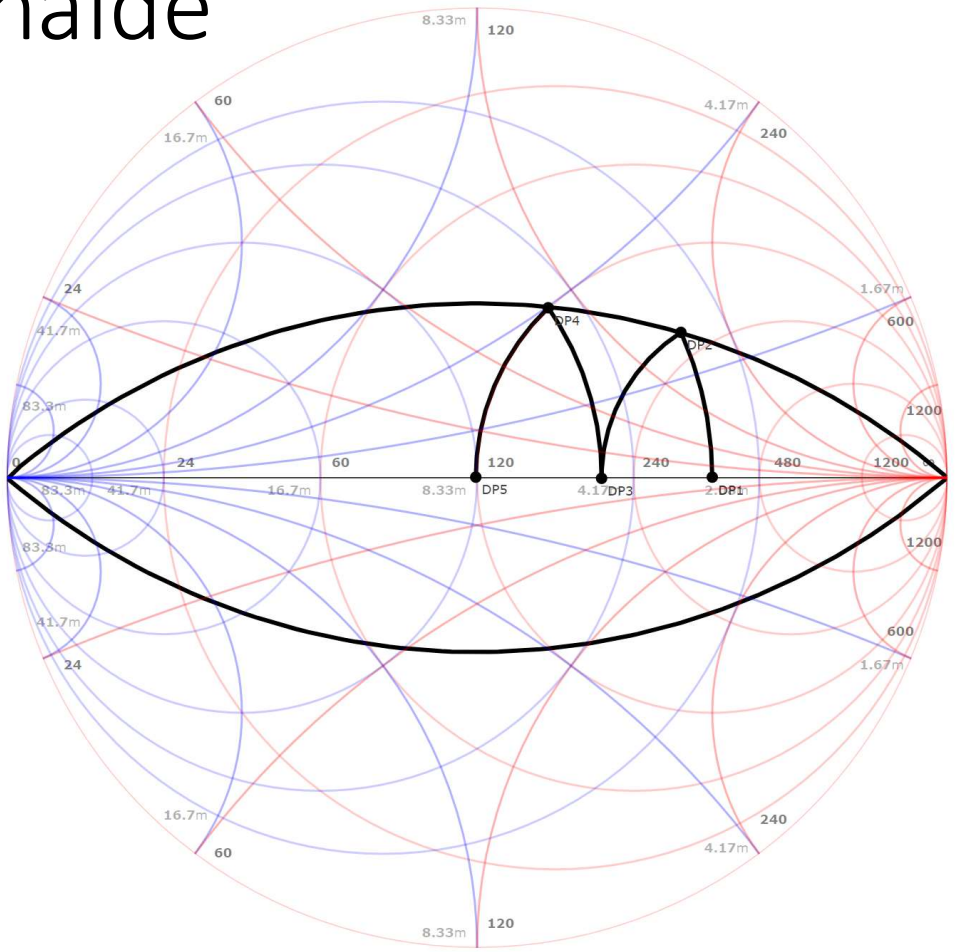
- Hüveteguri väärtus sellisel juhul:

$$Q = \sqrt{\frac{R_v}{R_{min}} - 1} = \sqrt{\frac{R_{max}}{R_v} - 1}.$$

Laiaribalise sobitusahela näide

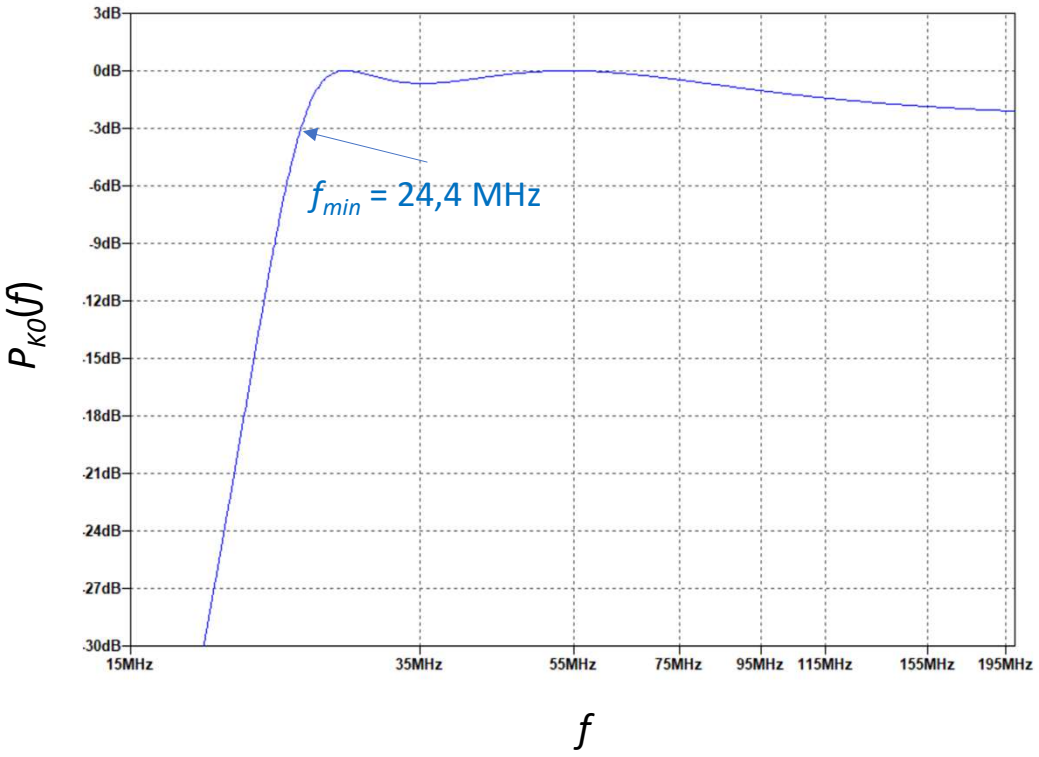
- Töösagedus f = 54 MHz, R_A = 360 Ω ja R_K = 120 Ω.
- Eesmärgiks maksimaalne ribalaius, antud juhul Q = 0,86.





Smithi diagramm: https://www.will-kelsey.com/smith_chart/

Laiaribalise sobitusahela näide



- Võimsuse ülekanne on vähenenud 3 dB võra sagedusel 24,4 MHz.
- Ligikaudne ribalaiuse hinnang $B \approx 2(f - f_{min}) = 59{,}2\ \mathrm{MHz}$.
- Vastav hüvetegur

$$Q = \frac{f}{B} = 0{,}91.$$

- Erinevus arvutuslikuga alla 6 %.

Laiaribalised sobitusahelad

- Juhul kui kahest L-kujulisest ahelast ei piisa soovitud ribalaiuse realiseerimiseks, siis tuleb järjestikuste ahelate arvu suurendada. Minimaalne hüvetegur on saavutatav juhul kui

$$\frac{R_{v1}}{R_{min}} = \frac{R_{v2}}{R_{v1}} = \frac{R_{v3}}{R_{v2}} = \cdots = \frac{R_{vn}}{R_{max}},$$

  kus R_{v1} … R_{vn} on vastavate ahelate arvutamise aluseks olevad virtuaalsed takistid.

- Iga individuaalse L-kujulise ahela disainiprotsess on ikka samasugune nagu me seda juba varasemast teame.

LISA A: Jada - rööpteisendus

- Mingil fikseeritud sagedusel *f* on igale RC ja LC jadaahelale võimalik leida ekvivalentne (RC või LC) rööpahel. Kui jadaahela impedants on $Z_j = R_j + jX_j$ siis vastava rööpahela takistus on leitav kui

$$R_p = \frac{|Z_j|^2}{R_j} = \frac{R_j^2 + X_j^2}{R_j}.$$

- Viimasega rööbiti on siis reaktiivtakistus suurusega

$$X_p = -\frac{|Z_j|^2}{X_j} = -\frac{R_j^2 + X_j^2}{X_j}.$$

- Loomulikult on teisendus võimalik ka vastupidises suunas $Z_p \rightarrow Z_j$.

LISA A: Jada – rööpteisendus hüveteguri kaudu

- Kui meil on teada jadaahela hüvetegur Q_j saab ekvivalentse rööpahela leida ka selle kaudu. Ilmselgelt ei sõltu hüvetegur sellest kas kirjeldame ahelat jada- või rööpskeemina, seega $Q_j = Q_p = Q$.
- Rööpahela takistus

$$R_p = R_j(1 + Q^2).$$

- Rööpahela reaktiivkomponendi reaktiivtakistus aga

$$X_p = X_j\left(1 + \frac{1}{Q^2}\right).$$

- Ka see teisendus on loomulikult mõlemasuunaline.