

4. SEISULAINE ÜLEKANDELIINIS

THOMAS JOHANN SEEBECKI ELEKTROONIKAINSTITUUT

TALLINN
2019

Seisulaine ülekandeliinis

Töö eesmärk:

Elektromagnetlaine lainejuhis, faasikiiruse ja lainearvu mõisted. Peegeldustegur, langev- ja peegeldunud laine, seisulaine ülekandeliinis ja selle mõõtmine.

Kasutatavad seadmed ja vahendid:

- Võimsussensor NRP-Z211;
- Seisulaine mõõtmise katsemakett ME1200;
- 5V toiteadapter;
- SMA-N üleminek;
- SMA lühis;
- Koaksiaalkaabel sensor ja maketi ühendamiseks.

Töö teoreetilised alused:

Laineuhi ühes otsas tekitatud pinge $u(t)$ levib mööda lainujuhti faasikiirusega v , mis on peamiselt määratud lainejuhis kasutatud dielektrikute omadustega (ϵ ja μ). Vahelduvpingega kaasneb vool lainejuhis, viimastega omakorda ajas muutuv elektri- $\mathbf{E}$ ja magnetväli $\mathbf{H}$. Teisisõnu võib öelda, et lainejuhis kulgeb x -telje sihis, kiirusega v leviv, suunatud elektromagnetlaine.

Käesolevas töös kasutatavaks lainejuhiks on mikroribaliin (*microstrip*) milles praktikumis kasutatavatel sagedustel toimub levi TEM (*Transverse Electro-Magnetic*) moodis. Teisisõnu tähendab see seda, et nii elektri- kui magnetvälja komponent võnguvad laine levisuunaga (x -telg) risti. Samaselt levib ka tasapinnaline laine vabas ruumis.

Laine võib ülekandeliinis kulgeda x -telje sihis mõlemas suunas. Vastupidises (x -i vähenemise) suunas kulgev laine tekitab juhul, kui ülekandeliini lõpus kogu positiivses suunas kulgeva laine energiat edasi ei anta. Praktikas siis juhul, kui liin ei ole koormusega täielikult sobitatud. Täieliku sobituse korral on liini lõpus koormus mille impedants Z_L on liini **karakteristliku impedantsi** Z_0 kaaskompleksarv $Z_L = Z_0^*$. Puhtalt aktiivtakistuse korral peab siis koormuse takistus olema võrdne ülekandeliini karakteristliku impedantsiga Z_0 .

Kaovabas liinis kirjeldab x -telje suunas kulgevat, ringsagedusega $\omega = 2\pi f$, harmoonilist (siinuselist) laine faasorkujul avaldis

$$u^+(x) = U_m^+ e^{-jkx}, \quad (1)$$

kus U_m^+ on x-telje suunalise komponendi amplituud ja k on **lainearv**

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{v}. \quad (2)$$

Korrutis $-kx$ on laine faas liini algusest kaugusel x . Positiivses suunas kulgevat lainet nimetatakse **langevaks** (*incident wave*) **laine**ks. Vastupidises suunas kulgeva, **peegeldunud laine** (*reflected wave*), faasorkujul avaldis on kujul

$$u^-(x) = U_m^- e^{jkx}, \quad (3)$$

kus U_m^- on peegeldunud laine amplituud.

Kuigi antud avaldised kirjeldavad ideaalset, kaovaba juhtu, saab neid teatud täpsusega rakendada ka reaalses olukorras. Viimast siis eeldusel, et reaalsed kaod ülekandeliinis on küllaltki väikesed. Kui liinis kulgeb kaks vastassuunas liikuvat lainet, siis pinge sõltuvus asukohast x on, vastavalt superpositsiooniprintsiibile, leitav nende kahe laine summana ehk

$$u(x) = u^+(x) + u^-(x) = U_m^+ e^{-jkx} + U_m^- e^{jkx}. \quad (4)$$

Langeva ja peegeldunud laine suhe on määratud piirtingimustega lainejuhi ja koormuse ühenduspunktis, numbriliselt väljendab seda peegeldustegurina Γ tuntud kompleksne suurus. Koormuse peegeldustegur

$$\Gamma_L = \frac{u^-(x)}{u^+(x)} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}, \quad (5)$$

kus Z_L on lainejuhi lõpus oleva koormuse impedants. Kahest eelmisest avaldisest (4) ja (5) saame kokku

$$u(x) = U_m^+ (e^{-jkx} + \Gamma_L e^{jkx}). \quad (6)$$

Käesolevas töös vaatleme kahte äärmuslikku erijuhtu, millest esimese korral on koormuseks tühis ($Z_L = \infty$) ja teise korral lühis ($Z_L = 0$). Juhul kui koormus on palju suurem lainejuhi karakteristikust impedantsist, ehk liin töötab tühikoormusele, on avaldise (5) kohaselt peegeldusteguri väärtus praktiliselt üks ja seega pinge liinis

$$u(x) = U_m^+ (e^{-jkx} + e^{jkx}) = 2U_m^+ \cos(kx). \quad (7)$$

Viimasest järeldub, et pinge amplituud muutub pikki liini koosinusfunktsiooni järgi

$$U_m(x) = 2U_m^+ |\cos(kx)|. \quad (8)$$

Kuna lahtistel otstel, ehk tühisel, on pinge maksimaalne, siis sellega on määratud ka vaadeldava funktsiooni algfaas. Tekkinud seisulaine on perioodiline perioodiga

$$kx = \pi \Rightarrow x = \frac{\lambda}{2}. \quad (9)$$

Seisulaine tühikoormuse korral on kujutatud joonisel 1 sinise joonega. Lühistatud lainejuhi korral on peegeldusteguri väärtus võrdne miinus ühega ja seisulaine amplituudi kirjeldav avaldis on seetõttu

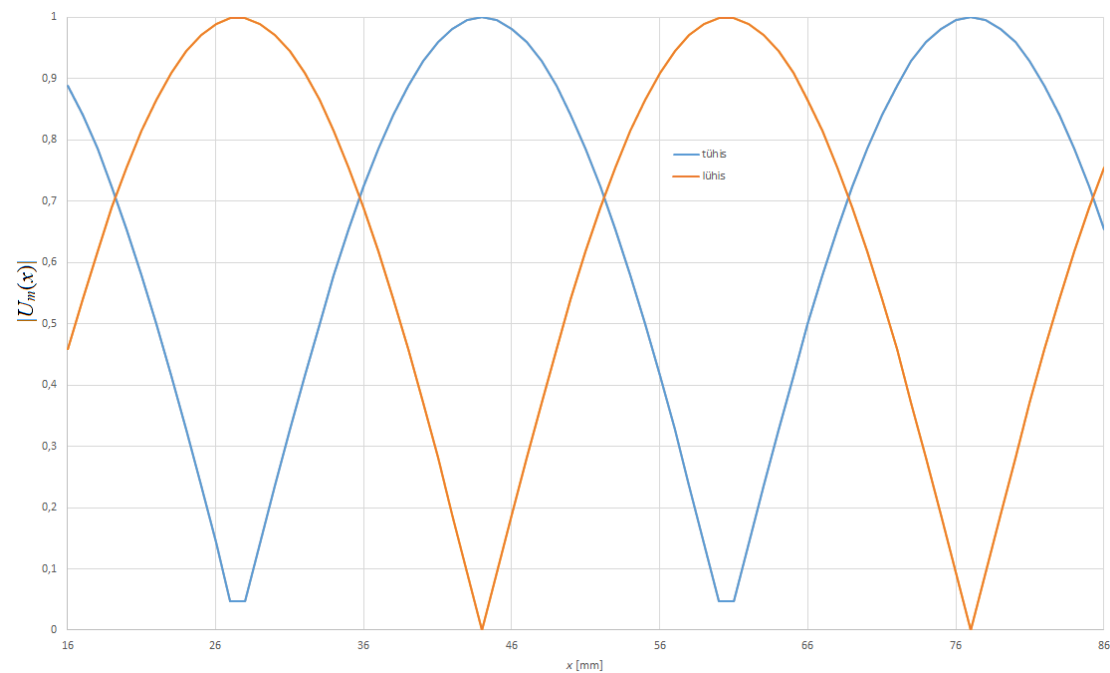
$$U_m(x) = 2U_m^+ |\sin(kx)|. \quad (10)$$

Tulemus on kujutatud joonisel 1 oranži joonega. Näeme, et seisulaine periood on mõlemal juhul sama, kuid ruumiline paiknemine erinev. Seisulainetegur

$$VSWR = \frac{U_{max}}{U_{min}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (11)$$

peaks mõlemal juhul olema lõputu ($\infty:1$).

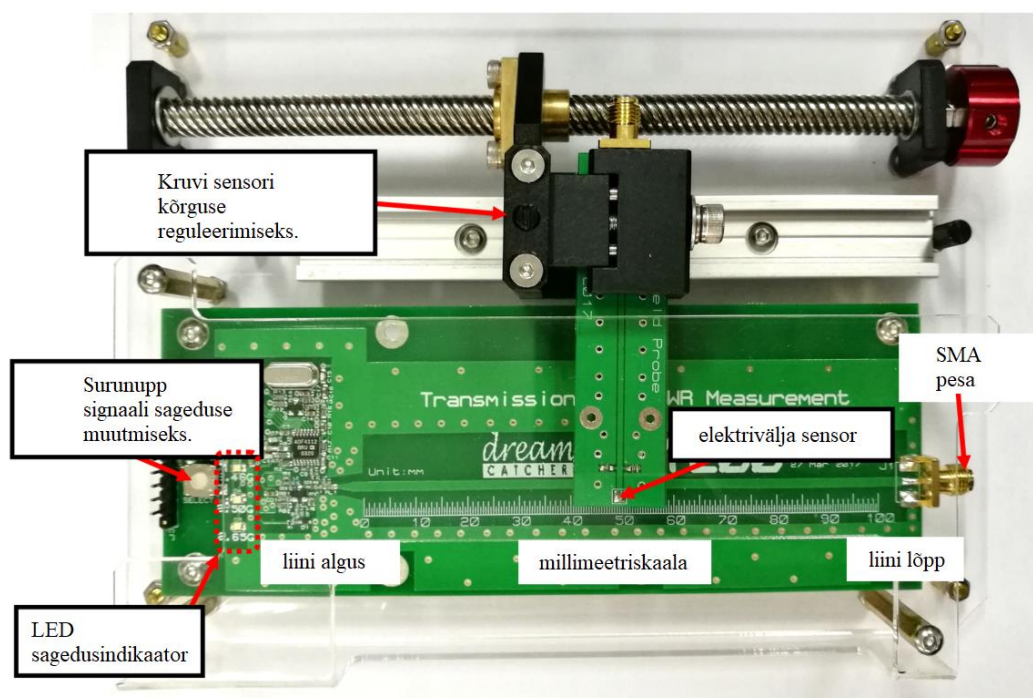
Muude koormuse Z_L väärtuste korral on seisulaine periood ikka sama, kuid amplituudi kõikumine ja seega ka seisulaineteguri väärtus, väiksemad. Täielikult sobitatud koormuse korral ($Z_L = Z_0$) puudub liinis peegeldunud laine ja seisulainet ideaalsel juhul ei teki. Seega on sellisel juhul seisulaineteguri väärtus 1:1.



Joonis 1. seisulaine amplituud lühistatud ja tühikoormusega liinis

Töö käik:

Töös kasutatava makett ME1200 (vt joonis 2) koosneb mikrolaine ostsillaatorist ja 11 cm pikkusest mikroribaliinist – trükkplaadil realiseeritud ülekandeliinist. Ülekandeliini kohal saab kruviülekanne kaudu liigutada elektrivälja tugevust mõõtvat sondi. Sond on liinile piisavalt lähedal, et selle abil saaks mõõta elektrivälja E tugevust liinis, kuid samas piisavalt kaugel, et liini normaalset talitlust märkimisväärselt mitte häirida.



Joonis 2. Praktikumis kasutatava ülekandeliini seisulaineteguri mõõtmise makett ME1200

Seisulaine amplituudi mõõtmiseks kasutame Rohde&Schwarz'i võimsussensorit NRP-Z211. Sensorit saab kasutada kas koos spektri- ja siduanalüsaatoriga FSH-4 või USB kaabli vahendusel arvuti külge ühendatuna R&S Power Viewer Plus tarkvara vahendusel.

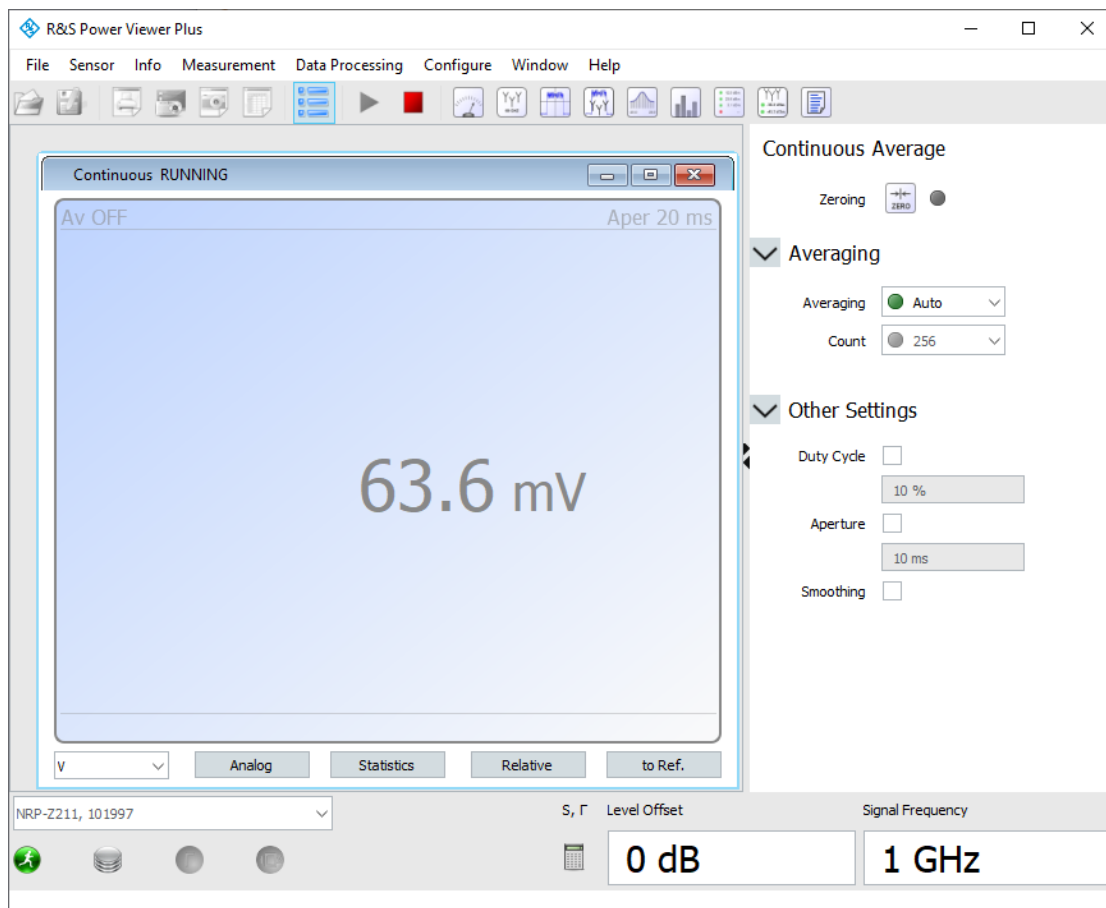


Sensoriga NRP-Z211 saab mõõta signaali võimsust P . Viimane on pingeline efektiivväärtusega seotud süsteemi karakteristliku impedantsi kaudu järgmiselt

$$P = \frac{U^2}{Z_0} . \quad (11)$$

Kuna suurused on omavahel võrdelised, siis on mõlema periood sama ning samuti langevad omavahel kokku maksimumide ja miinimumide asukohad.

Ühendada maketi 5V toiteplokk voluvõrku ja valida surunuppu kasutades etteantud töösagedus f , milleks on kas 2,435; 2,500 või 2,585 GHz. Töösageduse väärtus küsida praktikumi juhendajalt. Sageduse väärtus peab kajastuma ka praktikumi aruandes.



Joonis 3 R&S Power Viewer Plus programmi aken

Ühenda võimsusmõõduri sisend koaksiaalkaabliga elektrivälja sensori väljundisse. Käivita arvutis R&S Power Viewer Plus tarkvara (vt joonis 3). Seadista mõõdetavaks suuruseks signaali võimsus dBm-ides. Keskmistamise (Averaging) kasutamine võimaldab vähendada mõõtetulemuse hüplikkust kuid samas suurendab mõõtmiseks kuluvat aega.

Kuna tehtavad mõõtmised on üsna ajamahukad siis võib paari kaupa omavahel kokku leppida, et üks tudeng sooritab 1. ja 3. ning teine 2. ja 3. mõõtmise. Seejärel võib omavahel 1. ja 2. mõõtmise tulemusi jagada ja aruande koostamisel kasutada.

1. Esimesed mõõtmised teeme olukorras kus liini väljundis puudub koormus ehk tühise olukorras ($Z_L = \infty$).

Liiguta elektrivälja sensor asukohta $x = 16$ mm, mõõda sondi väljundist saadava signaali võimsus P ja kirjuta see mõõtetulemuste tabelisse. Tabeli näide on toodud lisas A. Tulemused on soovitatav salvestada Exceli tabelina, sellisel juhul on hilisem järeltöötlus ja tulemuste kuvamine kiirem ning mugavam.

Korda mõõtmisi ühemillimeetriste sammude tagant kuni koordinaadini $x = 86$, kokku peab tabelisse tekkima 71 mõõtetulemust.

2. Ühenda liini lõppu SMA lühis ja korda eelmises punktis tehtud mõõtmisi otsast lühistatud ($Z_L = 0$) liinilõigu jaoks. Kirjuta kõik saadud 71 mõõtetulemust tabelisse (vt lisa A).
3. Ühenda liini lõppu sobitatud koormus (50Ω terminaator) ja korda uuesti mõõtmisi kõigis 71 testpunktis, tulemused kirjuta tabelisse (vt lisa A).

Esita kõigis punktis ülese võetud tulemused graafikuna ühel ja samal teljestikul. Abstsissiteljel kujutada asukoha koordinaati x ja ordinaatteljel mõõdetud signaali võimsust P . Viimast võib esitada nii logaritmilises kui lineaarsetes skaalas, kas võimsuse- või pingehikutes.

Mõõda, kas esimeselt või teiselt, graafikult kahe kõrvutise miinimumi vahekaugus ja arvuta nende põhjal välja signaali lainepikkus λ lainejuhis. Teades ka signaali sagedust f arvuta leitud lainepikkuse põhjal välja signaali levimise kiirus ehk faasikiirus v . Esita leitud lainepikkuse λ ja faasikiiruse v hinnangud töö aruandes. Lainepikkusele lisada ka mõõtemäramatus.

Laine levimise kiirus ülekandeliinis v on pöördvõrdeline ruutjuurega kasutatava dielektriku suhtelisest dielektrilisest läbitavusest ϵ_r :

$$\frac{v}{c} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}}. \quad (12)$$

Kuna antud juhul on osa elektriväljast trükkplaadis ja teine osa esimese koha õhus, siis tulemuse määrab mõlemapoolne panus, ehk kahe väärtuse kaalutud keskmine, mis peaks tulema suurem kui õhu oma ja samas väiksem kui trükkplaadi alusmaterjali oma. Arvuta avaldise (12) alusel ülekandeliini efektiivne suhteline dielektriline läbitavus ja esita saadud tulemus aruandes.

Arvuta mõõtetulemuste põhjal seisulaineteguri $VSWR$ väärtuste hinnangud kõigil kolmel juhul (tühis, lühis ja sobitatud koormus) korral. Esita tulemused aruandes. Võrdle tulemusi eeldatavate väärtustega ja selgita võimalike erinevuste põhjuseid.

Aruandes esitada:

- Mõõtmistel kasutatava signaali sagedus f .
- Mõõtetulemuste põhjal koostatud graafikud ühtses teljestikus.
- Hinnangud lainepikkuse λ väärtusele (koos mõõtemääramatusega) ja signaali levimise (faasi) kiirusele v lainejuhis.
- Hinnang kasutatava lainejuhi suhtelise efektiivse dielektrilise läbitavuse kohta.
- Seisulainetegurite väärtused ja kaasnevad selgitused.
- Kokkuvõte ja järeldused – kuidas langesid mõõdetud tulemused kokku eeldatavatega. Kui esines erinevusi, siis mis võiks olla nende põhjuseks.

Täiendavaid materjale:

[1] Rohde&Schwarz. Universal Power Sensor Operating manual. https://www.rohde-schwarz.com/webhelp/NRPxxSN_HTML_UserManual_en/Content/dc7f85568ce9445c.htm, 25.10.2023

[2] Microwaves 101. Microstrip.

<https://www.microwaves101.com/encyclopedias/microstrip>, 25.10.2023

[3] Electronics notes. What is VSWR: Voltage Standing Wave Ratio.

<https://www.electronics-notes.com/articles/antennas-propagation/vswr-return-loss/what-is-vswr.php>, 25.10.2023

[4] Tallinna Tehnikaülikool, Füüsikainstituut. Füüsikaliste suuruste mõõtmine. Mõõtmisvead, mõõtehälbed ja mõõtemääramatus füüsika praktikumides.

https://haldus.taltech.ee/sites/default/files/2021-04/FUUSIKALISTE_SUURUSTE_MOOTMINE_MOOTMISVEAD_MOOTEHALBED_J.pdf, 25.10.2023

LISA A Mõõtetulemuste tabeli näide

Asukoht x [mm]	<i>P</i> [dBm] tühises	<i>P</i> [dBm] lühises	<i>P</i> [dBm] sobitatud
16			
17			
18			
19			
...			
85			
86			