

6. SAGEDUSMUUNDUR

THOMAS JOHANN SEEBECKI ELEKTROONIKAINSTITUUT

TALLINN
2022

Sagedusmuundur

Töö eesmärgid:

Töö eesmärgiks on mõista sagedusmuunduri ehitust ja tööpõhimõtet. Kuidas toimub sageduse muundamine, miks seda tehakse, milliseid sõlmi on selleks vaja ja millised on iga osa ülesanded kogu protsessi juures.

Kasutatavad seadmed ja vahendid:

- Spektri- ja siduanalüsaator R&S FSH4;
- Kõrgsagedusgeneraator SMC100A;
- ME1000 raadiovastuvõtja (Rx) laborimakett;
- Arvuti *RF Trainer Control Panel* tarkvaraga laborimaketi juhtimiseks;
- Ühendusjuhtmed ja üleminekud:
 - USB (A-B) kaabel;
 - 2 x 1 m pikkune SMA otsikutega koaksiaalkaabel;
 - 3 x 15 cm pikkune SMA otsikutega koaksiaalkaabel.

Töö teoreetilised alused:

Analoogkorruti on elektroonikaseade mille väljundpinge on võrdeline sisendpingete korrutisega:

$$u_{välj} = k \cdot u_{sis1} \cdot u_{sis2}, \quad (1)$$

kus k on konstantne võrdetegur. Raadiosageduslikus elektroonikas on signaalideks enamasti harmoonilised vahelduvpinged, olgu ka meie korrutatavateks pingeteks vastavalt $u_{sis1}(t) = U_{1m}\cos(2\pi f_1 t)$ and $u_{sis2}(t) = U_{2m}\cos(2\pi f_2 t)$, sagedustega f_1 ja f_2 . Viimaste asukoht spektris on kujutatud Joonis 1 vastavalt punase ja sinisega. Korruti väljundpinge on samuti ajas muutuv pinge

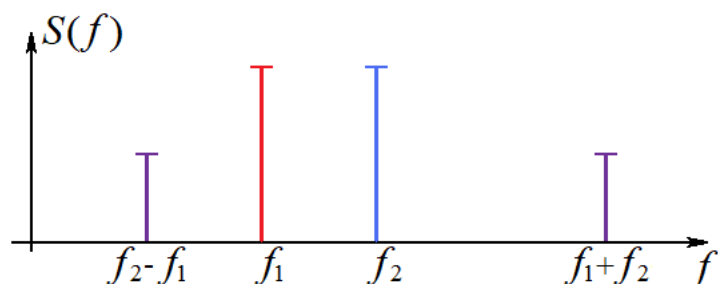
$$u_{välj}(t) = kU_{1m}U_{2m} \cos(2\pi f_1 t) \cos(2\pi f_2 t). \quad (2)$$

Kasutame saadud tulemuse lihtsustamiseks koosinuste korrutise (Werner) valemit ja saame tulemuseks, et

$$u_{välj}(t) = \frac{kU_{1m}U_{2m}}{2} \{\cos[2\pi(f_2 - f_1)t] + \cos[2\pi(f_2 + f_1)t]\}. \quad (3)$$

Näeme, et tulemuseks on kahe harmoonilise signaali summa, üks neist **vahesagedusel** $f_2 - f_1$ ja teine summasagedusel $f_2 + f_1$. Mõlemad sagedusmuunduse tulemusel saadud komponendid on Joonis 1 kujutatud violetse tooniga. Näeme, et mittelineaarne korrutamise operatsioon muudab signaalide sagedust. Sellisel **sagedusmuunduse** protsessil on raadiosageduslikus elektroonikas mitmeid rakendusi: signaalide

moduleerimine, nende demoduleerimine, soovitud sagedusega signaalide genereerimine ja raadiosignaalide sageduse muundamine on nendest enim kasutatavad. Käesolevas laboritöös uurime lähemalt **sagedusmuunduri** nimelise seadme tööd.

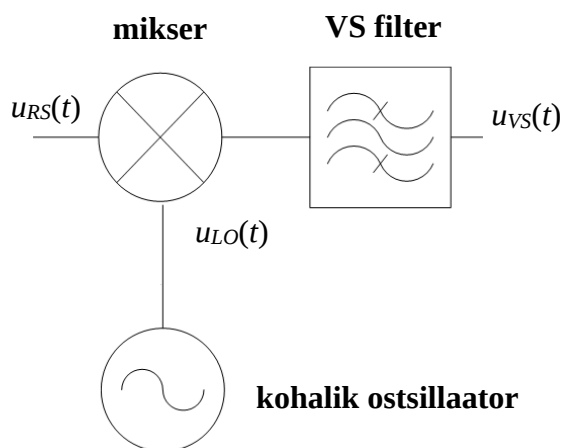


Joonis 1. Harmooniliste signaalide korrutis sagedusruumis kujutatuna

Sagedusmuunduri võib leida peaaegu iga raadiovastuvõtja seest. Taolisi vastuvõtjaid nimetatakse **superheterodüünvastuvõtjateks** või lihtsalt supervastuvõtjateks. Näiteks on oma olemuselt superheterodüünvastuvõtja nii laboris kasutatav spektrianalüsaator, taskus olev mobiiltelefon kui ka autos mängiv FM raadiovastuvõtja.

Vastuvõetud signaal sagedusega f_{RS} viiakse sagedusmuunduri abil madalamale vahesagedusele f_{VS} millel teostatakse seejärel signaali filtreerimine ja võimendamine. Signaali töötlemine, suhteliselt madalal, vahesagedusel on lihtsam ja odavam ning seetõttu on taoline disain praktikas väga levinud.

Sagedusmuundur ise baseerub eelnevalt kirjeldatud analoogkorrutil, viimast nimetatakse taolises rollis ka segistiks või mikseriks. Sagedusmuunduri plokk-skeemi kujutab allolev Joonis 2.



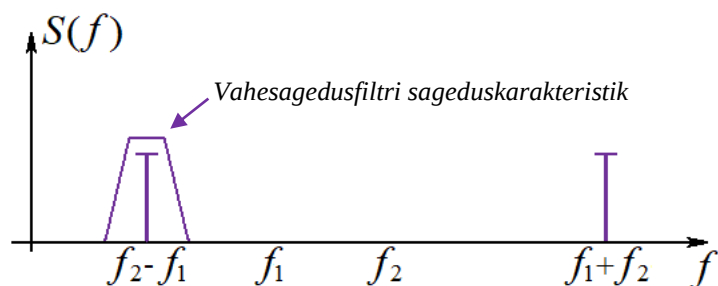
Joonis 2. Sagedusmuunduri plokk-skeem

Praktikas ei ole sagedusmuunduse teostamiseks ilmtingimata vaja korrutit, piisab mistahes teist-järku mittelineaarsest operatsioonist.

Supervastuvõtjas koosseisu kuuluva sagedusmuunduri sisendsignaaliks on vastuvõetud raadiosageduslik signaal $u_{sis1}(t) = u_{RF}(t)$. Teiseks mikseri sisendsignaaliks on vastuvõtjas endas, kohaliku (lokaalse) ostsillaator poolt genereeritud, harmooniline signaal $u_{sis2}(t) = u_{LO}(t)$. Praktikas, nagu ka käesolevas laboritöös, tekitatakse kohaliku

ostsillaatori signaal sagedussüntesaatoriga. Sagedusmuunduri väljundis on tulemusena vahesagedusega $f_{VS} = f_{LO} - f_{RS}$ signaal.

Ideaalse korruti puhul koosneb segusti väljundsignaali spekter ainult summa- ja vahesagedustest, nagu on näha ka Joonis 3. Kuna edasine signaali töötlemine leiab aset vahesagedusel on sumasagedusega komponent ebavajalik ja see eemaldatakse signaalist **vahesagedusfiltri** abil. Praktikas on mikseri väljundis ka sisendsignaali sagedustega komponendid, kõikvõimalikud harmoonilismoonutuste tulemid ja kõrgemad harmoonilised - vahesagedusfiltri ülesandeks on ka nende välja filtreerimine.



Joonis 3. Ideaalse analoogkorruti väljundpinge spekter

Lisaks sellele vastutab vahesagedusfilter ka naaberkanali signaalide piisava summutamise eest – selle kvaliteet määrab kogu vastuvõtja **selektiivsuse**, ehk võime eristada soovitud signaali kõigist teistest raadioeetris levivatest.

Vahesageduse väärtus võib põhimõtteliselt olla suvaline, kuid praktilistes seadmetes kasutatakse enamasti standardseid väärtuseid millede jaoks on sadaval tööstuslikult toodetud kompaktsed vahesagedusfiltrid. Fikseeritud vahesageduse ja konkreetse vastuvõetava signaali sageduse korral saame leida, soovitud vahesageduse tekitamiseks vajaliku, kohaliku ostsillaatori signaali sageduse:

$$f_{LO} = f_{RS} + f_{VS}. \quad (4)$$

Kui soovime sama seadmega vastu võtta erinevate kanalitel edastatavaid signaale, siis peab kohaliku ostsillaatori signaal olema muudetava sagedusega. Vastuvõetava- ja ostsillaatori signaali sagedused peavad alati teineteisest erineva vahesageduse võrra. Kõik ülejäänud signaalid, millede sagedus erineb ostsillaatori signaali omast rohkem- või vähem kui vahesageduse võrra, filtreeritakse vahesagedusfiltri poolt välja.

Üheks supervastuvõtja puuduseks on **peegelsageduse** f_P olemasolu. Tegemist on sagedusega, mis erineb vastuvõetava signaali omast kahekordse vahesageduse võrra

$$f_P = f_{RS} \pm 2f_{VS}. \quad (5)$$

Kui sellel sagedusel tegutseb mõni signaal siis muudetakse ka tolle sagedus sagedusmuunduri poolt vahesagedusele sest

$$f_P - f_{LO} = f_{LO} - f_{RS} = f_{VS}. \quad (6)$$

Vältimaks peegelsageduse häirivat mõju rakendatakse enne sagedusmuundurit eelselektioonifiltrit. Viimase ehituse lihtsustamiseks kasutavad kvaliteetsemad vastuvõtjat kahekordset sagedusmuundust. Esimene vahesagedus valitakse nii kõrge, et peegelsagedus asuks sisendsignaali omast, lihtsa filtriga eemaldamiseks, piisavalt kaugel.

Töö käik:

Mõõtetulemuste salvestamiseks kasutame Rohde&Schwarz'i R&S *InstrumentView* tarkvara. Ühenduse loomist arvuti ja siduanalüsaatori vahel kirjeldatakse piisava detailsusega käesoleva juhendi lõpus olevas lisas A. Peale FSH4 sisselülitamist veenduda, et seade töötaks spektrianalüsaatori 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 hoopis .csv formaadis andmetena siis on hiljem võimalik tulemuste töötlemine ning jooniste vormistamine endale meelepärasele kujule.

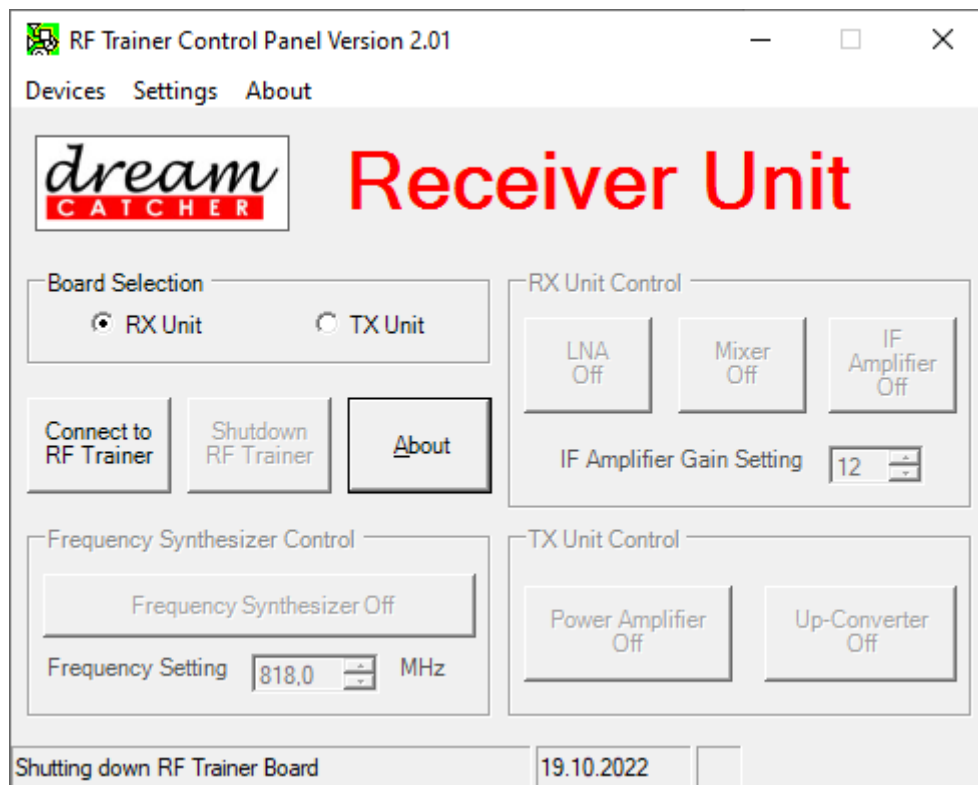
Mürade vähendamiseks ja nõrkade signaalide selgemaks kujutamiseks on soovitatav kasutada spektrianalüsaatori keskmistamise funktsionaalsust. Viimase sisselülitamiseks valida seadme esipaneelilt: *<TRACE> -> Trace Mode -> Average*. Meeles tuleb pidada, et keskmistamise mõju tõttu kulub nüüd seadmel signaali muutustele reageerimiseks mõnevõrra aega.

Enne mõõtmiste algust ühenda raadiovastuvõtja makett ME1000 USB kaabliga arvuti külge. Seejärel käivitage arvutis *RF Trainer Control Panel* tarkvara (vt Joonis 4). Veenduge, et *Board Selection* alas on valitud raadionupp *RX Unit*. Arvuti ja raadiovastuvõtja maketi vahel ühenduse loomiseks vajutage nuppu “*Connect to RF Trainer*”.



Alustame sagedusmuunduri töö uurimist kohalikust ostsillaatorist milleks antud juhul on sagedussüntesaator. Tegemis on siis digitaalselt juhitava stabiilse ostsillaatoriga mille väljundsignaali sagedust saab valida soovitud väärtuse sisestamisega.

Kasuta meeripikkust koaksiaalkaablit ühendamaks sagedussüntesaatori väljundit (*RF OUT*) spektrianalüsaatori sisendiga. Seejärel käivita sagedussüntesaator vajutades programmiakna alas *Frequency Synthesizer Control* nuppu “*Frequency Synthesizer Off*”. Süntesaatori väljundsignaali sagedust f_{LO} saab muuta parameetriga *Frequency Setting*.



Joonis 4. RF Trainer Control Panel tarkvara aken

1. Selgita välja, millises vahemikus on sagedussüntesaatori väljundsignaali sagedus muudetav. Esita minimaalse f_{LOmin} ja maksimaalse sageduse f_{LOmax} väärtused oma praktikumiaruandes.

Sagedussüntesaatori väljundsignaali sagedust ei saa muuta sujuvalt vaid ainult fikseeritud sammu võrra.

2. Leia kui suur on vähim väljundsageduse muutmise samm Δf_{LO} . Esita ka see väärtus oma aruandes. Mitut erinevat väljundsagedust on konkreetse süntesaatoriga võimalik realiseerida?

Vastuvõetava signaali sageduseks on $f_{RS} = 868 \text{ MHz}$, vahesageduseks aga $f_{VS} = 50 \text{ MHz}$. Arvuta avaldist (4) kasutades milline peab olema kohaliku ostsillaatori väljundsignaali sagedus f_{LO} . Esita oma arvutuskäik ja saadud tulemused aruandes.

3. Häälesta sagedussüntesaator leitud sagedusele f_{LO} . Spektrianalüsaator seadista näitama sagedusvahemiku 850 kuni 2850 MHz. Mõõda sagedussüntesaatori põhiharmoonilise komponendi võimsus P_{LO0} . Täiendavalt mõõda ka teise- ja kolmanda harmoonilisenivood. Arvuta mõõtetulemuste põhjal, sagedussüntesaatori väljundsignaali puhtust iseloomustav, harmoonilis-moonutuse THD väärtus. Esita aruandes mõõtetulemused ja arvutatud THD väärtus.

Järgnevalt kasuta lühikest (15 cm) koaksiaalkaablit ühendamaks sagedussüntesaatori väljundsignaal ($RF \text{ OUT}$) segusti ostsillaatorisisendiga ($LO \text{ IN}$). Spektrianalüsaatori

sisend ühenda aga segusti vahesagedusväljundiga (*IF OUT*). Segusti käivitamiseks vajutage nuppu “*Mixer Off*” programmiakna alas *RX Unit Control box*.

4. Ideaalsel juhul ei tohiks ostsillaatori signaal ise mikseri väljundisse jõuda. Reaalsel juhul lekib osa sellest siiski läbi. Mõõda ostsillaatori signaali nivoo segusti väljundis. Eelmisest punktis teame ka selle nivoo väärtust segusti sisendis. Arvuta nende kahe põhjal välja isolatsioon ostsillaatori sisendi ja vahesagedusväljundi vahel. Esita aruandes mõõdetud väljundnivoo ja arvutatud isolatsiooni väärtused.

Vastuvõetava raadiosagedusliku signaali allikana kasutame oma katses kõrgsagedusgeneraatorit SMC100A. Ühenda viimase väljund ühemeetrise koaksiaalkaabli vahendusel segusti sisendiga (*RF IN*). Seadista generaatori väljundsignaali sageduseks $f_{RS} = 868$ MHz. Sobivaks signaalinivooks on -30 dBm. Seejärel vajuta, seadistatud parameetritega signaali väljundisse andmiseks, generaatori esipaneelil nuppu „*RF ON/OFF*“.

Alustame suurema pildiga, seadista analüsaator näitama signaale sagedusvahemikus 10 MHz kuni 1,9 GHz.

5. Salvesta segusti väljundsignaali spekter ja esita see laboriaruandes joonisena. Võrdle saadud tulemusi Joonis 1 kujutatuga. Millised on sarnasused ja millised erinevused?

Detailide paremaks nägemiseks seadista spektrianalüsaatori kesk-sageduseks 893 MHz ja kuva laiuks (*span*) umbes 150 MHz. Ekraanil peaks näha olema kaks tippu. Esimene neist on juba eelnevalt mõõdetud, segustist läbi lekkinud, ostsillaatori signaal. Teine tipp aga vastab, samuti segustist läbi lekkinud, sisendsignaale.

6. Mõõda lekkinu raadiosagedusliku signaali võimsus. Arvuta, sarnaselt eelnevalt tehtule, isolatsiooni väärtus segusti RS sisendi ja vahesagedusväljundi vahel. Esita nii lekkinud sisendsignaali nivoo kui arvutatud isolatsiooni väärtused oma aruandes.

Järgnevalt keskendume väljundsignaali spektri kõrgemale osale, seadistades spektrianalüsaatori töösageduste vahemikuks 1,75 kuni 1,85 GHz.

7. Mõõda nähtavate spektrikomponentide sagedused ja võimsused. Milline neist on summasagedus? Mis võivad olla ülejäänud komponentide tekkepõhjused ja allikad?

Viimasena pöörame tähelepanu soovitud muundustulemusele. Seadista analüsaatori kesk-sageduseks 50 MHz ja spektri laiuks vahemik 10 kuni 80 MHz.

8. Mõõda vahesageduse väärtus ja selle sagedusega signaali nivoo. Esita mõlemad tulemused aruandes. Arvuta muunduskao väärtus kui erinevus vahesagedusliku väljundsignaali ja raadiosagedusliku sisendsignaali nivoo vahel. Esita ka see tulemus aruandes.

Kasuta järgmist lühikest koaksiaalkaablit ühendamaks segusti väljund (*IF OUT*) vahesagedusfiltri sisendiga (*IN*). Spektrianalüsaatori sisend ühenda vahesagedusfiltri väljundiga (*OUT*).

9. Filtri sisestuskao tõttu väheneb vahesagedussignaali nivoo. Mõõda viimast uuesti ja arvuta välja kogu sagedusmuunduri (segusti ja filtri) muunduskadu, esita tulemus aruandes.
10. Seadista jälle spektrianalüsaatori töösageduste vahemikuks 10 MHz kuni 1,9 GHz. Salvesta sagedusmuunduri väljundsignaali spekter ja esita see oma aruandes joonisena. Võrdle saadud tulemust viiendas punktis vaadeldud segisti väljundsignaali omaga, millist mõju on vahesagedusfiltri lisamine spektri kujule ja selles leiduvatele komponentidele avaldanud?

Nüüd vaatame, kuidas käitub sagedusmuundur kui muudame raadiosagedusliku signaali sagedust. Spektrianalüsaatori töösageduste vahemiku algus jäta samaks, kuid ülemiseks sageduseks seadista nüüd 90 MHz.

11. Suurenda sagedusmuunduri sisendsignaali sagedust 10 MHz suuruste sammudega 868 kuni 968 MHz. Kui palju ja millises suunas muutub muunduri väljundsignaali sagedus? Kuidas muutub sageduse mõjul väljundsignaali nivoo? Miks tekib muunduri väljundis signaal ka 968 MHz sisendsignaali korral kuigi muundur ise on häälestatud 868 MHz? Kirjelda oma tähelepanekuid lühidalt praktikumi aruandes.

Viimaseks ühendame kolmanda lühikese kaabliga sagedusmuunduri ette raadiosagedusliku eelselektioonifiltri. Täpsemalt siis ühendada eelselektioonifiltri väljund (*OUT*) sagedusmuunduri sisendiga (*RF IN*). Signaali kõrgsagedusgeneraatorist anna eelselektioonifiltri sisendisse (*IN*).

12. Mõõda uuesti sagedusmuunduri väljundsignaali sisendsignaali sageduste 868 ja 968 MHz juures. Mis on nüüd, võrreldes eelmises punktis mõõdetuga, teisiti – miks? Esita oma selgitused ja põhjendused praktikumi aruandes.

Aruandes Esitada:

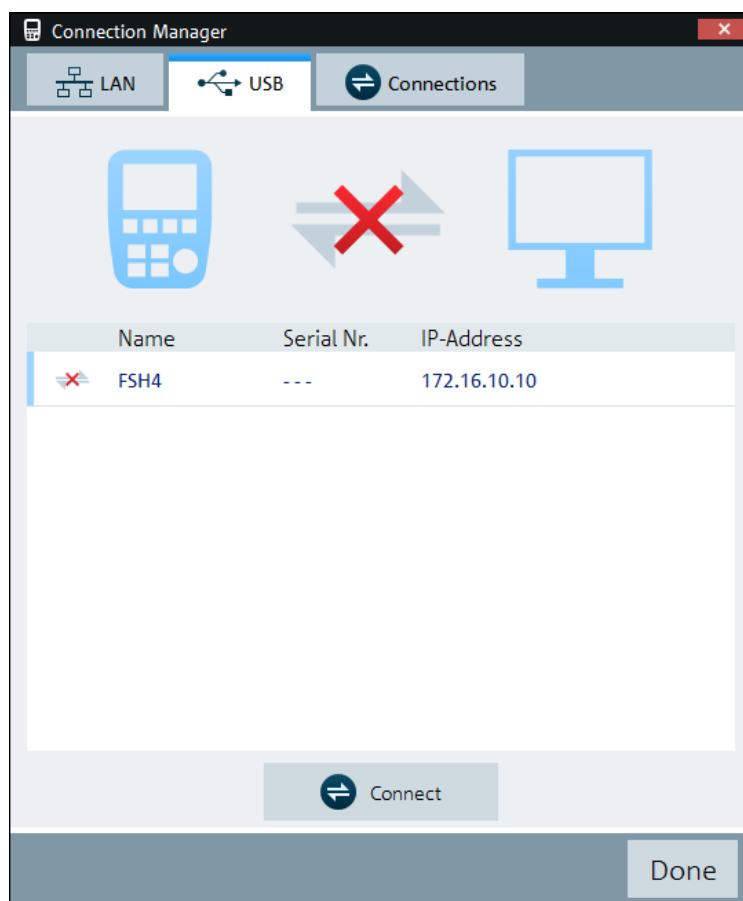
- Sagedussüntesaatori väljundsignaali sageduse muutumisvahemik f_{LOmin} kuni f_{LOmax} ja selle muutumise samm Δf_{LO} .
- Kasutatavale sisendsignaali sagedusele vastava ostsillatorisageduse f_{LO} arvutused koos saadud tulemusega.
- Sagedussüntesaatori väljundsignaali harmooniliste komponentide sagedused ja nivood ning nende põhjal arvutatud THD väärtus.
- Segustist läbi lekkinud ostsillatori signaali nivoo ja selle põhjal arvutatud isolatsiooni väärtus.
- Segusti väljundsignaali spekter joonisena.
- Segustist läbi lekkinud sisendsignaali nivoo ja selle põhjal arvutatud isolatsiooni väärtus.
- Segusti väljundis, sagedusvahemikus 1,75 kuni 1,85 GHz, olevate komponentide sagedused ja nivood koos selgitustega iga komponendi tekkepõhjuste kohta.
- Vaheagedussignaali sagedus ja nivoo.
- Segusti- ja sagedusmunduri muunduskadude väärtused.
- Vaheagedusfiltri väljundis mõõdetud, sagedusmuunduri väljundsignaali spekter joonisena. Võrdlus segisti väljundsignaali spektriga.
- 11. ja 12. punktis tehtud vaatluste tulemused ja nende selgitused.

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_manufacturers/gb_1/f/fsh_1/FSH_QuickStartGuide_en_FW3.20.pdf , 04.10.2024
- [2] R&S®FSH Handheld Spectrum Analyzer Quick Start.
- [3] Electronics Notes. [What is an RF Frequency Synthesizer » Electronics Notes \(electronics-notes.com\)](https://electronics-notes.com/2022/10/19/what-is-an-rf-frequency-synthesizer/), 19th October 2022
- [4] Electronics Notes. [Understand RF Mixing & Frequency Mixers » Electronics Notes \(electronics-notes.com\)](https://electronics-notes.com/2022/10/19/understand-rf-mixing-frequency-mixers/), 19th October 2022

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.