

2. DISKREETELEMENTIDEL SOBITUSAHELAD

THOMAS JOHANN SEEBECKI ELEKTROONIKAINSTITUUT

TALLINN
2024

Diskreetelementidel sobitusahelad

Töö eesmärgid:

Töö eesmärkideks on tutvumine erinevate, diskreetelementide põhjal valmistatud, sobitusahelatega. Töö käigus arvutatakse erinevate sobitusahelate komponentide väärtused ning mõõdetakse koostatud ahelate sobitust.

Kasutatavad seadmed ja vahendid:

- Spektri- ja siduanalüsaator R&S FSH4
- Kalibreerimiskomplekt ZV-Z135
- 1 m pikkune, SMA otsikutega, koaksiaalkaabel
- Trükkplaat sobitusahelate komponentidega (vt Joonis 4)
- Sillused (*juniper*) komponentide valikuks trükkplaadil

Töö teoreetilised alused:

Impedantside sobitamine:

Võimsuse ülekanne allikast koormusesse on maksimaalne, kui allika ja koormuse impedantsid Z_A ja Z_K on omavahel sobitatud. **Sobituseks** nimetatakse olukorda, kus vastavate impedantside reaalsed osad on omavahel võrdsed ($R_A = R_K$) ja imaginaariosad on moodulilt võrdsed, kuid märgilt vastupidised ($X_A = -X_K$). Lühemalt öeldes peavad allika ja koormuse impedantsid olema vastastiku teineteise kaaskompleksarvud (*complex conjugates*): $Z_A = Z_K^*$.

Kui ülalmainitud sobituse tingimus ei ole täidetud, siis peegeldub osa, allikast koormusesse langevast signaalist, koormuselt tagasi. Peegeldunud laine U^- suhet langevasse lainesse U^+ väljendab koormuse **peegeldustegur**

$$\Gamma_K = \frac{U^-}{U^+} = \frac{Z_K - Z_A}{Z_K + Z_A}. \quad (1)$$

Multipordi korral väljendatakse i -nda pordi peegeldustegurit ka hajuparameetri s_{ii} kujul. Logaritmilisel skaalal väljendatakse peegeldustegurit **peegelduskao** (*return loss*) kujul

$$RL = -20 \log(|\Gamma|). \quad (2)$$

Tihti peale jäetakse avalise (2) eest miinusmärk ära. Lahkusobituse suurst, eriti just antennitehnikas, saab väljendada ka **seisulaineteguriga** (*Voltage Standing Wave Ratio*)

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}. \quad (3)$$

Peegelduste tõttu ei jõua kogu saadaval olev võimsus koormusesse, põhjustades nn **lahkusobituskao** (*mismatch loss*). Viimaset väljendatakse kui koormusesse jõudnud võimsuse suhet saadavalolevasse võimsusesse, väljendatuna detsibellides on avaldis

$$ML = -10 \log(1 - |\Gamma|^2). \quad (4)$$

Energia, mis ei jõua lahusobituse tõttu allikast koormusesse põhjustab mitmeid probleeme. Suurte võimuste korral võib olla tagajärjeks allika, näiteks raadiosaatja, ülekuumenemine või tehniline rike. Nõrkade signaalide vastuvõtul kahaneb süsteemi tundlikus ja seega ka sidekaugus ja süsteemi häirekindlus.

Kirjeldatud probleemide vältimiseks ühendatakse allika- ja koormuse vahele sobitusahel. Tegemist on elektriahelaga mille ülesandeks on allika ja koormuse vahelise energiaülekande maksimeerimine. Sobitusahelate koostamiseks on palju erinevaid võimalusi: L-, Π - ja T- ahelad diskreetelementidel, transformaatorid, sobitusahelad ülekandeliini lõikudel jne.

Lihtsuse mõttes käsitlema käesolevas praktikumis ainult kahe aktiivtakistuse omavahelist sobitamist. Reaalses elus on tihtipeale allika- ja/või koormuse impedantsidel ka mittenulline imaginaarosa, millega tuleb sobitusahela arvutamisel ja koostamisel ka arvestada.

Diskreetelementidel sobitusahelad

Käesolevas töös uurime lähemalt diskreetelementide baasil valmistatud sobitusahelaid. Viimased koosnevad kahest või enamast kondensaatorist ja induktiivpoolist. Taolised sobitusahelad on sobivad kasutamiseks suhteliselt madalatel, kuni 50 MHz suurusjärku jäävatel, sagedustel. Lahenduse eelisteks on kasutatavate komponentide väikesed mõõdud, madal hind ja vajalike arvutuste lihtsus. Samuti piisab üldjuhul ahela realiseerimiseks maksimaalselt kahest – kolmes komponendist. Puudujääkidenä võib mainida, lisaks piiratud töösagedusele, ka asjaolu, et komponente toodetakse ainult lõpliku hulga fikseeritud väärtustega. Seega ei pruugi arvutuste tulemusel saadud väärtusega komponente üldse olemas olla.

Nagu eelnevalt mainitud võib diskreetelementidel realiseerida kolme erineva topoloogiaga sobitusahelaid: L-, Π - ja T- kujulisi. Antud töös käsitleme neist kahte esimest tüüpi, alustades lihtsamaist, L-kujulisest sobitusahelast. Arvutuste aluseks on allika- ja koormuse takistused R_A ja R_K ning ahela töösagedus f .

Esmalt on vaja leida koostatava ahela hüvetegur (*quality factor*) Q avaldisega

$$Q = \sqrt{\frac{R_{max}}{R_{min}}} - 1. \quad (5)$$

Avaldises tähistab R_{max} suuremat kahest antud takistusest, sarnaselt tähendab R_{min} väiksemat arvutuste lähteandmeteks olevatest takistustest. Matemaatiliselt väljendatuna:

$$\begin{aligned} R_{max} &= \max(R_A, R_K) \\ R_{min} &= \min(R_A, R_K) \end{aligned} \quad (6)$$

L-ahel koosneb kahest reaktiivkomponendist, ühest kondensaatorist ja ühest induktiivpoolist. Üks neist kahest komponendist ühendatakse **jadamisi väiksema takistusega** ja teine **paralleelselt** (rööbiti) **suurema takistusega**. Väiksema takistusega jadamisi ühendatava komponendi reaktiivtakistuse X_j moodul on leitav kui

$$|X_j| = Q R_{min}. \quad (7)$$

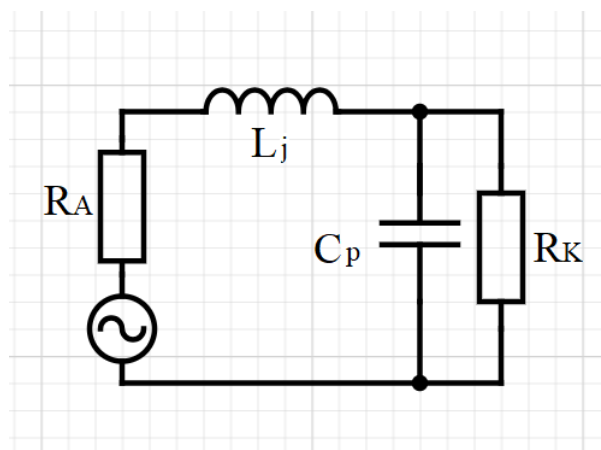
Kui see komponent on induktiivsus, siis on tema reaktiivtakistus $X_L = j|X_j|$, kui aga mahtuvus (kondensaator) siis $X_C = -j|X_j|$. Konstant j on imaginaarühik, mis on teatavasti võrdne ruutjuurega miinus ühest.

Teine L-ahela reaktiivkomponent, mis ühendatakse rööbiti suurema takistusega, omab reaktiivtakistuse X_p moodulit

$$|X_p| = \frac{R_{max}}{Q}. \quad (8)$$

Sarnaselt eelnevale, kui paralleelkomponent on induktiivsus, siis on tema reaktiivtakistus $X_L = j|X_p|$ ja kui mahtuvus, siis $X_C = -j|X_p|$.

Puhtalt sobituse seisukohast ei ole mingit vahet millist tüüpi reaktiivkomponent on ahelas jadamisi- ja milline rööbiti ühendatud. Seega valitakse komponentide asukohad muudest asjaoludest lähtuvalt. Näiteks jadamisi ühendatud kondensaator takistab alalispinge läbipääsu allikast koormusesse. Jadamisi ühendatud induktiivsuse puhul moodustab aga sobitusahel madalpääsfiltri mis aitab lisaks sobitamisele ka kõrgemaid harmoonilisi ülekantavast signaalist välja filtreerida. Viimane konfiguratsioon on ka kujutatud alloleval Joonis 1. Konkreetse näites on koormuse takistus R_K suurem kui allika oma R_A ja seega on mahtuvus C_p ühendatud koormusega paralleelselt. Sobitusahela induktiivsus L_j on aga ühendatud allikaga jadamisi.



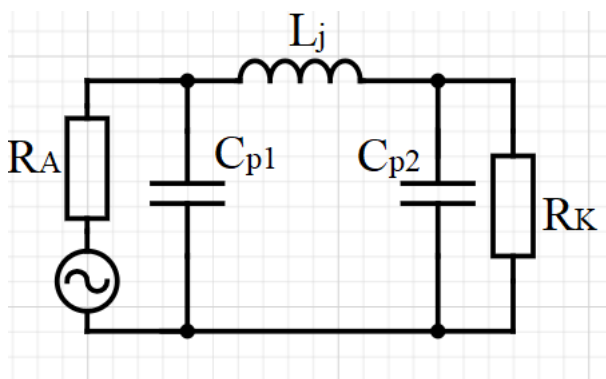
Joonis 1. L-ahela põhimõtteskeem

Induktiivsuse- ja mahtuvuse väärtused saab leida kasutades vastavate komponentide reaktiivtakistuste avaldisi:

$$|X_L| = 2\pi f L, \quad (9)$$

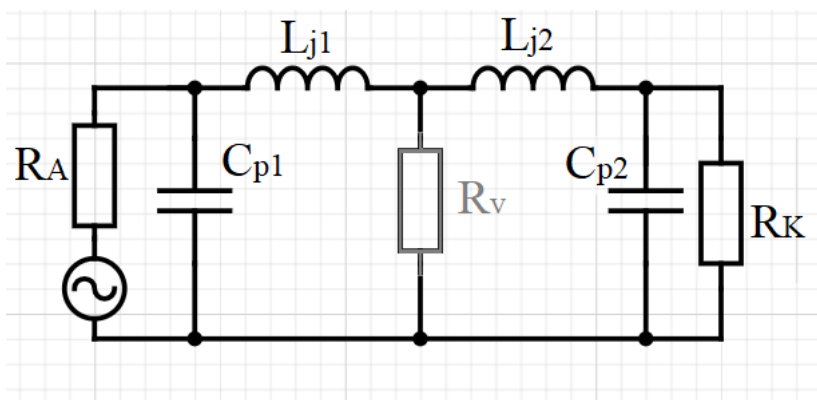
$$|X_C| = \frac{1}{2\pi f C}. \quad (10)$$

L-kujuline sobitusahel, koosnedes ainult kahest komponendist, on lihtsaim võimalik omataoliste seas. Viimase üheks suurimaks puuduseks on asjaolu, et ahela hüvetegur ja seega ka ribalaius on määratud allika- ja koormuse takistustega. Kui me soovime ise määrata allika hüvetegurit siis tuleb kasutada kolme- elementilist Π -kujulist sobitusahelat mille põhimõtteskeemi kujutab Joonis 2. Ka sellise ahela puhul on võimalik kaks erinevat konfiguratsiooni. Jadamisi ühendatud induktiivsusega, madalpääsfiltri konfiguratsioonis, nagu näidatud joonisel või jadamisi ühendatud mahtuvusega variant, mille korral on nii allika kui koormusega roobitu ühendatud induktiivpoolid. Käesolevas töös uurime just esimest versiooni.



Joonis 2. Π - kujulise sobitusahela põhimõtteskeem

Π -kujulist sobitusahelat saab vaadelda kui kahte kokku ühendatud L-kujulise ahela kombinatsioonid. Kusjuures mõlemad L-kujulised ahelad on disainitud sobitamaks, vastavalt allika- ja koormuse impedantsi, virtuaalse takistiga R_v (vt Joonis 3).



Joonis 3. Π - kujulise sobitusahela koostamise aluseks olev põhimõtteskeem

Virtuaalne takistus R_v peab olema väiksem nii allika- kui koormuse takistustest, muid piiranguid selle väärtusele pole. Selleks et sobitusahelal oleks, ligikaudne, hüveteguri väärtus Q peab virtuaalse takisti takistus olema:

$$R_v = \frac{R_{max}}{Q^2 + 1} . \quad (11)$$

Järgnevalt arvutame välja kaks L-kujulist ahelat ja, meie näite korral, asendame kaks eraldi induktiivpooli ühega, mille induktiivsuse on võrdne nende kahe summaga.

Töö käik:

Enne mõõtmiste sooritamist tuleb meil välja arvutada kõigi kolme ahela komponentide väärtused (mahtuvused ja induktiivsused). Viimast on soovitatav teha kodus, enne praktikumi tulemist.

Koormuse takistus on kõigil kolmel juhul $100\ \Omega$. Signaalliallikaks on siduanalüsaator karakteristliku impedantsiga $50\ \Omega$. Kõikide sobitusahelate töösagedus on $f_0 = 90\ \text{MHz}$.

1. Arvuta madalpääsfiltri konfiguratsioonis L-kujulise sobitusahela komponentide väärtused. Ahel peab võimaldama alalisvoolu pideva kulgemise allikast koormusesse. Taolise sobitusahela põhimõtteskeemi kujutab Joonis 1. Esita praktikumi aruandes oma arvutused ja nende tulemused.
2. Järgmisena arvuta kõrgpääsfiltri konfiguratsioonis L-kujulise sobitusahela komponentide väärtused. Selline ahel peab, vastupidiselt eelmisele, täksitama alalisvoolu pääsemise allikast koormusesse. Esita praktikumi aruandes oma arvutused ja nende tulemused.
3. Kolmandaks tuleb arvutada Π -kujuline sobitusahel antud allika ja koormuse sobitamiseks. Nagu eelnevalt mainitud, kasutame Joonis 2 kujutatud konfiguratsiooni jadamisi ühendatud induktiivpooli ja rööpmahtuvustega. Hüveteguri väärtuseks valida $Q = 3$. Esita ka nende arvutuste käik ja tulemused oma aruandes.
4. Ahelate arvutamisele oleme nüüd ühele poole saanud. Järgnevalt arvuta peegeldusteguri väärtus olukorras kus allikas ja koormus on otse, ilma igasuguse sobitusahelata, kokku ühendatud. Saadud tulemus annab võimaluse hinnata kui palju kasutatud sobitusahelad energiaülekannet tõhusamaks muudavad.

Arvutuste tulemused võin veebikalkulaatori abil [4] üle kontrollida.

Tabel 1. Trükkplaadile joodetud komponentide nimiväärtused

Allikaga rööbiti		
<i>Väärtus</i>	<i>Komponent</i>	<i>Sillus</i>
$68\ \text{pF} \pm 1\%$	C5	JP4
Jadamisi		
$36\ \text{pF} \pm 1\%$	C8	JP1
$83\ \text{nH} \pm 2\%$	L3 or L4	JP2 or JP3
Rööbiti koormusega ($100\ \Omega$ takisti R5)		
$51\ \text{pF} \pm 1\%$	C6	JP5
$16\ \text{pF} \pm 1\%$	C7	JP6
$180\ \text{nH} \pm 2\%$	L5	JP7

Trükkplaadile joodetud komponentide tegelikud väärtused on toodud Tabel 1. Need väärtused ei ole täpselt samad kui need, mida leiame oma arvutuste käigus. Põhjuseid selleks on mitmeid. Esiteks ei ole reaalselt võimalik valmistada kõikvõimalike väärtustega komponente. Seega tuleb praktiliseks kasutamiseks valida lähim

saadavalolev väärtus või kombineerida mitut komponenti sobiva summaarse tulemuse saamiseks. Teine põhjus on tingitud asjaolust, et komponentide valikuks kasutatavate silluste parasiitinduktiivsus on 4 nH suurusjärgus. Nende mõju vähendamiseks tuli trükkplaadile joodetud komponentide väärtuseid mõnevõrra kohendada.

Praktikumis tehtavate mõõtmiste jaoks valige lihtsalt tabelist arvutatud väärtusele lähima nimiväärusega komponent.

Mõõtetulemuste salvestamiseks kasutame Rohde&Schwarz'i R&S InstrumentView tarkvara. Ühenduse loomist arvuti ja siduanalüsaatori vahel kirjeldatakse piisava detailsusega käesoleva juhendi lõpus olevas lisas. Peale FSH4 sisselülitamist veenduda, et seade töötab siduanalüsaatori režiimis. Vajalikku režiimi lülitamiseks vajutada seadme esipaneelil nuppu *<MODE>* ja seejärel *<F2>* (*Network Analyzer*).



Mõõtmiste juures tuleb jälgida, et kuvatavad graafikud oleksid ekraanile mahutatud selliselt, et midagi ei jääks ekraani serva taha ja samas nii, et suurem osa ekraani pinnast oleks kasutatud. Graafiku automaatseks ekraanile mahutamiseks on soovitatav kasutada automaatset skaleerimise funktsiooni: *<AMPT>* → *Range* → *Auto Scale*. Loomulikult võib skaalat sobivaks seadistada ka käsitsi.

Graafikuid võib salvestada otse .png formaadis pildifailina, kuid kui seda teha .csv formaadis andmetena siis on võimalik tulemusi hiljem töödelda ning kujundada jooniseid endale meelepärasele kujule.

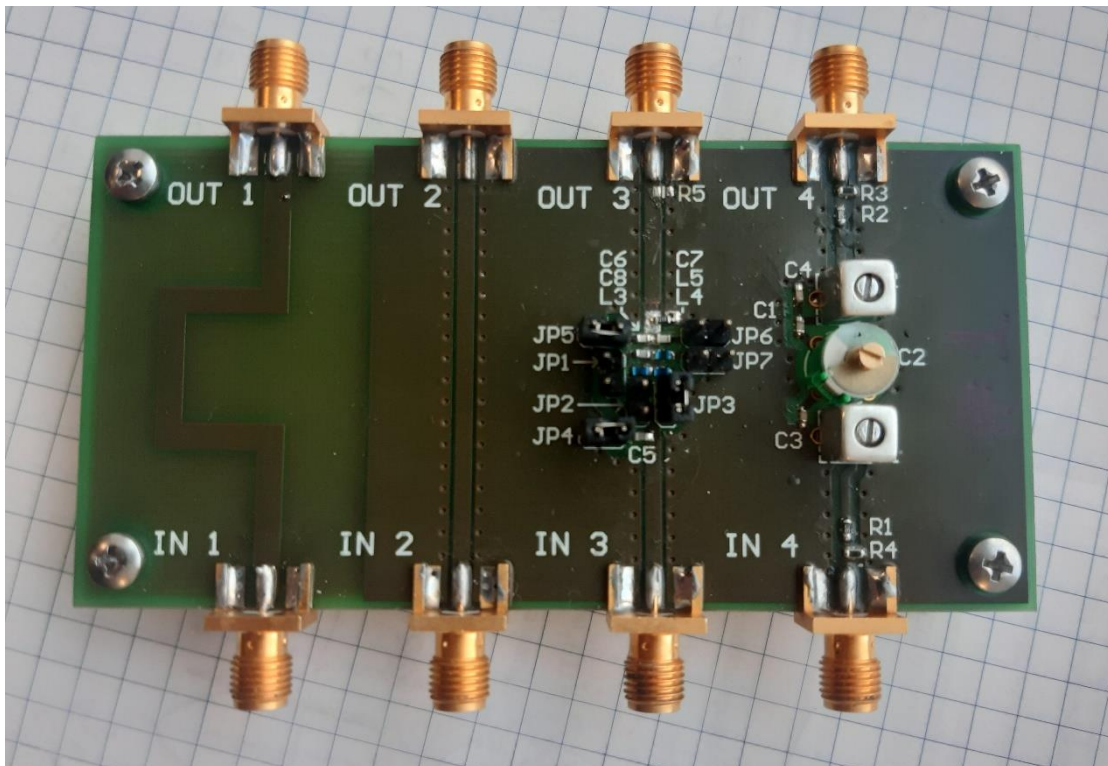
Enne mõõtmiste tegemist tuleb siduanalüsaatorit kalibreerida peegeldusteguri mõõtmiseks (*Reflection Port 1*). Kalibreerimise eesmärgiks on minimeerida, mõõdetava seadme ja siduanalüsaatori ühendamiseks kasutatava kaabli mõju mõõtetulemustele. Seega tuleb vastav kaabel enne kalibreerimist siduanalüsaatori esimese pordi (*PORT 1*) külge ühendada. Samuti tuleb enne kalibreerimist seadistada mõõtmisteks kasutatavate sageduste vahemik (*span*). Käesolevas töös valida vahemikus 10 – 150 MHz.

Kalibreerimise protseduuri ennast kirjeldatakse detailselt mõõteriista juhendi „R&S® FSH4/8/13/20 Spectrum Analyzer Quick Start Guide [1]“ lehekülgedel 60 ja 61. Kasutatav kalibreerimiskomplekt on ZV-Z135. Kui analüsaator palub kalibreeritava kaabliga ühendada „LOAD“ siis selleks kasutada kalibreerimiskomplekti „MATCH“ porti.

Enne mõõtmiste alustamist veendu, et siduanalüsaator kuvab ekraanil peegeldusteguri mooduli väärtust $|S_{11}|$.

Ühenda sillustega sobitusahela külge komponendid mis on vajalikud punktis 1. arvutatud L-kujulise sobitusahela realiseerimiseks. Ühenda trükkplaadi port (*IN 3*) mõõtekaabli lahtise otsa külge, samasse kohta kuhu kalibreerimise käigus ühendasid kalibreerimiskomplekti.

5. Leia, millisel sagedusel f_{opt} on sobitus kõige parem. Sellel sagedusel on sisendi peegeldusteguri mooduli väärtus minimaalne. Kui suur on sellel sagedusel sisendi sobituse väärtus $|S_{11}(f_{opt})|$? Esita nii sagedus kui peegeldusteguri mooduli väärtus sellel sagedusel oma aruandes.
6. Kui suur on mõõdetav, koormuse ja sobitusahela ühine, impedants sellel sagedusel $Z(f_{opt}) = R + jX$? Esita mõõdetud väärtus oma aruandes. Impedantsi saam mõõta markeri abil valides: *MARKER – Marker Mode – R + jX*.
7. Järgmisena nihuta marker arvutuste aluseks olevale töösagedusele $f_0 = 90$ MHz. Mõõda sellel sagedusel nii peegeldusteguri mooduli $|S_{11}(f_0)|$ kui ka impedantsi väärtused $Z(f_0)$, esita ka need tulemused oma aruandes.
8. Salvesta impedantsi mooduli sagedussõltuvuse graafik $|S_{11}(f)|$ ja esita see oma aruandes.



Joonis 4. Trükkplaat sobitusahela komponentidega

Kui kirjeldatud mõõtmised esimese sobitusahelaga on teostatud siis ühenda sillused ümber selliselt, et moodustuks punktis 2. arvutatud, kõrgpääsfiltri konfiguratsioonis, L-kujuline sobitusahel. Korda selle ahelaga punktides 5. – 8. kirjeldatud mõõtmisi.

Viimasena tõsta sillused ümber ja moodusta 3. punktis arvutatud Π -kujuline sobitusahel. Korda ka selle ahelaga punktides 5. – 8. kirjeldatud mõõtmisi.

Aruandes esitada:

Alljärgnev kontrollnimekiri aitab esmalt veenduda, et kõik vajalikud mõõtmised on tehtud ja nende tulemused aruandes kasutamiseks salvestatud. Samuti aitab nimekiri veenduda, et praktikumi aruandele on lisatud nõutavad arvutused, järeldused ja analüüsi tulemused.

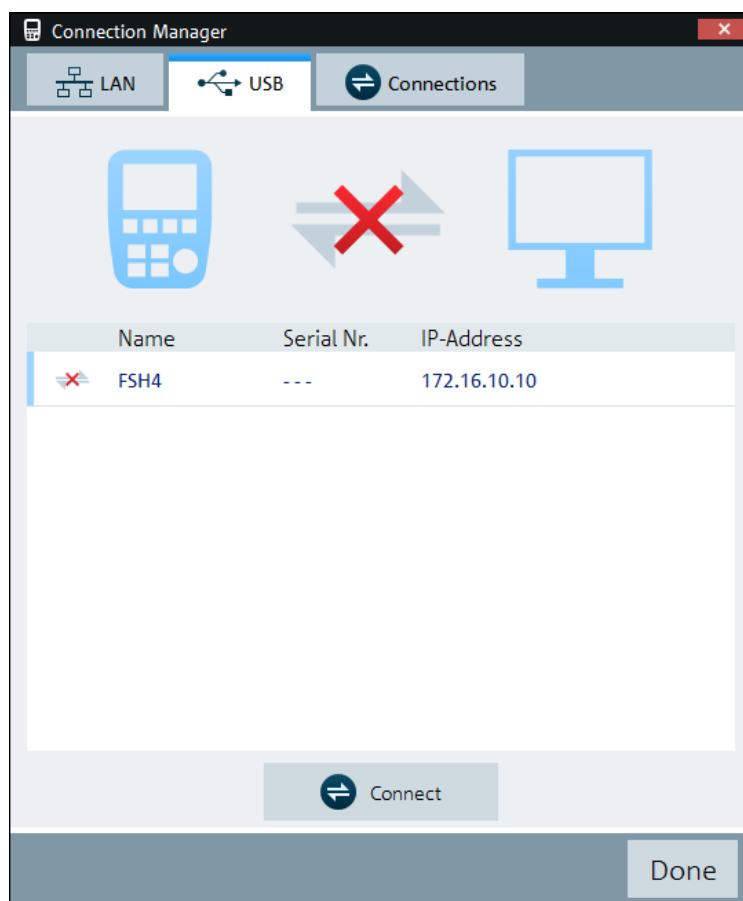
- Kõigi kolme sobitusahela arvutused (punktid 1.-3.). Tulemusteks on siis kõikide kasutatavate kondensaatorite mahtuvused ja poolide induktiivsused. Täiendavalt esitada oma aruandes ka allika- ja koormuse impedantsid, sobitusahelate töösagedus ja Π -kujulise sobitusahela hüvetegur.
- 4. punktis arvutatud peegeldustegur allika ja koormuse omavahel otse ühendamise korral.
- Parima sobituse sagedus f_{opt} ja parima sobituse väärtused $|S_{11}(f_{best})|$ kõigi kolme sobitusahela korral.
- Mõõdetud impedantsid $Z(f_{opt})$ sagedusel mis tagas parima sobituse – samuti kõigi kolme ahela korral.
- Mõõdetud peegeldustegur $|S_{11}(f_0)|$ ja impedants $Z(f_0)$ valitud töösagedusel f_0 . Ikka kõigi kolme ahela korral.
- Sobituse sagedussõltuvuse graafikud $|S_{11}(f)|$ kõigi kolme sobitusahela korral. Omavahelise võrdluse teeb lihtsamaks, kui kõik kolm esitada samas teljestikus. Soovi korral võib anda ka igäühe eraldi joonisena.
- Milline kolmest uuritud sobitusahelast tagasi töösagedusel parima sobituse. Kui palju parandas sobitusahelate kasutamine sooritust võrreldes juhuga kui allikas ja koormus otse kokku ühendada.
- Järeldused ja kokkuvõte.

Täiendavaid materjale:

- [1] R&S®FSH4/8/13/20 Spectrum Analyzer Quick Start Guide. https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_manuals/gb_1/f/fsh_1/FSH_QuickStartGuide_en_FW3.20.pdf , 16.09.24
- [2] R&S®FSH Handheld Spectrum Analyzer Quick Start.
- [3] Chis Bowick. RF Circuit Design. Second Edition. Elsevier 2008.
- [4] L-Matching Impedance Network Calculator. <https://www.eeweb.com/tools/l-match/>, 16.09.24

LISA A – Siduanalüsaatori ja arvuti vahelise ühenduse loomine

1. Käivita arvutis *R&S InstrumentView* tarkvara. *Connection Manager*'i aken peaks avanema automaatselt. (vt joonis A.1).
2. Vali USB sakk (*tab*) ja vajuta *Connect* nuppu. Ühenduse loomine võid veidi aega võtta, peale selle lõppu vajuta *Done* nuppu ja ühendus ongi tööks valmis.



Joonis A.1 *R&S InstrumentView* tarkvara *Connection Manager*'i aken

3. Kui ühenduse loomine ei peaks miskipärast õnnestuma, siis vajuta siduanalüsaatori esipaneeli paremas servas olevat <SETUP> nuppu.
4. Avanenud *Instrument Setup* dialoogiaknas saab liikuda kas mõõteriista esipaneelil olevat ketast või nooleklahve kasutades.
5. Dialoogiakna jaotise *LAN Port* juures seadistada *DHCP* olekuks „On“ või sisestada käsitsi sama IP aadress mis on näha *Connection Manager*'i aknas (172.16.10.10). Seejärel tuleb ühenduse loomiseks korrata teist punkti siinses loetelus.