1. TAKISTUSLIK HARGMIK

THOMAS JOHANN SEEBECKI ELEKTROONIKAINSTITUUT

TALLINN
2024

Raadiosagedusliku elektroonika IEE2560 laboratoorne töö

Takistuslik hargmik

Töö eesmärgid:

- Siduanalüsaator (*network analyser*), selle ehitus, tööpõhimõte ning kasutamine ahela hajuparameetrite mõõtmiseks.
- Takistuslik hargmik, selle ehitus, tööpõhimõte, parameetrid ja võimalikud rakendused.
- Passiivse, lineaarse multipordi hajuparameetrid, nende mõõtmine, esitamine ja saadud tulemuste tõlgendamine.

Kasutatavad seadmed ja vahendid:

- Spektri- ja siduanalüsaator R&S FSH4;
- Kalibreerimiskomplekt ZV-Z135;
- 50 Ω takistuslik hargmik (vt joonis 2);
- Üleminekud ja ühendusjuhtmed:
  - 1 m pikkune, SMA otsikutega, koaksiaalkaabel;
  - 18 cm pikkune koaksiaalkaabel;
  - 50 Ω SMA terminaator;
  - SMA lühis (*short*);
  - „isane-isane“ SMA üleminek.

Töö teoreetilised alused:

Siduanalüsaator (*network analyser*) on seade kõrgsageduslike elektriahelate impedantsi mõõtmiseks. Kuna suurtel sagedustel on impedantsi enda mõõtmine tehniliselt keerukas, siis tegelikult mõõdetakse seadmega ahela haju- ehk S-parameetreid (*scattering parameters*). *N*-pordi hajuparameetrid S_{ij} on defineeritud kui pordis i mõõdetud reaktsiooni (peegelduva laine U_i^-) ja porti j antava testsignaali (langeva laine U_j^+) suhe:

$$S_{ij} = \left.\frac{U_i^-}{U_j^+}\right|_{U_n^+=0, k\neq j} . \qquad (1)$$

Hajuparameetreid mõõdetakse **sobitatud** portide korral mistõttu et kõikides ülejäänud portides langev laine puudub ($U_n^+ = 0$, kui $k \neq j$). Langevat- ja peegeldunud lainet tähistatakse kirjanduses tihtipeale ka väikeste tähtedega a ja b.

Kui peegeldunud signaali mõõdetakse samast pordist, kuhu antakse ka testsignaal ($i = j$) siis on tulemuseks antud pordi **peegeldustegur** Γ. Teades analüsaatori

karakteristliku impedantsi (tavaliselt on selleks Z_0 = 50 Ω) on võimalik mõõdetud peegeldusteguri järgi välja arvutada selle pordi impedants:

$$Z_i = Z_0 \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma} = Z_0 \frac{1+S_{ii}}{1-S_{ii}} \,. \tag{2}$$

Peegeldusteguri moodul $|\Gamma|$, väljendatuna logaritmilistes ühikutes [dB], kannab **peegelduskao** (*Reflection Loss*) nime:

$$\mathrm{RL}_i = -20\log(|\Gamma|) = -20\log(|S_{ii}|). \tag{3}$$

Samuti saab peegeldusteguri mooduli $|\Gamma|$ kaudu leida seisulaineteguri (*Voltage Standing Wave Ratio*) väärtuse:

$$\mathrm{VSWR} = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \,. \tag{4}$$

Kui peegeldunud lainet mõõdetakse mõnest teistest pordist kui see kuhu antakse testsignaal (langev laine), siis saame avaldist (2) kasutades leida vastava **läbivimpedantsi:**

$$Z_{ij} = Z_0 \frac{1+S_{ij}}{1-S_{ij}} \,. \tag{5}$$

Sarnaselt peegelduskaole saab kahe erineva pordi jaoks leida tekkiva **sisestuskao** (*Insertion Loss*) väärtuse avaldisega:

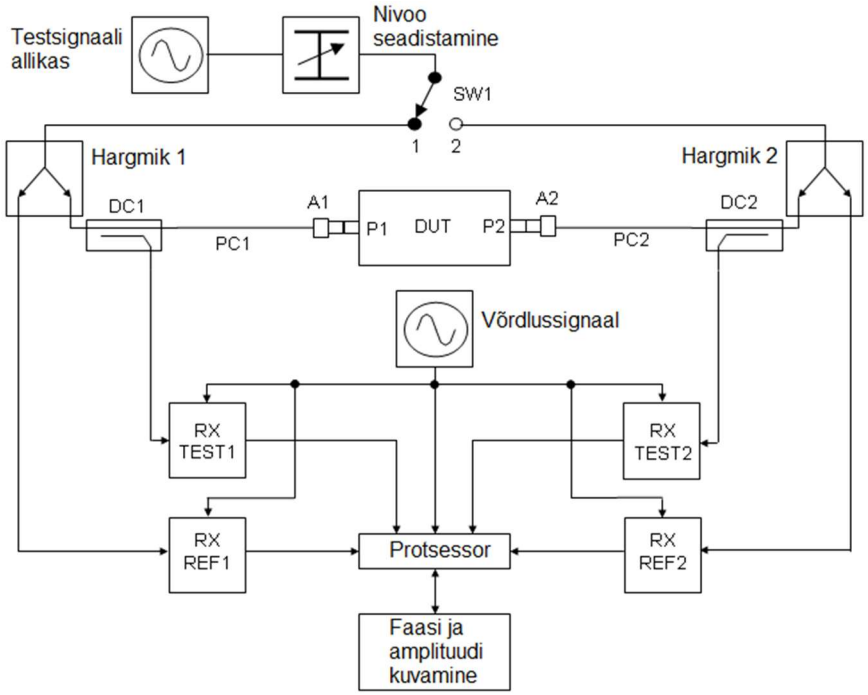
$$\mathrm{IL}_{ij} = -20\log\left(\left|S_{ij}\right|\right). \tag{6}$$

Sisestuskadu näitab, kui palju suurenevad kaod kõnealuse seadme signaaliahelasse lisamisel (sisestamisel). Väärib rõhutamist, et hajuparameetrid on üldjuhul sagedusest sõltuvad. Samuti võivad nad sõltuda ka muudest tingimustest nagu temperatuur, õhurõhk- ja niiskus, mõõdetava seadme toitepinge jne.

Siduanalüsaatori ehitust on kujutatud alloleval joonisel 1. Testsignaali allikas tekitab muudetava sagedusega ja vajaliku nivooga harmoonilise (siinuselise) testsignaali. Lülitiga SW1 saab valida kummase testitava seadme DUT (*Device Under Test*) porti testsignaal antakse. Kui testsignaal antakse esimese porti, siis saab mõõta sisendi sobitust S_{11} ja seadme ülekannet S_{21}, vastupidisel juhul aga väljundi sobitust S_{22} ja sisemist tagasisidet S_{12}.

Signaaliallikale järgnev hargmik jaotab testsignaali kaheks, võrdsete amplituudide ja faasidega, osaks. Mõlema väärtus on, sõltuvalt mõõtmiste suunast, kas U_1^+ või U_2^+. Pool jagatud testsignalist antakse mõõdetava seadme vajaliku porti ning teist poolt kasutatakse lõpptulemuse arvutamisel võrdlussignaalina.

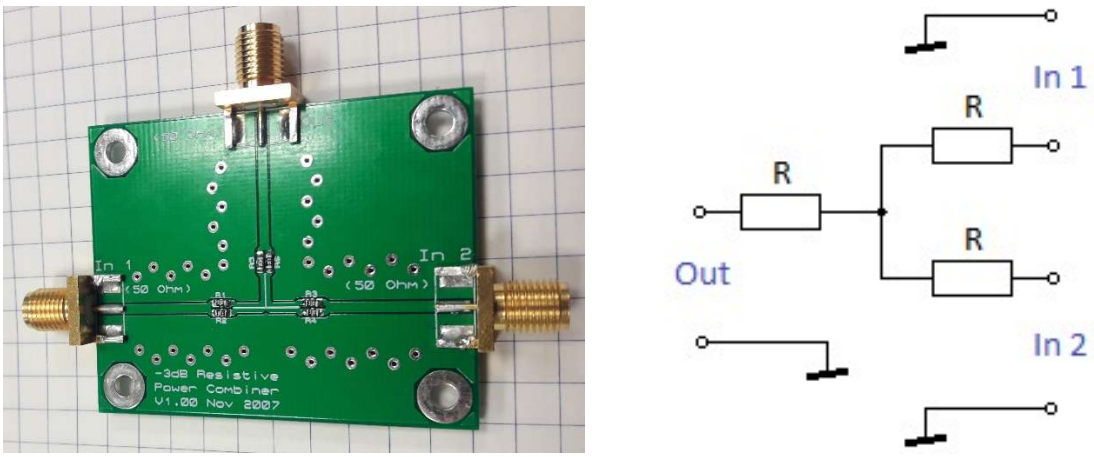
Langeva testsignaali U_j^+ ja peegeldunud signaali U_i^- teineteisest eraldamiseks kasutatakse suundhargmike (*Directional Coupler*) DC1 ja DC2. Suundhargmiku DC1 väljundsignaal on võrdeline esimesest pordist peegeldunud signaaliga U_1^- ning analoogselt on DC2 väljundsignaal võrdeline teisest pordist peegeldunud signaaliga U_2^-.



Joonis 1. Siduanalüsaatori ehitus

Teades nüüd U_j^+ ja U_i^- väärtuseid saab arvutada kõikide hajuparameetrite väärtused S_{ij}. Muutes testsignaali sagedust saab mõõta hajuparameetrite sõltuvust sagedusest. Mõõtetulemusi saab ekraanil kuvada, mõõteriista mällu salvestada või välisesse seadmesse edastada.

Takistuslik hargmik (*resistive splitter*) on seade sisendsignaali võimsuse jaotamiseks kahe või enama väljundi vahel. Väljundvõimused võivad jaguneda väljundite vahel nii võrdselt kui ka ebaühtlaselt. Pööratavuse (*reciprocity*) põhimõttel saab igat hargmiku kasutada ka mitme signaali liitmiseks. Käesolevas töös uurime sellist takistusliku hargmikku mis jaotab sisendsignaali võimsuse võrdselt kahe väljundi vahel. Hargmik ise ja tema põhimõtteskeem on kujutatud joonisel 2. Taolist seadet saab näiteks kasutada korterisse saabuva kaabeltelevisiooni signaali jagamiseks kahe teleri vahel või kahe antenni signaalide liitmiseks väikese antennivõre korral.



Joonis 2. Hargmiku trükkplaat (vasakul) ja põhimõtteskeem (paremal)

Nagu jooniselt 2 näha, on taolise seadme põhimõtteskeem väga lihtne, koosnedes lisaks SMA (*SubMiniature version A*) ühenduspistikutele ainult kolmest, võrdse takistusega *R,* takistist. Takistuse *R* väärtus on süsteemi karakteristliku impedantsi Z_0 kaudu leitav lihtsalt kui

$$R = \frac{Z_0}{3}. \tag{7}$$

Lisaks lihtsale ehitusele on taolise hargmiku eeliseks ka suur ribalaius. Kuna skeem sisaldab ainult takisteid, mille parameetrid ideaalsel juhul ei sõltu üldse sagedusest, siis on ka taolise seadme ülekanne ideaaljuhul sagedusest täiesti sõltumatu. Reaalsel juhul tuleb muidugi arvestada kasutatavate komponentide parasiitsete väärtustega, mistõttu on töösageduste küll lai, kuid siiski lõplik.

Loomulikult pole ükski seade veatu, takistusliku hargmiku suurimaks puuduseks on tema suur sisestuskadu IL, mis on peamiselt tingitud skeemi kuuluvatest takistitest. Antud töös vaadeldava hargmiku sisestuskao teoreetiline väärtus on seetõttu 6 dB. Nõrkade signaalide puhul vähendab taolise hargmiku kasutamine süsteemi üldist tundlikkust. Suurtel võimsustel muutub aga probleemiks hargmiku jahutamine ja loomulikult selle madal kasutegur.

Nagu põhimõtteskeemist näha, siis on konkreetne takistuslik hargmik sümmeetriline, iga suvaline port võib olla nii sisendiks, kui ka väljundiks. Seega on ka trükkplaadile kantud markeeringud (*In* ja *Out*) antud olukorras ainult soovituslikud.

Teiseks takistusliku hargmiku miinuseks on viimase asjaolu tõttu tema väljundportide vaheline madal isolatsioon. Kui ühes väljundis on sobitus paigast ära, siis tekkinud peegelduva laine tõttu läheb paigast ära ka teiste portide sobitus. Seega töötab taoline hargmik korrektselt ainult siis, kui kõik tema pordid on korralikult sobitatud.

Ideaalsel juhul on vaadeldava takistusliku hargmiku hajuparameetrite maatriks kujul

$$\mathbf{S} = \frac{1}{2}\begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \tag{8}$$

Reaalsel juhul peame arvestama, et kasutatavatel takistitel on lõplikud füüsilised mõõtmed ning ülekandeliinid, mida kasutatakse komponentide ühendamiseks hargmiku trükkplaadil, põhjustavad signaalide ajalist viidet. Seega on reaalse hargmiku hajuparameetrid, erinevalt avaldises (8) nähtust, komplekssed suurused.

Kokkuvõtlikult võib öelda, et antud seade on sobilik kasutamiseks keskmistel võimsustel juhul kui oluline on suur ribalaius ning mõõdukad kaod on lubatavad.

<u>Töö käik</u>:



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 töötaks 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 soovitav kasutada automaatse 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.

<u>Siduanalüsaatori kalibreerimine</u>

Enne mõõtmiste tegemist tuleb siduanalüsaatorit kalibreerida. Kalibreerimine minimiseerib mõõtmiseks kasutatavate üleminekute ja kaablite mõju mõõtetulemustele. Enne kalibreerimist tuleb mõõteriista külge ühendada töö käigus kasutatavad kaablid ja/või üleminekud. Soovitav on kasutada ühe pordi küljes 1 m pikkust koaksiaalkaablit ning teises pordis kas 18 cm kaablit või M-M SMA üleminekut. Selline konfiguratsioon võimaldab mõõdetava seadme mugavat ühendamist ilma kaableid liialt painutamata. Kalibreerimist tuleb teostada samas sagedusvahemikus mille ulatuses on plaanis mõõtmisi teostada.

Kalibreerimist teostatakse mõõterežiimis mille valimiseks tuleb vajutada klahvi <*MEAS*>. Kalibreerimise teostamiseks tuleb seejärel vajutada <*F2*> (*Calibration*). Avanenud menüüst tuleb esmalt valida sobiv kalibreerimiskomplekt (*Select Calkit*), milleks meie puhul on ZV-Z135 FEMALE. Käesolevas töös on esmalt plaanis mõõta koaksiaalkaabli ülekannet (*Transmission*), seetõttu valida menüüst valik „*Transmission Fwd (Port 1►2)*“ ja vajutada <*ENTER*>. Ekraanile ilmub kalibreerimise alustamisest informeeriv teade mille peale vajutada <*F2*> (*Continue*).

Kalibreerimine koosneb kahest osast, esimesena kalibreeritakse analüsaator kokku ühendatud portide korral (*THROUGH*). Ekraanile ilmuvale teatele kohaselt tuleb portide vahele ühendada kalibreerimiskomplekti pordid nimega „*THROUGH*.“ Kui mehaaniline ühendus on loodud, siis vajutada klahvi <F2> (*Continue*) ja oodata kuni kalibreerimine on teostatud.

Peale kalibreerimise lõppu ilmub ekraanile kiri „*Calibrate LOAD*.“ Ühendada mõõteseadme esimese pordi külge kalibreerimiskomplekti port „*MATCH*“ ja vajutada uuesti klahvi <*F2*>. Peale seda on kalibreerimine teostatud ja kalibreerimiskomplekti võib mõõteriista küljest eemaldada. Detailne kalibreerimise juhend on toodud ka lisamaterjali [1] lehekülgedel 60 ja 61.

Hargmiku ülekande mõõtmine

1. Ühenda kaks hargmiku porti (*Out* ja *In1*) analüsaator omadega. Kolmandasse hargmiku porti (*In2*) ühendada sobituse tagamiseks 50 Ω SMA terminaator (vt joonis 3).

   Seadista analüsaator päriülekande mooduli $|S_{21}|$ (*Format –> Magnitude*) mõõtmiseks maksimaalses sagedusvahemikus (*Full Span*) ja salvesta saadud graafik. Esita tulemus aruandes.

   Võrdle saadud tulemust teoreetilisega, millised on erinevused ja millest võivad need olla tingitud? Vähemalt kui suur on mõõdetava hargmiku ribalaius *B* (3 dB nivool)?



Joonis 3. SMA terminaator (hõbedane) ja lühis (kuldne)

2. Vähendada järgnevalt vaadeldava sagedusvahemiku ülemist piiri 500 MHz-ni. Mõõda päriülekande S_{21} mooduli ja faasi väärtused sagedusel 120 MHz. Esita tulemused aruandes. Võrdle mõõdetud väärtuseid teoreetilisega, kas ja kui suured on erinevused, millest võivad need tingitud olla?

3. Eemalda hargmiku kolmanda pordi (*In2*) küljest 50 Ω terminaator. Nüüd on antud port lahtine (tühises). Mõõda uuesti ülekande mooduli $|S_{21}|$ väärtus samal sagedusel. Esita saadud väärtus aruandes.

   Arvuta kodus ka teoreetiline ülekande väärtus siduanalüsaatoriga ühendatud portide vahel, antud punktis vaadeldaval juhul. Võrdle mõõdetud tulemust arvutatuga. Esita aruandes ka oma arvutuskäik.

4. Ühenda kolmandasse porti lühis (*SHORT* – vt joonis 3). Kui suur on nüüd ülekande mooduli väärtus samal sagedusel? Esita tulemus aruandes.

Võrdle ülekande mooduli väärtuseid kõigi kolme juhu korral. Siis kui kolmas port on: sobitatud, lahti ühendatud ja lühistatud. Mida me võime nendest tulemustest järeldada?

Hargmiku sobituse mõõtmine

Enne järgmisi mõõtmisi teostame peegelduste (*Reflection*) mõõtmiseks kiirkalibreerimise. Kalibreerimiseks peame ühenduse katkestama hargmiku sisendpordi (selle mis on ühendatud siduanalüsaatori port 1 külge) juures. Mõtemenüüs (*Meas*) valime „*Calibration*" ja seejärel „*Easy 1- Port Calibration Port 1*". Vajutada klahvi <*F2*> ning oodata kuni kalibreerimine on lõppenud [1].

Hargmiku teise pordi jätame siduanalüsaatoriga ühendatuks, viimane tagab antud pordis sobitatud koormuse olemasolu.

5. Mõõta nii lühistatud kui tühises kolmanda pordi korral hargmiku sisendi peegeldusteguri Γ (S_{11}) väärtused (*MEAS - > Format -> Reflection Coefficient*). mõlemad mõõtmised teha jällegi sagedusel 120 MHz. Esita saadud tulemused aruandes.

6. Korda peegeldusteguri mõõtmist juhul, kui ka kolmandas pordis on sobitatud koormus (50 Ω terminaator). Kui suur peaks sellisel juhul peegeldusteguri väärtus teoreetiliselt olema? Millest on erinevused tingitud?

Koosta punktides 2. ja 6. mõõdetud andmete põhjal hargmiku S-parameetrite maatriks sageduse 120 MHz jaoks. Neid väärtuseid mida töö käigus otseselt ei mõõdetud saad tuleta seadme sümmeetrilise ehituse põhjal. Ära unusta, et üldjuhul on hajuparameetrite väärtused kompleksarvulised. Võrdle mõõtmiste põhjal saadud maatriksit teoreetilisega (8). Millised on erinevused ja mis võiksid olla nende põhjused?

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.

- Punktis 1 salvestatud päriülekande mooduli graafik. Vastused esitatud küsimustele ja 3dB nivool ribalaiuse *B* hinnang.
- Punktis 2 mõõdetud ülekande S_{21} mooduli ja faasi väärtused. Ära unusta ka mõõtetulemuste võrdlust ja vajadusel ka erinevuste põhjuste selgitusi.
- Punktis 3, tühises pordiga, mõõdetud ülekande mooduli $|S_{21}|$ väärtus. Ülekande teoreetilise väärtuse arvutuskäik ja tulemus, teoreetilise ja mõõdetud suuruse võrdlus.
- 4. punktis, lühistatud pordiga, mõõdetud ülekande mooduli $|S_{21}|$ väärtus.
- Võrdle kolmel viimasel juhul saadud tulemusi omavahel. Mida saab nendest tulemustest järeldada?
- Punktis 5 mõõdetud sisendi sobituse S_{11} väärtused nii lühistatud kui ka tühises kolmanda pordi korral.
- 6. punktis mõõdetud sisendi sobitus S_{11} sobitatud koormuse korral. Võrdle saadud mõõtetulemust eeldatava teoreetilisega.
- Koostatud hargmiku hajuparameetrite maatriks ja selle võrdlus teoreetilisega (8).

Võimalikud kaitsmisküsimused:

1. Kui suur võimsus hajub hargmiku takistites kokku, kui sisendsignaali võimsus on 100 mW ?
2. Kui suur on hargmiku ühes väljundpordis signaali võimsus, kui sisendsignaali oma on 26 dBm ?
3. Kui suur on sisendi peegeldustegur Γ, kui üks väljundportidest on lühistatud?
4. Kui suur on sisendi peegeldustegur Γ, kui üks väljundportidest on tühises?
5. Kui suur on sisendi peegeldustegur Γ, kui mõlemad väljundpordid on korralikult sobitatud?
6. Kui suur on sisendi peegeldustegur Γ, kui mõlemad väljundpordid on lühistatud?
7. Kui suur on sisendi peegeldustegur Γ, kui mõlemad väljundpordid on tühises (lahtised)?
8. Kasutatava hargmiku korral on takistid R asendatud kahe rööbiti ühendatud takistiga. Kui suured peavad nende takistite takistused olema?
9. Kui suur peaks olema takistuse R väärtus, kui süsteemi karakteristlik impedants oleks 75 Ω?
10. …

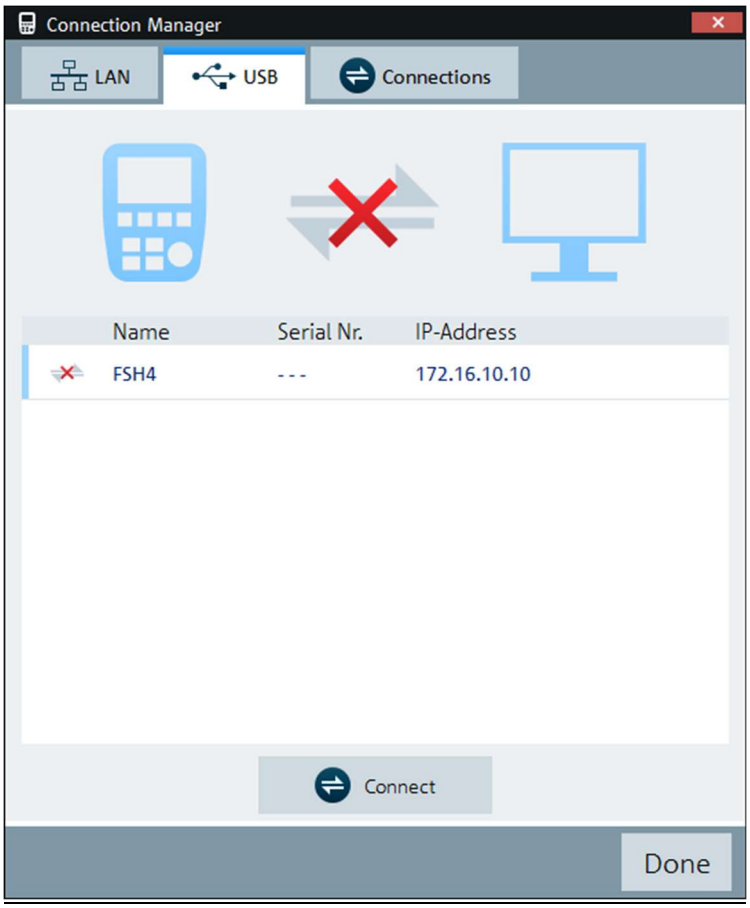
Täiendavaid materjale:

[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/dl_getting_started/FSH_QuickStartGuide_en_FW3.20.pdf , 05.09.26
[2] Microwaves101. Resistive Power Splitters. https://www.microwaves101.com/encyclopedias/resistive-power-splitters, 07.09.26
[3] Electronics notes. Resistive RF Power Splitter / Divider & Combiner. https://www.electronics-notes.com/articles/radio/rf-combiner-splitter-coupler-hybrid/resistive-power-splitter-combiner.php, 07.09.26
[4] D. M. Pozar, Microwave Engineering, Fourth Edition, John Wiley & Sons, Inc, 2012.
[5] National Instruments. Introduction to Network Analyzer Measurements Fundamentals and Background. https://download.ni.com/evaluation/rf/Introduction_to_Network_Analyzer_Measurements.pdf, 07.09.26

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 Conection 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.