

3. ÜLEKANDELIINI ASEESKEEM

THOMAS JOHANN SEEBECKI ELEKTROONIKAINSTITUUT

TALLINN
2020

Ülekandeliini aseskeem

Töö eesmärk:

Tutvumine lainujuhi aseskeemiga, amplituud ja faasinihke mõõtmine, langev- ja peegeldunud laine, seisulaine. Aseskeemi ja reaalse lainujuhi sarnasused ja erinevused.

Kasutatavad seadmed ja vahendid:

- Ostsilloskoop Keysight DSOX1102G.
- Üleminekud ja ühendusjuhtmed:
 - 50 Ω BNC otsikutega koaksiaalkaabel;
 - 50 Ω BNC terminaator;
 - 75 Ω BNC terminaator;
 - BNC lühis.

Töö teoreetilised alused:

Ülekandeliin koosneb üldjuhul kahest, omavahel isoleeritud, juhtmest. Juhtmed võivad olla erineva kujuga nagu koaksiaalkaabli puhul või teineteisega identsed, nagu näiteks keerdpaaari korral.

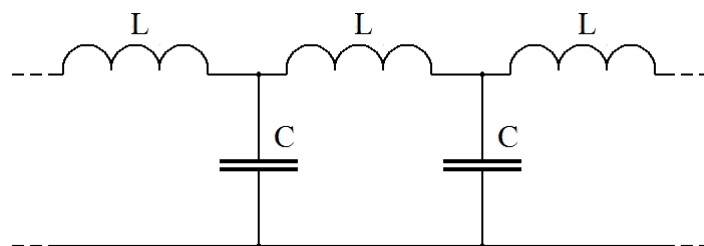
Igal juhul on nende kahe juhtme vahel mingi väike mahtuvus, mille väärtus sõltub nii juhtmete kujust, vahekaugusest kui nende vahelise isolaatori ehk dielektriku omadustest. Kuna mainitud mahtuvus sõltub konkreetse lainujuhi pikkusest l ja on seega iga lõigu puhul erinev, siis on otstarbekas anda iga lainujuhi tüübi kohta **mahtuvus pikkusühiku kohta** dC/dl [F/m]. Enamasti tähistatakse seda suurust, nagu on näha ka joonisel 1, lihtsalt mahtuvuse tähisega C . Sarnaselt mahtuvusele antakse pikkusühiku kohta ka kõik ülejäänud lainujuhi elektrilised parameetrid.

Kui lainujuhti läbib vool i , siis tekib viimase tõttu juhtmete ümber magnetväli, mis salvestab endasse osa elektrivoolu energiast – teisisõnu on igal juhtmel mingi nullist erinev induktiivsus. Juhtmete **induktiivsus pikkusühiku kohta** L [H/m] on seega teiseks ülekandeliini elektriliseks parameetriks.

Näitena võib tuua laialt levinud koaksiaalkaabli RG-58, mille puhul on mahtuvus pikkusühiku kohta ligikaudu 95 pF/m ja induktiivsus vastavalt 236 nH/m.

Ülaltoodust lähtuvalt saab koostada lainujuhi elektrilise mudeli ehk aseskeemi joonisel 1 toodud kujul. Näeme, et aseskeem on oma olemuselt n – indat järku LC-madalpääsfilter. Kuna nii ideaalne mahtuvus ja induktiivsus on kaovabad

komponendid siis kirjeldavad ülalmainitud parameetrid **kaovaba ülekandeliini**. Tegemist on idealiseeringuga mida praktikas teostada ei ole loomulikult võimalik. Siiski on tegemist kasuliku mudeliga mida saab piisava täpsusega rakendada ka reaalsete ülekandeliinide kirjeldamisel, tingimusel, et nendes esinevad kaod on väikesed.



Joonis 1. Kaovaba lainejuhi aseskeem

Ülekandeliini üheks peamiseks parameetriga on tema **karakteristlik impedants** Z_0 mis on võrdne liinis, samas suunas kulgevate ping- ja voolulaine amplituudide U_m ja I_m suhtega:

$$Z_0 = \frac{U_m}{I_m}. \quad (1)$$

Kaovaba ülekandeliini karakteristlik impedants sõltub selle elektrilistest parameetritest L ja C alljärgnevalt

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (2)$$

Signaal kulgeb ülekandeliinis väga suurel, kuid siiski lõplikul, kiirusel v . Saab näidata, et kaovaba lainejuhi korral on **signaali levikiirus** liinis

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (3)$$

Tavaliselt iseloomustatakse ülekandeliini levikiiruse tegeliku väärtuse v asemel hoopis **kiirusteguriga** VF (*velocity factor*). Kiirustegur näitab, kui palju on elektromagnetlaineline levikiirus konkreetses ülekandeliinis väiksem laine levikiirusest vaakumis c

$$VF = \frac{v}{c}. \quad (4)$$

Enamkasutatavates ülekandeliinides on kiirusteguri väärtus tüüpiliselt vahemikus 0,5 kuni 0,8.

Elektrilised mõõteriistad nagu siduanalüsaator või ostsilloskoop ei mõõda otseselt laine levikiirust v vaid kas signaali lainejuhis levimise aega τ või lainejuhi läbimisel signaalis tekkinud faasinihet ϕ . Ajaline viide on lihtsalt võrdeline ülekandeliini pikkuse l ja levikiiruse v suhtega

$$\tau = \frac{l}{v} \quad (5)$$

ning tihtipeale nimetatakse seda ka **grupihilistuseks** (*group delay*). Viidet saab mõõta ostsillooskoobiga või spetsiaalse, selleks otstarbeks mõeldud mõõteriistaga – reflektomeetriga.

Viite τ tõttu tekkiv φ faasinihe suhtub täisringi (2π radiaani) samamoodi nagu viide τ suhtub signaali perioodi T (vt joonis 2)

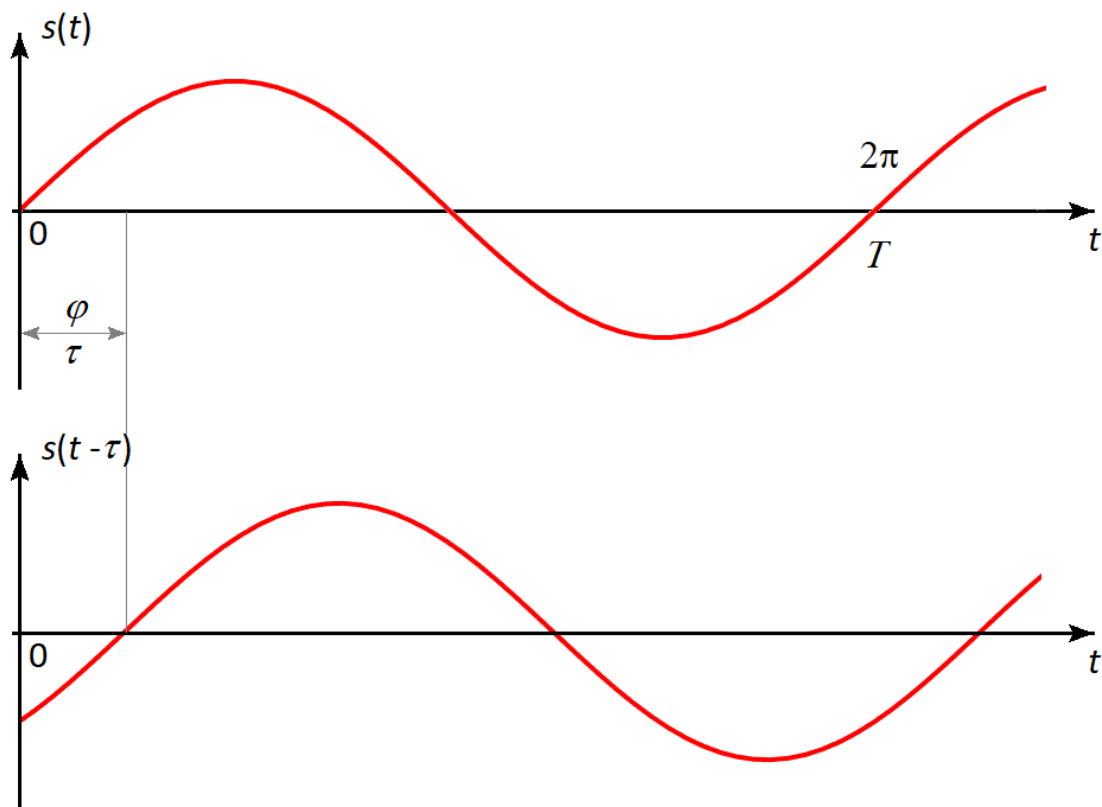
$$\frac{\varphi}{2\pi} = \frac{\tau}{T}. \quad (6)$$

Joonise 2. ülemises osas on kujutatud ülekandeliini sisendis olevat harmoonilist signaali $s(t) = U_m \cdot \sin(\omega t)$. Sama joonise alumises pooles on vastavalt kujutatud liini väljundis olevat, ajas τ võrra hilistunud, signaali $s(t-\tau) = U_m \cdot \sin[\omega(t-\tau)]$.

Võrdusest (6) saame avaldada faasinihke väärtuse

$$\varphi = 2\pi \frac{\tau}{T} = \omega \tau = \omega \frac{l}{v} = \omega \frac{l}{c \cdot VF}. \quad (7)$$

Kuna liinis tekkiv hilistumine ei sõltu testsignaali $s(t)$ algfaasist, siis võib viimase mugavuse mõttes lugeda nulliks. Sellisel juhul on ülekandeliini väljundis oleva signaali faas ja tekkinud faasinihe omavahel võrdsed. Seetõttu võime antud töös edaspidi neid kahte mõistet segiläbi kasutada.



Joonis 2. Ajalise viite ja faasinihke vaheline seos

Erinevalt ajalisest viitest τ , tuleb meeles pidada, et faasinihe φ on üheselt defineeritud ainult vahemikus $-\pi$ kuni π (-180° kuni 180°). Juhul kui ülekandeliinis tekkinud ajaline viide τ on signaali perioodist T suurem ei ole mõõteriista poolt registreeritud faasinihe φ enam üksüheses vastavuses tekkinud ajalise viitega τ ega ka liini füüsilise pikkusega l .

Niisiis on tekkinud faasinihe φ võrdeline ülekandeliini pikkusega l . Samas võib viimane suurus võib omada praktikas üsna meelevaldset väärtust. Seetõttu on jällegi mõistlik lainejuhi iseloomustamiseks kasutada suurust, mis näitaks tekkinud faasinihke suurust pikkusühiku kohta. Sellist suurust nimetatakse **lainearvuks** k . Lainearvu, mille mõõtühikuks on [rad/m], väärtuse saame jagades avaldise (7) läbi ülekandeliini pikkusega l

$$k = \frac{\omega}{v} = \frac{\omega}{c \cdot VF} = \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (8)$$

Suurus λ viimases avaldises on signaali lainepikkus ülekandeliinis. Viimane on teatavasti võrdne signaali levikiiruse v ja sageduse f suhtega

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{c \cdot VF}{f}. \quad (9)$$

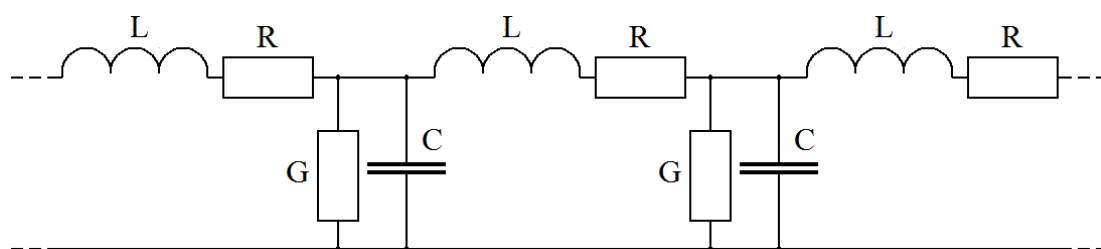
Ülekandeliini läbimisel tekkinud faasinihet (7) saab nüüd lainearvu kaudu väljendada palju kompaktsemal kujul

$$\varphi = kl. \quad (10)$$

Siiamaani oleme vaadelnud ideaalse ülekandeliini parameetreid ja omadusi. Reaalsel juhul omavad kõik juhtmed väikest, kuid siiski lõplikku takistust. Viimane on omakorda, pinnaefektist tingituna, võrdeline lainejuhis kulgeva signaali sagedusega f . Seega kolmandaks ülekandeliini elektriliseks parameetriks on selle juhtmete **takistus pikkusühiku kohta** R [Ω/m].

Juhtmete vahelise isolaatori takistus on ideaalsel juhul lõputu, kuid reaalses dielektrikutes tekivad erinevad energiakaod. Viimaseid väljendatakse kokkuvõtlikult dielektriku **juhtivusega pikkusühiku kohta** G [S/m].

Aseskeem mis võtab arvesse ka energiakadusid ülekandeliinis on kujutatud joonisel 3. Taolist realistlikku ülekandeliini nimetatakse **kadudega ülekandeliiniks** ja tegemist on mudeliga, mis kirjeldab kõiki praktiliselt kasutatavaid ülekandeliine. Juhul kui antud mudelis võtta R ja G väärtused nulliks, lihtsustub aseskeem alguses vaadeldud kaovaba ülekandeliini mudeliks (joonis 1).



Joonis 3. Reaalse, kadudega lainejuhi, aseskeem

Mistahes reaalse ülekandeliini karakteristiklik impedants on leitav avaldisega

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}, \quad (11)$$

kus $\omega = 2\pi f$ on lainejuhis leviva signaali ringsagedus. Näeme, et kaovabal juhul, kui mõlemad, nii $R = G = 0$, lihtsustub viimane avaldis kujule (3). Olukorras, kus kaod ülekandeliinis on väikesed võib lihtsuse mõttes sellist liini käsitleda kui kaovaba. Samas tuleb suuremate kadude puhul arvestada asjaoluga, et ülekandeliini karakteristiklik impedants on tegelikult sagedusest sõltuv kompleksne suurus.

Laine levi kadudega ülekandeliinis kirjeldab kompleksne **levikonstant** γ

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta. \quad (12)$$

Levikonstandi reaalosa α nimetatakse **sumbeteguriks** mõõtühikuga Neeprit meetri kohta [Np/m]. Neeper on logaritmiline mõõtühik kahe suuruse suhte kirjeldamiseks. Pingete u_1 ja u_2 suhe h Neeprites avaldub kujul

$$h[\text{Np}] = \ln \frac{u_1}{u_2}. \quad (13)$$

Teisisõnu võib öelda, et kui signaal levib lainejuhis teekonna pikkusega $1/\alpha$, siis tema amplituud nõrgeneb selle käigus e , ehk ligikaudu 0,368 korda. Sumbetegur Detsibellides meetri kohta [dB/m] on $20\log(e) \approx 8,686$ korda suurem kui Neeprites väljendatuna.

Levikonstandi imaginaarosa β kirjeldab laine faasikiirust [rad/m] ja on tuntud kui faasikonstant. Väikeste kadudega lainejuhis on levikonstandi imaginaarosa praktiliselt võrdne lainearvuga k .

Ülekandeliini elektriline mudel

Sidetehnikas ja kõrgsageduselektroonikas on oluline tunda ülekandeliinide parameetreid ja lainelevi seaduspärasusi nendes. Reaalse ülekandeliini uurimise õppetöö käigus vajab suhteliselt kalleid, kõrgel sagedusel töötavaid mõõteriistu. Seetõttu kasutatakse mõnikord õppetöös ülekandeliini asemel ülalkirjeldatud aseskeemi, kuna viimase uurimiseks piisab odavates seadmetest mis on üldjuhul õppelaboris juba olemas.

Õnneks on meie laboris olemas vajalikud vahendid reaalsete ülekandeliinide mõõtmiseks, kuid aseskeemi uurimine võimaldab paremini mõista reaalsete ülekandeliinide omadusi ja seetõttu ongi käesolev töö aine praktikumide nimekirjas.

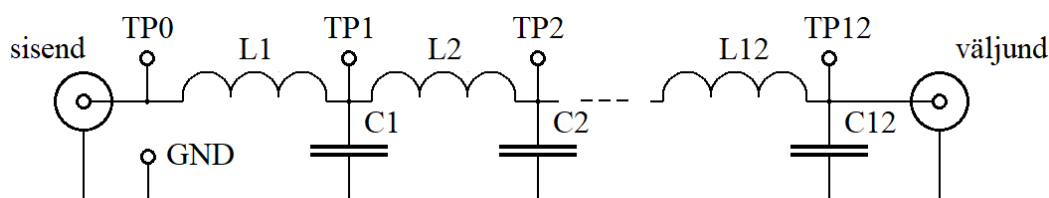
Kui reaalsel ülekandeliini kirjeldab joonisel 3 kujutatud mudel, siis peaks diskreetsetest elementidest koostatud, samasuguse põhimõtteskeemiga elektriabel käituma sarnaselt reaalsele ülekandeliinile. Toodud arutluskäik on aluseks käesolevale praktikumitööle.

Joonistel 1 ja 3 kujutatud mudelite puhul eeldatakse, et iga LC ahel on mõõtmelt lõputult väike ja selliseid ahelaid on ülekandeliini kohta lõputult palju. Nendel alustel saab koostada diferentsiaalvõrrandite süsteemi, mis kirjeldavat ülekandeliinis levivaid laineid. Mainitud võrrandeid tuntakse **telegraafi võrrandite** nime all.

Aseskeemi koostades tekib paratamatult praktiline küsimus vajalike LC ahelaid hulga kohta. Tulles tagasi RG-58 koaksiaalkaabli näite juurde võiks esimeses lähenduses kasutada ainult ühte LC ahelat mahtuvusega 95 pF ja induktiivsusega 236 nH. Tulemuseks saame esimest järku madalpääsfiltri lõikesagedusega 33,7 MHz. Lõikesagedusest madalamatel sagedustel on sumbumuse ja faasinihke väärtused tõepoolest sarnased reaalsele kaabli omale, kuid päris kaabel on palju laiaribalisem kui kirjeldatud mudel. Ühe ahelaga maketi teise puudusena saame mõõta amplituudi ja faasi ainult „ülekandeliini“ sisendis ja väljundis, aga mitte nende punktide vahel.

Eelmisest parema mudeli meetripikkusest RG-58 koaksiaalkaablist saame, kui ühendame jadamisi kaks LC ahelat milles mõlema mahtuvus ja induktiivsus on poole väiksemad kui eelmisel juhul (47 pF ja 118 nH). Nüüd on lõikesagedus kaks korda kõrgem ja saame signaali mõõta lisaks sisendile ja väljundile ka „poole“ kaabli pealt. Mida suurem on ahelate arv, seda täpsem on saadud mudel ja seda parema resolutsiooniga saab mõõtmisi teha. Samas kasvab vajalike komponentide hulk, mis teeb skeemi suuremaks, kallimaks ning suurendab ka vajalike mõõtmiste hulka.

Kõike ülaltoodut arvesse võttes on käesolevas praktikumis kasutataval maketil kompromissina kaksteist LC ahelat. Laborimaketi põhimõtteskeem on kujutatud joonisel 4. Eraldi takisteid induktiivsusega jadamisi ega mahtuvusega rööbiti ühendada vaja pole, sest praktikas on kõikidel komponentidel omad kaod juba olemas.



Joonis 4. Laborimaketi põhimõtteskeem

Maketis kasutatavatel poolide CM322522-5R6KL induktiivsus on 5,6 μH ja andmelehe [1] kohaselt on nende takistus alalisvoolule väiksem kui 1,6 Ω . Hüveteguri Q väärtus on testsagedusel 7,96 MHz vähemalt 30. Teatavasti on reaktiivkomponendi hüvetegur Q võrdne nende reaktiiv- ja aktiivtakistuste suhtega, mis induktiivsuse korral on

$$Q = \frac{\omega L}{R}. \quad (14)$$

Viimasest saab avaldada, et testsagedusel on kasutatava induktiivpooli takistus suurusjärgus 9,3 Ω . Teades, et pinnaefektist tingitud aktiivtakistus on võrdeline ruutjuurega sagedusest saab hinnata, et töö käigus mõõtmisteks kasutataval sagedusel 1 MHz on aktiivtakistuse väärtus suurusjärgus kuni $R = 3,3 \Omega$. Kasutatava induktiivsuse väärtuse tolerants on $\pm 10\%$.

Skeemi kondensaatorid C1206C222GBGACAUTO [2] on suure hüveteguriga ja seega võib kasutataval madalal töösagedusel juhtivuse G praktiliselt nulliks lugeda. **Kondensaatorite mahtuvus on tegelikult 2,2 nF** – trükkplaadile on ekslikult kirjutatud tuhat korda väiksem väärtus 2,2 pF. Mahtuvuse tolerants on 2 %.

Signaali allika ja erinevate koormuste ühendamiseks maketiga on plaadil kaks BNC koaksiaalkaabli pesa, mis on vastavalt märgitud tekstiga „sisend“ ja „väljund“. Pingete mõõtmiseks sisendist ja iga LC ahela väljundist on trükkplaadile joodetud kolmteist testpunkti (TP0 – TP12) ning maaühendus (GND). Kasutatava maketi foto on toodud joonisel 6.

Lainelevi ülekandeliinis

Telegraafi võrrandite lahendamisel selgub, et lainejuhis kulgevad vastupidistes suundades kaks harmoonilist lainet. Allikast koormuse poole liikuvat lainet nimetatakse langevaks ja vastupidises suunas liikuvat lainet nimetatakse peegeldunuks. Langeva laine avaldise võib kirjutada kujul

$$u^+(x, t) = U_m^+ e^{-\alpha x} \cos(\omega t - \beta x + \varphi^+). \quad (14)$$

Ülaindeks $^+$ näitab, et tegemist on langeva lainega mis liigub x -telje positiivses suunas. U_m^+ on langeva laine amplituud, x on kaugus pikki ülekandeliini selle algusest mõõdetuna ja φ^+ on langeva signaali algfaas. Viimase võib enamasti nulliks lugeda. Juhul kui ülekandeliin on kaovaba, või on kaod piisavalt väikesed ($\alpha = 0$, $\beta = k$), et neid võib praktikas ignoreerida lihtsustub (14) kujule

$$u^+(x, t) = U_m^+ \cos(\omega t - kx + \varphi^+). \quad (15)$$

Peegeldunud lainet kirjeldav avaldis on sarnane langeva laine omale, ainsaks erinevuseks on laine levimise suund, ehk märk levikonstandi ees. Peegeldunud laine avaldis kaovabas ülekandeliinis

$$u^-(x, t) = U_m^- \cos(\omega t + kx + \varphi^-). \quad (16)$$

Juhul kui liini lõpus oleva koormuse impedants Z_k on võrdne ülekandeliini (või selle aseskeemi) karakteristliku impedantsiga Z_0 , on tegemist erijuhuga mille korral peegelduv laine puudub ($U_m^- = 0$). Sellisel juhul öeldakse, et allikas on koormusega **sobitatud**. Kirjeldatud juhul on pinge amplituud kaovabas liinis asukohast sõltumatu. Ükskõik millise x väärtuse puhul on pinge amplituud ikka sama. Olukorda illustreerib rohelisega kujutatud sõltuvus joonisel 5. Kadudega liinis väheneb amplituud kadude tõttu allikast kaugenedes eksponentsiaalselt võrdeliselt $e^{-\alpha x}$. Faas aga kasvab lineaarselt vastavalt avaldisele (10) $\varphi = kx$.

Reaalse ülekandeliini korral on asukoha koordinaat x pidev suurus mis võib omada mistahes reaalarvulist väärtust vahemikus nullist kuni liini kogupikkuseni l . Töös kasutataval maketil on kaksteist LC ahelat – pingeamplituudi ja faasi on võimalik mõõta ainult sisendis, väljundis ja veel üheteistkümnnes kohas „liini“ ulatuses. Seega on asukoht antud juhul diskreetne x_n , kus $n = 0, \dots, 12$.

Reaalses ülekandeliinis on kõik elektrilised parameetrid ühtlaselt hajutatud kogu liini pikkuse ulatuses, seetõttu kutsutakse selliste omadustega komponente **hajuparameetritega** komponentideks. Maketis kasutatavate komponentide puhul on aga nende peamine omadus (mahtuvus, induktiivsus) koondunud väikesele alale. Juba varasemalt näitena toodud RG-58 koaksiaalkaabli puhul on mahtuvus 95 pF meetripikkusel kablilõigul. Samas võib 95pF kondensaator olla mõõtmetega 1x0,5 mm. Seetõttu on sama faasinihke tekitamiseks vajalik LC ahel füüsiliselt palju väiksem kui vajaliku pikkusega ülekandeliini lõik.

Ühe LC ahela poolt tekitatav faasinihe sõltub nii selle komponentide väärtusest, signaali sagedusest kui ka allika ja koormuse impedantsist, olgu selleks väärtuseks $\Delta\varphi$. Ahela tekitatud faasinihe sõltub täisringi 2π rad samaoodi nagu taolise faasinihke tekitamiseks vajalik liinilõigu pikkus l signaali lainepikkusesse λ

$$\frac{\Delta\varphi}{2\pi} = \frac{l}{\lambda}. \quad (17)$$

Viimasest saab avaldada liinilõigu pikkuse mis tekitab sama suure faasinihke $\Delta\varphi$ kui vaadeldav LC ahel. Kuna tegelik ahel on mõõtmetelt palju väiksem, kui sama faasinihke saamiseks vajalik ülekandeliini lõik siis nimetame saadud pikkust edaspidi pseudopikkuseks

$$l_p = \frac{\Delta\varphi}{2\pi f \sqrt{LC}} = \frac{\Delta\varphi}{\omega \sqrt{LC}}. \quad (18)$$

Sarnaselt saab leida sagedusega f signaali pseudo-lainepikkuse ülekandeliini maketis

$$\lambda_p = \frac{1}{f \sqrt{LC}}. \quad (19)$$

Tuleme nüüd tagasi lainete levi juurde ülekandeliinis ja selle maketis. Juhul kui koormus liini lõpus ei ole sama impedantsiga kui liin ise, siis peegeldub osa langevast lainest liini lõpust tagasi ja tekitab ülekandeliinis peegeldunud laine. Peegeldunud laine amplituud U_m^- ja faas φ^- sõltuvad nii langeva laine vastavatest väärtustest liini lõpus kui komplekse peegeldusteguri Γ omast. Peegeldustegur on defineeritud kui

$$\Gamma = \frac{U^-}{U^+}, \quad (20)$$

kus $U^+(x) = U_m^+ e^{j\varphi^+}$ ja $U^-(x) = U_m^- e^{j\varphi^-}$ on vastavalt faasorkujul langeva ja peegeldunud laine väärtused peegelduskohas. Peegeldustegur sõltub ülekandeliini ja koormuse väärtustest

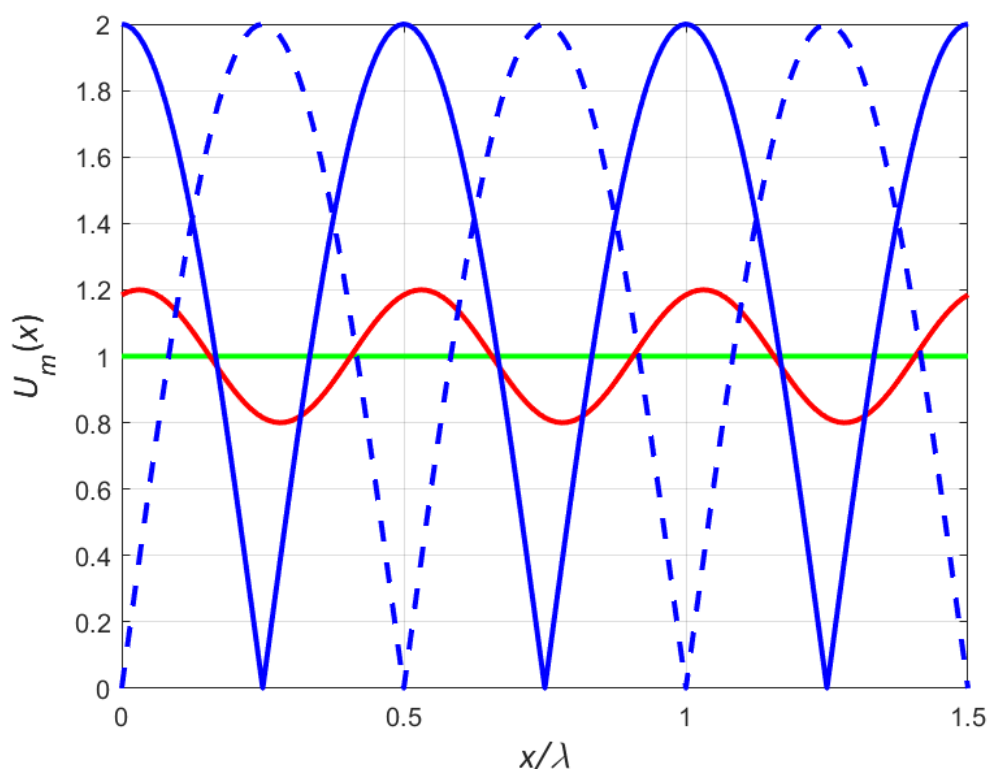
$$\Gamma = \frac{Z_k - Z_0}{Z_k + Z_0}. \quad (21)$$

Kui liinis levivad samaaegselt kaks lainet, langev ja peegelduv, siis on pinge hetkväärtus mistahes asukohas leitav nende kahe summana. Sõltuvalt kahe laine vahelisest faasinihkest liituvad nad teatud asukohtades konstruktiivselt ja võnkumine

võib saavutada amplituudi kuni $U_m^+ + U_m^-$. Teistes kohtades tekib destruktiivne interferents, peegeldunud laine lahutub langevast, võnkumiste amplituudi miinimumväärtuseks kujuneb $U_m^+ - U_m^-$. Pinge amplituud liinis hakkab asukohast x perioodiliselt sõltuma, perioodiks on pool signaali lainepikkust. Teisisõnu tekib interferentsi tulemusena ülekandeliinis seisulaine. Seisulaine, nagu nimigi viitab, tähendab, et võnkumised toimuvad paigal ja energia ei levi liinis kummaski suunas. Seisulainet sellises olukorras (näitena $|\Gamma| = 0,2$) illustreerib punane kõver joonisel 5. Reaalsel juhul eksisteerib ülekandeliinis nii kulgev- kui ka seisulaine. Mida suurem on teine võrreldes esimesega seda väiksem on energiaülekanne, ehk seda halvemini teeb ülekandeliin oma tööd. Seisulaine suurust iseloomustatakse seisulaineteguriga VSWR (*Voltage Standing Wave Ratio*)

$$VSWR = \frac{U_m^+ + U_m^-}{U_m^+ - U_m^-} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (22)$$

Ideaalsel juhul, kui peegeldused puuduvad ($|\Gamma| = 0$), on seisulaineteguri väärtus üks, tavaliselt on kirja pildiks 1:1. Mida suurem on seisulaineteguri väärtus, seda väiksem on energiaülekanne soovitud suunas. Praktikas loetakse heaks suhet kuni 2:1 ja rahuldavaks kuni 3:1.



Joonis 5. Pinge amplituudi sõltuvus asukohast liinil erinevate peegeldustegurite korral

Juhul kui ülekandeliini väljund on lühises, ehk $Z_k = 0$ peab kogu liini lõppu jõudnud energia tagasi peegelduma. Kuna pinge lühisel peab olema null, siis peab peegeldunud laine olema amplituudilt võrdne, aga faasilt vastupidine langevale lainele – seega on peegeldusteguri väärtus lühise korral $\Gamma = -1$. Otsast lühistatud liinis eksisteerib seega statsionaarses olekus ainult seisulaine mille maksimumid on võrdsed kahekordse langeva laine amplituudiga ja miinimumid nulliga. Üks nendest miinimumidest asub liini lõpus, lühise asukohas. Ülejäänud paiknevad liini lõppust poole lainepikkuse

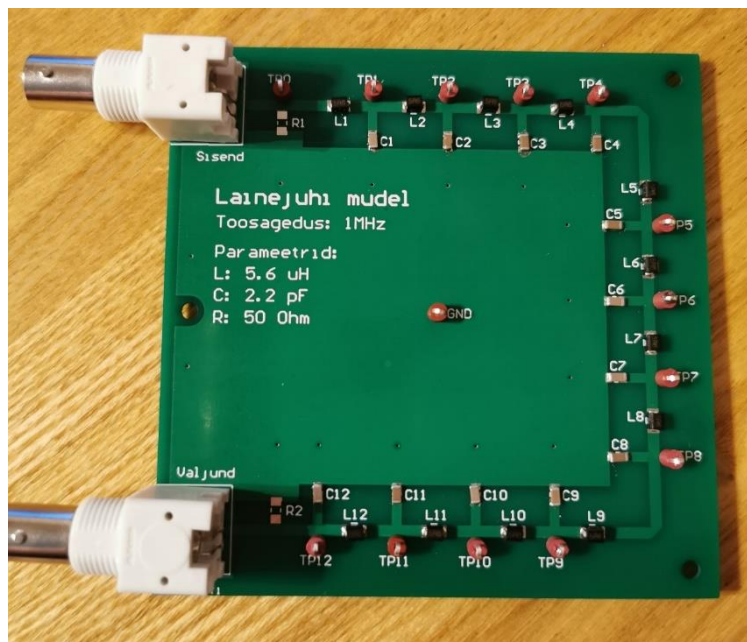
suuruse sammuga liini alguse suunas. Seisulainet lühistatud liinilõigu korral illustreerib sinine kriipsjoon joonisel 5.

Sarnaselt käitub ülekandeliin ka siis, kui selle ots on tühises – ehk ilma igasuguse koormuseta lihtsalt lahti jäetud. Ainsaks erinevuseks on see, et seisulaine maksimum asub nüüd liini lõpus ja sellest poole lainepikkuse täisarvkordselt allika suunas. Seisulaine kuju tühises liini korral on toodud joonisel viis sinise pidevjoonega.

Kuna seisulaine korral ei toimu energia ülekannet, siis on faas sõltumatu asukohast x konstantne muutudes ainult poole lainepikkuse tagant perioodiliselt π radiaani võrra.

Töö käik:

Mõõteobjektiks on joonisel 6 kujutatud ülekandeliini makett. Ühendada ostsilloskoopi sisse ehitatud signaaligeneraatori väljund (**Gen Out**) koaksiaalkaabli abil laborimaketi sisendiga.



Joonis 6. Laborimaketi foto

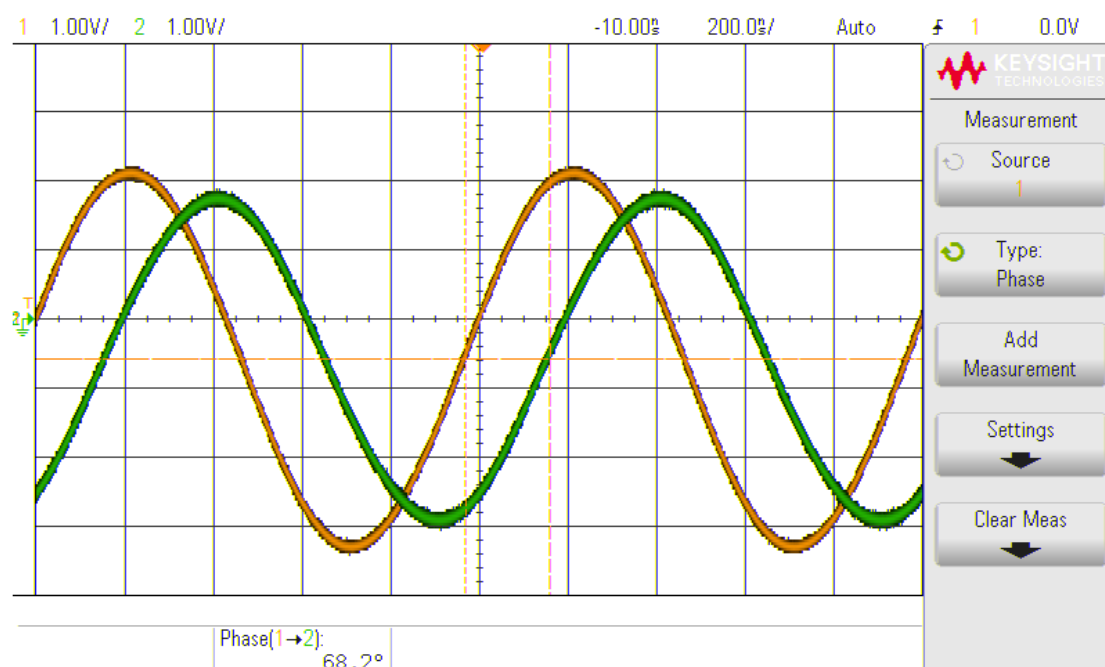
Signaaligeneraatori menüü avaneb esipaneeli nuppu *WaveGen* vajutamisel. Väljundpinge kuju peab olema siinuseline (*Waveform Sine*) sagedusega (*Frequency*) üks megaherts. Generaatori väljundimpedants peab antud töös olema sama mis ülekandeliini mudeli oma ehk 50 Ω . Viimase seadistamiseks vajutada *Settings* - > *Output Load* ja valida väärtuseks 50 Ω . Signaaligeneraatori väljundpinge amplituud U_0 (*Amplitude*) ei ole antud töös kuigi kriitiline, soovitav on valida väärtus suurusjärgus mõni volt.

Mõõtmisi on plaanis teostada nelja erineva koormusega, alustades sobitatud koormusega – 50 Ω terminaatoriga, seejärel karakteristikust impedantsist erineva, 75 Ω koormusega. Kolmandaks mõõdame otsast lühistatud ja viimasena otsast lahtise ülekandeliini mudeli korral.

Kõigil neljal korra mõõdame pinge amplituudi U_m ja faasi φ kõigis kolmeteistkümnes testpunktis TP0 – TP13. Faasi φ mõõdame mudeli sisendi, ehk TP0 oleva signaali suhtes, seega iga koormuse korral saame 13 amplituudi ja 12 faasinihke väärtust. Testpunktis TP0 loeme seega faasi väärtuse nulliks ($\varphi = 0$). Mõõtetulemused tuleb laboriaruandes esitada ühtse tabeli kujul.

Amplituudi ja faasi saab ostsilloskoobi ekraanilt kursoreid kasutades käsitsi mõõta, kuid kiirema tulemuse saab, kui lasta ostsilloskoobil vajalikud mõõtmised automaatselt sooritada (*Meas* menüü). Faasi mõõtmist ostsilloskoobi ekraanilt illustreerib joonis 7. Kuna faasinihke väärtus kõigub suhteliselt palju, siis täpsema tulemuse saamiseks tuleks teha igas testpunktis mitu mõõtmist ja leida nende keskmine. Kuna antud töös soovime pigem tutvuda üldise trendiga, siis võtame mõõtetulemuseks lihtsalt ühe

väärtuse igas punktis. Kõige lihtsam on seda saavutada ootelaotust kasutades ehk vajutades igal mõõtmisel ostsilloskoobi ekraani paremas ülemises servas nuppu *Single*.



Joonis 7. Faasi mõõtmine ostsilloskoobi ekraanilt

1. Nagu varasemalt öeldud toimub esimene mõõtmine sobitatud koormuse olukorras. Selleks ühendame maketi väljundisse $50\ \Omega$ terminaatori (joonisel 8 vasakpoolne). Ostsilloskoobi esimese kanali (1) sisend ühendada testpunkti TP0 külge, mõõta sellelt pinge amplituud U_m ja kanda tulemus tabelisse. Kuna edaspidi mõõdame faasi sellesama testpunkti, ehk ülekandeliini sisendi, suhtes, siis faasi väärtuseks antud punktis on null.

Ostsilloskoobi teise kanali (2) sisend ühendada testpunkti TP1 külge – mõõta sellelt nii pinge amplituud U_m kui ka faas φ TP0 oleva pinge suhtes (ostsilloskoobi kanal 1). Kanda mõõdetud tulemused tabelisse. Korrata kirjeldatud amplituudi ja faasi mõõtmist kõigi ülejäänud üheteistkümne testpunktiga (TP2-TP12). Kanda ka need tulemused tabelisse.



Joonis 8. Töös kasutatavad terminaatorid ja BNC lühis (keskel)

Sobitatud koormuse korral suureneb faas φ pikki lainejuhti lineaarselt, võrdeliselt kaugusega ehk antud juhul testpunkti numbriga. Kaovaba lainejuhi korral peaks pinge amplituud U_m olema igas testpunktis sama. Reaalse, kadudega liini korral, aga kauguse suurenedes monotoonselt vähenev.

Koosta mõõdetud andmete puhul kaks graafikut – üks mis kujutab faasi sõltuvust testpunkti numbrist ja teine, mis kujutab amplituudi sõltuvust testpunkti numbrist. Esita graafikud aruandes.

Võrdle saadud graafikuid eeldatavate tulemustega. Millised trendid avalduvad graafikutel, mille poolest erinevad need oodatutest, mis võivad olla erinevuste põhjuseks?

2. Teades maketis kasutatud induktiivsuse $L = 5,6 \mu\text{H}$ ja mahtuvuse $C = 2,2 \text{ nF}$ väärtuseid arvuta lainejuhi mudeli karakteristiklik impedants Z_0 ja signaali levikiirus v . Esita arvutuskäik ja selle tulemused täielikult kujul (koos mõõtemääramatustega) töö aruandes.
3. Järgmisena ühendame sobitatud koormuse asemel maketi väljundisse 75Ω takistusega koormuse (terminaatori) ja kordame punktis üks kirjeldatud mõõtmisi. Tulemused salvestada samasse tabelisse ja mõõtmiste põhjal tehtud graafikud esitada töö aruandes.

Faas φ peab ka sellisel juhul lineaarselt kasvama. Kuna antud juhul ei ole koormustakistus võrdne liini karakteristikliku impedantsiga peegeldub osa signaalist väljundist tagasi ja liinis kulgeb samaaegselt kaks, vastupidistes suundades levivat, lainet. Viimaste omavahelise interferentsi tagajärjel on pinge amplituudi väärtus testpunktides perioodiliselt muutuv.

Võrdle mõõtmiste põhjal saadud graafikuid eeldatavaga, kui esineb suuremaid lahknevusi, siis põhjenda millest need võiksid tingitud olla.

4. Kolmas mõõteseeria sooritada otsast lühistatud liini (mudeli) korral. Selleks ühendada esmalt terminaatori asemel liini lõppu BNC lühis. Seejärel teostada mõõtmised täpselt samamoodi nagu esimeses punktis. Tulemused kanda tabelisse ja mõõtmiste põhjal koostada kaks graafikut.

Juhul kui liin on otsast lühistatud peegeldub selle lõpust tagasi kogu sinna jõudnud energia. Lühise tõttu peab pinge liini lõpus olema võrdne nulliga. Kaovabas liinis oleks sellisel juhul langeva ja peegeldunud laine amplituudid võrdsed, energiaülekanne puuduks ja liinis võnguks ainult seisulaine. Sellisel juhul on faasinihe liinis asukohast sõltumatult kas null või $\pi \text{ rad}$ (180°). Kadude tõttu on reaalsel juhul olemas ka allikas koormuse suunas kulgev laine mistõttu on faasinihkel siiski kerge kasvav trend.

5. Viimane mõõteseeria teostada tühisel, ehk otsast lahtise liiniga. Selleks tuleb väljundist eemaldada sinna eelmises punktis kinnitatud lühis ja jätta väljund lihtsalt lahtiseks. Seejärel teostada mõõtmised täpselt samamoodi nagu esimeses punktis. Tulemused kanda tabelisse ja mõõtmiste põhjal koostada kaks graafikut.

Ka otsast lahtise liini korral ei ole selle lõppu jõudnud lainel minna kuhugi mujale, kui tagasi allika suunas. Ka siin tekib liinis seisulaine – ehk faas on asukohast sõltumata konstantne ja amplituud muutub asukohast sõltuvalt suurel määral. Ainus erinevus otsast lühistatud liiniga võrreldes on siin pinge amplituudi U_m maksimumide ja miinimumide asukohas mis on võrreldes eelmise juhuga omavahel vahetuses.

6. Arvuta esimeses punktis tehtud mõõtmiste põhjal keskmine faasinihe $\Delta\varphi$ ühe LC ahela kohta. Ära unusta A-tüüpi mõõtemääramatust. Leia avaldist (17) kasutades ühe LC ahela pseudopikkus l_p . Kui pikale ülekandeliinile vastab kogu makett oma kaheteistkümne LC ahelaga? Kui suur on kasutatava signaali pseudo-lainepikkus λ_p maketis? Esita aruandes arvutuskäigud ja tulemused koos mõõtemääramatustega.

Aruandes esitada:

- Mõõtetulemuste tabel – kolmteist amplituudi U_m ja faasi φ väärtust kõigi nelja koormuse korral.
- Esimeses punktis, sobitatud koormuse korral tehtud mõõtmiste graafikud – nii faasi φ kui amplituudi U_m sõltuvus testpunkti numbrist. Tulemuste võrdlus eeldatavatega, vastused esitatud küsimustele.
- Teises punktis sooritatud arvutuskäik koos tulemustega.
- Kolmandas punktis, $75\ \Omega$ koormuse korral tehtud mõõtmiste graafikud – nii faasi φ kui amplituudi U_m sõltuvus testpunkti numbrist. Tulemuste võrdlus eeldatavatega, vastused esitatud küsimustele.
- Neljandas punktis, lühistatud liini korral tehtud mõõtmiste graafikud – nii faasi φ kui amplituudi U_m sõltuvus testpunkti numbrist. Tulemuste võrdlus eeldatavatega, vastused esitatud küsimustele.
- Viiendas punktis, tühises liini korral tehtud mõõtmiste graafikud – nii faasi φ kui amplituudi U_m sõltuvus testpunkti numbrist. Tulemuste võrdlus eeldatavatega, vastused esitatud küsimustele.
- Kuuendas punktis tehtud arvutuste käik ja tulemused täielikul kujul.
- Kokkuvõte ja järeldused. Hinnang kasutatud mudelile.

Võimalikud kaitsmisküsimused:

Mille poolest on uuritud mudel sarnane reaalsele ülekandeliinile?

Mille poolest erineb uuritud mudel reaalsest ülekandeliinist?

Miks on faasinihe nii lühistatud kui tühises liini korral konstantne?

Miks väljendatakse dielektriku kadusid just juhtivuse-, mitte takistusega?

...

Täiendavaid materjale:

- [1] CM322522 Series - Chip Inductor.
<https://www.mouser.ee/datasheet/2/54/cm322522-777598.pdf>, 28. juuli 2020.
- [2] Surface Mount Multilayer Ceramic Chip Capacitors (SMD MLCCs). High Voltage C0G Dielectric, 500 – 3,000 VDC (Automotive Grade).
https://www.mouser.ee/datasheet/2/212/1/KEM_C1080_C0G_HV_AUTO_SMD-1104146.pdf, 29.juuli 2020
- [3] Keysight Technologies. Keysight InfiniiVision 1000 X-Series Oscilloscopes User's Guide. <https://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/54612-97015.pdf?id=2839839>, 05.08.2020
- [4] Keysight Technologies. Keysight Technologies InfiniiVision 1000 X-Series Oscilloscope. Datasheet. <https://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5992-1965EN.pdf>, 05.08.2020
- [5] Tallinna Tehnikaülikool, Füüsikainstituut. Füüsikaliste suuruste mõõtmine. Mõõtmisvead, mõõtehälbed ja mõõtemääramatus füüsika praktikumides.
https://www.ttu.ee/public/m/Marek_Vilipuu/FI_doks/FUUSIKALISTE_SUURUSTE_MOOTMINE_MOOTMISVEAD_MOOTEHALBED_J.pdf, 05.08.2020