



Teknillinen tiedekunta / Sähkötekniikan osasto  
BL10A1000 Kandidaatintyö ja seminaari

## **Polarisointilaitteiston suunnittelu ja toteutus**

## SISÄLLYSLUETTELO

KÄYTETYT LYHENTEET JA MERKINNÄT.....	2
1. Johdanto .....	4
2. Suurjännitelähteen suunnittelu ja simulointi.....	6
2.1. Muuntaja.....	8
2.2. Ensiöpuoli.....	9
2.3. Toisiopuoli.....	14
3. Suurjännitelähteen mittaukset .....	19
3.1. Muuntajan mittaukset ja toteutus.....	24
4. Polarisointilaitteisto .....	27
4.1. Polarisointilevyt.....	27
4.2. Mittausjärjestely .....	28
5. Mittauksen toteuttaminen ja tulkinta .....	29
Yhteenveto .....	31
LÄHTEET .....	33

## KÄYTETYT LYHENTEET JA MERKINNÄT

### Roomalaiset

$A$	Pinta-ala	[m <sup>2</sup> ]
$A_e$	Efektiiivinen poikkipinta-ala	[m <sup>2</sup> ]
$C$	Kapasitanssi	[F]
$f$	Taajuus	[Hz]
$F$	Voima	[N]
$g$	Gravitaatiovakio	[m/s <sup>2</sup> ]
$h$	Pudotuskorkeus	[m]
$l$	Pituus	[m]
$L$	Induktanssi	[H]
$L_m$	Magnetoimisinduktanssi	[H]
$m$	Massa	[kg]
$N$	Käämikierrosluku	
$N_1$	Ensiön käämikierroslukumäärä	
$N_2$	Toisiosion käämikierroslukumäärä	
$q_v$	Tilavuusvirta	[m <sup>3</sup> /s]
$R$	Resistanssi	[Ω]
$t$	Aika	[s]
$U_1$	Ensiöjännite	[V]
$U_2$	Toisiojännite	[V]
$v$	Nopeus	[m/s]
$V$	Tilavuus	[m <sup>3</sup> ]
$X_L$	Induktiivinen reaktanssi	[Ω]
$Z$	Impedanssi	[Ω]

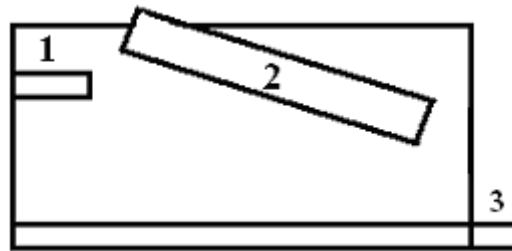
### Kreikkalaiset

$\mu$	Permeabiliteetti	[Vs/Am]
$\mu_0$	Tyhjiön permeabiliteetti	[Vs/Am]

$\mu_r$	Suhteellinen permeabiliteetti	
$\eta$	Viskositeetti	[kg/ms]
$\rho$	Tiheys	[kg/m <sup>3</sup> ]

## 1. JOHDANTO

Tämän työn tarkoituksena on suunnitella kuvan 1 mukainen polarisointilaitteisto. Laitteistoa käytetään mittauksiin, joissa tutkitaan homogeenisen sähkökentän vaikutusta nesteen viskositeettiin.



Kuva 1. Suunniteltavan polarisointilaitteiston periaatekuva.

Nestettä valutetaan kuvan 1 kohdan 1 tasolta kohdan 2 polarisointilevyjen läpi, jossa neste kulkee sähkökentän vaikutuksen alaisuudessa. Lopulta neste valuu kohdan 3 astiaan. Tietyssä aikayksikössä virranneesta nesteen massasta tutkitaan sähkökentän vaikutusta nesteen viskositeettiin.

Polarisointilaitteistolle annettiin lähtövaatimuksina, että siihen tehtävän suurjännitelähteen tulisi pystyä tuottamaan 3 kV tasajännitettä ja polarisoidun alueen pituutta täytyisi pystyä muuttamaan. Mahdollisimman suuri alue käytettävästä putkesta pitäisi olla polarisoitavalla alueella ja pisimmillään polarisoitava alue olisi noin puolen metrin luokkaa. Käytettävän putken tiedettiin olevan ulkohalkaisijaltaan 3 mm. Putkessa kulkevan nesteen virtaus täytyisi pystyä pysäyttämään luotettavasti ja siten, että lappoa ei jouduttaisi muodostamaan uudestaan jokaisella mittauskerralla.

Työn toisessa kappaleessa käydään läpi suurjännitelähteen suunnittelu ja simulointi. Kolmannessa kappaleessa esitetään valmistetun suurjännitelähteen mittaukset ja analysoidaan niiden poikkeavaisuuksia teorian ja simuloinnin kanssa. Neljännessä kappaleessa kerrotaan polarisointilevyjen ja laitteiston toteutus. Viidennessä kappaleessa tutustutaan mittausten toteutukseen ja tapaan, jolla analysoida tuloksia. Viimeisessä

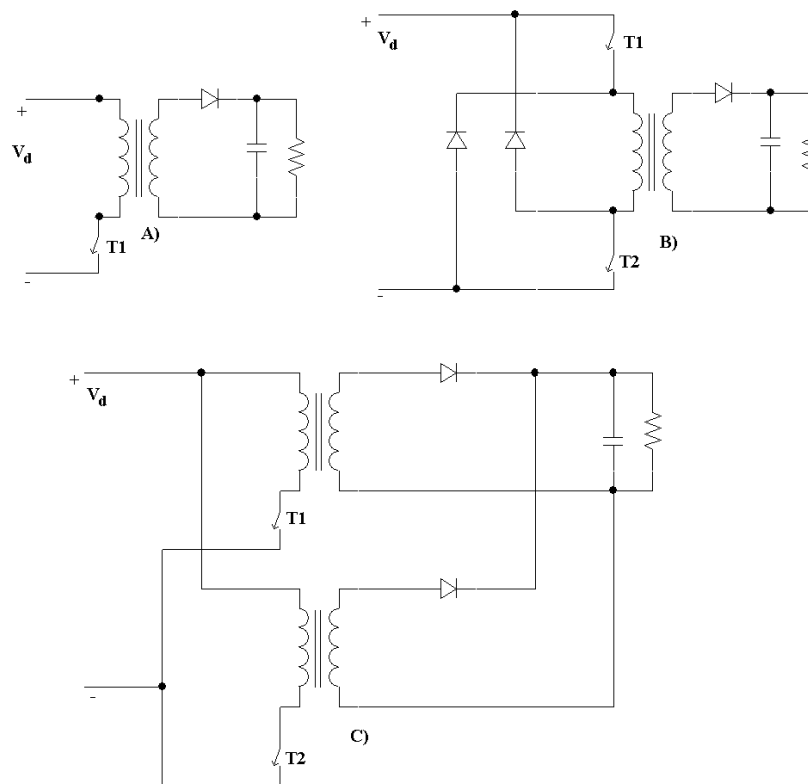
kappaleessa arvioidaan työn onnistumista tavoitteiden täyttymisen ja päätulosten osalta. Työn pääpaino on suurjännitelähteen suunnittelussa ja toteutuksessa.

## 2. SUURJÄNNITELÄHTEEN SUUNNITTELU JA SIMULOINTI

On olemassa monia eri vaihtoehtoja, joilla toteuttaa suurjännitelähde. Lineaarinen teholähde on yksi mahdollisuuksista, jossa muuntajalla muunnetaan verkkojännitettä haluttuun tasoon ja tasasuunnattaisiin. Lähdön jännitettä muunnettaisiin sarjassa olevalla transistorilla, jota käytettäisiin muuttuvana vastuksena. Tätä ei kuitenkaan valittu sen vaikean säädettävyyden ja suurten transistorissa syntyvien jännitehäviöiden vuoksi.[1, sivut 301-302]

Toisena mahdollisuutena olisi ollut myös käyttää diodijännitekertojaa, jossa diodien ja kondensaattorien avulla saataisiin tuleva vaihtojännite kerrottua suuremmaksi. Suurjännitelähdettä ei kuitenkaan toteutettu diodijännitekertojalla, sillä sen todettiin vievän liian paljon komponentteja, ja sen säädettävyys on heikko. [2, sivut 77-78]

Suurjännitelähde päätettiin toteutettavan flyback hakkurikytkennällä sen helpon säädettävyyden ja yksinkertaisen toteutuksen vuoksi. Flyback-hakkurin toteutukseen on useita eri topologia vaihtoehtoja. Vaihtoehtoina olivat yksinkertaisin yhden transistorin, kahden transistorin tai rinnakkainen flyback-hakkurimuuntajatopologia. Eri topologioiden piirikaaviot on esitetty kuvassa 2. [1, sivut 308-311]

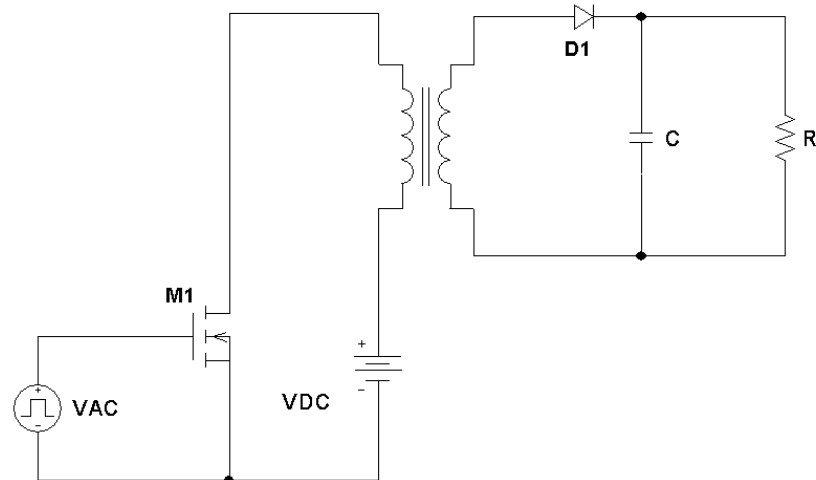


Kuva 2. Eri flyback-hakkuritopologioita, jossa A) on yhden transistorin hakkuri, B) kahden transistorin ja C) rinnakkainen flyback-hakkurimuuntaja topologia.  $V_d$  on syöttävä tasajännite ja T1 ja T2 ovat kytkiminä toimivia transistoreja.

Kahden transistorin topologian etuna on se, että yhden transistorin tarvitsee kestää vain puolet jännitteestä verrattuna yhden transistorin topologian tapaukseen. Rinnakkaisessa topologiassa etuna voidaan pitää sitä, että sillä voidaan siirtää suuria tehoja ja se on luotettavampi kahden rinnakkaisen systeeminä vuoksi. Käytettäväksi topologiaksi valittiin kuitenkin yhden transistorin flyback-hakkurimuuntaja, sillä se on kyseisistä topologioista helpoin toteuttaa ja valittavan transistorin tiedettiin kestävän hyvin jännitettä ja tehoa ei tarvinnut siirtää toisioon suurta määrää.

Kuvassa 3 on esitetty suurjännitelähteessä käytetyn hakkurimuuntajakytken pääosat.





Kuva 3. Hakkurijännitelähteen kytkentäkaavio, jossa muuntajan vasemmalla puolella ensiö ja oikealla puolella toisio.

Kytkenässä VDC syöttää jännitettä muuntajalle. Tätä jännitettä pätkitään transistorilla M1. Jännitteen pätkimisen yhteydessä on muutostiloja, jotka aiheuttavat muuntajaan jännitteen. Muuntaja nostaa muuntosuhteen verran jännitettä toisiokäämitykseen, jolloin saadaan suurjännitettä. Toisiojännite tasasuunnataan diodilla D1, josta jännite kulkeutuu RC-suotimelle, jonka muodostavat kondensaattori C ja vastus R. RC-suodin tasoittaa tasajännitteen väreen, jotta sitä voitaisiin käyttää polarisaatiossa.

## 2.1. Muuntaja

Muuntaja suunniteltiin tehtävän kahdesta teräksisestä U-palasta, joista toiseen kierrettäisiin ensiökierrokset ja toiseen toisiokierrokset. U-paloista syntyvä magneettiirin pituus  $l$  olisi 0,212 m ja efektiivinen poikkipinta-ala  $A_e$  0,000512 m<sup>2</sup>. Sydänmateriaalin kyllästysvuon tiheys on 1,8 T ja suhteellinen permeabiliteetti  $\mu_r$  sähköverkon 50 Hz taajuudella noin 9700. Sydänaineen suhteellisen permeabiliteetin voidaan kuitenkin olettaa olevan pienempi käytettävillä kilohertsien taajuuksilla.

Ensiöjännitteen  $U_1$  ja toisiojännitteen  $U_2$  suhteen tiedetään riippuvan kierroslukujen yhtälöllä

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}, \quad (1)$$

jossa  $N_1$  on ensiökierrosten ja  $N_2$  toisiokierrosten lukumäärä. Tästä huomataan, että mitä enemmän toisiokierroksia on suhteessa ensiökierroksiin, sitä suurempi toisiojännite saadaan. Tämän muuntajien ominaisuuden vuoksi toisiokierrosten määrä haluttaisiin mahdollisimman suureksi. Tällöin voidaan suurella määrällä toisiokierroksia lisätä myös ensiökierrosten lukumäärää ilman muuntosuhteen huomattavaa muuttumista. Ensiökierrosten suuren lukumäärän etu on magnetoimisinduktanssin kasvaminen.

Muuntajan magnetoimisinduktanssi  $L_m$  voidaan laskea yhtälöllä

$$L_m = \frac{N^2 A_e}{l} \mu, \quad (2)$$

missä  $N$  on käämikierrosten lukumäärä ja  $\mu$  sydänaineen permeabiliteetti. Aineen permeabiliteetti saadaan sen suhteellisesta permeabiliteetista yhtälöllä

$$\mu = \mu_r \mu_0, \quad (3)$$

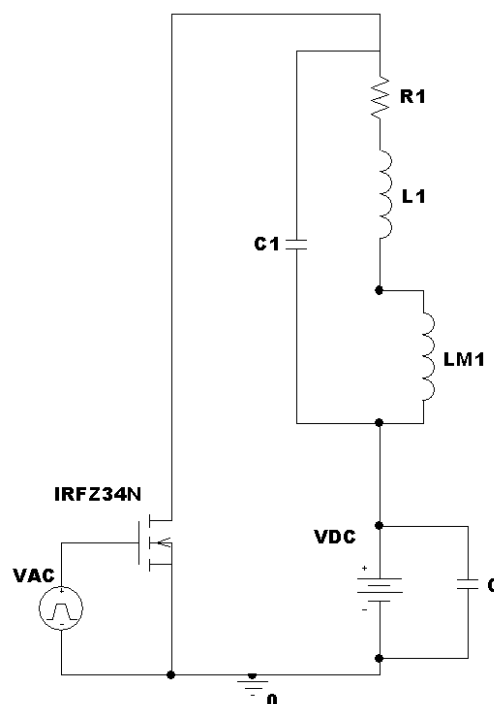
missä  $\mu_0$  on tyhjiön permeabiliteetti eli  $4\pi 10^{-7}$  Vs/Am. Muuntajaan toisioon uskottiin pystyttävän kiertämään 1800 toisiokierrosta, joten ensiöön voitaisiin kiertää 6 käämikierrosta. Tällöin muuntajan muuntosuhde 300 olisi vielä tarpeeksi suuri. Ensiön magnetoimisinduktanssiksi saataisiin näin 1,06 mH, josta hajainduktanssia oletetaan olevan noin kymmenes eli 106  $\mu$ H. Jännitteiden suhde on näillä kierroslukujen suhteella 300.

## 2.2. Ensiöpuoli

Ensiöpuolen tasajännitteen pätkimiseen käytettäisiin International Rectifierin valmistamaa IRFZ34N HEXFET® Power MOSFET-transistoria, joka valittiin sen

suuren 29 A kanavavirran kestokyvyn, pienen  $0,040 \Omega$  johtavuustilan resistanssin, lyhyiden 7 ns päälle kytkemisviiveen ja 40 ns poiskytkentäviiveen ja lyhyiden nousuajan 49 ns ja laskuajan 40 ns vuoksi. Transistorin jäähdyttämiseksi se kiinnitettäisiin jäähdytyslevyyn, jota puhallin viilentäisi, estäen transistorin ylikuumentumisen. Tasajännitelähteen kanssa rinnankytkettäisiin  $100 \mu\text{F}$  kondensaattori, jonka tarkoituksena olisi auttaa tasajännitelähdettä nopeassa tehonsyötössä. [3, sivut 1-2]

Ensiöpuolen simulointiin käytettiin kuvan 4 mukaista simulointimallia, jossa on huomioitu erilaisia loisparametreja, joita todellisessa laitteessa on. Simulointimalli ei kuitenkaan vastaa täydellisesti todellista piiriä etenkin muuntajan osalta, sillä esiintyviä loisparametreja on hyvin vaikea arvioida tarkasti.

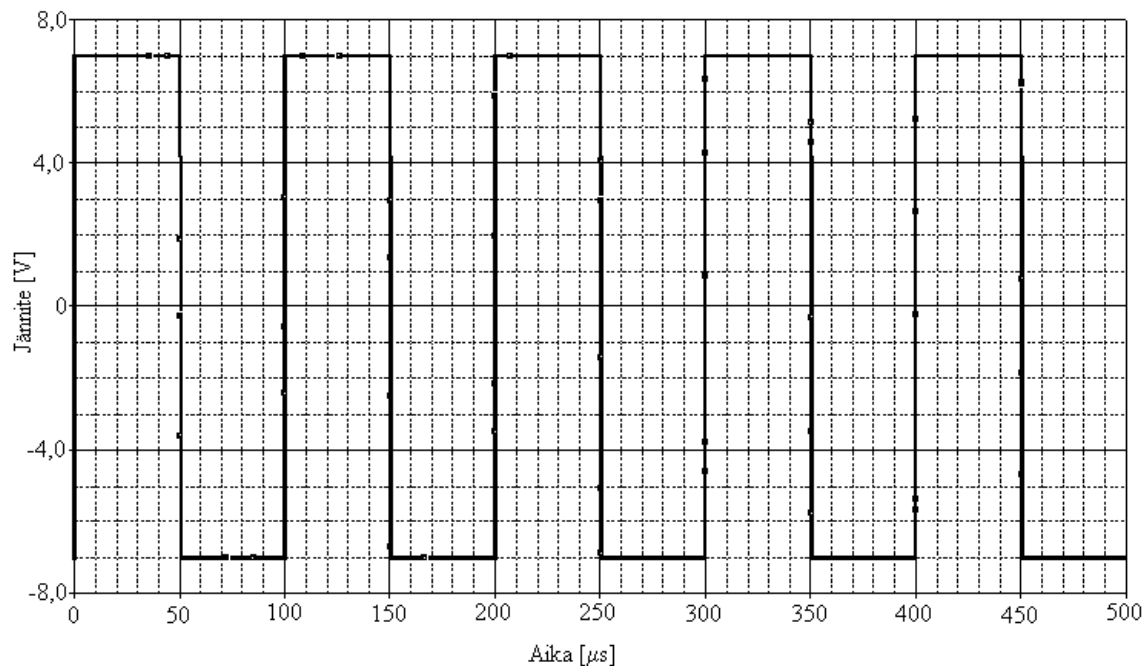


Kuva 4. Piirikaavio ensiöpuolen simuloimiseksi, josta toisiopuoli on jätetty pois kuvasta ensiöpuolen hahmottamisen parantamiseksi.

Kuvan 4 loisparametreista R1 kuvaa ensiökäämityksessä olevaa resistanssia, jonka arvioitiin olevan noin  $5 \Omega$ . L1 kuvaa muuntajassa ja johtimissa syntyviä hajainduktansseja, joiksi arvioitiin  $100 \text{ nH}$ . C1 kuvaa hajakapasitanssia, joka syntyy

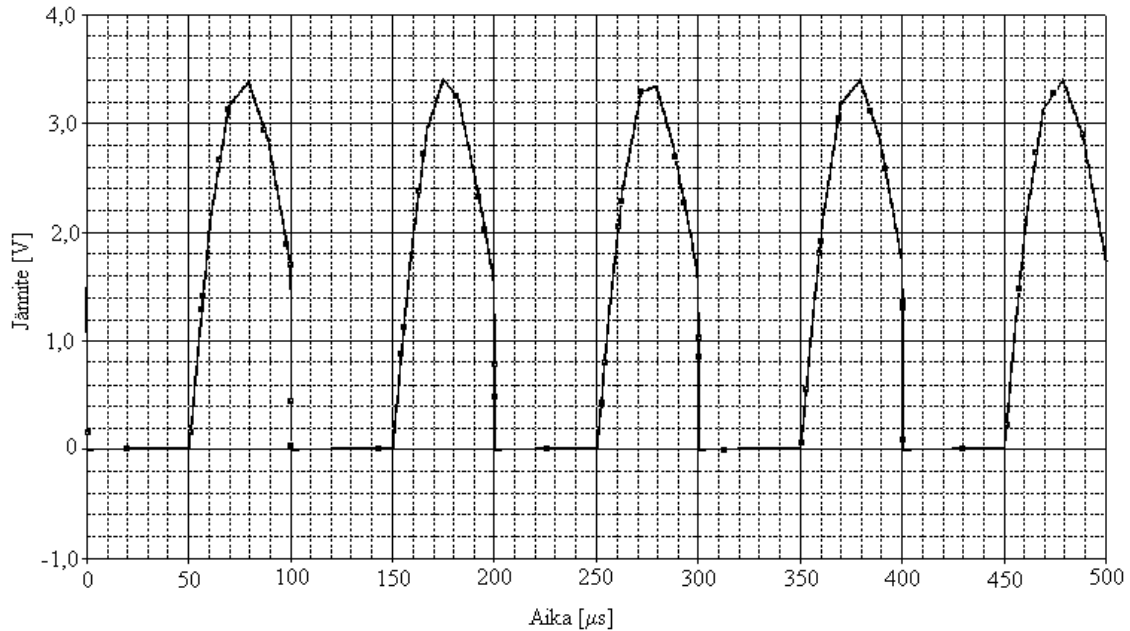
käämikierroston välille, jonka arvon oletettiin olevan noin  $1 \mu\text{F}$ . LM1 kuvaa simuloinnin piirikaaviossa ensiön magnetoimisinduktanssia, joka on yhteydessä toisioon, tämän laskettiin olevan noin  $0,93 \mu\text{H}$ .

Simuloinnissa käytettiin tasajännitelähteen syöttöjännitteenä  $1,5 \text{ V}$  ja  $10 \text{ kHz}$  taajuutta transistorin ohjaukseen. Ohjauksen amplitudiksi valittiin  $7 \text{ V}$ , sillä se on riittävä ajamaan transistori kyllästystilaan. Transistorin ohjaussignaali on esitetty kuvassa 5.[3, sivu 3]



Kuva 5. Transistorin ohjaukseen käytettävä jännitesignaali.

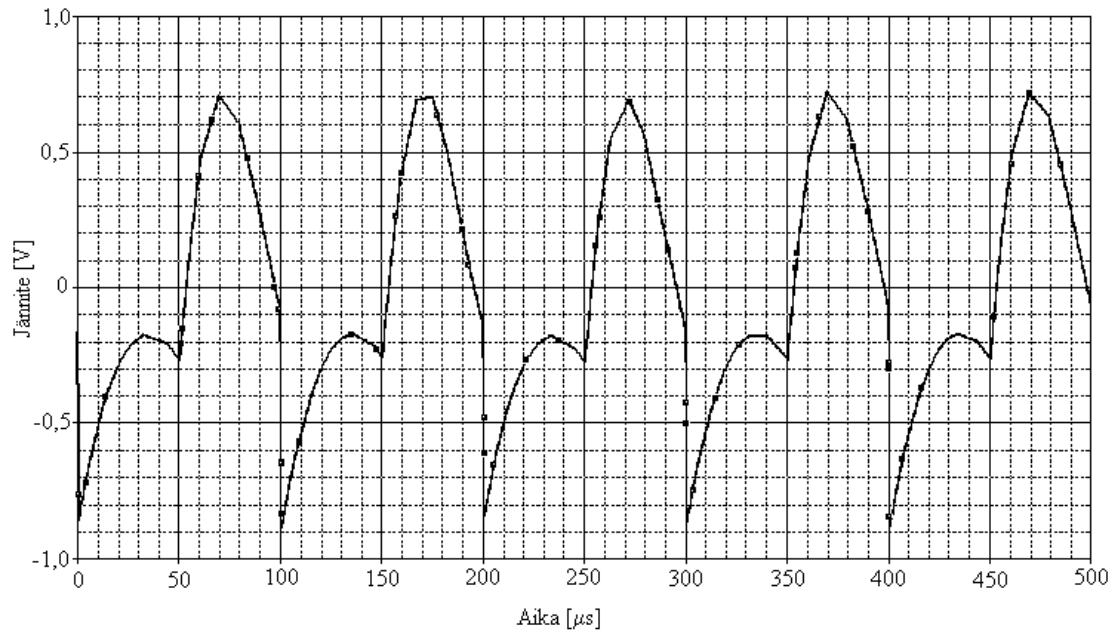
Transistorin nielun ja lähteen väliseksi jännitteeksi  $U_{\text{DS}}$  saatiin kuvan 6 mukainen jännitesignaali edellä mainitulla transistorin ohjaussignaalilla ja tasajännitelähteen syötön arvolla.



Kuva 6. Transistorin nielu-lähde-jännitteen  $V_{DS}$  käyränmuoto, tasajännitelähteen 1,5 V syötöllä ja transistorin 10 kHz ohjaustaajuudella.

Kuvasta 6 huomataan transistorin kanavan aukeavan lähes täydellisesti, sillä jännite kanavan yli on lähes nolla kanavan johtaessa. Kuvasta huomataan myös, että transistorin yli oleva jännite on estotilassa noin kaksinkertainen tasajännitelähteen syöttöön nähden. Tämä johtuu hajakapasitanssien purkautumisesta ja niiden piiriin tuomasta lisäjännitteestä.

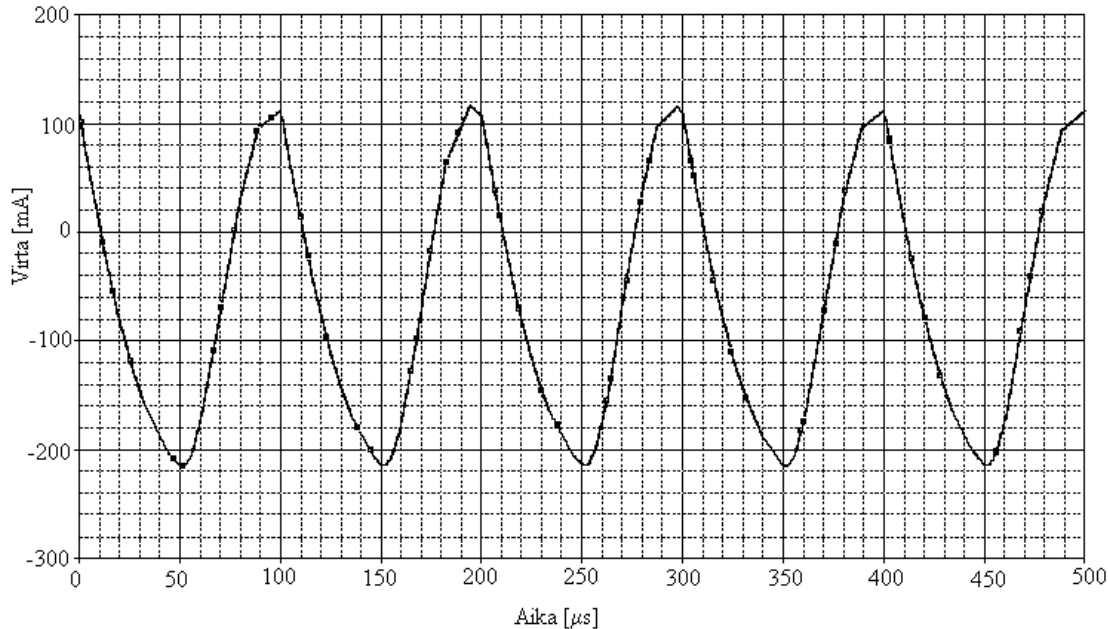
Ensiökäämityksen ideaalisen muuntajan LM1 yli olevaksi jännitteeksi saadaan kuvan 7 mukainen jännitesignaali.



Kuva 7. Ideaaliseen ensiökäämityksen syntyvä jännite ajan funktiona, tasajännitelähteen 1,5 V syötöllä ja transistorin 10 kHz ohjaustaajuudella.

Kuvasta 7 huomataan jännitteen huippuarvon olevan noin puolet syöttöjännitteen 1,5 V arvosta positiivisella puolijaksolla. Negatiivisella puolijaksolla tapahtuu energian siirtoa hajakapasitanssien ja induktanssien välillä, josta syntyy negatiiviseen puolijaksoon jännitteen muutoksen nollakohta noin -0,2 V jännitteen kohdalle.

Muuntajan ensiövirraksi saadaan kuvan 8 mukainen virran muoto.



Kuva 8. Muuntajassa kulkeva ensiövirta ajan funktiona, tasajännitelähteen 1,5 V syötöllä ja transistorin 10 kHz ohjaustaajuudella.

Kuvasta 8 huomataan virran positiivisen huipun olevan noin 100mA ja negatiivisen huipun 200 mA. Negatiivisen virran suurempi huippu voidaan selittää myös energiavarojen välisellä energian vaihdolla. Virranarvosta tulee myös esille, että ensiövirran suuruus voi olla ongelma, kun suurjännitelähteeltä vaaditaan suurta toisiojännitteen arvoa.

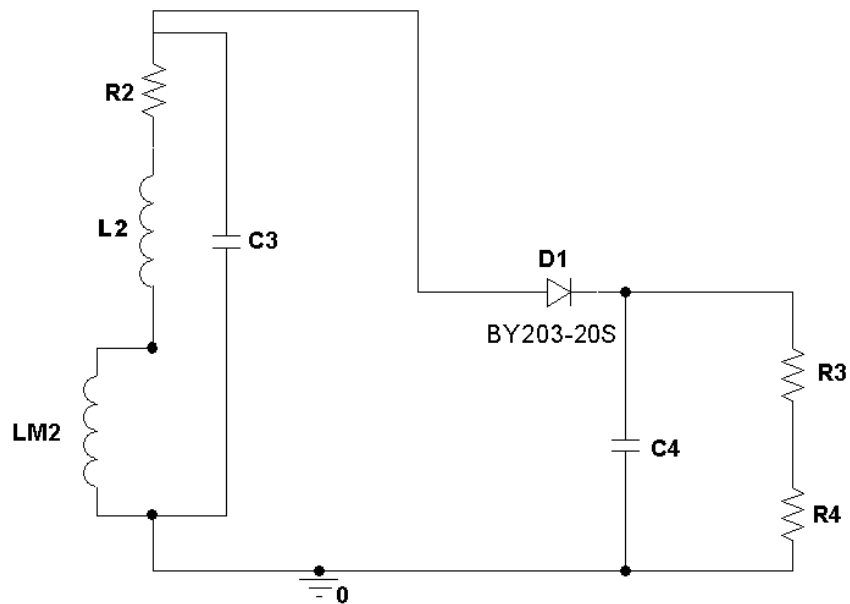
### 2.3. Toisiopuoli

Toisiopuolen puolialtotasasuuntaajan diodiksi asetettiin sarjaan neljä Vishayn BY203-20S diodia suuren jännitekestoisuuden takaamiseksi. Yhden diodin jännitekestävyys on 2 kV, joten diodisillan kestävyudeksi saataisiin 8 kV. Diodien johtamissuunnaksi kytkettäisiin siten, että diodit johtavat, kun ensiöpuolella on jännitteen nousureuna. Diodien jännitekestoisuus on toisiopuolen komponenteista heikoin ja täten määrää toisiopuolen suurimman komponenttien kestävä jännitteen. [4, sivu 1]

RC-suotimen kondensaattori koostui useasta rinnankytketystä kondensaattorista, joiden yhteenlaskettu kapasitanssi oli noin 1,6 nF. Mittavastusjärjestelmä koostui kymmenestä

sarjaan kytketystä  $10\text{ M}\Omega$  vastuksesta ja niiden kanssa sarjaan kytketyn  $1\text{ M}\Omega$  vastuksesta, jonka yli jännite mitattaisiin. Mittavastusjärjestelmän tarkoituksena on tiputtaa suuri jännite mittausslaitteiden mittauskyvyn tasolle. Mittavastusjärjestelmä myös purkasi kondensaattorin jännitteen syötön loputtua, ettei polarisointijärjestelmään jäisi vaarallisia jännitteitä.

Toision simuloimisessa käytettiin kuvan 9 mukaista simulointimallia, jossa on otettu huomioon reaalisen piirin loiskomponentteja. Toision simulointimalli, kuten ensiön simulointimalli, on vain suuntaa antava eri loiskomponenttien tarkan arvioinnin vaikeuden vuoksi.

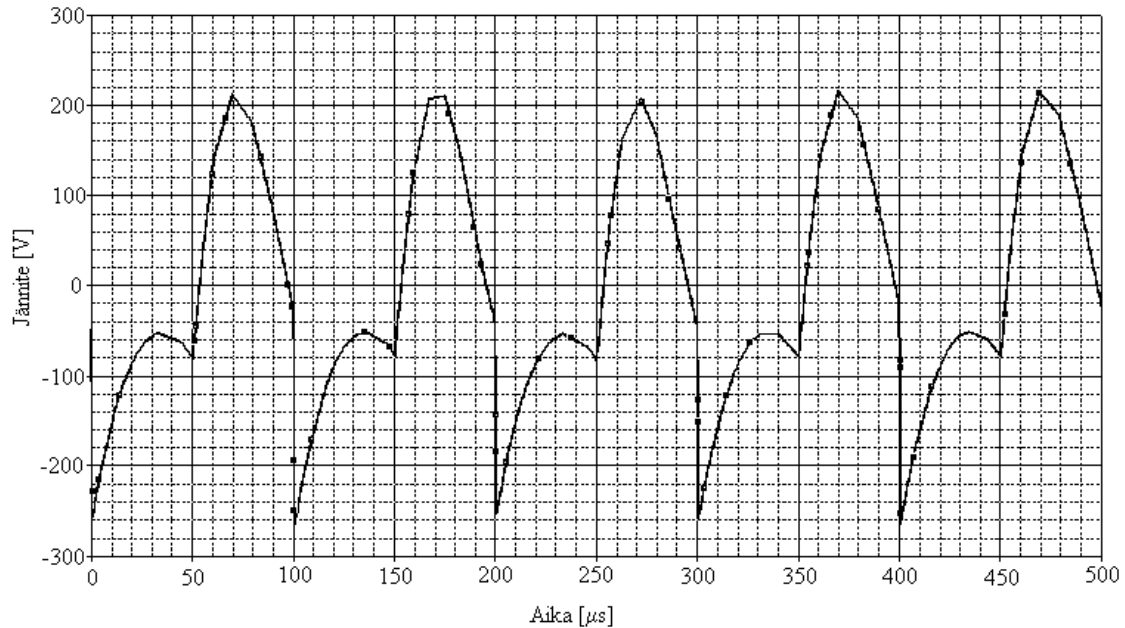


Kuva 9. Toisiopuolen simuloimisessa käytetty piirikaavio, jossa on otettu huomioon todellisen piirin epäideaalisuuksia.

Kuvan 9 kondensaattori C3 kuvaa toisiokäämikierrosten välille syntyvää hajakapasitanssia, L2 hajainduktansseja ja R2 käämikierroksissa syntyvää puhdasta resistanssia. Toision magnetoimisinduktanssi LM2 laskettiin yhtälöllä (2) ja siksi saatiin  $85,84\text{ H}$ . Toision hajainduktanssin oletettiin olevan noin kymmenesosa toision magnetoimisinduktanssista eli noin  $9,54\text{ H}$  ja käämityksessä syntyväksi resistanssiksi  $10\ \Omega$ . Toisiokäämityksissä syntyväksi hajakapasitanssin arvioitiin olevan noin  $10\text{ pF}$ .

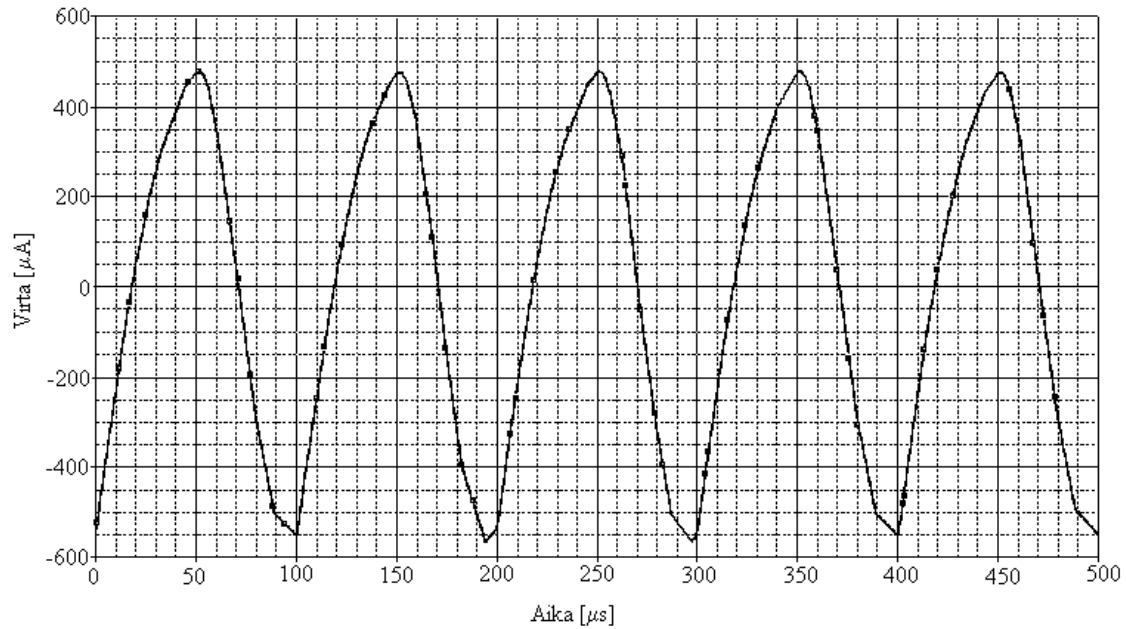


Syötettäessä toisiopuolta ensiöpuolen simuloinnin arvoilla oli toisiokäämitykseen syntyvä jännite noin 300-kertainen ensiöjännitteeseen verrattuna, kuten kuvasta 10 huomataan.



Kuva 10. Muuntajan toisiokäämitykseen syntyvä jännite signaali, ensiöpuolen 1,5 V tasajännitesyötöllä ja 10 kHz ohjaustaajuudella.

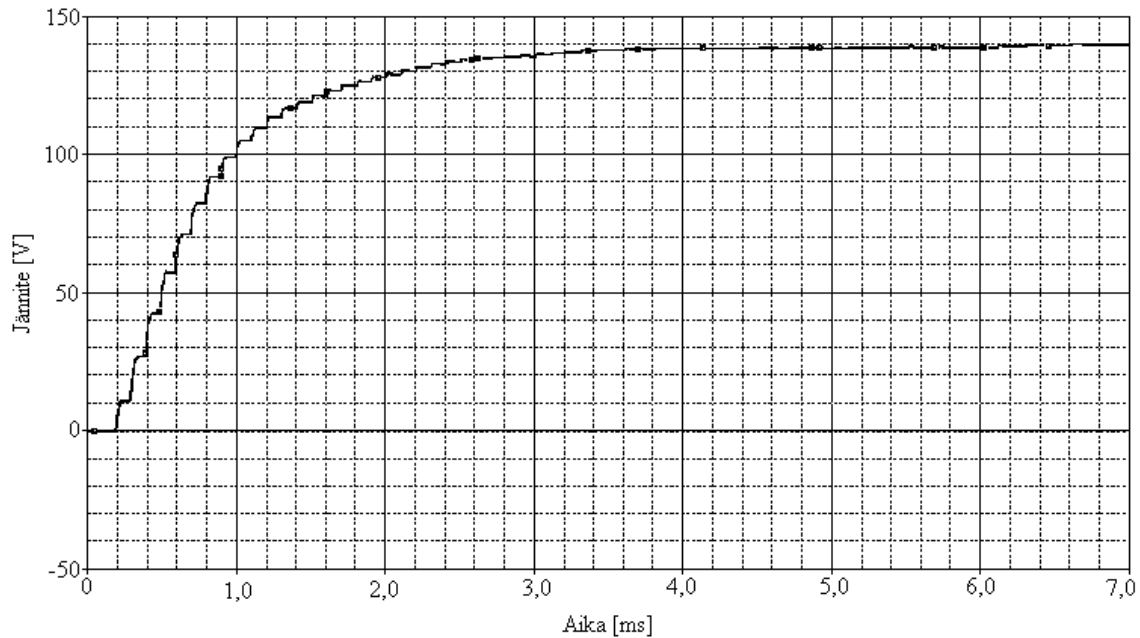
Toisiovirraksi tällä toisiokäämitykseen syntyvällä jännitteellä saatiin kuvan 11 mukainen virran muoto.



Kuva 11. Muuntajassa kulkeva toisiovirta ajanfunktiona, ensiöpuolen 1,5 V tasajännitesyötöllä ja 10 kHz ohjaustaajuudella.

Kuvasta 11 huomataan, että toisiopuolella kulkee alle yhden milliampeerin virta, joka ei tämä aiheuta ongelmia toisiopuolen komponenttien kestävyydelle.

Kondensaattorien yli olevaksi jännitteeksi simuloitaessa saatiin kuvan 12 mukainen jännite.

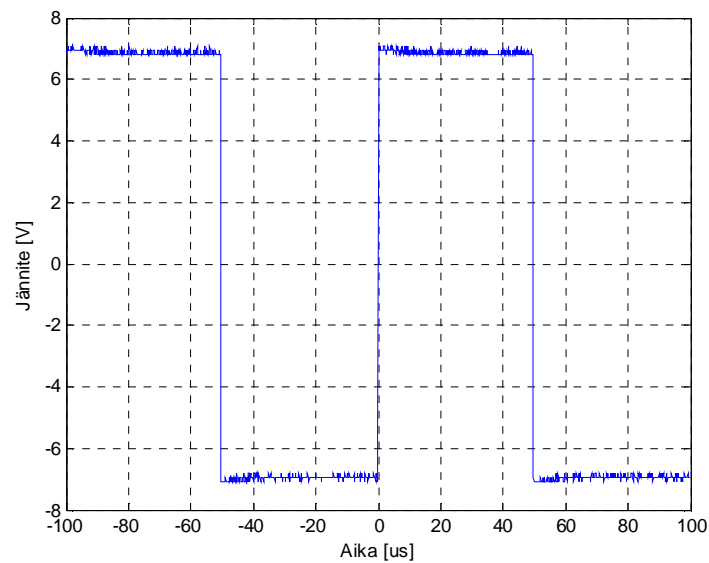


Kuva 12. Kondensaattorien simuloitu jännite eli polarisointiin käytettävä jännite.

Kuvasta 12 huomataan, että simuloitaessa polarisointiin käytettävä jännite on ensiöjännitteen syötöllä noin 140 V, joten kytkentä toimii jännitteen nostajana. Kuvan 12 käyränmuodosta huomataan suotimen aikavakion olevan hyvin suuri noin 1 ms, jolloin kondensaattorien latautuminen kestää. Asettumisaika on kuitenkin mittausten kannalta niin lyhyt noin 4 ms, joten se ei tulisi olemaan ongelma mittausten näkökulmasta. Simuloidun polarisointiin käytettävän jännitteen väre on pieni, joten se soveltuu nesteen polarisointiin. Mittavastuksen yli mitattava jännite oli käyränmuodoltaan samanlainen kuin polarisointijännite, mutta arvoltaan vain sadasosa, josta voidaan päätellä mittavastusjärjestelmän toimivan, kuten oli suunniteltukin.

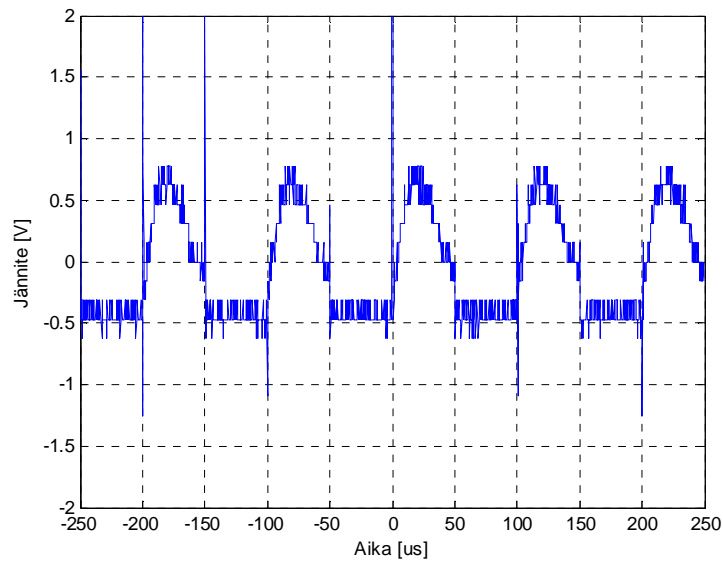
### 3. SUURJÄNNITELÄHTEEN MITTAUKSET

Mitattaessa suurjännitelähteen toimintaa oli mitattava suurjännitelähteen toiminta pienellä alle 250 V toisiopuolen jännitteellä, jonka oskilloskooppi kestää, jotta mittaukset voitaisiin tehdä samoilla ensiöpuolen syötön arvoilla, jokaisesta mitattavasta kohdasta. Aivan kuten simuloinneissakin ensiöpuolen transistoria ohjattiin kanttiaallolla, jonka taajuus oli 10 kHz ja amplitudi 7V.



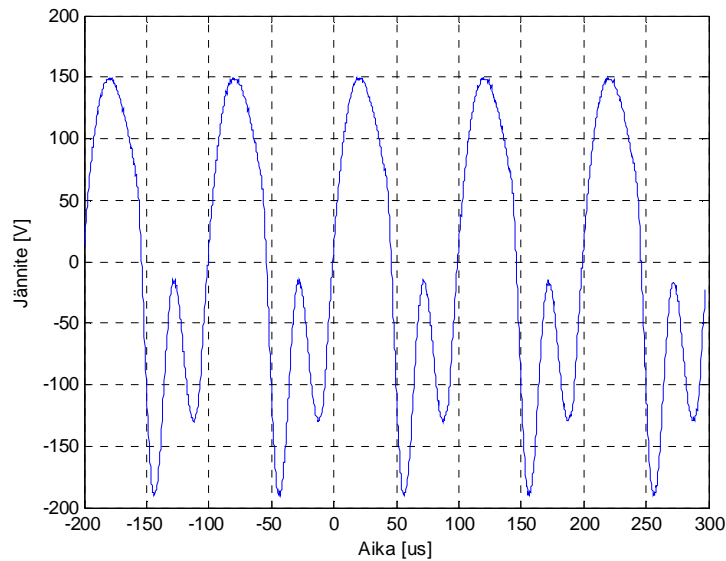
Kuva 13. Transistorin ohjaamiseen käytetty jännitesignaali.

Tällä ohjaussignaalilla saatiin muuntajan ensiökäämiin kuvan 13 mukainen jännitteen pulssijono tasajännitelähteen ollessa noin 1,5 V arvossa ja virran tehollisarvo noin 100 mA.



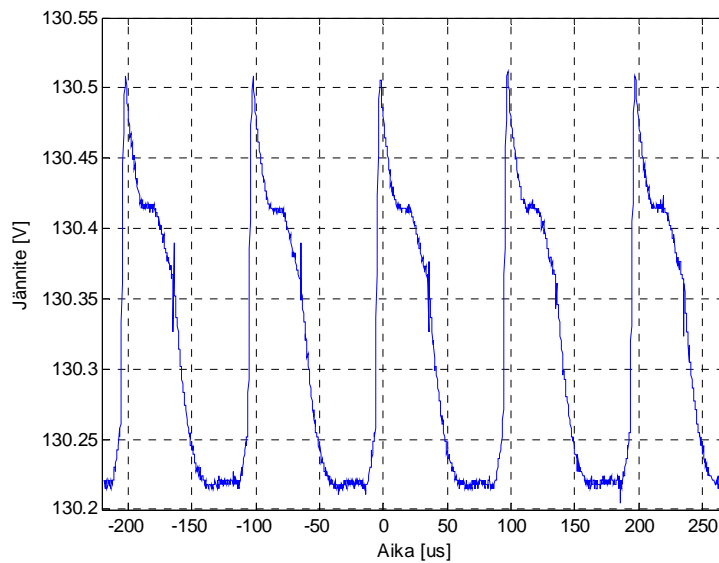
Kuva 14. Ensiökäämitykseen syntyvä pulssijono, ensiön 10 kHz ohjaustaajuudella ja noin 1,5 V tasajännitesyötöllä.

Kuvasta 14 huomataan, että jokaisessa transistorin johtamistilaan siirtymisessä on piikki jonka voidaan olettaa olevan mittasil mukkaan indusoituva häiriön hyvin lyhyen keston ja muuhun signaaliin verrattuna suuren arvonsa vuoksi. Ensiökäämityksessä syntyvä jännite on huippuarvoltaan noin 0,75 V. Tämä on vain noin puolet 1,5 V tasajännitesyötöstä, joka johtuu muun muassa johdinten aiheuttamista hajainduktansseista sekä erinäisistä resistansseista, joita ensiöpiiriin on syntynyt mukaan lukien jännitelähteen sisäresistanssi.



Kuva 15. Toisiokäämitykseen syntyvä jännite, ensiön 10 kHz ohjaustaajuudella ja noin 1,5 V tasajännitesyötöllä.

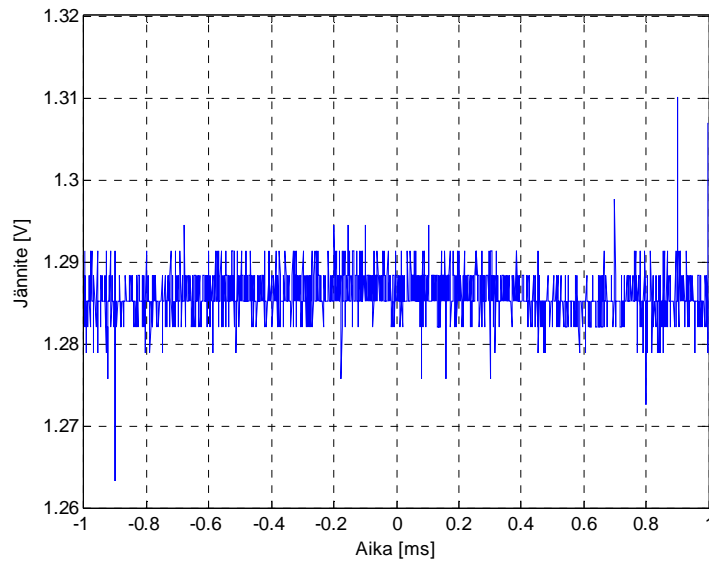
Kuvasta 15 huomataan, että toisiojännitteellä on kaksi huippua, joista ensimmäinen voidaan selittää ensiöpuolen pois kytkennällä ja toinen hajakapasitanssien ja toisio magneitoimisinduktanssin välisenä resonanssina. Kuvista 12 ja 13 huomataan, että toisiojännitteen huippuarvo 200 V on noin 250-kertainen ensiöjännitteen huippuarvoon 0,75 V verrattuna. Tämä teorian kanssa eriävä arvo johtuu suurista jännitteen- ja virrannousuista, jolloin hajavoiden, pyörrevirtojen ja muiden epäideaalisuuksien osuus kasvaa, täten pienentäen ensiön ja toisio välistä kytkeytymistä. Myös muuntajan parametrit ovat hyvin taajuusriippuvaisia, esimerkiksi suhteellinen permeabiliteetin imaginääriosia kasvaa huomattavasti taajuuden noustessa pienentäen jännitteiden suhdetta.



Kuva 16. Kondensaattorien jännite eli polarisointijännite, ensiön 10 kHz ohjaustaajuudella ja noin 1,5 V tasajännitesyötöllä.

Kuvasta 16 huomataan kondensaattorien jännitteen olevan noin 130 V ja väreen olevan noin 0,3 V, joka on 0,25 %. Täten voidaan todeta tuotetun tasajännitteen olevan hyvin lähellä ideaalista tasajännitettä ja täten sopivaa käytettäväksi polarisointijärjestelmässä.

Mitattaessa jännitettä mittavastuksen yli huomattiin käämissä syntyvän magneettikentän aiheuttavan jännitteen mittavastussilmukkaan. Tämä jännite esti luotettavan jännitteen mittauksen mittavastuksen yli. Ongelma selvitettiin asettamalla 47  $\mu\text{F}$  kondensaattori mittavastuksen yli, jolloin syntyi alipäästösuodin, jolla häiriöt poistettiin ja signaali saatiin mittauskelpoiseksi. Mittavastuksen jännite oli suodatuksen jälkeen kuvan 17 mukainen.



Kuva 17. Mittavastuksen jännite siihen asennetun suodinkondensaattorin jälkeen, ensiön 10 kHz ohjaustaajuudella ja noin 1,5 V tasajännitesyötöllä.

Kuvasta 17 huomataan mittavastuksen yli olevan jännitteen vaihtelevan noin 0,01 V, joten sen pystyy mittaamaan luotettavasti yleismittarilla, ilman että signaalin taajuus aiheuttaisi ongelmia. Muuntokerroin, jolla mittavastuksen yli olevasta jännitteestä saataisiin polarisointiin käytettävä jännite, saatiin yksinkertaisella kokeella. Yleismittarin jännitealueella mitattiin jännite  $U$  koko mittavastussysteemin yli ja jännite  $U_m$  mittavastuksen yli. Näiden mittausten suhde on kerroin, jolla saadaan polarisointiin käytettävä jännite mittavastuksen jännitteestä.

Taulukko 1. Mittausvastus järjestelmän muuntokertoimen mittaukset.

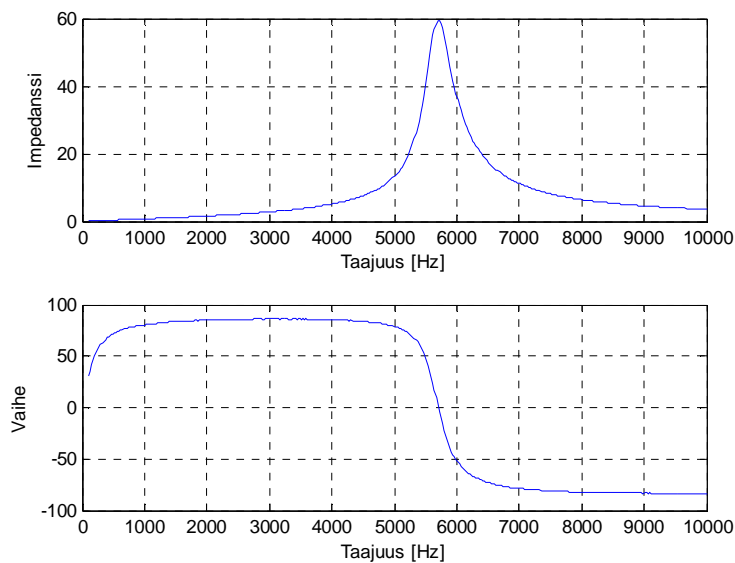
$U$	$U_m$	Kerroin
315	2,9	108,6
403	3,7	108,9
510	4,7	108,5
623	5,7	109,3
717	6,6	108,6
824	7,6	108,4
933	8,6	108,5



Mittauksista huomataan, että kertoimeksi saadaan noin 109. Hienoiset kertoimien eroavaisuudet johtuvat yleismittarin rajallisesta tarkkuudesta suurilla jännitteillä. Arvon huomattava eroaminen simuloituun arvoon, on yleismittarin jännitemittauksen epäideaalisuuden syytä. Yleismittarin resistanssi on noin  $10\text{ M}\Omega$  jännitemittauksissa, jolloin mittavastuksen ja yleismittarin rinnankytkentä alentaa mittausvastuksen noin  $0,91\text{ M}\Omega$ :iin. Tämä vastuksen alennus nostaa kerrointa noin 110, mutta vastusten valmistustoleranssien vuoksi kerroin tippuu 109:ään.

### 3.1. Muuntajan mittaukset ja toteutus

Muuntajan toisiopuolelle saatiin kierrettyä suunnitellut 1800 käämikierrosta, joten ensiöpuolelle voitiin kiertää kuusi kierrosta. Mitattaessa impedanssianalysointorilla muuntajan magnetoimisimpedanssi eri taajuuden arvoilla, toisiökäämityksen ollessa avoin eli tyhjäkäynnissä, saatiin kuvan 18 mukaiset impedanssit.



Kuva 18. Muuntajan ensiön impedanssit eri taajuuden arvoilla, muuntajan toision ollessa avoin.

Kuvasta 18 huomataan muuntajan toimivan hyvin muuntajan taajuusvälillä 1 kHz - 4 kHz, sillä magnetointi-impedanssi kasvaa lineaarisesti sekä virran ja jännitteen vaihe-

ero on 90 astetta. Täältä alueelta voidaan laskea muuntajan magnetoimisinduktanssi, kun tiedetään että reaktiivinen induktanssi  $X_L$  lasketaan yhtälöllä

$$X_L = j2\pi fL, \quad (4)$$

missä  $L$  on induktanssi ja  $f$  taajuus. Muuntajan ensiön magnetoimisimpedanssi  $Z$  saadaan yhtälöllä

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}, \quad (5)$$

missä  $R$  on ensiökäämityksen aiheuttama resistanssi. Tiedettäessä, ettei ensiökäämityksen resistanssi muutu taajuuden funktiona, voidaan impedanssin muutos olettaa syntyvän vain reaktiivisesta osasta. Täten magnetoimisinduktanssi saadaan suoran alueen kulmakertoimesta, yhtälöllä

$$L = \frac{\Delta X_L}{2\pi\Delta f}. \quad (6)$$

Ensiöpuolen magnetoimisinduktanssiksi saadaan täten 0,125 mH, joka on vain noin kymmenesosa lasketusta arvosta. Nämä eroavaisuudet teorian kanssa johtuvat siitä, että sydänaineen parametrit tunnettiin vain sähköverkon taajuuksille. Taajuuden kasvaessa sydänaineen parametri muuttuvat huomattavasti, esimerkiksi aineen permeabiliteetti pienenee sekä pyörrevirrat kasvavat materiaalissa, rajoittaen aikaan saatavaa magneettikenttää.

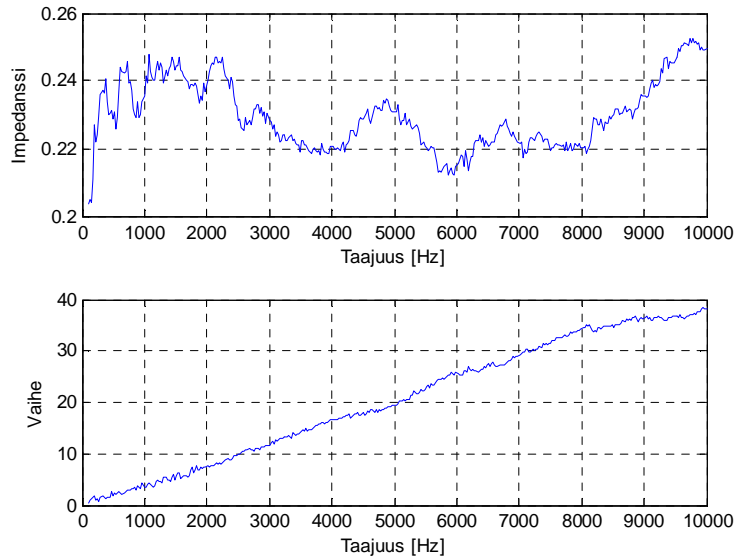
Kuvasta 18 huomataan myös, että taajuuden arvon kohdalla 5,7 kHz kohdalla on magnetoimisinduktanssin ja käämikierrosten välisen hajakapasitanssien aiheuttama rinnakkaisresonanssi. Tiedettäessä resonanssitaajuuden yhtälö, voidaan hajakapasitanssien arvo laskea yhtälöllä

$$C = \frac{1}{L(2\pi f)^2}, \quad (7)$$

missä  $L$  on magnetoimisinduktanssi ja  $f$  taajuus. Hajakapasitanssien arvoksi saadaan täten  $6,2 \mu\text{F}$ .

Muuntajan käämikierrosten aiheuttamat hajakapasitanssit saavat muuntajan toimimaan hyvin epäideaalisella tavalla. Myös pieni magnetoimisimpedanssi aiheuttaa ongelmia muuntajan syötössä, virran kasvaessa nopeasti syöttöjännitettä nostettaessa.

Kuvasta 19 huomataan, että toisiopuolen ollessa oikosuljettu on ensiöpuolen impedanssi hyvin pieni verrattuna tyhjäkäyntitestiin. Tämä tarkoittaa sitä, että hajainduktanssit sydänmateriaalissa ovat pienet ja ensiökäämityksen kytkeytyminen toisiökäämitykseen on hyvä.



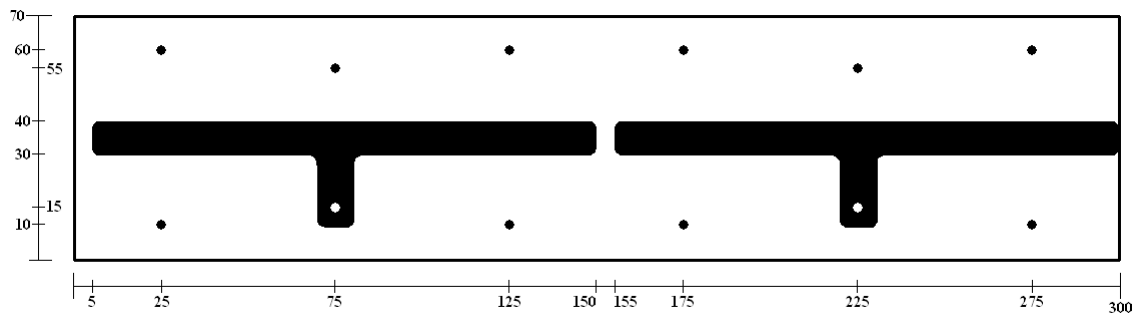
Kuva 19. Muuntajan ensiön impedanssi toision ollessa oikosuljettu.

## 4. POLARISOINTILAITTEISTO

Tässä kappaleessa on esitetty polarisointiin käytettävien levyjen valmistus ja mitat sekä niiden liittyminen suurjännitelähteeseen ja mittausslaitteiston lopullinen ulkomuoto.

### 4.1. Polarisointilevyt

Polarisointiin käytettävät levyt valmistettiin jyrsimällä piirilevystä kuvan 20 mukaisia levyjä neljä kappaletta. Sähkökentän paikallisen tihentymisen estämiseksi kuparoidun alueen reunat pyöristettiin, täten pienentäen läpilyönnin riskiä.



Kuva 20. Lautojen ulkoiset mitat millimetreissä, jossa yhtenäinen musta alue on kuparia ja pisteet reikiä.

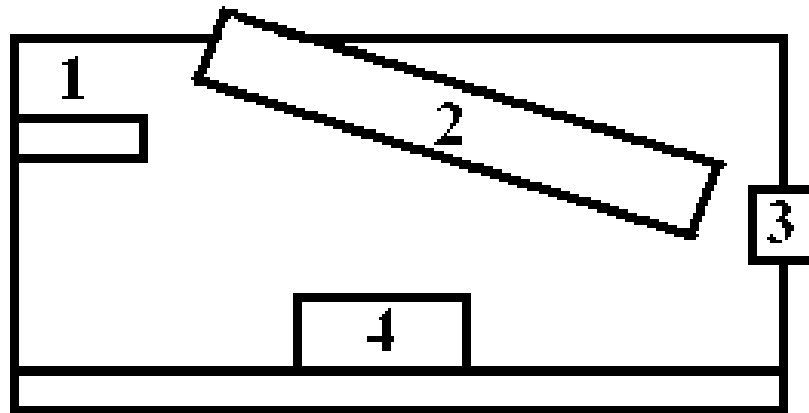
Neljästä levystä saadaan kaksi levypakettia, kääntämällä toinen levypaketin levyistä pidemmän sivunsa kautta ympäri. Kuparilliset alueet muodostavat vastakkaisen levyn kanssa levykondensaattorin, ja näitä levykondensaattoreita on molemmissa levypaketeissa kaksi. Kukin levykondensaattoreista pystytään saamaan jännitteelliseksi toisistaan riippumatta. Maksimissaan jännitteellisen alueen pituudeksi saadaan 580 mm. Jännite johdetaan levyille T-kuvion pienimmän haaran kautta. Varman galvaanisen yhteyden varmistamiseksi kukin johdin kiinnitettiin pulttiin APECO-liittimellä, ja pultti kiinnitettiin kuparoituun alueeseen tähtialuslevyllä ja mutterilla.

Putki, jota pitkin neste virtaa, ohjattiin kulkemaan levykondensaattorien välistä. Levyjen ollessa kiinnitettyinä toisiinsa jäi niiden etäisyydeksi toisiinsa noin 2,8 mm, joten putki painui 0,2 mm kasaan. Käyttämällä oletusta, että ilman läpilyöntikestävyys on noin

1 kV/mm, voidaan sanoa, että suurin levykondensaattorin kestävä jännite on noin 3 kV, joka on myös jännite joka pystytään laitteistolla tuottamaan.

#### 4.2. Mittausjärjestely

Kaikki mittausjärjestelyn osat kiinnitettiin puiseen runkoon. Periaatteellinen kuva eri osioiden sijoittelusta on esitetty kuvassa 21.



Kuva 21. Periaatteellinen kuva eri osioiden sijoittelusta puiseen runkoon.

Kuvan 21 kohdassa 1 on taso, johon tarkasteltavan neste astian voi asettaa. Astiasta lähtee putki kohdan 2 levyäkin läpi, jossa se kohtaa sähkökentän. Levyjen jälkeen putki johtaa magneettiventtiilille. Magneettiventtiili on nesteastian alapuolella kohdassa 3, ettei lappoa joutuisi muodostamaan uudestaan jokaisella mittauskerralla. Putken kiinnitys magneettiventtiiliin tiivistettiin polyuretaanilla, joka kestäisi syövyttäviäkin aineita. Venttiililtä putki johtaa astiaan, johon tarkasteltava neste kerätään. Pudotuskorkeutta astiassa olevan nesteen pinnasta letkun toiseen päähän on noin 0,2 m ja putki on noin 20 asteen kulmassa vaakatasoon nähden. Virtauskanavana käytetyn putken pituus noin 1 100 mm.

Suurjännitelähde on sijoitettu levyn alalaitaan kohtaan 4. Suurjännitelähteeltä jännite johdetaan levyille johtimia pitkin siten, ettei sähkökentän napaisuus vaihdu eri levyjen välillä.

## 5. MITTAUKSEN TOTEUTTAMINEN JA TULKINTA

Mittaukset toteutettaisiin kuvan 21 laitteistolla. Ylemmästä astiasta valutettaisiin lapolla nestettä alempaan astiaan ennalta määrätyn ajan verran. Alempaan astiaan kertyneen nesteen massa  $m$  mitattaisiin, jolloin voitaisiin laskea nesteen tilavuus  $V$  tietämällä nesteen tiheys  $\rho$

$$V = \frac{m}{\rho}. \quad (8)$$

Saadusta tilavuudesta saadaan nesteen tilavuusvirta  $q_v$  yksinkertaisesti jakamalla tilavuus ajalla  $t$ , jolla nestettä kerättiin

$$q_v = \frac{V}{t}. \quad (9)$$

Tilavuusvirrasta saadaan nesteen virtausnopeus  $v$  tietämällä putken poikkipinta-ala  $A$

$$v = \frac{q_v}{A}. \quad (10)$$

Olettamalla nesteen virtaus laminaariseksi voidaan laskea aineen viskositeetti  $\eta$  yhtälöllä [5, sivut 446-448]

$$\eta = \frac{F l}{A v}, \quad (11)$$

jossa  $F$  on nesteeseen kohdistuva voima,  $A$  putken poikkipinta-ala,  $l$  putken pituus ja  $v$  nesteen virtausnopeus. Nesteeseen kohdistuvan voiman tiedetään syntyvän vain paineesta  $p$ , jonka yhtälö on

$$p = \frac{F}{A}. \quad (12)$$

Tiedettäessä, että putkessa paineen synnyttää vain hydrostaattinen paine

$$p = \rho gh, \quad (13)$$

jossa  $\rho$  on nesteen tiheys,  $g$  pudotuskiihtyvyys ja  $h$  pudotuskorkeus saadaan viskositeetin yhtälö muotoon

$$\eta = \rho gh \frac{l}{v}. \quad (14)$$

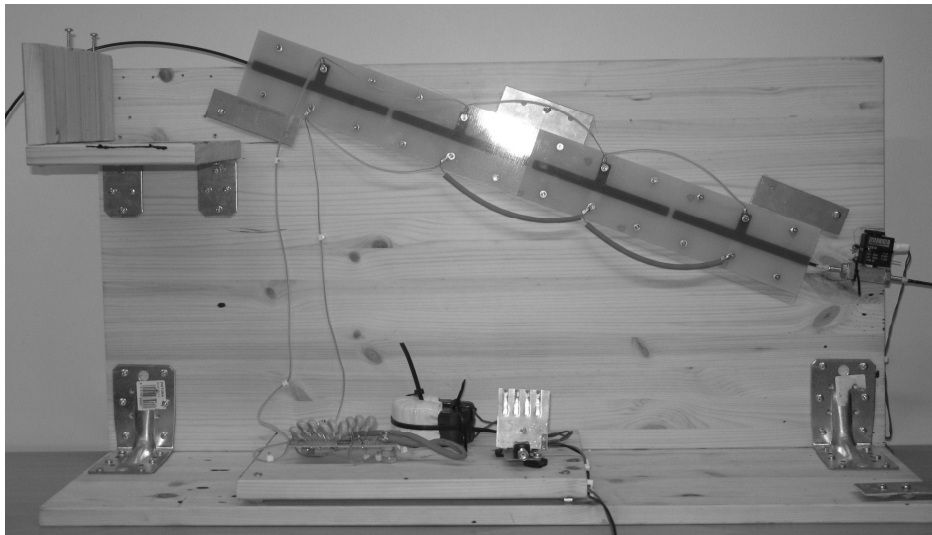
Vertaamalla ilman polarisointia tehdyillä mittauksilla laskettuja viskositeetin arvoja polarisoinnilla saatuihin arvoihin, voidaan päätellä sähkökentän vaikutusta nesteen viskositeettiin. Nesteen viskositeetin arvon kasvaessa voidaan todeta sähkökentän hidastavan nesteen virtausta ja viskositeetin arvon pienessä sähkökentän nopeuttavan nesteen virtausta kanavassa.

## YHTEENVETO

Tämän työn tavoite oli suunnitella suurjännitelähde polarisointijärjestelmään, jolla tutkittaisiin sähkökentän vaikutusta nesteen virtaukseen putkessa. Työssä suunniteltiin ja toteutettiin suurjännitelähde, jonka jännitteellä nestettä polarisoitaisiin ja levyt, joilla ohjattaisiin sähkökenttää. Mittausten toteutus ja järjestelyjen esittäminen tehtiin tässä työssä. Työn päätuloksina voitaneen mainita, että on mahdollista toteuttaa suurjännitelähde flyback-hakkuritoteutuksen, josta saadaan tarpeeksi tasaista tasajännitettä, jolla voidaan tutkia suuntaa antavasti nesteen viskositeetin muutosta sähkökentän alaisuudessa.

Suurjännitelähde toteutti, sille asetetut vaatimukset ja pystyi tuottamaan 3 kV tasajännitettä. Laitteisto saatiin toteutettua, siten että lappoa ei jouduta lappoa muodostamaan jokaisella mittauskerralla uudestaan ja polarisoitavan alueen pituus saatiin tehtyä muutettavaksi.

Kuva valmiista laitteistosta on esitetty kuvassa 21.



Kuva 22. Toteutettu polarisointilaitteisto.

Suurimmaksi haasteeksi järjestelmän toteuttamisessa osoittautui muuntajan toiminta ja ensiövirta. Suuren jännitteen nousureunan taajuuden vuoksi ei tarkasti voitu ennustaa



muuntajan toimintaa, jolloin jouduttiin ongelmiin simulointitulosten antamien arvojen kanssa. Ensiövirran suuruudesta syntyi myös ongelma komponenttien lämpenemisen johdosta, jota osattiin odottaa myös simulointitulosten puolelta, mutta siitä selvittiin asentamalla transistorille isompi jäähdytyslevy. Mahdollinen ratkaisu tähän ongelmaan olisi tehdä muuntaja paremmin korkeille taajuuksille soveltuvasta materiaalista, jolloin ensiön induktanssi kasvaisi ja toisi lisää impedanssia ensiöpiiriin, jolloin ensiövirta pienisi.

Itse järjestelmä todettiin hyväksi tavaksi tutkia mahdollista nesteen viskositeetin muutosta pienessä mittakaavassa ja oli täten onnistunut täyttämään mittauksiin asetetut tavoitteet.

**LÄHTEET**

- [1] Mohan N., Undeland T. M., Robbins W. P., 2003, Power Electronics, 3. painos, John Wiley & Sons, Inc. ISBN 0-471-42908-2
  
- [2] Floyd, T., 2005, Electronic Devices, Conventional Current Version, 7. painos. Pearson Education, Inc., ISBN 0-13-127827-4
  
- [3] International Rectifier, IRFZ34N datalehti, saatavilla internetistä osoitteesta <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irfz34n.pdf>
  
- [4] Vishay, BY203-20S datalehti <http://pdfdata.datasheetsite.com/pdf1/Vishay/BY203-20S.pdf>
  
- [5] Young H. D., Freedman A. R., 2000, Sears and Zemansky's University Physics, 10. painos, Addison Wesley Longman, Inc. ISBN 0-201-60322-5