

Viljandi Noorte Huvikeskus

WIKI.WIFI.EE
RAAMATUKOGU

Viljandi Paalalinna Gümnaasium

Tanel Ainla

**Vase ja alumiiniumi raadiotehnilise kasutamise
võrdlus praktilistes tingimustes**

**Comparing copper and aluminum in actual ra-
diotechnical environment**

Uurimistöo

Juhendaja:
Raadioringi õpetaja
Hellar Luik

Viljandi 2004

Sisukord

1 Sissejuhatus.....	3
2 Võnkeringid.....	7
2.1 Raadioside põhiprinsipiidest	7
2.2 Kõrgsagedusvooluringide kaod	7
2.3 Hüvetegur	8
2.4 Pinnaefekt	11
2.4.1 Pinnaefektist tingitud kadude vähendamine.....	13
3 Uurimismetoodika.....	14
3.1 Uurimisobjekt – võnkering	14
3.2 Katsemeetodi valik	15
3.2.1 Mõõteseadmed.....	17
3.3 Katseseadme konstrueerimine	18
3.3.1 Kondensaatorid.....	19
3.3.2 Pool.....	19
3.3.3 Katseseadme komponentide kokkuühendamine.....	20
4 Sooritatud katseseeriad.....	22
4.1 Oletatavad tulemused – hüpotees	22
4.2 Katse läbiviimine	22
4.3 Katsete seeriad kronoloogilises järjekorras	23
5 Tulemuste analüüs.....	25
5.1 Veamääramise teooriast	25
5.2 Vea hindamine	25
6 Kokkuvõte.....	27
7 Kasutatud kirjandus.....	29
8 Abstract.....	30

1 Sissejuhatus

Tänapäeval on inimeste kasutuses tohtus kogus kõikvõimaliku kommunikatsiooni- ja ringhäälingutehnikat – raadio, teler, mobiiltelefon, aruvuti jne. Palju neist sidekanaleist asuvad kas otseselt või kaudsemalt meid ümbritsevas õhuruumis, kuid ka valgus- ja metallkaablites. Raadioside on maailma tervikuks ühendamisel mänginud olulist rolli läbi lähema ajaloo ja tulevikku ei kujutaks me ilma selle ilmselt ettegi. Side pikematel distantsidel on muul viisil võimatu. Atlandi kaablid ju ei õigustanud

ennast ning kosmoseajastu oleks ilma raadiosideta mõeldamatu. Ka lokaalne juhtmata sidevõrk on saanud asendamatuks abivandiks inimeste töös ja meelelahutuses. See annab meile võimaluse vahetada informatsioon ka liikudes või väljaspool kaabliulatust asudes. Mida rohkem on aeg edasi läinud sidesüsteemide arengus, seda kõrgemaid sagedusi on informatsiooni ülekandel kasutama hakatud. Põhjuseks on vajadus üha suuremate andmehulkade liigutamise järele.

Raadiosides kasutatavate kõrgsagedus signaalide vastuvõtuks ja selekteerimiseks tarvitatakse võnkeringe. Võnkeringid võivad olla erineva selektiivsusega. Kui antenni (avatud võnkeringi) poolt vastuvõetavad raadiosignaalid on „nõrgad“, siis on äärmiselt oluline, et selekteerimisel antennist ja muudest võnkeringidest lähtuvad kaod oleksid võimalikult väikesed. Siis säilib rohkem saabuvas signaalis olevat informatsiooni ja side on parema kvaliteediga. Kahtlemata on olulised vastuvõtja elementide mehhaanilised omadused (kuju, materjalis olevad pinged jne.), ümbrisev keskkond, võnkeringi valmistamiseks kasutatavate materjalide keemilisest eripärast tingitud omadused (eritakistus, dielektriline läbitavus). Viimased punktid saab kokku võtta, kui materjalist ja võnkeringi valmistamise meetodikast tingitud omadused. Alati on võimalik kasutada kalleid ja praktiliselt ideaalilähedasi materjale ning täppistootmistehnikat, kuid hobitegevuses ja ka tööstuslikus masstootmises on oluline lõpp-produkti hind.

Keskkonnamõjud on kõige suuremad raadiotehnikas kasutatavatele antennidele. Antennidena võib käsitleda kui avatud võnkeringid, millede omadused on sarnased klassikalise poolist ja kondensaatorist koosneva LC võnkeringi. Autori kasutada olev tehniline baas ei võimalda sooritada mõõtmisi otseselt antennidel ega liinilõikudel. Puudub kõrgemas sagedusvahemikus töötav generaator. Samuti muutub siis kriitiliseks varjestamine ja ühenduste konstruktsioonide täpsus. Seega tuleb antenni modelleerida madalama sagedusel töötava LC võnkeringina.

Antud töö teemaks on pooli materjali pinnakihti katvate ühendite mõju uurimine võnkeringi omadustele. Rõhutatud on seejuures pinnaefekt. Selleks koostati lihtne katse-seade erinevatest poolidest, kondensaatoritest, generaatorist, sagedusmõõtjast ja kõrgsagedusdiodvoltmeetrist. Selline süsteem imiteerib raadiovastuvõtjat – signaali allika-ks on antenni asemel labori generaator, selekteerivaks elemendiks on klassikaline kondensaatorist ja poolist koosnev LC võnkering, selekteerimise tulemusel võnkeringi lä-

biva signaali edasine mõõtmise toimub sagedusmõõtjaga ja voltmeetriga, kust ka pärinevad võrreldavad katsetulemused. Lõpptulemusena leitavaks objektiivseks suuruseks on võnkeringi universaalselt iseloomustav suurus – hüvetegur. Võnkeringide uurimisest saadavad tulemused on ka ülekantavad antennides kasutatavatele materjalidele, milledele pinnaefekti mõju on sarnane poolidega.

Töö probleemipüstituseks oli: (a) leida, milliseid raadioamatöörile kättesaadavaid materjale on otstarbekas kasutada praktiliselt antennide valmistamiseks; (b) kuidas tegelikult ja millise eksperimentaalse keerukusega annab leida võnkeringi iseloomustavaid suurusi; (c) püüda mõista kuivõrd mõjutavad tingimused laboris mõõtetulemusi.

Katseid sooritati raadioamatöörile ja hobialektronikule kõige kättesaadavamate materjalidega – vask, alumiinium. Etaloniks võeti lisaks kasutusele ka hõbetatud vask. Võib eeldada, et erinevate metallide oksiidide omadused on erinevad, nii ka elektrilised omadused – siit ka oletus, et oksiidikiht juhtme pinnal võib erinevate materjalide puhul tingida erinevaid elektriliste omaduste muutusi. Praktiliselt ongi vaja veenduda, kas mõju on arvestatavas suurusjärgus ja millised materjalid on „stabiilsemad“ (st. oksüdeerunud ja oksüdeerumata materjali omaduste vahe on väiksem). Mõjutavateks ühenditeks ei saa kindlasti mitte lugeda ainult okside, vaid ka muid õhust pinnale haakuvaid ühendeid.

Käesolev on kirjutatud kokkuvõttena autori poolt Viljandi Noorte Huvikeskuse raadioringis läbi viidud uurimistööst. Teematika valik kujunes välja autori huvist täpisteaduste, eriti füüsika vastu. Teema valiku otsustas praktiline vajadus autori järgmise projekti tarbeks koguda informatsiooni ja valida välja sobiv materjal. Uurimistöös on märgatavat rõhku pööratud elektriliste mõõtmiste juures olulisele täpsusele, veamääramisele ja püütakse arvestada võimalike kõrvalmõjude osakaalu. Põhiosa valmis 2004. aasta kevadel toimunud iganädalastel katsemõõtmistel.

Käesolev töö jaguneb neljaks osaks. Esimene osa annab sissejuhatava ülevaate raadio- tehnika tööpõhimõttest ning teoreetilistest võnkeringe mõjutatavatest teguritest, eelkõige pinnaefektist. Teises osas kirjeldame täpsemalt katseseadet ning kolmandas osas sellel läbi viidud mõõtmisi. Autor püüab tuginedes teoreetilistele teadmistele ja kogemustele luua võimalikult „ideaalse“ katsetamiskeskkonna. Töö neljandas, osas

esitab autor katsetulemused arvudes, analüüsib neid täpsuse seisukohalt ja kokkuvõtteks leiab, millistel tingimustel on mõttekam kasutada vaske, millistel alumiiniumi.

2 Võnkeringid

2.1 Raadioside põhiprintsiipidest

Raadioside saatja ja vastuvõtja vahel toimud elektromagnetiliste lainete vahendusel. Saateseadmetes toodetav kõrgsageduslik vahelduvvool juhitakse saateantenni. Antenni ümber tekkivad võnkumise rütmis kiiresti vahelduvad elektri- ja magnetväljad moodustavad ühise elektromagnetilise välja. See levib antenni ümbritsevas ruumis valguse kiirusega ja moodustab elektromagnetilise ehk raadiolaine. Sealjuures ei tohi unustada, et raadiolained pole ainsad elektromagnetlained meid ümbritsevas keskkonnas. Ka soojuskiirgus, nähtav valgus, gammakiired ning röntgenkiired on elektromagnetilised lained. Saateantenni juhitud kõrgsagedusvoolu poolt ruumis tekitatavad raadiolained löikavad oma levikul vastuvõtuantenni ja indutseerivad selles elektromotoorjõu. Kuna aga üheaegselt tegutseb maailmas tohutu arv raadiosaatjaid, siis peab iga raadiovastuvõtja sisaldama seadist, mis võimaldaks eraldada – selekteerida – kõigist antenni saabuvatest signaalidest vajalikke. Seda ülesannet täidab võnkering. [1]

Võnkeringiks nimetatakse kondensaatorist ja induktiivpoolist koosnevat vooluringi, milles ilmneb resonantsinähtus. Resonantsiks nimetatakse olukorda, mil vahelduvvooluringi lülitatud induktiivsuse X_L ja mahtuvuse X_C reaktiivtakistused on võrdsed ($X_L = X_C$).

2.2 Kõrgsagedusvooluringide kaod

Reegel, millega arvutatakse takistust alalisvooluringis, pole sobiv takistuse määramiseks vahelduvvooluringis. Katseliselt selgub, et vahelduvvoolu läbimisel juhtmest on soojuse eraldumine suurem kui seda alalisvoolu arvutused näitavad. Soojuskadude suurenemine tuleneb efektiivtakistuse suurenemisest vahelduvvoolu puhul, tingituna muutuvate elektromagnetiliste ja elektrostaatiliste väljade tekkimisest. Sageduse tõustes juhtme efektiivtakistus (kaotakistus) suureneb, omandades mitmekordse väärtuse, võrreldes alalisvoolu takistusega. Erinevalt takistusest alalisvoolu puhul nimetatakse vahelduvvoolu juures suurenenud juhtmetakistust efektiivtakistuseks. On arusaadav, et kõrgsagedusvooluringides tuleb takistused viia võimalikult väike-

steks, et vältida liigseid kadusid. Kõrgsageduslikke kadusid põhjustavad peamiselt pöörivoolud, pinnaefekt, dielektrilised kaod, hüstereesikaod, kiirguskaod.

Kui vahelduvvoolu kandva juhtme läheduses asub teisi juhtmeid või metallesemeid, mida haarab voolujuhtme ümber tekkinud magnetväli, siis magnetvälja tekkimiseks kulunud energia ei kandu samasse juhtmesse vooluenergiana tagasi terviklikult, vaid osa indutseerub lähedalasuvais esemeis nn. *pöörivoolude* e. *fukoovoolude* näol. Lisaks pöörivooludele, mis tekivad väljaspool juhtme keskkonda, tekivad pöörivoolud veel juhtme enda materjalis. Need pöörivoolud ise omavad seesugust suunda, mis neutraliseerib algvoolu juhtme tsentris ja suurendab pinnal voolavat voolu. Tulemuseks on nähtus, et voolutihedus ei ole kõigis juhtme ristlõike üksikpunktides ühesuurune, vaid kontsentreerub pinna kihti, millest tulenebki nimetus *pinnaefekt*. *Dielektrilised kaod* tekivad juhtmete isolatsiooni ja dielektriku ebatäiuslikkusest. Kõrgsagedusringides tuleb vaadelda dielektrikuna mitte ainult tõelist, kondensaatori plaatide vahel asuvat dielektrikut, vaid iga isolatsioonimaterjali, mis asub pinge all olevate juhtmete vahel või nende lähikonnas. *Hüstereesikaod* on seotud materjalidega, mida kasutatakse poolide magnetringides väljatiheduse tõstmiseks ja mis tekivad nende materjalide ümbermagneetimisest. Peale loetletud kadude levib osa magnetvälja energiat ruumi, juhtmesse tagasi pöördumata. Seda liiki kadusid nimetatakse *kiirguskadudeks* ning võetakse arvesse ekvivalentse kiirgustekistusena. Kiirguskaod suurenevad sageduse tõustes ja sõltuvad vooluringi kujust, mõõtmetest ning asetusest ruumis. [2]

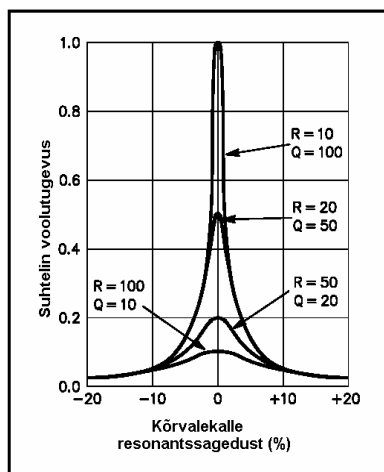
2.3 Hüvetegur

Kõrgsagedusringides kasutatavaid poole ja kondensaatoreid hinnatakse nende kadude suhtelise suuruse järgi. Kuna suurema induktiivsusega pooli valmistamiseks läheb rohkem traati ja suure mahtuvusega kondensaatori dielektrilise materjali hulk on suurem, siis on arusaadav, et vastavalt induktiivsuse või mahtuvuse suurenemisel suurenevad ka samade materjalide korral nende kõrgsageduskaod. Nende kadude iseloomustamiseks kasutatakse mõistet kaotakistus. Teiselt poolt suurenevad kõrgsageduskaod ka sageduse suurenemisega. Seepärast on nii poolide kui ka kondensaatorite headuse võrdlemise aluseks nende kõrgsagedustakistuse (reaktiivtakistuse) ja

kaotakistuse (aktiivtakistuse) suhe, mida nimetatakse hüveteguriks (*Quality Factor*, *Q-factor*) ja tähistatakse Q -ga.

$$Q = \frac{X}{R} \quad (2.1)$$

Hüveteguri sõltuvust aktiivtakistusest illustreerib järgnev joonis: [6]



Joon. 2-1 Võnkeringi iseloomustav resonantskõver, millele on kantud ka mõned näitlikud Q väärtused.

Poolide puhul

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{\omega L}{R} = \frac{2\pi fL}{R} \quad (2.2)$$

kondensaatorite puhul

$$Q = \frac{X_C}{R} = \frac{1}{\omega CR} = \frac{1}{2\pi fCR} \quad (2.3)$$

Pooli ja kondensaatori hüveteguri järgi hinnatakse ühtlasi ka selle vahelduvvooluringi headust, kuhu nad lülitatud on. Kesk- ja kõrgsageduste puhul on kondensaatori kaod reeglina suhteliselt väikesed ja sellepärast vooluringi headuse määrajaks on peamiselt pooli Q .

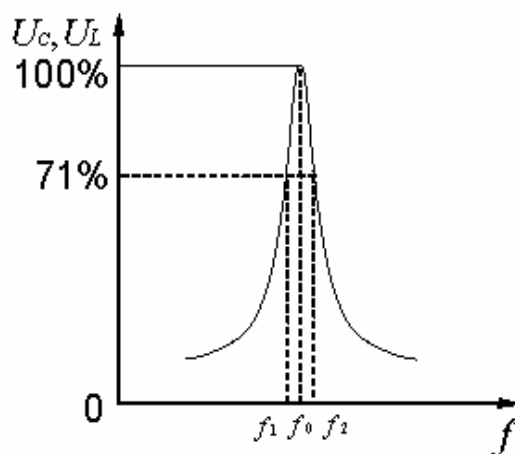
Q omab võnkeringi omaduste määramisel suurt tähtsust. Ta näitab, kui suur on poolist ja kondensaatorist koosneva vooluringi (mida sel puhul nimetatakse võnkeringiks) pingevõimendus resonantsi korral, s. o. mitu korda on suurem pooli otstel saadav pinge võnkeringi toiteks rakendatud pingest. Sellest seosest täpsem ülevaade § 3.1. [2]

$$Q = \frac{U_{C, res}}{U} = \frac{U_{L, res}}{U} \quad (2.4)$$

Samuti on võnkeringi sageduste eraldusvõime ehk selektiivsus võrdeline võnkeringi Q -ga jne. Meie hilisemal mõõtemetoodika valikul on oluline ka teadmine, et

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f} \quad \Delta f = f_2 - f_1 \quad (2.5)$$

See tähendab, et Q väljendab ka resonantssageduse ja ribalaiuse suhet. Väiksema ribalaiuse ehk nn. kitsa riba saamiseks tuleb kasutada suure hüveteguriga võnkeringi või mitut omavahel sidestatud võnkeringi. Võnkeringi Q määramisel mõõdetakse U_C arvutamiseks vajaminevad sageduste väärtused nivoodel, mis moodustavad ($1/\sqrt{2} = 0,71$) osa resonantspingest.



Joon. 2-2 Võnkeringi ribalaiuse selgituseks (resonantskõver).

Üldiselt on aga võnkeringidel (lühilaine- ja ultralühilaineseadmed) ribalaius suurem ja selektiivsus seega kehvem. (Võnkeringi omadus eraldada resonantssageduse lähedase sagedusega vahelduvvoole või vahelduvpingeid kõigi muude sagedustega vahelduvpingete ja -voolude hulgast on selektiivsus.)

Kokkuvõtteks võib öelda, et hüvetegur on võnkeringi universaalselt iseloomustav suurus, mille määramine on seega oluline ning selleks on mitmeid meetodeid. Et saada üldse ettekujutus, millisesse suurusjärku jääb Q väärtus, toon välja mõned näited kirjandusest:

Nimetus	Sagedus	Q väärtus
Paberdielektrikuga kondensaator	100 kHz	50...100
Õhksüdamikuga, tiheda mähisega varjestatud litsepoolid	456 kHz	80...100
Samad om. Raudsüdamikuga	456 kHz	120...160
Vähekaolised silinderpoolid, diam. 25-70 mm	1 MHz	180...500
Vähekaolised raudsüdamikuga silinderpoolid	1 MHz	150...300

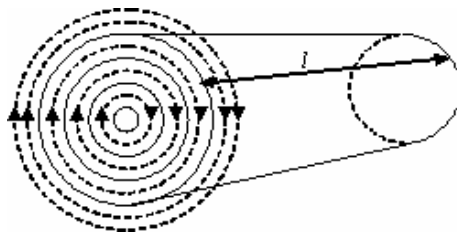
Joon. 2-3 Kondensaatorite ja poolide Q väärtusi.

Praktiliseks otstarbeks võnkeringe disainides ei tohi unustada, et võnkeringi hüvete-guri väärtus ei ole kunagi eesmärk omaette ja see peab olema kooskõlas vajaliku ri-balaiusega. Muidu ei ole lihtsalt võimalik anda edasi vajalikus koguses informa-tiooni.

2.4 Pinnaefekt

Pinnaefekti (*skin effect*) näol on, nagu eespool mainitud, tegu nähtusega, kus kõrg-sagedusvool jaotub juhi ristlõikes erinevalt nii, et voolutihedus juhtme pinnakihis suureneb. See tingib ka nähtuse, et voolu sageduse tõustes suureneb ka juhi efektiivta-kistus. See nähtus seletati esmakordselt lahti Lord Kelvini poolt aastal 1887. Samuti tegeles tuntud teadlastest ka Nikola Tesla pinnaefekti uurimisega. [3]

Pinnanähtuse tekkimise põhjuse selgitamiseks kujutame silindrikujulist juhet koosne-vana suurest arvust elementaarjuhtmetest, mis asuvad üksteisega lähestikku ja asetse-vad kontsentriliste kihtidena. Nende elementaarjuhtmete takistused alalisvoolule, mis on leitavad valemiga $R = \rho / s$, on võrdsed. [5]



Joon. 2-4 Ümarjuhtme magnetväli.

Vahelduvvoolu korral tekib iga elementaarjuhtme ümber vahelduv magnetväli. Juht-me teljele lähemal asuv elementaarjuhe on aheldatud suurema magnetvooga, kui

elementaarjuhe, mis asub juhtme välispinnale lähemal; sellepärast on esimese elementaarjuhtme induktiivsus ja ka induktiivtakistus suurem kui teisel. Pikkusega l elementaarjuhtmete otste vahelise pinge korral on juhtme teljele lähemal asuvate elementaarjuhtmetes voolutihedus väiksem. Voolutiheduse erinevus juhtme telje ja välismises kihis suureneb juhtme läbimõõdu d , materjali juhtivuse σ , magnetilise läbitavuse μ ja vahelduvvoolu sageduse f suurenemisega. [5]

Matemaatiliselt rääkides, voolutihedus J väheneb juhul eksponentsiaalselt sügavusega d :

$$J = e^{-z/d} \quad (2.6)$$

Selles valemis tähistab d konstanti, mida kutsutakse *pinna sügavus (skin depth)* konstandiks. See on defineeritud, kui sügavus pinnast, kus voolutihedus on $e^{-1/e}$ (u. 0,37) osa voolutihedusest pinnal. Seda saab arvutada järgmiselt: [4]

$$d = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} = \sqrt{\frac{2\rho}{2\pi f\mu}} \quad (2.7)$$

kus ρ tähistab eritakistust, f voolu ringsagedust ($\omega=2\pi f$) ja μ juhi magnetilist läbitavust. Nähtusest selgema pildi saamiseks toon välja mõned vaskjuhtme kohta väl- ja arvatud sügavused: [3]

Voolu sagedus(f)	Sügavus (d)
60 Hz	8.57 mm
10 kHz	0.66 mm
10 MHz	21 μ m

Joon. 2-5 Voolu jaotumine vaskjuhtmes.

Kuna praktilises raadiotehnikas on tihti sagedused veel kordi kõrgemad, siis saab väita, et vool on koondunud peaaegu täielikult pinnale, millele välisingimuste mõju on kõige suurem.

Praktiline kirjandus toob välja ka valemeid, millega saab määrata mingi kindla materjali jaoks takistuse sõltuvus sagedusest. Näiteks üks valem kaotakistuse leidmiseks vaskjuhtme kohta: [9]

$$R_{\left[\frac{\Omega}{m}\right]} = \frac{1,195 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{f_{[Hz]}}}{d_{[cm]}} \quad (2.8)$$

Autorit huvitavad selliselt saadavad suurused ainult oma praktiliste katsetulemuste kontrolliks.

2.4.1 Pinnaefektist tingitud kadude vähendamine

Kirjanduse on välja toodud mitmeid meetodeid, mida sissejuhatuseks meid huvitavasse teemasse ka lühidalt tutvustan.

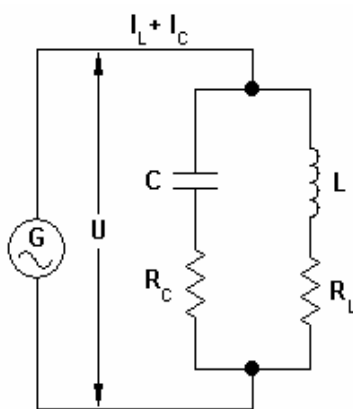
Pinnaefekti mõju vähendamiseks tuleb kasutada võimalikult väikese läbimõõduga juhet. Et aga seejuures ei suureneks alalisvoolu takistus, siis peab üksiku peene juhtme asemel kasutama vastavat peenikest isoleeritud juhtmete punutist – kiudtraati ehk nn. litset. Samuti vähendatakse pinnaefektist tingitud kadusid juhtme pealispinna suurendamisega, kusjuures võib kasutada täisjuhtme asemel õhukese seinaga toru. Kuna ultrakõrgsageduste puhul kogu vool kontsentreerub üliõhukesse pinnakihti, siis õhukesesenaalse torujuhtme kasutamisega mitte ainult suurendatakse kasulikku ristlõiget, vaid kõrvaldatakse ka kadude keskkond juhtme südamikus. Üldiselt osutub paremaks kasutada madal- ja kesk-raadiosagedustel (kuni 3MHz) juhtmematerjaliks (eeskätt poolides) litset, kõrgematel sagedustel – toru. [2]

Need meetodid on enimkäsitletud kõigis praktilisemates sellekohastes kirjandusteostes, kuid puuduvad ühesed lahendused materjali valiku osas (kui jätta kõrvale tugevusarvutused) nii antennide kui võnkeringide valmistamisel. Kui näiteks pooli- või antennimaterjali (induktiivelementi) katab oksiidi või muu „saasta“ kiht, milliseks muutuvad kaod siis. See sõltub eeskätt oksiidi enda magnetilisest läbitavusest ja takistusest, kui ka praktiliselt oksiidi ja metalli enda omadusest siduda enda pinnale muid õhus leiduvaid ühendeid (süsiniku-, väävli- jm. ühendid). Selliste mõjude uurimiseks saigi korraldatud katsete seeria, millega saada selgemat pilti, kui suur pinnakihi seisukorra mõju tegelikult võnkeringi hüvetegurile on.

3 Uurimismetoodika

3.1 Uurimisobjekt – võnkering

Uuristöös kasutame pooli hüveteguri uurimiseks kõige lihtsamat paralleel LC võnkeringi. Paralleelne võnkering on vooluring, kus induktiivsus L ja mahtuvus C koos nende tegelike aktiivtakistusega (kaotakistustega) on ühendatud rööbiti. Sellel joonisel on näha, et järjestikune ja paralleelne võnkering erinevad ainult toitepinge erineva ühendusviisi poolest.



Joon. 3-6 Paralleelne LC võnkering.

Kui on tegemist ideaalse paralleelse võnkeringiga, siis loetakse generaatori sisetakistus lõpmatult suureks ($R_s = \infty$). Kui on tegemist ideaalse järjestikuse võnkeringiga, siis loetakse generaatori sisetakistus lõpmatult väikeseks ($R_s = 0$). Praktikas sellist generaatorit muidugi ei leidu ja seega tuleb valida täpsem ning kergemini teostatav variant. Autor otsustas rööbiti võnkeringi kasuks, sest sellisel juhul on praktiliselt lihtsam kutsuda esile võnkumisi võnkeringis nii, et generaatori mõju võnkeringile oleks minimaalne.

Resonantsi korral võrdub toitepinge sagedus võnkeringi omavõnkesagedusega ning järjestikuse võnkeringi induktiivtakistus mahtuvustakistusega,

$$X_L = X_C$$

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}$$

$$2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC} \quad (3.1)$$

millest resonantssagedus

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.2)$$

Sellises vooluringis tekkivat resonantsinähtust nimetatakse vooluresonantsiks. Resonantsi korral vooluringi kummagi reaktiivosa takistust nimetatakse lainetakistuseks.

$$z_l = \frac{1}{\omega C} = \omega L \quad (3.3)$$

Resonantsi korral on ahela näivtakistus ehk impedants

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = R \quad (3.4)$$

See tähendab, et impedants võrdub resonantsi korral ahela aktiivtakistusega ja on seega nurksageduse muutumisel ahela kõikidest võimalikest näivtakistustest väikseim.

Ring vool (efektiivväärtus) saavutab resonantsi korral maksimumi ja on pingega samas faasis.

$$Q = \frac{z_l}{R} = \frac{U_L}{U} = \frac{U_C}{U} \quad (3.5)$$

Ülaltoodud seosed on heaks teejuhiks, kui oleme otsimas võimalusi võnkeringi hüveteguri leidmiseks. Üheks võimaluseks oleks näiteks pooli või kondensaatori resonantspinge leidmine. Millist mõõtmismetoodikat aga praktilisi tingimusi arvestades kasutada tuleks? [5]

3.2 Katsemeetodi valik

Hüvetegurit saab, nagu eespool kirjutatus, leida mitmeid erinevaid võnkeringi parameetreid teades. Et leida parimat varianti, milliseid parameetreid kasutada, tuleb analüüsida, millised parameetrid on reaalselt kõige lihtsamalt ja täpsemalt võimalik määrata.

Kõik autorile teadaolevad meetodid arutamiseks (kokkuvõtte eelnevates paragrahvides toodud valemitest):

$$Q = \frac{U_{L\ res}}{U} = \frac{U_{C\ res}}{U} = \frac{X_L}{R} = \frac{X_C}{R} = \frac{f_0}{\Delta f} \quad (3.6)$$

On kindel, et arvutustes on kasulik kasutada andmeid, mis tulevad otseselt mõõtmiste tulemuste hulgast, nendega vahepeal liigseid tehteid sooritamata. Kindlasti ei tohi tuua arvutustesse sisse konstante, mis on seotud materjali keemilisest eripärasest, sest selles teemas me ju üritame informatsiooni mõõtmiste ja arvuste abil hankida. Samuti tuleb hinnata, milliseid parameetreid on võimalik antud tingimustes määrata täpsemalt. Täpsus võib sõltuda nii parameetri teoreetilisest „iseloomust“, kui ka mõõteseadmete täpsusest. Mõõtmiste juures võib ka kasutada suhtelisi tulemusi, kui ei ole täieliku kindlust, kas antud seadmega on võimalik määrata objektiivset arvulist vastust.

Otseselt saame määrata vaid neid suursi, mille määramiseks on meil olemas mõõteseadmed. Laboris on autori käsutuses multimeetrid, lampvoltmeeter, sagedusgeneraatorid, sagedusmõõtja, ostsillograaf. Nende mõõteseadmetega saame määrata aktiivtakistust alalisvoolule; nii vahelduv- kui alalispinge tugevust; nii alalis- kui vahelduvvoolu tugevust, mõõta vahelduvvoolu, -pinge sagedust. Sagedusgeneraatoriga saame tekitada kindlas sagedusvahemikus vahelduvvoolu, -pinge võnkumise.

Siin toodud kriteeriumidest jäävad sõelale järgnevad seosed hüveteguri leidmiseks:

$$Q = \frac{U_{L\ res}}{U} = \frac{U_{C\ res}}{U} = \frac{f_0}{\Delta f} \quad (3.7)$$

Nüüd tuleb veenduda, milliste parameetrite määramine on võimalik täpsemalt. Võnkeringi toitepinget U saab mõõta lampvoltmeetriga küll rahuldava täpsusega, kuid siiski tuleb pingete mõõtmisest tingitud viga suur, sest saab väita, et resonantspinge U_{res} ja toitepinge U vahe on sadades kordades. Seega pole U_{res} mõõtmisel vead lubatud. Probleemiks võib veel kujuneda ka resonantspinge leidmine reaktiivtakistus omavatel komponentidel (kondensaator, pool). Kuna resonants kõver on „kumera“ tipuga, siis on selle kõrgeima punkti määramine raske, kuna labori vanal sagedusgeneraatoril puudub sobivasse suurusjärku kuuluva sageduse täppishäälestamise võimalus. Nii ei ole võimalik leida objektiivset U_L või U_C väärtust. Järelikult tuleks otsida alternatiivi. Üle jääb seega resonantsageduse f_0 leidmine, kuid sealgi ilmneb tõsiasi, et resonantskõvera tipu otsimine täpselt on peaaegu võimatu. Siis võib aga abiks olla valem $f_0 = (f_2 - f_1) / 2$. 71% leidmine resonantspingest on oluliselt täpsem, kuna re-

sonantskõvera selles osas on kõvera tõus absoluutväärtuselt oluliselt suurem, kui tipus (vt. Joon 2.2). Selles piirkonnas on mõõtmistäpsus seega suurem ja suhteliseks võrdlemiseks aitab ka resonantspinge mõõtetäpsusest.

Nende argumentide põhjal otsustas autor, et valib mõõdetavateks suurusteks resonantssageduse (et veenduda, kas tema oletus ebatäpsuse osas pidas paika) ja riibalaiust ehk sageduste, millel $U_L = 0,71U_{L, res}$, vahet. Loomulikult tuleb mõõtmiste ajal jälgida pinge U_L muutumist, kuid hinnata tuleb ainult selle suhtelist muutumist.

3.2.1 Mõõteseadmed

Mõõtemetoodika valikul on väga suurt roll mõõteseadmetel. Mõõteseadmete poolt pakutavatest võimalustest sõltub mõõtetäpsus ja piirkond, mille piires soovivad väärtused üldse määratavad on.

Mõõteseadmed, mida autoril oli võimalik oma uurimustöö läbiviimisel, on peamiselt pärit NSVL'i militaartööstusest. Seadmed on küll iganenud, kuid täidavad oma ülesanded edukalt. Mõõteseadmed on kalibreeritud kohalike võimaluste piires ja on mõeldud kasutamiseks eeskätt raadiotehnika häälestamiseks. Seega jääb mõõteviga raadiotehnikas lubatud piiridesse.

Mõõteriist	Tüüp	Seeria nr.	Aasta	Täpsusklass
Lampvoltmeeter	B7-17	№ 0645	1973	Mõõdetava pinge sagedus kuni 1 GHz; garanteeritud täpsusklass 100 MHz. Autori poolt kasutatud mõõtepiirkonnal mõõteviga 4%
Sagedusgeneraator	Г4-102	№ 13136	1983	-
Sagedusmõõtja	Ч3-34	№ Y06112	1982	10 ⁻⁵
Induktiivsusemõõtja	E12-1	-	1965	-

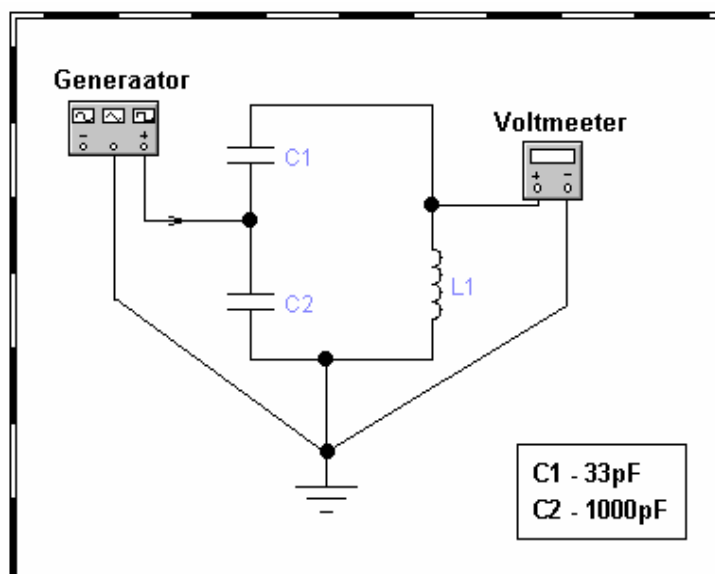
Joon. 3-7 Kasutatud mõõteseadmed.

Katseseadmed piiritlevad ära mõõtepiirkonna. Pinnaefektist tingitud muutuste uurimiseks on tulemus seda selgem, mida kõrgem on sagedus. Autori kasutada olnud sagedusgeneraator on võimeline genereerima siinuspinget kuni sageduseni 50MHz. Sagedusmõõtja mõõtepiir oli u. 36MHz. Voltmeetri omadused ei seadnud mingeid piire. Kasulik ei ole sooritada mõõtmisi päris mõõteriista äärmistel piirkondadel, kuna seal kipuvad mõõteriistast tingitud vead suurenema, siis sai katsesageduseks valitud u.

30MHz. Sellele sagedusele sai ka teoreetiliselt arvutatud võnkeringide komponentide parameetrid.

3.3 Katseseadme konstrueerimine

Praktilist katseseadet konstrueerides valime generaatori võnkeringiga osalise ühendusskeemi, et viia reaalse miinimumini selle mõju. Generaatori ühendusteguriks sai valitud (33/1000).



Joon. 3-8 Katseseadme ülesseade.

Kui me hakkame looma võnkeringi soovitud nähtuste uurimiseks, siis tuleb arvestada, et valmis katseseade ei vasta kindlasti ideaalsele. Selleks tuleb viia läbi vea mõõtevea hindamine ja proovida arvestada kõikvõimalike kõrvaliste mõjude suurusjärku (vt. §5). Katseseadme konstrueerimisel tuleb arvestada konstrueerimiseks kasutatavate detailide keemilist eripära (mis ongi meie üheks uurimiseesmärgiks), kui ka näiteks mõõtevahendite kasutamisest tingitud kadusid.

Meie katseseadmes võib kõige olulisemat mõju avaldada pooliga rööbiti ühendatud voltmeeter. Sellise mõju tegelikule suurusle tuleb tähelepanu pöörata analüüsi peatükis. Kui sagedusmõõtja ühendada otse sagedusgeneraatori teise väljundisse (mitte võnkeringi toitvasse väljundisse), siis ei mõjuta see kuidagi uuritavat võnkeringi.

3.3.1 Kondensaatorid

Katseseadmes on kokku kasutatud vaid kahte kondensaatorit, mida ei muudetud kogu uurimuse jooksul. Nendest tingitud kaod on seega pidevalt samad. Põhiline koormus jäi kondensaatorile C1. Selle kondensaatori mahtuvus oli 33pF, mark K15Y-1, lubatud pinge 10 kV, lubatud reaktiivvõimsus 8kVAr. Tegu on keraamilise kondensaatoriga, mille kaod on väikesed, sest muidu ei saaks tal lihtsalt niisuguse reaktiivvõimsuse taluvus olla. Kondensaator C2 oli mahtuvusega 1000pF, mark KCO-11. Tegu on vilgukivikondensaatoriga, lubatud pinge 2kV. C2-le jaotuva energia hulk on märgatavale väiksem, siis pole tema kaod kuigi määravad.

Nende järjestiku ühendatud kondensaatorite kogumahtuvus sai määratud nii teoreetiliselt, kui ka mõõtmiste teel. $C = 32,9 \text{ pF}$

3.3.2 Pool

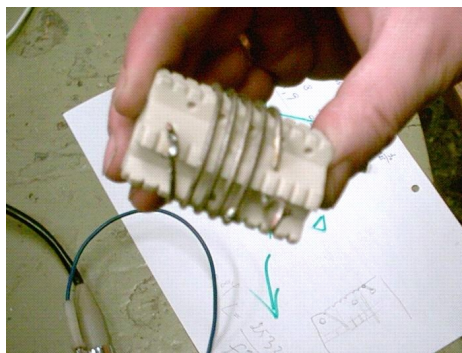
Pool, kui uurimisobjekt on kõige olulisem komponent selles võnkeringis. Poole sai valmistatud kokku 5 erinevat tüüpi. Valmistatud poolid erinesid teineteisest nii traadi materjali, kui ka traadi pinnakihi seisukorra poolest, kuid olid ühesugused mõõtmetelt. Kõik poolid keriti samale keraamilisele õhksüdamikule. Südamiku valikul lähtuti selle kujust, et pooli induktiivsus oleks vahemikus, kus talle leiduks ka sobilik paariline laboris leiduvate kondensaatorite hulgast nii, et moodustuva võnkeringi resonantsagedus jääks 30 MHz ümbrusesse.

Poolialuse geomeetrilised mõõtmed: läbimõõt ($d = 3,5 \text{ mm}$), keerdude arv ($N = 5$), pooli pikkus ($l = 2,2 \text{ mm}$). Kui jätta arvestamata materjali eripärast tingitud erinevused, siis praktilises kirjanduses leidub valemeid pooli induktiivsuse ligikaudseks arvutamiseks geomeetrilisi mõõtmeid arvestades. Teades teoreetilist induktiivsust saame ka kontrollida, ka mõõdetud induktiivsuse väärtus jääb samasse suurusjärku.

$$L = \frac{0,01 \cdot d_{[cm]} \cdot N^2}{\frac{l_{[cm]}}{d_{[cm]}} + 0,44} = \frac{0,01 \cdot 3,5 \cdot 5^2}{\frac{2,2}{3,5} + 0,44} = 0,82 \mu H \quad (3.8)$$

Poole keriti alumiiniumtraadist, vasktraadist ning hõbetatud vasktraadist. Raadioamatöörile kõige kättesaadavamad „rahuldavaid“ elektrilisi omadusi omavad materjalid on vask ja alumiinium. Hõbetaat sai võetud etaloniks, kuna on tead, et hõbetaadi elektrilised omadused (eritakistus) on paremad, kui vase ja alumiiniumi puhul. Samuti

on tead, et vase elektrilised omadused on paremad alumiiniumi elektrilistest omadustest. Oksiid- ja muude ühendite kihiga kaetud traadi omadusi ei oska eelnevalt tuginedes kindlale seisukohal võrrelda. Kõik traadid olid sama läbimõõduga (1,8 mm) ja kehitud täpselt sama kuju ning paigutusega. Samasuguste poolide kerimisele aitas kaasa alus millel olid suunavad sooned. Tegu on 50 MHz raadiosaatjast pärit poolialusega.



Joon. 3-9 Hõbetatud pool – siit jooniselt on ka näha pooli aluse kuju.

Traadid, mis uurimisotstarbeks õnnestus autoritel hankida, olid üleni oksüdeerunud ja nende pinna leidus kindlasti (värvi järgi oletades) veel ka palju muid ühendeid. Traadid on pärit elektrivõrkudest ja on välistingimustes viibinud u. 20-30 aasta.

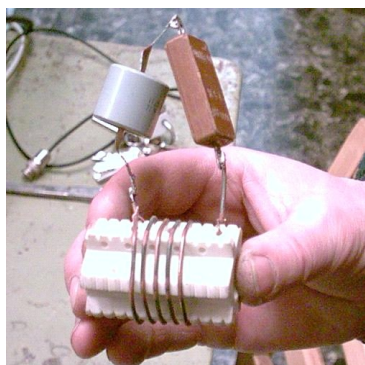
Erinevate poolide kerimisel polnud tehniliselt mingisugust vahet. Suurimaks probleemiks osutus oksüdeerunud vasktraadi kerimine, kuna vasktraadi pinda katnud „eriti paks“ muude ühendite kiht (Autor ütleb nii sellepärast, et koorunud kiht hoidis enda kuju ja silmaga hinnates sai öelda, et seega oli selle kihi paksus pinnaefekti juures käsitletavatest sügavusest () märatavalt suurem.) koorus osaliselt deformeerimisel ja silmajärgi oletades võis öelda, et u. 1/3 pinnast oli pärast kerimist kaotanud end enne katnud mustast kihist.

3.3.3 Katseseadme komponentide kokkuühendamine

Esmapilgul tundus see teema mainimist mitteväärivana. Kui tööjärg jõudis kokkuühendamise ja katsetamiseni selgus, et ühendamine pole sugugi lihtne teema ja on hulgaliselt punkte, millele rõhku pöörata. Komponentide ühendusjuhtmed peavad olema võimalikult lühikesed, et vähendada juhtme nii aktiiv- kui reaktiivtakistusest tingitud kadusid. Seda tean, tuginedes eelnevatele kogemustele kõrgsagedusseadmete monteerimise osas. Mõõteriistade sisend- ja väljundjuhtmed on varjestatud. Kõigi mõõteseadmete kestad peavad olema võimalikult lühikeste juhtmetega kokku ühendatud.

Vastasel juhul õnnestus küll saada mõõtetulemus, mis on ligikaudu oodatavas piirkonnas, kui erinevate mõõtmiste vahele võib tekkida kaootiliselt muutuv liiga suures suurusjärgus diferentsiga. Kõikumised osutusid üsnagi suureks, kui näiteks muuta käe kaugust mõõteriisast jne. Sarnastest mõjudest püüdis autor selgusele jõuda nii suurel määral, kui võimalik.

Katseseadme monteerimisel ja katsevalmis seades oleks olnud kasulik ka katseseade varjestada ning kõrgemate sageduste puhul on kindlasti vältimatu. Siis suureneb kirguskaos osatähtsus energiakadudes veelgi. Katseseade sai paigutati tavalisele värvitud puitlauale. Autor oletas, et värvikihi all katseseadme läheduses ei paiknenud metalldetailide (näiteks nael või kruvi), milles indutseeruks osa magnetvälja energiast ja selle tagajärjel suurendaksid kaod oluliselt. Selle väljaselgitamiseks sai katseseadme asukoha laual ja asendit laua suhtes pidevalt muudetud. On kindlalt teada, et katseseadme läheduses ei paiknenud ühtegi vooluga või vooluta juhet, mis oleks võinud võnkeringi kuidagi mõjutama hakata.



Joon. 3-10 Kokkujoodetud võnkering (oksüdeerunud vasktraadist pool).

Komponentide (pool ja kondensaatorite) omavaheliseks kokkuühendamiseks kasutati kahte meetodit. Esimesed mõõtmiste seeriad sooritati vask- ja hõbetaadist pooli puhul kokkujoodetud komponentidega, kuid kui järg jõudis alumiiniumpooli juurde meenus tõsiasi, et alumiiniumi jootmine pole erivahenditeta võimalik. Seega mindi üle kruviklemmida kasutamisele ja sooritati uus katseteseeria ka vask- ja hõbetaadist valmistatud pooliga, et ühendusmeetoditest tingitud viga oleks minimaalne.

Mõõteseadmed ühendati võnkeringi külge mõõteseadmete juures kasutatavate „krokodill“ ühendustega. Mõõteseadmete ühendamise meetodi juures ei toimunud muutust kogu uurimuse jooksul.

4 Sooritatud katseseeriad

4.1 Oletatavad tulemused – hüpotees

Olemaks kindel, et katseid läbi viies ei toimu väga suuri ja uurimust sisuliselt mõtte- tuks muutvaid möödalaskmisi, võtsin aluseks katsetes kasutatavate materjalide kohta kirjandusest teadolevad suhtelised suurused. On tead, et parim elektrijuht uuriavatest materjalidest on hõbe, temaga peaaegu võrdväärne on vask (siiski kuigivõrd suurema takistusega). Neist kolmest suurima takistusega on alumiinium. Need suhted ei muutu sageduse tõustes suhteliselt puhaste materjalide korral, kuid kuidas toimuvad muutused kui pinda katavad oksiid ja muud keskkonnast pinnale kinnitunud ühendid, seda loodab autor leida mõõtmiste tulemusel. Puhaste materjalide korral on võrdlus võimalik, kuid ei saa ka mainimata jätta, et täiesti puhta pinnagi ei ole alumiiniumi võimalik meie laboris hoida, sest alumiinium oksüdeerub koheselt õhuhapniku mõjul. [7]

Mustade traatide juures põhineb oletus erinevate materjalide omaduste muutumise osas ainult raadioamatöörade hulgas väljakujunenud traditsioonidel. On väljakujune- nud tava valmistada pikemat aega välistingimustes töötavad antennid alumiiniumist. Ajutiselt võistluste või muude lühemate väliürituste korral eelistatakse antennide val- mistamise materjalina vaske. Siit ka oletus, et vase omadused halvenevad oksü- deerudes ja saastudes rohkem, kui alumiiniumi. Selle oletuse tõestamises seisneb ka uurimise peaeesmärk. Siiski ei tähendaks musta vase paremus lühilaine võnkeringis veel, et must alumiinium ultralühilainetel paremaks ei osutuks.

4.2 Katse läbiviimine

Selles punktis kirjeldab autor, kuidas toimus ühe ülesseatud võnkeringi uurimine. Kui uuritav katseseade oli ühendatud mõõteseadmetega, siis liigutasin sagedusgene- raatorilt sageduse resonantssagedusest oluliselt kõrvale. See järel hakkasin lähenema oletatavale resonantssagedusele generaatori sagedust ühtlaselt aeglaselt muutes. Samal ajal jälgin pidevalt näitu voltmeeteril, mis mõõtis poolile jäävat vahelduvpinget. Kui pinge näit oli jõudnud maksimumini, siis lugesin sagedusgeneraatorilt näidu. Sellega oli resonantssagedus määratud. Seejärel muudan sisendsignaali amplituudi, kuni volt-

meetri näit vastab täpselt maksimumile, millele skaalal vastab nr 1. Seejärel muudan resonantssageduselt sagedusgeneraatori genereeritava võnkumise sagedust, kuni voltmeetri näit on 0,71 ühikut. Selliseid piirkondi on kaks – nii üleval, kui allpool resonantssagedus, nagu on näha ka selgitavalt resonantskõveralt (vt. joonis 2.2). Nendes seisudes määrان sagedusmõõtja lugemi, mille alusel saab välja arvutada ribalaiuse.

4.3 Katsete seeriad kronoloogilises järjekorras

Kokku sai sooritatud katseid kolme erinevast materjalist traadiga. Katseteseeriaid sa läbi viidud mitukümmend. Suurem enamus mõõtmistulemusi sai dokumenteeritud, kuid osad eriti suure kõrvalekaldega oletatavast tulemusest jäeti siiski kõrvale juba mõõtmisprotsessi käigus mustandipaberil. Selle põhjuseks oli kas mõõteriistade vales häälestusest või autori inimlikest omadustest tingitud vead (*a la* vaatas valesti mõõteriista skaalat või unustas kää katseseadme lähedusse lauale mõõtmise ajal). Mõõtmistulemuste täpsemast analüüsist §5.

Kuna poolide kerimiseks vanakraami hulgast leitud poolialusel oli juba oletatavalt sobivasse suurusjärku langeva induktiivsusega hõbetatud traadist pool, siis see sai võetud ka etaloniks. Enne uurimustöö alustamist sai sooritatud kiiresti ja võrreldes hilisemate mõõtmistega ebatäpne mõõtmiste seeria veendumaks, et teooria põhjal valitud meetodi ja autori kasutuses olevate mõõteseadmetega on võimalik jõuda mingi tulemuseni, mis mahub kirjanduses antud suurusjärku. Selle katse õnnestumine andis ka mõtte edasisteks katsetusteks. Samuti sai hõbetatud pooliga läbiviidud katse korraliku katsesüsteemi ülesseade korral, et oleks võimalik vask- ja alumiinium traadist keritud poolide hüvetegurit mingi kolmanda pooli hüveteguriga. (Oletatavalt on hõbetatud pooli suurem, kui vask- ja alumiiniumpinna korral.)

Enne keritud pooli katsevõnkeringi asetamist mõõdeti pooli induktiivsus, et leida võnkeringi resonantssagedus teoreetiliste arvutuste teel ja oleks võimalik võrrelda mõõtmise tulemust mingil teisel meetodil saavutatud mõõtmistulemusega. (Tegelikult on ka induktiivsusemõõtja puhul tegu võnkeringiga, kuid tegu on teise seadmega ning võnkeringi teised komponendid peale uuritava pooli on samuti erinevad). Pooli induktiivsust oli vaja ka sellepärast teada, et valida kondensaatorit katseseadmesse nii, et võnkeringi omavõnkesagedus oleks mõõtemetoodika valikul spetsifitseeritud suurusjärgus.

Järgmised katseteseeriad toimusid musta ja puhastatud vasktraadist valmistatud pooliga, mis oli joodetud kasutades tavalist jootetina teiste komponentide külge. Autor proovis leida, kas toimus olulist muutust tulemuses, kui liigutada katseseadet laua pinna suhtes. See tegevus ei toonud kaasa märgatavaid muutusi resonants-sageduses. Sellest sai tehtud ka kiire järeldada, et seda toimingut pole rohkem vaja sooritada, kuna sellest ei sõltu midagi. Igas katseteseerias sooritati 3-5 mõõtmist. Seejärel muudeti kas mõõteseadmete konfiguratsiooni, nulliti voltmeeter või muudeti uuritava katseseadme konfiguratsiooni (joodeti lahti ning seejärel uuesti kokku, et vähendada kehvast jootmisest tingitud puuduliku ühenduse mõju mõõtmistulemustele; ühendati mõõteriist võnkeringist lahti ja ühendati, et vältida puuduliku ühenduse mõju mõõtmistulemustele; vahetati poolile keritud traati)

Alumiiniumiga katseid tehes meenus tõsiasi, et alumiiniumit joota ei õnnestu ning tuleb üle minna kruviklemmi kasutamisele. Kruviklemmi kasutamisest tingitud erinevuse elimineerimiseks tuli ka hõbeda ja vase puhul sooritada uus katsete seeria ja kuna sellest tingituna tekkis vahe, siis eelnevad mõõtmistulemused luges autor sekundaarse tähtsusega mõõtmistulemusteks ning jättis need kokkuvõttearvestusest välja.

Mõõtmiste tulemuste põhjal kiirelt väljaarvutatud tulemused mahtusid oletatavatesse piiridesse, teadaolevad seosed olid omavahel paigas ning seega on nende mõõtmistulemuste täpsemal analüüsil suur mõte.

Mõõtetulemused on esitatud lisas. [L1]

5 Tulemuste analüüs

Järgnevas peatükis üritame jõuda selgusele, kas enne mõõtmisi püstitatud oletused peavad paika ja kui usaldusväärsete mõõtetulemustega tegu on. Eksperimentide kokkuvõttes arvudes, kust on elimineeritud eksitusest tingitud vigadega tulemused, on nähtavad uurimustöö lisas. [L1, L2]

5.1 Veamääramise teooriast

Missuguse meetodiga ja kui hoolikalt ka suurust ei mõõdaks, ei ole kunagi võimalik saada selle täpset väärtust. Vead on tingitud mõõteriista ebatäpsusest, mõõtmismeetodite ebatäpsusest, meie meeleorganite puudulikkusest ja igasugustest juhuslikkudest mõjudest mõõtmise tulemusele. Sellepärast tuleb igal mõõtmisel määrata nii mõõdetud suuruse arvuline väärtus, kui ka selle täpsus.

Mõõtevead jagunevad kolme liiki: süstemaatilised vead; juhuslikud vead; eksitused. Süstemaatilised vead jäävad kas muutumatuks, või muutuvad korrapäraselt. Neid vigu saab võib uurida, kindlaks määrata ja nende mõju mõõtmistulemusele vastavate paranduste sisseviimisega kõrvaldada. Süstemaatilised on näiteks instrumendi ebatäiuslikkusest tingitud vead. Juhuslike vigade all mõistetakse suuruselt ja märgilt muutuvaid vigu, millede muutumine ei allu mingile tuntud seaduspärasuselt. Juhuslikud vead on näiteks vead, mis on tingitud meie meeleorganite puudulikkusest. Eksituste all mõistetakse vigu, mis moonutavad jämedalt mõõtmistulemusi, näiteks vale lugem mõõteriista skaalalt, mõõtmistulemuste valesti ülesmärkimine jne. Tulemused, mis on eksitused, tuleb kõrvale jätta. Eksimused on ka katseseadme valest ülesseadmisest tingitud vead ja meetodilised või teoreetilised vead. [8]

5.2 Vea hindamine

Süstemaatiliste vigade osakaalu võib antud uurimuse korral lugeda mitteamustatavaks, sest kogu uurimuse jooksul kasutati samu mõõteseadmeid. Ka mõõtepiirkonnad olid pidevalt samad – sellest tingitud vead on seega elimineeritud, kuna meid huvitavad suurused on suhtelised. Mõõteseadmete viga on nende võimaliku esinemise korra aga pidevalt ühesuunaline. Seega mõõtmistel, millede eesmärk on leida katsete erinevus, võib need vead lugeda taanduvateks.

Juhuslike vigade suurust ei saa määrata muudel meetoditel, kui tuleb sooritada ühe konfiguratsiooni korral mitmekordseid mõõtmisi – viia läbi terve mõõtmiste seeria. Saadud väärtuste hulgas välja visata äärmised väärtused, kui eksitused ning ülejäänud mõõtmistulemustest võtta aritmeetiline keskmine, mis lugeda ka antud seeria tulemuseks.

Eksitused, nagu jämedad skaala valesilugemised või katseseadme kehv ühendu mõõteseadmetega, avastati töö käigus ning need tulemused jäeti edasisest arvestusest välja.

Voltmeetri mõju suurus mõõtmistulemustele on veel teadmata suurus. Võnkeringiga rööbiti liituva koormustakistust võib alati ümber muuta ekvivalentseks järjesikuseks takistik. Kui takistus R_k on rööbitine koormustakistus, siis ekvivalentne järjestikune takistus oleks

$$R'_k = \frac{X_L^2}{R_k} = \frac{X_C^2}{R_k} \quad (5.1)$$

Voltmeetri takistus on suurusjärgus u. $10^7 \Omega$. Induktiivtakistuse ruut on oluliselt väiksem ($X_L = 160 \Omega$). ($R_k = 2,5 \cdot 10^{-4} \Omega$) Selle suurusjärgu saab lugeda tühiselt väikeseks.

Ka kiirguskaos osas saab teha tuginedes teoreetilistele teadmistele analüüsi näitamaks, kui suur on kiirguskadude osa kogu kaotakistusest. Selleks annavad antenniteooriast rääkivad raamatud ringantennide kiirguskaos (kaotakistuse) leidmiseks valemi [9]

$$R_R = 3,12 \cdot 10^4 \left(\frac{NA}{\lambda^2} \right)^2 \quad (5.2)$$

kus N tähistab ringantenni keerdude arvu, A moodustatud ringi pinda, λ lainepikkus. Meie pooli parameetreid arvestades on $R_R = 1,5 \cdot 10^{-4} \Omega$ - piisavalt väike, et jätta arvestamata. Selle takistuse väiksust saaks ka tõestada teades seost antenni pikkuse ja sellest tingitud kiirgustakistuse vahel. Meie võnkeringi puhul on $\lambda = 100 \text{ m}$, pooli mõõtmed aga $l = 0,0022 \text{ m}$. Elektrilistes kraadides väljendatud pikkus $l/\lambda = 360^\circ$ on kaduvväike, mille korral ka R_k väärtus on minimaalne, nagu oli näha ka valemi 5.2 põhjal tehtud arvutusest. (Väärtuse hindamisel kasutasin antud raamatus toodud seose kõverat.) [9]

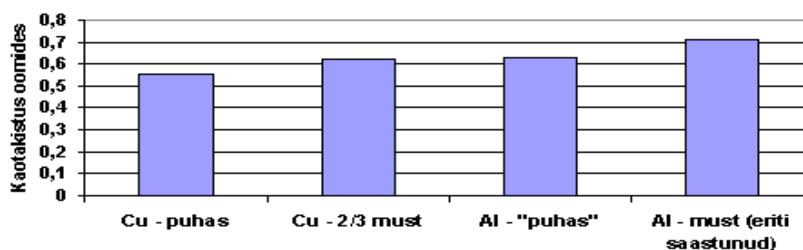
6 Kokkuvõte

Käesolev uurimustöö on kirjutatud eesmärgiga uurida pinnaefektist tingitud kadude suurenemist mittesoovitavate ühendite sattumisel pinnale. Töö käigus koostas autor elektrilise katseseadmena võnkeringi hüveteguri katseliseks määramiseks ning teadmiste ja võimaluste piires analüüsis saadud tulemusi tuginedes kirjandusest ammutatud teadmistele.

Katseseadme – LC võnkering – koostamine õnnestus peale mõningate probleemidest ülesaamist edukalt, seda tõestasid juba esimesed katsed hõbedaga, kui mõõtmistulemused oli väärtustelt sobivas vahemikus. Oletus alumiiniumi eelistest vasktraadi omaduste ees lühilaine piirkonnas ei leidnud kinnitust. Siiski tõi erineva puhtusega pinnaga poolide uurimine välja hüveteguri märgatava muutuse.

Vask- ja alumiiniumtraadist keritud poolide hüvetegurite võrdlemisel selgus siiski autorile pettumust valmistamata tõsiasi, et vaskpooli hüvetegur halvenes mustunud pinna korral rohkem, kui alumiiniumi puhul, kui võrreldi puhast ja musta pooli. Sellele vaatamata on kindlaks määratud, et lühilainetel töötavas elektrotehnikas tasub võnkeringide valmistamisel kasutada vasktraati. Tulemuste põhjal saab oletada, et sageduse tõustes suurenevad vasktraati katvast mustusest tingitud kaod alumiiniumi omast kiiremini ning sellisel juhul tasub kasutada poolide valmistamise materjalina alumiiniumit. Samuti leidis kõrvaltulemusena praktilist kinnitust hõbedaga paremus teiste uuritud materjalide ees.

Kokkuvõtlikult on kaotakistused erinevate materjalide puhul järgmised:



Joon. 6-11 Hõbetatud pool – siit jooniselt on ka näha pooli aluse kuju.

Uurimustöö tulemusena selgus, et lühilaine antennide puhul on materjali samade mõõtmete korral eelistatud alumiiniumi ees vask sõltumata tema pinna seisukorrast.

Käesolev uurimistöö andis autorile täiendavaid teadmisi võnkeringidest ja nende kasutamisest, mis on oluline peatükk nii inseneri, kui füüsiku seisukohalt vaadates. Samuti selgitas autor endale signaalitöötuse põhimõtteid ning sai asendamatu kogemusi oma tööprotsessi dokumenteerimises. Tegu on autori esimese eksperimentaalteoreetilise täppisteadusliku uurimistööga kui ka üldse esimese uurimustööga, mida ta on kirjutanud. Inseneriprobleemidele teooriapoolt lähenedes leidis autor töö käigus hulganisti uusi teemasid, mis pole veel adekvaatselt lahtimõtestatud.

Kuna selle uurimustöö tulemusena selgus, et vase pinnakihti kattev oksiidi- ja mustuse kiht suurendab kõrgsagedusel kadusid rohkem, kui alumiiniumi puhul, siis hakkas autorit huvitama teema, millisel sagedusel osutub alumiinium olema parem materjal võnkeringide ja antennide valmistamisel. Oletuste järgi on see sagedus suurusjärgus 100 MHz ja rohkem. Kui autoril avaneb võimalus ligipääsuks paremale laboritehnikale, siis on tal kindel soov järgmiseks uurida antenni materjali kadude suurust kõrgematel sagedustel viies katseid läbi liinilõigul.

Autor tänab oma juhendajat – Viljandi Noorte Huvikeskuse raadioringi õpetajat Hellar Luike. Juhendaja aitas autoril mõista raadiotehnika ja võnkeringide teooriat puuduvat, aitas töö käigus esile kerkinud probleemidest jagu saada ning vaatas asjatundjana üle autori kirjatöö. Samuti tänan Viljandi Paalalinna Gümnaasiumi keeleõpetajaid, kes aitasid jagu saada keelevigadest. Tänan oma venda, kes juhatas mulle oma eeskujuga teed uurimustöö läbiviimiseni ning andis näpunäiteid, kuidas korrektne uurimustöö vormistatud peab olema.

7 Kasutatud kirjandus

- [1] H. Pedusaar. *Elektro- ja raadiotehnika*. Valgus, Tallinn, 1967
- [2] A. Isotamm. *Raadioamatööri käsiraamat*. Eesti Riiklik Kirjastus, Tallinn, 1958
- [3] Wikipedia – The Free Encyclopedia – Skin effect
URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Skin_effect
- [4] H. Johnson. Skin Effect Calculations.
URL: <http://www.sigcon.com/Pubs/news/skineffect.htm>
- [5] N. Mansurov, V. Popov. *Teoreetiline elektrotehnika*. Eesti Raamat, Tallinn, 1965
- [6] D. G. Reed, *The ARRL Handbook for Radio Amateurs*. ARRL – the national association for Amateur Radio, Newington, 2002
- [7] J. Lesurf. Effect of material conductivity URL:
http://www.st-andrews.ac.uk/~www_pa/Scots_Guide/audio/skineffect/page4.html
- [8] V. Popov. *Elektrimõõtmised ja mõõteriistad*. Valgus, Tallinn, 1966
- [9] *The ARRL Antenna Book*. ARRL – the national association for Amateur Radio, Newington, 1994

8 Abstract

This work is written as a summary of my experiments with different resonant circuits. Resonant circuits are inevitable components in every radio transmitter and receiver. Many radio signals with different frequencies are being sent to Earth's airspace. Resonant circuits are separating the signal we need from other signals. If the resonant circuit is with bad characteristics we can lose required information. Accordingly, it is very important to use the resonant circuits with good characteristics in radio communication devices.

There are many factors that affect resonant circuit characteristics. I found a lot of information about differences in characteristics, which are conditioned on the shape or chemical properties of the resonant circuit. It was hard to find information how the characteristics of resonant circuit changes when resonant circuit is being affected by outdoor environment. The most environment sensitive resonant circuits (which I know) are antennas which are situated outdoors. High frequency current density is greater near the surface in conductors. This property is called skin effect. If the conductor surface is oxidized or dirty the resistance of the conductor rises. Then the signal "strength" decreases.

The aim of my work was to compare different well-known available materials which are used in radio technical systems – aluminium and copper. I wanted to find out how the characteristics of copper and aluminium change if they oxidize and get dirty. I could not research open resonant circuits (antennas) because I did not have access to a special laboratory. I constructed a LC resonant circuit as a model of the antenna and measured the quality factor of this resonant circuit to compare different materials which had different surface conditions. I measured the quality factors of different coils. I researched dirty and cleaned aluminium and dirty and cleaned copper. I used silver as etalon to be sure that I am having the right configuration of the experiment device and the results are in a believable interval. I had to use lower measuring frequencies as I wanted, but it made measuring technically much easier. I also did not have an access to special laboratory technology.

Performing measurement led me to many knowledges which were new for me. I found out how much the conditions actually affect resonant circuits and how difficult it is to get objective results from high frequency measurements. The results show that the clean and dirty copper coils both are better materials for shortwave resonant circuits than aluminium, but difference between the quality of cleaned and dirty copper was bigger than difference between cleaned and dirty aluminium. It is important knowledge and I can assume that if the frequency of the resonant circuit is higher than the aluminium is a better conductor for making antennas than copper.