

2. KESKKONNA MAGNETILNE LÄBITAVUS

THOMAS JOHANN SEEBECKI ELEKTROONIKAINSTITUUT

TALLINN
2021

Keskkonna magnetiline läbitavus

Töö eesmärk:

Keskkonna magnetiline läbitavuse mõiste, absoluutne ja suhteline magnetiline läbitavus. Magnetilise läbitavuse mõõtmine, selle reaali- ja imaginaarosa, läbitavuse sagedussõltuvus. Rõngassüdamikuga induktiivpooli ehitus ja induktiivsus.

Kasutatavad seadmed ja vahendid:

- Spektri- ja siduanalüsaator R&S FSH4;
- Kalibreerimiskomplekt R&S ZV-Z135;
- 1 m pikkune koaksiaalkaabel;
- Nihik;
- Mõõteobjektiks olev rõngassüdamikuga induktiivpool.

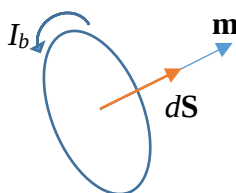
Töö teoreetilised alused:

Magnetiseeritus

Seotud laengute, näiteks aatomituuma ümber tiirlevat elektronide, tekitatud voolu nimetatakse seotud vooluks I_b . Kui seotud vool ringleb diferentsiaalse pinna dS serva pidi, siis moodustub **magnetiline dipoolmoment**

$$\mathbf{m} = I_b d\mathbf{S}. \quad (1)$$

Suletud pinnaks on aatomi näitel elektroni orbiidiga ümbritsetud pind. Magnetilise dipoolmomendi mõõtühikuks on $A \cdot m^2$.



Joonis 1. Magnetiline dipoolmoment

Üldjuhul koosneb materjal suurest hulgast magnetilistest dipoolidest. Kui ühikruumala kohta on neid kokku n tükki, siis summaarne magnetiline dipoolmoment ruumalas Δv on

$$\mathbf{m}_{kogu} = \sum_{i=1}^{n\Delta v} \mathbf{m}_i. \quad (2)$$

Keskkonna **magnetiseerituseks** $\mathbf{M}$, mõõtühikuga [A/m], nimetatakse summaarset dipoolmomenti ühikruumala kohta

$$\mathbf{M} = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta v} \sum_{i=1}^{n\Delta v} \mathbf{m}_i. \quad (3)$$

Lineaarses ja isotroopses keskkonnas on magnetiseeritus võrdeline rakendatud välise magnetvälja tugevusega $\mathbf{H}$

$$\mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H}, \quad (4)$$

kus võrdetegurit χ_m nimetatakse keskkonna **magnetiliseks vastuvõtlikkuseks**. Summaarne magnetvoo tihedus $\mathbf{B}$ keskkonnas koosneb kahest komponendist. Üks osa $\mu_0 \mathbf{H}$ on põhjustatud välisest magnetväljast ja teine keskkonna enda magnetiseeritusest $\mathbf{M}$. Magnetvoo tihedus keskkonnas oleks seega

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \chi_m \mathbf{H}) = \mu_0 (1 + \chi_m) \mathbf{H} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}. \quad (5)$$

Suurust $\mu_r = (1 + \chi_m)$ nimetatakse keskkonna (materjali) **suhteliseks magnetiliseks läbitavuseks**. Korrutist $\mu = \mu_0 \mu_r$ nimetatakse keskkonna **absoluutseks magnetiliseks läbitavuseks**. Viimase kaudu on seos magnetvälja tugevuse ja magnetvoo tiheduse vahel

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}. \quad (6)$$

Konstant $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m on vaakumi magnetiline läbitavus. Juhul kui magnetväli on ajas muutuv siis tuleb arvestada sellega, et magnetiseerumine ei toimu hetkeliselt vaid selleks kulub alati veidi aega. Kuna sõltuvus $\mathbf{B}$ ja $\mathbf{H}$ vahel on kausaalne, siis jääb magnetvoo tihedus ajaliselt magnetvälja tugevusest veidi maha. Seega on ka keskkonna magnetiline läbitavus üldjuhul sagedusest sõltuv kompleksne suurus

$$\mu(\omega) = \mu'(\omega) - j\mu''(\omega). \quad (7)$$

Läbitavuse reaalosa $\mu'(\omega)$ iseloomustab keskkonna energiasalvestusvõimet ja imaginaarosa $\mu''(\omega)$ kadusid keskkonnas ehk peamiselt magnetvälja energia soojuseks muutumise määra.

Induktiivsus

Juhi **induktiivsus**, täpsemalt **eneseinduktiivsus**, L on lineaarses keskkonnas defineeritud kui aheldusvoo λ suhe seda põhjustanud voolutugevusse I

$$L = \frac{\lambda}{I}. \quad (8)$$

Alternatiivselt saab induktiivsust defineerida magnetvälja energia W_H kaudu

$$W_H = \frac{LI^2}{2}. \quad (9)$$

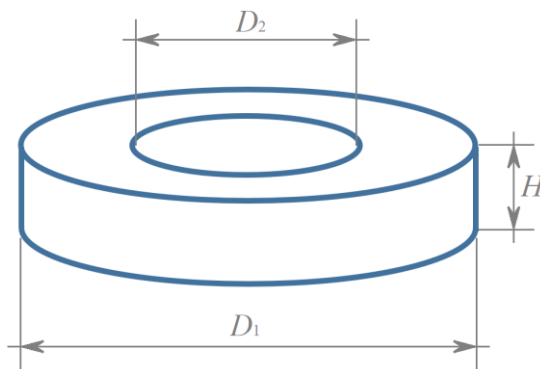
Induktiivsuse mõõtühik on henri [H]. Lineaarses magnetilises keskkonnas sõltub induktiivsus ainult keskkonna magnetilisest läbitavusest ja juhi geometriast. Induktiivpool on elektroonikakomponent mille peamine omadus on induktiivsus. Üldjuhul valmistatakse nad ühe- või mitmekihilise mähisena. Mähise keerud võivad olla ringi- või risttahuka kujulised ja mähis võib olla keritud nii magnetilisele- kui mittemagnetilisele alusele ehk südamikule. Pooli induktiivsus on üldjuhul võrdeline mähise pikkusega, südamiku magnetilise läbitavusega μ ja keerdude arvu N ruuduga ning pöördvõrdeline mähise ristlõikepindalaga S .

Alljärgnevalt kirjeldatakse ühte võimaliku magnetilise läbitavuse mõõtmise viisi. Esmalt valmistame teadaoleva geometriaga induktiivpooli südamikule mille magnetilist läbitavust teada tahame. Seejärel mõõdame saadud induktiivsuse väärtuse ning arvutame tulemuste põhjal välja keskkonna magnetilise läbitavuse μ .

Käesolevas töös määramegi rõngas- ehk torroidsüdamikuga pooli südamikuks oleva ferriidi magnetilist läbitavust. Juhul kui südamiku läbimõõt on paju suurem kui paksus on taolise konstruktsiooniga pooli induktiivsus ligikaudu

$$L = \frac{\mu N^2 S}{2\pi r}, \quad (10)$$

kus r on südamiku keskmine raadius ja seega on $2\pi r$ pooli ligikaudne pikkus.



Joonis 2. Rõngassüdamiku mõõdud

Üldjuhul on lihtsam mõõta rõngassüdamiku välis- ja siseläbimõõte D_1 ja D_2 kui keskmist raadiust r . Ristlõikepindala jaoks on lisaks vaja teada südamiku kõrgust H . Seega saab avaldist (10) teisendada praktiliseks kasutamiseks sobivamale kujule ([1] lk 183)

$$L = 4 \cdot 10^{-7} \mu_r N^2 \frac{H(D_1 - D_2)}{D_1 + D_2}. \quad (11)$$

Juhul kui eelmises avaldises kasutada mõõtühikuna millimeetrit, siis on saadud tulemus millihenrides [mH]. Suurendades lisaks konstandi $4 \cdot 10^{-7}$ väärtust avaldises (11) tuhat korda suuruseni $4 \cdot 10^{-4}$ on leitud induktiivsuse mõõtühikuks praktiliseks kasutamiseks sobivam mikrohenri [μ H]. Kui me võtame arvesse asjaolu, et magnetvälja tugevus rõngassüdamikus ei ole tegelikult ühtlane vaid väheneb välisserva suunas saame täpsema induktiivsuse avaldise kujul

$$L = 2 \cdot 10^{-7} \mu_r N^2 H \ln \frac{D_1}{D_2}. \quad (11)$$

Kui südamiku mõõdud on avaldises millimeetrites siis on ka siin tulemus millihenrides.

Impedantsi mõõtmine siduanalüsaatoriga

Valmistatud pooli induktiivsust mõõdame laboris vektor-siduanalüsaatoriga. Taolise mõõteriista kasutamisel saame teada mõõdetava pooli kogu impedantsi $Z = R + jX_L$.

Ideaalsel juhul, kui südamikus ei esine mingeid kadusid ja pooli valmistamiseks kasutatud traadi juhtivus on lõputu, oleks saadud impedants puhtalt imaginaarne ($R = 0$). Reaalsel juhul on impedantsi reaalsal kolm peamist komponenti. Esimene neist on tingitud pooli valmistamiseks kasutatud juhtme aktiivtakistusest. Viimane on, pinna- ja lähedusefektidest tingituna, võrdeline sagedusega.

Ülejäänud kaks takistuse komponenti tulevad südamiku kadudest. Hüstereesikaod on samuti võrdelised sagedusega. Südamikus indutseeritud pöörivooludest tingitud kaod on võrdelised sageduse ruuduga, mistõttu on nad kõrgematel sagedustel domineerivad.

Siduanalüsaator mõõdab teatavasti tema külge ühendatud elektriahela peegeldustegurit. Tegemist on üldjuhul sagedusest f sõltuva kompleksse suurusega

$$\Gamma(f) = |\Gamma(f)| e^{j\varphi(f)}. \quad (12)$$

Peegeldusteguri moodul $|\Gamma|$ näitab peegeldunud ja langeva laine (pinge) amplituudide suhet. Peegeldusteguri faas ϕ aga nende lainete vahelist faasinihet. Teades peegeldusteguri väärtust ja mõõteriista karakteristliku impedantsi $Z_0 = 50 \Omega$ saame leida elektriahela impedantsi väärtuse igal mõõdetud sagedusel kui

$$Z = R + jX = Z_0 \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma}. \quad (13)$$

Kui peegeldusteguri moodul on antud logaritmilisel kujul detsibellides (19), siis tuleb see enne teisendada lineaarsele kujule.

Leitud impedantsi imaginaarosa X on antud töös induktiivne ja seotud uuritava pooli induktiivsusega L kui

$$X_L = 2\pi f L. \quad (14)$$

Teades pooli füüsilist ehitust kirjeldavaid parameetreid D_1 , D_2 , H ja N ning mõõdetud X_L väärtust saab avaldise (11) ja (14) kombineerides arvutada südamiku materjali magnetilise läbitavuse μ . Täpsemalt on tulemuseks kompleksse magnetilise läbitavuse (7) reaalsosa μ' .

Reaktiivkomponentide kadude numbriliseks iseloomustamiseks kasutatakse tihtipeale hüveteguri Q mõistet

$$Q = \frac{|X|}{R}. \quad (15)$$

Alternatiivelt kasutatakse kadude suuruse väljendamiseks kaonurga δ tangensi mõistet

$$\tan \delta = \frac{R}{|X|} = \frac{1}{Q}. \quad (16)$$

Kaonurk δ näitab kui palju on faasinihe ping- ja voolu vahel väiksem ideaalsest, kaovabast, väärtusest $\pi/2$. Kaovabal ideaaljuhul on kaonurga tangensi väärtus null, mida suurem on tegelik väärtus seda suuremad on energiakaod komponendis. Viimases avaldises on kaonurga tangens väljendatud elektriliste parameetrite kaudu, keskkonna magnetiliste parameetrite vahendusel oleks sama suurus

$$\tan \delta = \frac{\mu''}{\mu'}. \quad (17)$$

Kahest viimasest avaldisest ja varasemalt leitud magnetilise läbitavuse reaalse kaudu saab nüüd leida ka viimase imaginaarosa väärtuse

$$\mu'' = -\mu' \frac{R}{|X|}. \quad (18)$$

Töö käik:

Mõõtmisi võib teha kasutades kas mõõteseadme esipaneeli klaviatuuri või üle Etherneti kaabli R&S InstrumentView tarkvara vahendusel arvutist. Lisa A kirjeldab võrguühenduse loomist analüsaatori ja arvuti vahel.



Peale analüsaatori FSH4 voluvõrku ühendamist ja sisse lülitamist veenduda, et seade töötab siduanalüsaatori režiimis. Vajalikku režiimi lülitamiseks vajutada seadme esipaneelil nuppu <MODE> ja seejärel <F2> (*Network Analyzer*).

Siduanalüsaatori kalibreerimine

Enne mõõtmiste tegemist tuleb siduanalüsaatorit kalibreerida. Kalibreerimine minimeerib mõõtmiseks kasutatavate üleminekute ja kaablite mõju ja suurendab mõõtetäpsust. Kalibreerimise juhendi leiab R&S®FSH4/8/13/20 Spectrum Analyzer Quick Start Guide [3] lehekülgedelt 60 ja 61. Praktikumis kasutame FSH4 analüsaatori kalibreerimiseks kalibreerimiskomplekti ZV-Z135.

Kalibreerimist teostatakse mõõterežiimis mille valimiseks tuleb vajutada klahvi <MEAS>. Kalibreerimise teostamiseks tuleb seejärel vajutada <F2> (*Calibration*).

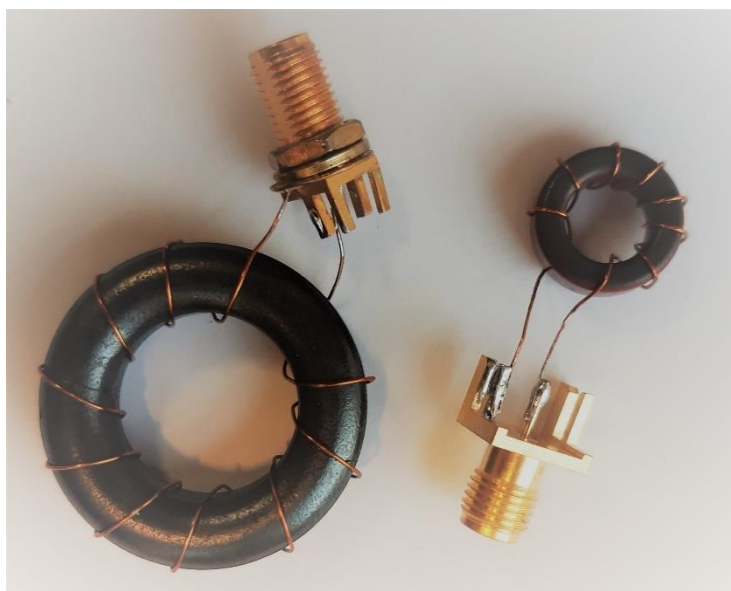
Avanenud menüüst tuleb esmalt valida sobiv kalibreerimiskomplekt (*Select Calkit*), milleks meie puhul on ZV-Z135 FEMALE. Kuna antud juhul on tegemist ainult ühe

pordiga seadmega – kaks-klemmiga, siis mõõdame peegeldustegurit. Seega tuleb kalibreerimine teostada peegeldusteguri mõõtmiseks: *Reflection Port 1*. Analüsaatori töösageduste vahemik sõltub konkreetsest südamikust. Alumine ja ülemine sageduspiir küsida juhendajalt.

Ühendada analüsaatori külge koaksiaalkaabel ja teostada seejärel kalibreerimine. Nüüd on seade valmis induktiivpooli impedantsi mõõtmiseks.

Impedantsi sagedussõltuvuse mõõtmine

1. Mõõda nihikut kasutades pooli südamiku kõrgus H , välimine diameeter D_1 ja sisemine diameeter D_2 (vt Joonis 2). Välimise diameetri otsese mõõtmise asemel võib olla lihtsam rõnga paksuse W mõõtmine ja selle kahekordse väärtuse lisamine sisemisele diameetrile $D_2 = D_1 + 2W$. Loe kokku südamikule keritud pooli keerdude arv N . Esita mõõtetulemused töö aruandes.



Joonis 3. Rõngassüdamikuga poolide näited

Ühenda induktiivpool koaksiaalkaabli teise otsa külge. Veendu, et mõõteriist mõõdab peegeldustegurit (*Result Display – Reflection Port 1*) ja vali andmete kuvamise viisiks *Smith Chart*. Viimasel juhul kuvatakse impedantsi Z sõltuvus sagedusest Smithi diagrammile.

Vali *InstrumentView* aknast *GetTrace*. Nüüd tekib mõõteriista ekraanikuva arvuti ekraanile. Kuna me ei ole Smithi diagrammiga veel tuttavad, siis ei ole sellega esialgu palju peale hakata. Arvutuste tegemiseks ja edasiseks analüüsiks tuleb saadud andmed faili salvestada. Selleks vali *InstrumentView* aknast *Save* ja failiformaadiks *.csv*.

Veendumaks salvestuse õnnestumises ava salvestatud fail *Exceli* keskkonnas. Faili alguses on kirjas olulisemad mõõteriista seadistused ja seejärel kolm veergu andmetega. Esimeses veerus on mõõtmisel kasutatud signaali sagedus f ja teises mõõdetud peegeldusteguri moodul $|\Gamma|$ detsibellides väljendatuna kujul

$$20\log|\Gamma|. \quad (19)$$

Kolmandas veerus on salvestatud mõõdetud peegeldusteguri faas ϕ kraadides.

Mõõtmistega on selleks praktikumiks kõik, edasine töö põhineb mõõtetulemuste töötlemisel ja seda võib teha iseseisvalt kodus. Järgnevates punktides nõutud tulemuste leidmiseks kasuta töö teoreetilises osas toodud avaldisi.

2. Koosta graafik kus on kogu sagedusvahemiku ulatuses kujutatud impedantsi Z reaali- ja imaginaarosa sagedussõltuvust. Juhul kui takistuse R ja reaktiivtakistuse X_L muutumisvahemikud on samas suurusjärgus, siis võib mõlemad graafikud esitada samas teljestikus. Muul juhul tee kummagi kohta eraldi graafik või kasuta kahte erinevat y -telge. Võrdle saadud graafikuid teoreetiliste teadmistega elektrotehnikast, kas graafikud on ootuspärased, kui mitte, siis mis on teisiti? Mis võiks olla erinevuste põhjuseks?
3. Koosta graafik mis kujutab induktiivsuse L sagedussõltuvust. Juhul kui vaadeldav väärtus on suures ulatuses muutuv esita aruandes selle maksimaalne väärtus, konstantse L puhul aga keskmine väärtus.
4. Koosta graafik mis kujutab uuritud südamiku materjali suhtelise magnetilise läbitavuse $\mu_r = \mu_r' - j\mu_r''$ sagedussõltuvust. Kui reaali- ja imaginaarosa muutumisvahemikud ei ole samas suurusjärgus siis esita tulemused kahe eraldi graafikuna. Anna mõõtetulemuste põhjal hinnang, millisest materjalist võiks südamik valmistatud olla?
5. Viimasena koosta graafik mis näitab kas kaonurga tangensi või hüveteguri sõltuvust sagedusest. Kuidas sõltub uuritud induktiivsuse kvaliteet sagedusest? Võrdle saadud tulemust ootuspärasega.

Kuna siduanalüsaatori mõõtemääramatuse hindamine on üsna keerukas ja antud töös vajalikud avaldised on samuti üsna pikad, siis seekord me mõõtemääramatusi ei hinda.

Aruandes esitada:

- Esimeses punktis mõõdetud pooli südamiku mõõtmed H , D_1 ja D_2 ning pooli keerdude arv N .
- Teises punktis koostatud graafik(ud) koos selgitustega ja küsimuste vastustega.
- Kolmandas punktis koostatud induktiivsuse sagedussõltuvuse graafik ja arvuline väärtus (maksimum või keskmine).
- Neljandas punktis koostatud keskkonna magnetilise läbitavuse graafik(ud) ja hinnang südamiku võimaliku materjali kohta.
- Viiendas punktis koostatud graafik induktiivsuse kvaliteedi sagedussõltuvuse kohta koos selgitustega ja vastustega küsimustele.
- Kokkuvõte ja järeldused. Millised võiksid olla töös uuritud induktiivpooli praktilised kasutusvaldkonnad?

Võimalike kaitsmisküsimusi:

- Leia etteantud parameetritega pooli induktiivsus. Südamik võib olla kas rõngas või silinder.
- Leia induktiivsuse ja osade parameetrite kaudu pooli mõne parameetri väärtus.
- Kui suur on induktiivsusesse salvestatud energia?
- Kirjelda erinevaid kaomehhanisme induktiivpoolis.
- Kuidas saab tekkivaid kadusid vähendada?
- Kui suur on hüvteguri Q väärtus mõnel etteantud sagedusel?
- ...

Täiendavaid materjale:

[1] Lembit Abo. Elektroonikakomponendid. Tallinn 1997.

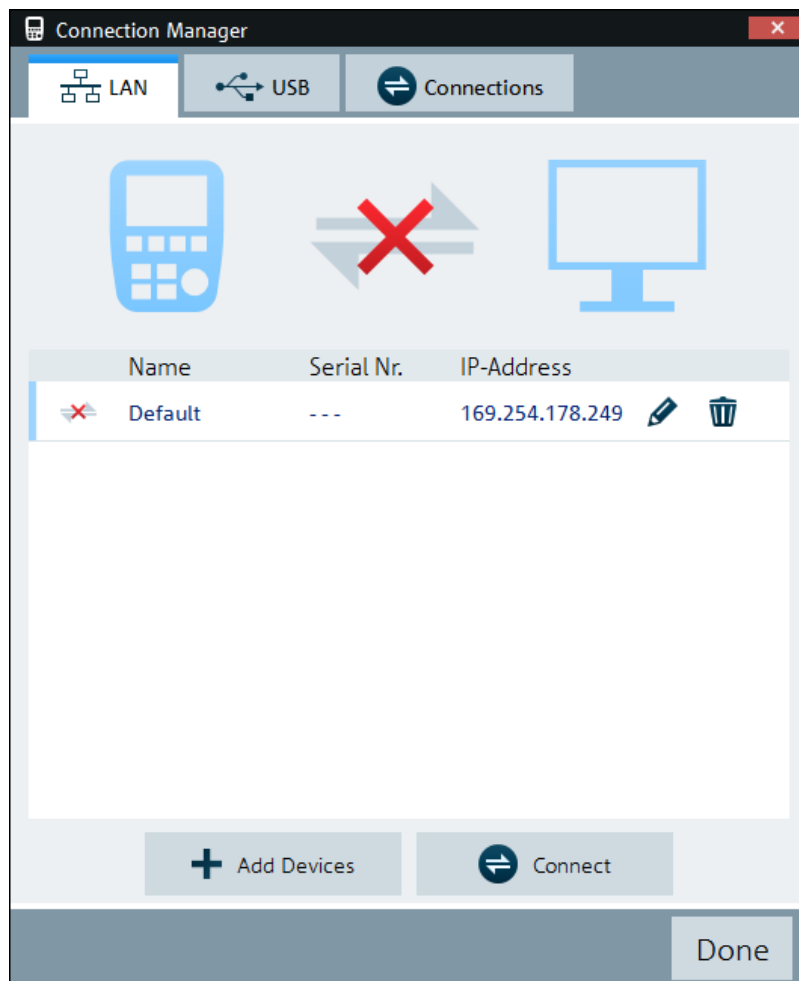
[2] W.H. Hayt, J.A. Buck. Engineering Electromagnetics. 6th ed.

[3] R&S®FSH4/8/13/20 Spectrum Analyzer Quick Start Guide. https://www.rohde-schwarz.com/hk/manual/r-s-fsh4-8-13-20-quick-start-guide-manuals-gb1_78701-29312.html, 15.09.2022

[4] R&S®FSH Handheld Spectrum Analyzer Quick Start.

LISA A – FSH 4 siduanalüsaatoriga võrguühenduse loomine.

1. Käivita arvutis *R&S InstrumentView* tarkvara. *Connection Manager*'i aken avaneb tarkvara käivitamisel automaatselt (vt joonis A.1).
2. Siduanalüsaatori (FSH4) IP aadressi muutmiseks vali *LAN* sakk ja vajuta pliiatsikujulisel ikoonil.



Joonis A.1 R&S InstrumentView Connection Manager aken

3. Vajuta *Instrument Setup* dialoogi avamiseks siduanalüsaatori esipaneeli paremas servas asuvale **SETUP** nupule.
4. Kasuta nooleklahve või pöördnuppu avanenud dialoogiaknas IP aadressi leidmiseks. Veendu, et DHCP kasutamine on lubatud (*On*). Vajadusel luba DHCP kasutamine lubatuks ja oota seejärel kuni analüsaator saab endale IP aadressi.
5. Sisesta analüsaatori IP aadress *InstrumentView Connection Manager*'i aknasse ja vajuta saki sulgemiseks **OK** ning seejärel ühenduse loomise algatamiseks **Connect**.
6. Ühenduse loomine võtab mõned sekundid aega, kui ühendus on loodud, siis vajuta **Done** nuppu.