TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

ELEKTROONSETE TOITEALLIKATE SISSELÜLITAMISVOOLUD JA NENDEST TINGITUD PINGELOHUD

INRUSH CURRENTS OF ELECTRONIC POWER SUPPLIES AND RESULTING VOLTAGE DROPS

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Jan Markus Tinno

Üliõpilaskood: 206772EAAB

Juhendaja: Lauri Kütt, vanemlektor

Tallinn 2023

(Tiitellehe pöördel)

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.
Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"....." ..... 20.....

Autor: .....
/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetööle esitatud nõuetele

"....." ..... 20.....

Juhendaja: .....
/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

".....".....20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....
/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks[1]

Mina Jan Markus Tinno

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose *Elektroonsete toiteallikate sisselülitamisvoolud ja nendest tingitud pingelohud*, mille juhendaja on Lauri Kütt,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

18.05.2023

[1] *Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingulise tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.*

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	**Elektroonsete toiteallikate sisselülitamisvoolud ja nendest tingitud pingelohud**
Lõputöö teema inglise keeles:	**Inrush currents of electronic power supplies and resulting voltage drops**
Üliõpilane:	**Jan Markus Tinno, 206772EAAB**
Eriala:	**Elektroenergeetika ja mehhatroonika**
Lõputöö liik:	**Bakalaureusetöö**
Lõputöö juhendaja:	**Lauri Kütt, vanemlektor**
Lõputöö kaasjuhendaja: (ettevõte, amet ja kontakt)	
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	**2023/2024 Sügis**
Lõputöö esitamise tähtaeg:	**18.05.2023**

_____	_____	_____
Üliõpilane (allkiri)	Juhendaja (allkiri)	Õppekava juht (allkiri)

_____

Kaasjuhendaja (allkiri)

1. Teema põhjendus

Elektroonsed toiteallikad sisaldavad oma struktuuris suure mahtuvusega kondensaatoreid, mis võrku ühendumisel või sisselülitamisel toovad kaasa tugevad laadimisvoolud. Antud töö käigus luuakse mudel, millega hinnata võimalike sisselülitusvoolude tugevusi, pidades silmas elektroonseid toiteallikaid (sh LED-lambid, impulss-toiteallikad jt). Mudeli abil saaks hinnata erinevate võrgupunktide ja mikrovõrkude käitumist ja stabiilsust kaasaegsete koormuste lülitamise ajal.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on luua mudel, mis kirjeldaks läbi RLC-ahelate sisselülitamisvoolude kujunemist ning võrguparameetreid, millised sisselülitamisvoolu dünaamikat määravad. Mudeli abil saaks hinnata ka suurte tarbijagruppide sisselülitamisvoolude oodatavaid tippväärtusi ja pingelohkude suuruseid.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

1. Kuidas koostada tarvitite mudelid ja millised on oodatavad parameetrite suurused?
2. Kuidas kirjeldada erinevate võrkude sisselülitamisvoolu kujundavaid parameetreid?
3. Mida tuleb arvestada sisselülitamisvoolust tingitud pingelohkude arvutusel?
4. Kui täpne on mudel võrreldes teiste katsetega?

4. Lähteandmed

Peamiseks lähteandmete allikaks on Jan Kulikovi 2022. aasta magistritöö „Seadmete lülitus-sööstvoolude profiilide analüüs ja mõju võrgule".

5. Uurimismeetodid

- Katsete läbiviimine praktiliste tarvititega.
- Katsetulemuste analüüs tabelarvutustarkvara abil.
- Elektriahelate tarkvaraline simulatsioon.
- Mudeli vastavuse kontroll võrdluskatsetega.

6. Graafiline osa

Töö sisaldab jooniseid, skeeme, tabeleid ja graafikuid. Graafiline osa on nii põhiosas kui lisades.

7. Töö struktuur

1. Sissejuhatus
2. Ülevaade kondensaatoritega toiteahelatest
3. Katsete läbiviimise ettevalmistus ja katsemaketi kirjeldus
4. Tarbijate sisselülitusvoolude mõõtmine
5. Tarbijate mudeli koostamine ja parameetrite analüüs
6. Võrguparameetrite katsed
7. Võrgu ekvivalentse mudeli katsetamine ja parameetrite analüüs
8. Summaarse lülitusvoolu kasutamine pingelohumudelis
9. Lõppkatsed ja mudeli kontroll
10. Kokkuvõte ja järeldused

8. Kasutatud kirjanduse allikad

J. Kulikov, „Profiling of the device inrush currents and the effects to the distribution networks. Seadmete lülitus-sööstvoolude profiilide analüüs ja mõju võrgule", [Magistritöö], Inseneriteaduskond, TalTech, Tallinn, Eesti, 2022. [Online]. Loetud aadressil https://digikogu.taltech.ee/et/Item/8b2d7d81-95f9-4858-960b-9b08779db8d8

9. Lõputöö konsultandid

- Laur Valgur
- Martin Parker

10. Töö etapid ja ajakava

Jaanuar 2023 – tarbijate katsemakett valmis
Veebruar 2023 – tarbijate ja võrgu katsed
Märts 2023 – mudeli ja parameetrite väljatöötamine
Aprill 2023 – mudeli kontrollkatsed ja tulemuste vormistamine
Mai 2023 – lõputöö vormistamine
18.05.2023 – lõputöö esitamine

SISUKORD

EESSÕNA 8
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU 9
1 SISSEJUHATUS 10
2 KATSETE ÜLESEHITUS 12
2.1 Katsemaketi koostamine 12
2.2 Võrgu parameetrite selgitamine 14
2.3 Katsed tarvitite ja mikrovõrguga 19
3 KATSETE TEOSTAMINE 20
3.1 Katsemaketi katsetamine 20
3.2 Mikrovõrgu olukordade katsetamine 23
4 KATSETULEMUSTE ANALÜÜS 31
4.1 Aegsuuruste arvutamine 31
4.2 Mudeli takistuse ja induktiivsuse arvutamine 32
4.3 Mudeli mahtuvuse arvutamine 34
5 HINNANGUD 35
5.1 Tarvitite mõju lülitusvoolule 35
5.2 Ühendusviiside mõju lülitusvoolule 37
5.3 Toiteviiside mõju lülitusvoolule 39
5.4 Pingelohkude kujunemine 40
KOKKUVÕTE 43
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU 45
LISAD 46
Lisa 1 Katsemaketi foto 46

EESSÕNA

Käesoleva lõputöö teema on sõnastatud Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi vanemlektor Lauri Kütti algatusel. Töö praktiline osa on teostatud Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi laboratooriumites. Teoreetilise osa alusmaterjal on kogutud internetist.

Autor avaldab tänu vanemlektor Lauri Küttile töö juhendamise eest ning insener Martin Parkerile ja insener Laur Valgurile töö praktilise osaga seotud abi eest.

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

LED – valgusdiood (ingl k *Light emitting diode*)

MOSFET – metalloksiid-väljatransistor (ingl k *Metal–oxide semiconductor field-effect transistor*)

1 SISSEJUHATUS

Käesoleval ajajärgul on tõusutrendis vajadus elektroonsete seadmete järele, ent seejuures kehtib ka nõue energiatõhususe tagamisele. Suurema energiatõhususe saavutamiseks rakendatakse elektroonsetes toitemuundurites kõrgemat kasutegurit, mille jaoks omakorda pööratakse tähelepanu argielu seadmete energiat tarbivatele komponentidele. Sellisteks komponentideks on üldjuhul seadmete põhielemendid, näiteks küttekeha, mootor või protsessor, ent seadmete tööks vajalik energia varustatakse jõuelektroonikal põhinevate toitemuundurite kaudu. Toitemuundurite ülesandeks on viia kasutatava võrgu parameetrid ühendatud seadme töötamiseks sobilikule kujule ja suurustele. Ideaalses muunduris on väljunud elektrienergia võrdne sellesse sisenenud elektrienergiaga, kuid reaalselt esinevad muundurites kaod. Lisaks esineb ka nähtusi, näiteks lühis- ja lülitusvoolud, mis lühendavad muundurite eluiga. Euroopas on elektritoiteahelate tõhustamise eesmärgil sätestatud reeglistikud, näiteks Euroopa Liidu ökodisaini direktiiv 2009/125/EC, mille kohaselt on elektroonikatootjatel kohustus seejuures arendada võimalikult energiasäästlikke muundureid pidades samaaegselt silmas tootmise keskkonnasõbralikkust ja toote eluiga [1].

Tüüpiliste toitemuundurite põhikomponentideks on aladi, silukondensaator ning aktiivkomponendid – lülitustransistorid. Aktiivkomponentidega ehitatud muundurisse kuuluvad trafod ja regulaatorid, mille abil tagatakse väljundpinge parameetrid ja stabiilsus. Alaldi võimaldab muundada vahelduvvoolu siinuselise tsükliga antava toiteenergia pulseeriva kujuga alalisvooluks. Alaldile järgneva kondensaatori ja vajadusel filtri koostöös tekkinud pulsatsioonid silutakse. Seejuures seadme sisselülitamisel laetakse kondensaator kiiresti täis, et saavutada vahelduvooluvõrgus esinevat toitepinge hetkväärtust. Kondensaatori kiire laadimise tõttu leiavad aset kiired ja tugevad voolu siirdeprotsessid.

Sisselülitamisel esinevad voolutipud tõusevad märgatavale tugevusele ning võivad seejuures ulatuda normaaltalitlusega võrreldes mitmekümnekordsete väärtusteni. Tugevates võrkudes sellised lülitusvoolud erilisi probleeme ei tekita, kuid mikrovõrkudes võivad need põhjustada häiringuid. Sisselülitamisvoolude kestus on küll väga lühike, ent tugev vool mõjub korduvate lülituste järel siiski seadmetele kahjulikult. Lisaks tugevale voolule ohustab seadmete tööd voolu tõusuga kaasnev pinge langemine. Tugevad pinge ja voolu muutused vähendavad võimsuskadude tekkimisel muunduri efektiivsust ning kõrvalekalded tavatalitlusel rakenduvatest pinge ja voolu väärtustest kahjustavad muunduri komponente ning lühendavad seeläbi võivad tavalisest

tugevamad muutused põhjustada rikkeid ja kaitsefunktsioonide rakendumist ning sellega tekitada tahtmatuid katkestusi.

Käesolevas töös käsitletakse pooljuhtmuundurites esinevad seni väheselt uuritud sisselülitamisvoolusid ja nendest tingitud pingelohkusid. Seejuures on esmaseks ülesandeks edasiarendus mudelitele, mis aitaksid kirjeldada seadmete vajadust pidada vastu tugevatele hetkvooludele. Valminud mudeliga viiakse läbi katsed kahes osas – katsed mudeliga ja katsed tarvitiga. Mudeliga läbiviidavates katsetes leitakse võrgu parameetrid, mis hiljem arvestatakse maha tarvitiga läbiviidud katsete tulemustest eesmärgiga leida võimalikud täpsed andmed tarviti enda kohta. Kogutud katsetulemuste põhjal tehakse järeldused ning antud töö tulemusena selgitatakse välja, kuidas lühiajalised voolutipud mõjutavad kogu-hetkvoolu kujunemist ning kui suureks võivad hetkvoolude väärtused kujuneda toiteallika juures.

Töö teoreetiline osa tugineb Jan Kulikovi 2022. aasta magistritööl *„Seadmete lülitus-sööstvoolude profiilide analüüs ja mõju võrgule*" [2].

2 KATSETE ÜLESEHITUS

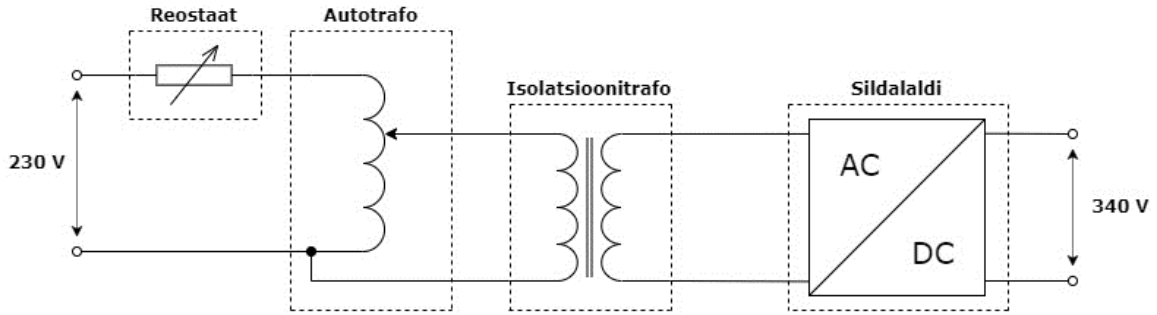
2.1 Katsemaketi koostamine

Katsete läbiviimiseks koostatakse katsemakett, mis võimalikult täpsete katsetulemuste leidmiseks peab seejuures imiteerima ideaalset tugevat võrku. Lisaks peab katsemakett ühilduma ükskõik millise katsetatava toiteplokiga ning erinevate toiteplokkide korral pinge stabiilsuses muutusi ilmneda ei tohi.

Loodava ideaalse allikana töötava mudeli juures on ühtlasi eesmärgiks saavutada võimalikult väike takistus ja induktiivsus, ent see-eest hoida mahtuvus kõrgel tasemel. Mudeli mahtuvus peab ületama ühendatava seadme sees oleva kondensaatori oodatavat mahtuvust vähemalt suurusjärgu võrra. Mudeli kõrge mahtuvus tagab toitepinge stabiilsuse ning seeläbi katseolude korduvuse.

Katsemakett on ehitatud spetsiaalsele trükkplaadile, et vältida ühendustena pikki juhtmeid, mis võivad põhjustada liigset induktiivsust. Komponentidest põhilised on lülitusi juhtiv Arduino Nano mikrokontroller, MOSFET transistorid, mille abil lülitusi korraldatakse ning kilekondensaatorid (kuus mahtuvusega 10 μF) ja elektrolüütkondensaatorid (kaheksa mahtuvusega 100 μF) suure mahtuvuse kujundamiseks. Maketil on kaks toitesisendit – üks lülituste juhtimise toiteks ning teine katsetatava toitemuunduri toiteks. Väljundeid on kokku neli, mis võimaldab maketiga ühendada samaaegselt mitu tarvitit. Katsemaketi foto on välja toodud käesoleva töö lisades (vt Lisa 1).

Maketi toiteahel koosneb elementidest joonisel 2.1, millega tagatakse vahelduvvoolu toitevõrgu pinge (230 V) muundamine alalispingeks tasemel 340 V. Toiteahela moodustavad vooluimpulsse piirav reostaat, pinget reguleerda võimaldav autotrafo, katsetusahelaid lahti sidestav isolatsioonitrafo ning sildalaldi.



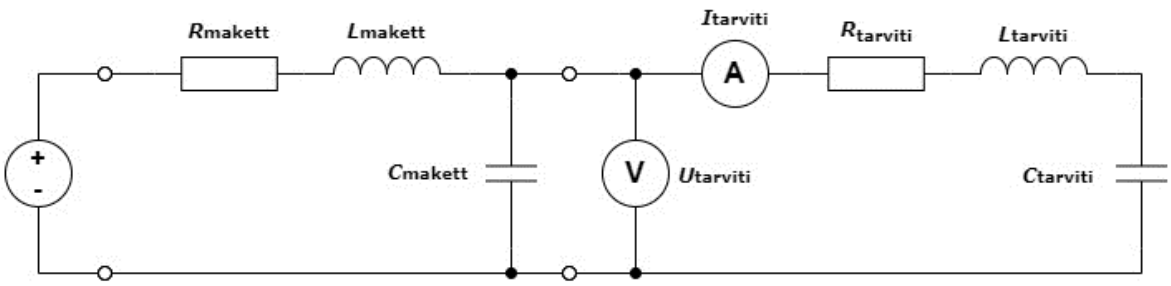
Joonis 2.1. Katsemaketi toiteahela skeem

Veendumaks mudeli toitepinge väärtuses on toiteklemmidele ühendatud pinge mõõtmiseks multimeeter. Mudeliga on mõõtmiste teostamiseks ühendatud voolu- ja pingeproovikud, mis on omakorda ühendatud ostsilloskoobiga, mida kasutades on võimalik leida pinge ja voolu lainekujud ja seeläbi ka otsitavad parameetrid.

Mõõteseadmetest olid täpsemalt kasutatavateks:

- multimeeter Beha-Amprobe AM-555-EUR;
- vooluproovik Rohde & Schwarz RT-ZC10;
- pingeproovik CalTest Electronics CT2593-1;
- ostsilloskoop Rohde & Schwarz RTH1004.

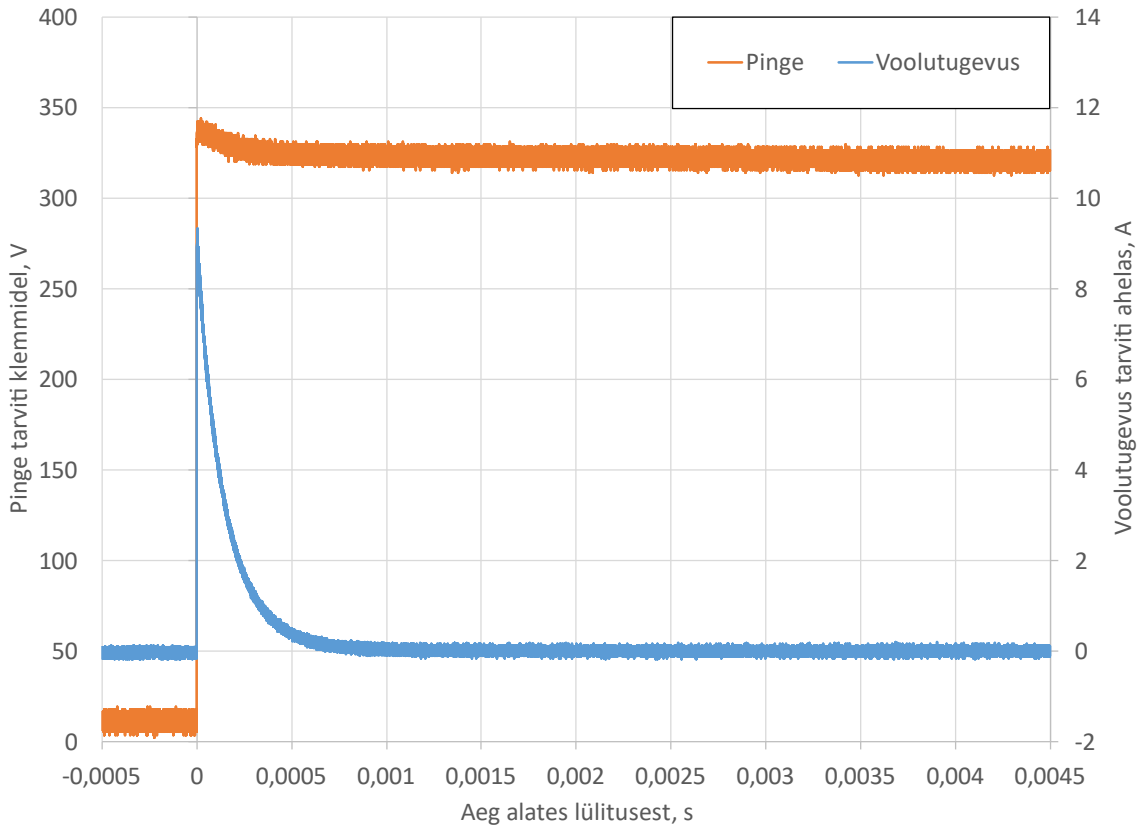
Loodud katsemaketil määratakse voolutugevust kujundava skeemi ekvivalentsed parameetrid ning seejärel on võimalik teostada lülitusvooludega seotud protsesside mõõtmisi. Mõõtmised antud mudeliga võimaldavad leida info nii üksiku tarviti kohta kui mitme ühendatud seadme korral. Katsemaketi skeem koos katsetel käsitletavate parameetritega on kujutatud alloleval joonisel (vt Joonis 2.2).



Joonis 2.2. Katsemaketi ja ühendatud tarviti skeem käsitletavate parameetritega

Veendumaks koostatud katsemaketi korrektsuses viidi maketiga läbi kontrollkatse ühe valitud tarvitiga (LED-lamp). Katsest nähtus, et leitud voolu- ja pingekujud osutusid

ootustele vastavateks (vt Joonis 2.3). Katsemakett näitas ülikiiret pinge ja vooltugevuse kasvu, mis tähendab, et loodud mudel tagab kiired lülitamisajad ja mõõteahelad töötavad probleemideta.



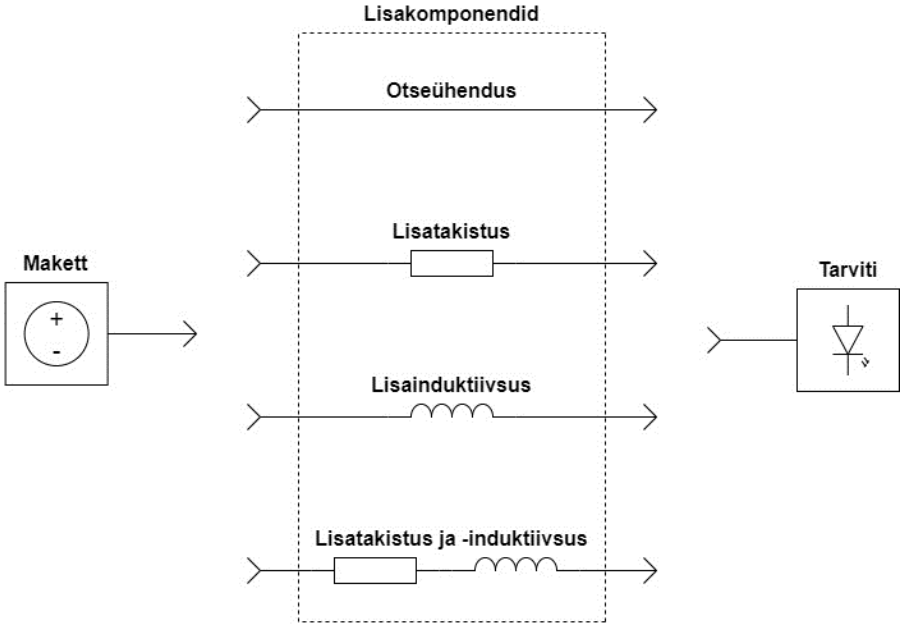
Joonis 2.3. Katsemaketi kontrollkatse LED-lambiga

2.2 Võrgu parameetrite selgitamine

Tarvitis rakenduvate pingete ja voolude siirdeprotsesside korrektseks hindamiseks on mõõtetulemustest tarvis eraldada võrgu parameetrid ehk allika parameetrid, mis ei iseloomusta tarvitit ennast. Võrgu mudelahela parameetrite (takistus, induktiivsus ja mahtuvus) välja selgitamiseks sooritatakse katseid mudeli endaga.

Võrgupoolse takistuse ja induktiivsuse leidmiseks ühendatakse katsemaketiga kaks võrdsete parameetritega tarvitit ning täiendavad komponendid, mille puhul on takistus ja induktiivsus fikseeritud ja juba teada (vt Joonis 2.4). Lisaks kasutatakse veel kolme

erinevat tarvitit ning rakendatakse maketi ja tarvitite vahel kolme erinevat ühendusviisi (vt Joonis 2.5). Nimetatud osi omavahel kombineerides viiakse läbi seeria katseid. Mudeliga on ühendatud ka ostsilloskoop, millega mõõtmisi läbi viiakse.



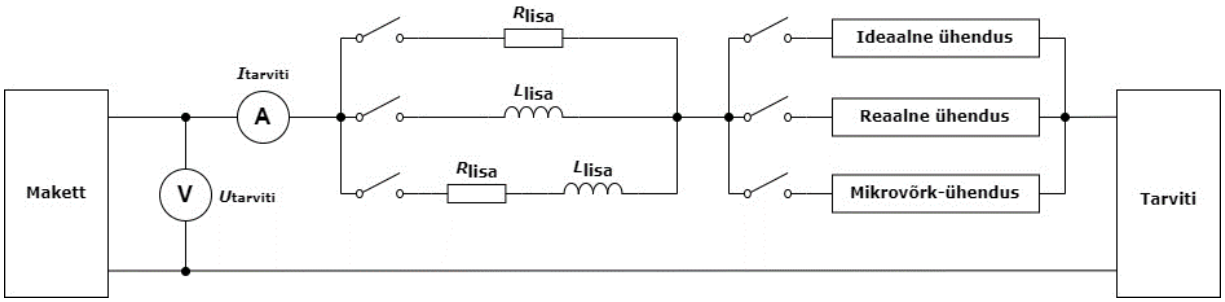
Joonis 2.4. Maketile lisanduvad komponendid

Täpsemalt on kolmeks erinevaks ühendusviisiks:

1) ideaalne ühendus, kus maketi ja tarviti vahelise ühenduse pikkus on minimaalne;

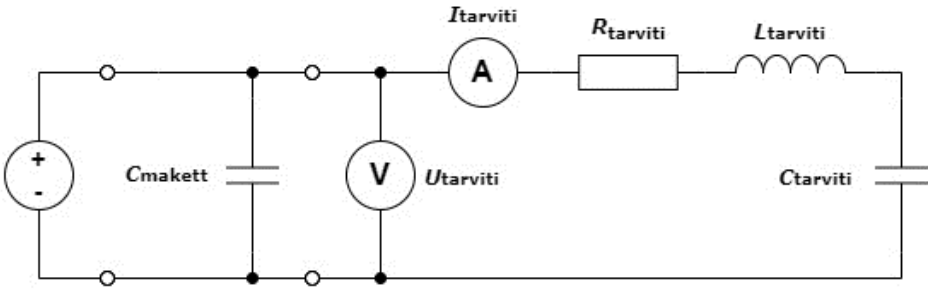
2) reaalne ühendus, kus maketi ja tarviti vahelise ühenduse pikkus vastab ligikaudselt klassikaliste koduseadmete toitejuhtmete pikkusele;

3) mikrovõrk-ühendus, kus maketi ja tarviti vaheline ühendus iseloomustab elumaja pikki ühendusi peakilbi ja seadme vahel.



Joonis 2.5. Rakendatavad täiendavad takistused ja induktiivsused ning ostsilloskoop

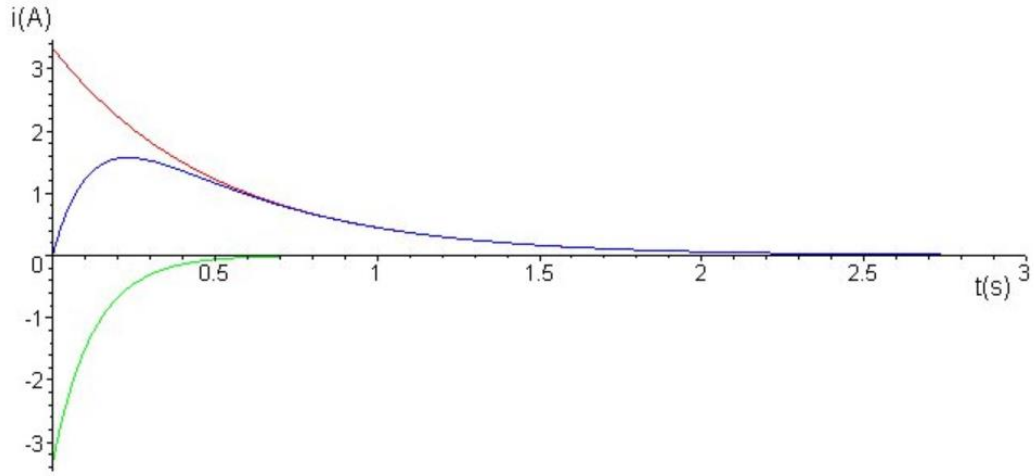
Leitud andmeid töödeldes on võimalik veenduda võrgupoolse takistuse ja induktiivsuse minimeeritud väärtustes ja mahtuvuse kõrgemas väärtuses ning võtta need kasutusele tarvitite katsetamisest saadud mõõtetulemuste arvutamisel. Seeläbi võrgu takistuse ja induktiivsuse välistamisega jäävad tarvitite katsetamisel uuritavateks olulisteks parameetriteks alloleval joonisel kujutatud suurused (vt Joonis 2.6).



Joonis 2.6. Katsemaketi ja ühendatud tarviti skeem võrgu minimeeritud parameetritega

Kindlaks määratud suurustega tarviti katsetamisel ja ostsilloskoobiga mõõtmisel leitakse tulemused lainekujuna. Ostsilloskoobi abil leitavaks eeldatavaks lainekujuks on ülesummutatud siirdeprotsess, mis on kujutatud joonisel 2.7, kuhu on lisaks kantud ka lülitusvoolu moodustavad voolu siirdeprotsessi osakomponendid. Siin on ülesummutatud protsessis lainekuju moodustajaks oleva kahe eksponentsiaalselt muutuva voolukomponendi seos kujutatud valemis (2.1), kus *A* ja *B* on integreerimiskonstandid [3]. Saadud mõõtmistulemustele tuginedes teostatakse arvutused, mille lõpptulemusena on takistus, induktiivsus ja mahtuvus koguväärtustest maha arvestatud teadaolevate suurustega tarvitite parameetrid.

$$i(t) = Ae^{s_1 t} + Be^{s_2 t} \tag{2.1}$$



Joonis 2.7. Ülesummutatud siirdeprotsess [3]

Arvutuste teostamiseks on esimesteks otsitavateks tõusu-ajakonstandid $\tau_{1,2}$ ehk ajalised suurused, mis näitavad, kui kiiresti jõuaks vool lineaarselt kasvades mõõdetud tippväärtuseni. Esimese ehk tõusu-ajakonstandi leidmiseks selgitatakse välja kulunud aeg Δt_1, millega vool tõusis 30%-ni tippväärtusest. Teise ehk langus-ajakonstandi jaoks leitakse ajavahemik Δt_2, mille jooksul vool langeb tippväärtuselt selle 37%-lise väärtuseni. Eelnevalt väljatoodud protsentide väärtused said valituks seetõttu, et nii kaua kulgeb protsess hinnanguliselt valdavalt lineaarselt. Leitud ajavahemike alusel arvutatakse otsitavad ajakonstandid lähtuvalt valemist (2.2). Seejärel kasutades valemit (2.3) leitakse ajakonstantide pöördväärtused $s_{1,2}$.

$$\begin{cases} \tau_1 = \dfrac{\Delta t_1}{0{,}3} \\ \tau_2 = -\dfrac{\Delta t_2}{0{,}63} \end{cases} \tag{2.2}$$

$$s_{1,2} = \frac{1}{\tau_{1,2}} \tag{2.3}$$

Rakendades RLC-ahelas Kirchoffi pingeseadust kujuneb välja võrrand valemis (2.4). Leitud võrrandi Laplace'i teisenduse töötlusel saab võrrand uue kuju valemis (2.5).

$$Ri + L\frac{di}{dt} + \frac{1}{C}\int_0^t idt = 0 \tag{2.4}$$

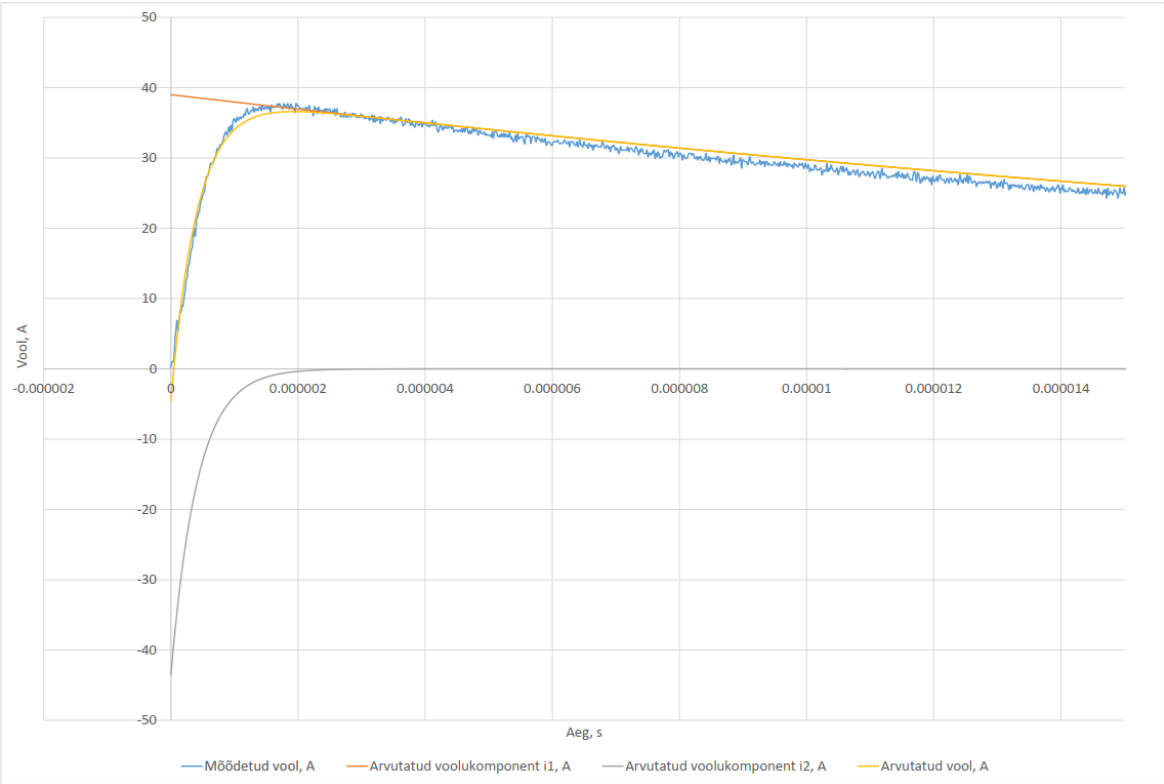
$$\frac{R}{L}s + s^2 + \frac{1}{LC} = 0 \tag{2.5}$$

Viies eelneva võrrandi Laplace'i teisenduse läbi kujule, kus lahendiks on *s*, omandab lahend kuju (2.6), milles a on sumbuvussagedus ning ω resonantssagedus. Tähelepanu tuleb juhtida asjaolule, et ülesummutatud siirdeprotsessi korral kehtib võrratus valemis (2.7).

$$s_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} = -a \pm \sqrt{a^2 - \omega^2} = -a \pm b \tag{2.6}$$

$$\left(\frac{R}{2L}\right)^2 > \frac{1}{LC} \tag{2.7}$$

Antud arvutusviise võib pidada küllaltki usaldusväärseks. Selle kinnituseks on esitatud registreeritud mõõtetulemustele tuginev siirdeprotsessi arvutus (vt Joonis 2.8), millel on võrreldavatena kujutatud mõõdetud ja samade arvutusmeetoditega leitud lülitusvoolud ning ühtlasi ka vastavad voolukomponendid.



Joonis 2.8. Mõõdetud ja arvutatud lülitusvoolude võrdlus [2]

2.3 Katsed tarvitite ja mikrovõrguga

Katsetamisele kuuluvate tarvitite valikul lähtutakse igapäevaselt majapidamises kasutatavatest seadmetest. Seejuures on oluline, et seadmetes oleksid kasutusel toitemuundurid, kus leiaksid aset kondensaatorite laadimisega seotud siirdeprotsessid. Võrdluse alla kuuluvad LED-lambid, mille võimsused varieeruvad. Katsetel mõõdetavateks suurusteks on tarvitit läbiv vool ning tarviti klemmidel esinev pinge.

Tarvitite katsetamisel mikrovõrgu tingimustes luuakse olukord, mis kujutaks majapidamises esinevaid reaalseid tingimusi. Nimelt ühendatakse sellisel juhul katsemaketiga mitu tarvitit ning lisatakse ühendusse elamu juhistikku imiteeriv komponent. Selliseks komponendiks võib valida näiteks suurema pikkusega kaabli. Antud katsetusviis võimaldab uurida ja anda hinnangu sisselülitamisvooludele reaalseid ja tõenäoliseid olusid arvesse võttes. Selgitamaks välja lülitusvoolude mõju ja nende iseloomu toiteallika läheduses võetakse kasutusele jõuelektroonne autonoomne toiteallikas. Selliseks allikaks sobib näiteks bensiin- või diiselgeneraator, millel on inverter-muundur vahelduvpinge tekitamiseks.

Seadmete katsetamisest saadud andmete hindamiseks viiakse nendega läbi arvutused. Esmalt selgitatakse välja katsetatud tarviti parameetrid arvestades mõõdetud väärtustest maha eelnevalt leitud võrgupoolsete parameetrite väärtused. Seeläbi on võimalik kohandatud mõõtetulemustega teostada tarvitite enda kohta täiendavad arvutuslikud analüüsid ja esitada hinnangud lülitusvooludega kaasnevate nähtuste kohta.

3 KATSETE TEOSTAMINE

3.1 Katsemaketi katsetamine

Katsemaketi parameetrite määramiseks teostati katsed kahe identse LED-lambiga. Ahela parameetrite määramise üldises katses lisati ahelasse kombinatsioonides lisakomponente täiendava, kindla väärtusega takistuse ja induktiivsuse sisseviimiseks. Lisandunud takisti takistuse väärtuseks oli 2 Ω ning induktiivpooli induktiivsuseks 4,6 μH. Katsetes rakendatud komponentide kombinatsioonid on välja toodud tabelis 3.1 ning katsetulemused tabelis 3.2. Selliselt oli võimalik teha järeldused ahela ekvivalentsete R, L, C parameetrite kohta.

Tabel 3.1. Katsete kombinatsioonid samasuguste LED-lampide korral

Katse nr	**Tarviti**	**Lisatakistus**	**Lisa-induktiivsus**
1.1	1 jadamisi LED-lamp	X	
1.2			X
1.3		X	X
1.4	2 rööbiti LED-lampi	X	
1.5			X
1.6		X	X

Tabel 3.2. Katsetulemused samasuguste LED-lampide korral

Katse nr	**Voolu tõusu aeg vahemikus 0-30% tippväärtusest Δt_1, s**	**Voolu languse aeg vahemikus 100-37% tippväärtusest Δt_2, s**	**Ajahetk voolu tippväärtusel t_{max}, s**	**Voolu tippväärtus I_{max}, A**
1.1	$9{,}0 \cdot 10^{-7}$	$7{,}0 \cdot 10^{-5}$	$1{,}3 \cdot 10^{-5}$	6,41
1.2	$5{,}4 \cdot 10^{-7}$	$7{,}7 \cdot 10^{-5}$	$1{,}4 \cdot 10^{-5}$	7,12
1.3	$6{,}4 \cdot 10^{-7}$	$7{,}1 \cdot 10^{-5}$	$2{,}0 \cdot 10^{-5}$	6,88
1.4	$8{,}0 \cdot 10^{-7}$	$8{,}9 \cdot 10^{-5}$	$1{,}7 \cdot 10^{-5}$	12,3
1.5	$1{,}2 \cdot 10^{-6}$	$8{,}7 \cdot 10^{-5}$	$1{,}7 \cdot 10^{-5}$	13,2
1.6	$1{,}2 \cdot 10^{-6}$	$8{,}7 \cdot 10^{-5}$	$1{,}8 \cdot 10^{-5}$	12,3

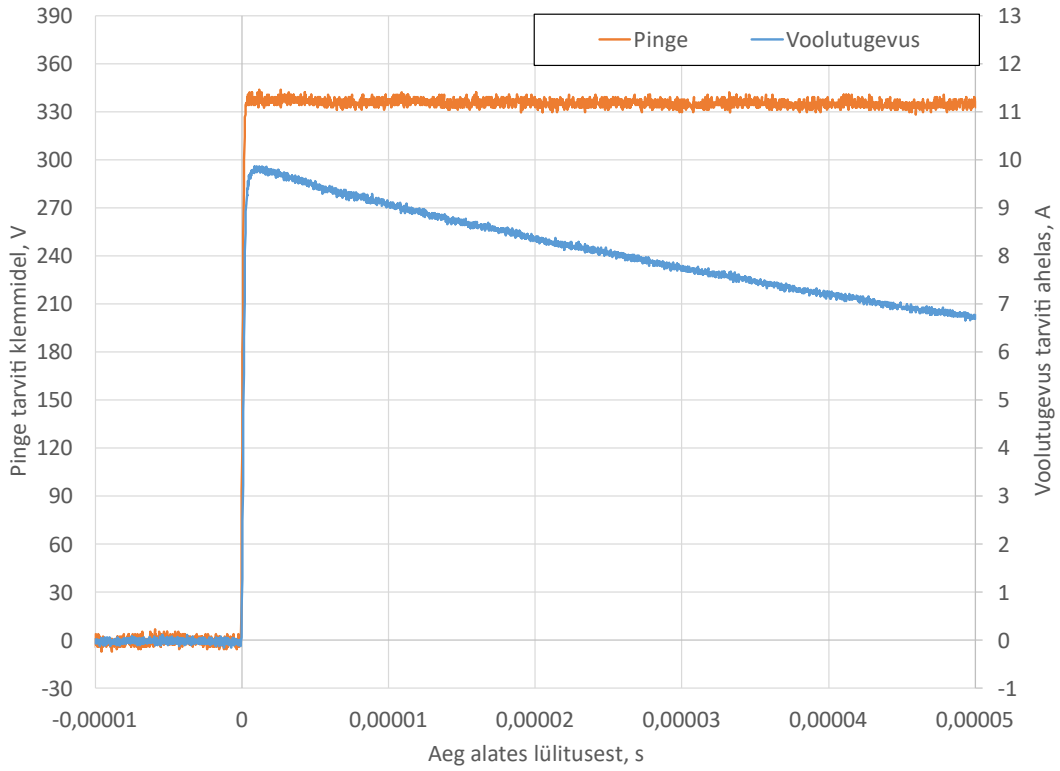
Selgitamaks välja katsemaketi enda parameetrid viidi läbi seeria katseid, kus maketiga ühendati tarvititeks kolm erinevat LED-lampi. Maketi ja tarviti vahele ühendati ka

täiendavad komponendid, mis koosnesid kas ainult takistusest, ainult induktiivsusest või mõlemast ning lisaks kasutati erinevaid ühendusviise. Katsete kombinatsioonid on kujutatud tabelis 3.3.

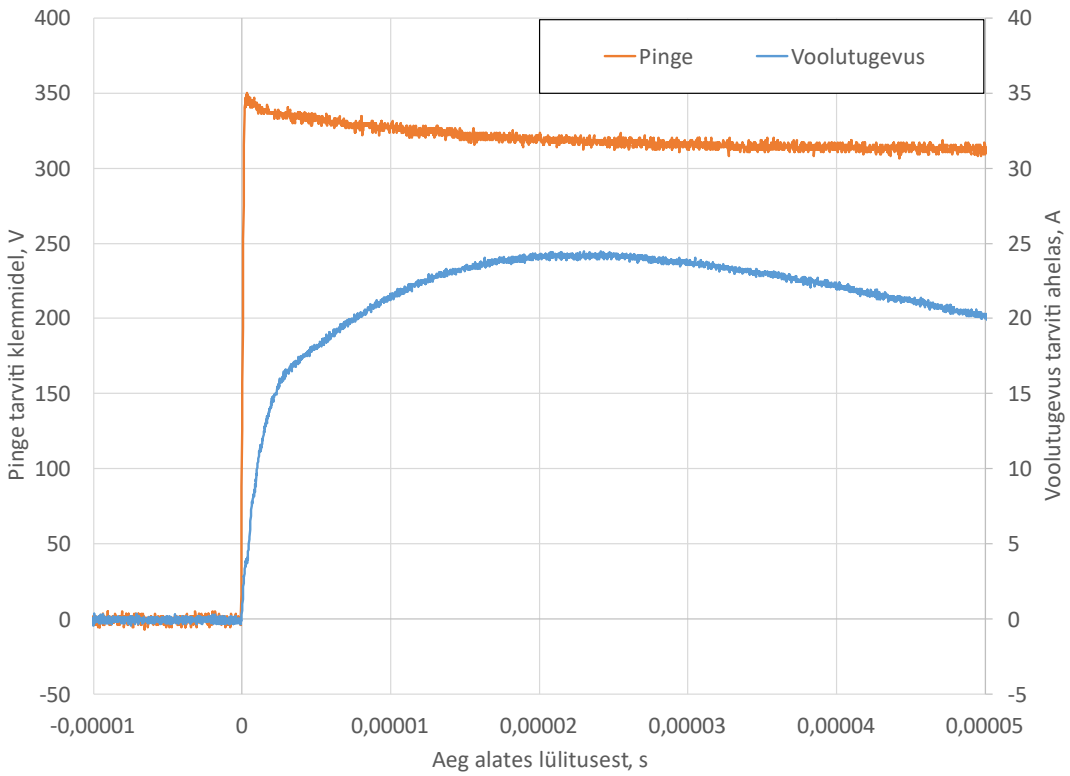
Kokku viidi läbi 18 katset ning saadud tulemuste graafilised näited on kujutatud joonistel 3.1 ja 3.2 ning arvulised tulemused kantud tabelisse 3.4.

Tabel 3.3. Katsete kombinatsioonid erinevate LED-lampide korral

Katse nr	**Tarviti**	**Lisatakistus**	**Lisa-induktiivsus**	**Ideaalne ühendus**	**Reaalne ühendus**	**Mikrovõrk-ühendus**
2.1	LED-lamp nr 1	X		X		
2.2			X			
2.3		X	X			
2.4	LED-lamp nr 1	X			X	
2.5			X			
2.6		X	X			
2.7	LED-lamp nr 1	X				X
2.8			X			
2.9		X	X			
2.10	LED-lamp nr 2	X		X		
2.11			X			
2.12		X	X			
2.13	LED-lamp nr 3	X		X		
2.14			X			
2.15		X	X			
2.16	LED-lampide nr 1, 2 ja 3 koosühendus	X				X
2.17			X			
2.18		X	X			



Joonis 3.1. Maketi katsetmine LED-lambiga nr 1, täiendava takistuse ja reaalse ühendusega



Joonis 3.2. Maketi katsetamine LED-lampide nr 1, 2 ja 3 koosühenduse, täiendava induktiivsuse ja mikrovõrk-ühendusega

Tabel 3.4. Katsetulemused erinevate LED-lampide korral

Katse nr	Voolu tõusu aeg vahemikus 0-30% tippväärtusest Δt_1, s	Voolu languse aeg vahemikus 100-37% tippväärtusest Δt_2, s	Ajahetk voolu tippväärtusel t_{max}, s	Voolu tippväärtus I_{max}, A
2.1	$8{,}0 \cdot 10^{-8}$	$1{,}4 \cdot 10^{-4}$	$1.0 \cdot 10^{-6}$	9,86
2.2	$1{,}6 \cdot 10^{-7}$	$1{,}3 \cdot 10^{-4}$	$1.5 \cdot 10^{-6}$	10,0
2.3	$1{,}4 \cdot 10^{-7}$	$1{,}6 \cdot 10^{-4}$	$1.3 \cdot 10^{-6}$	9,49
2.4	$8{,}0 \cdot 10^{-8}$	$1{,}4 \cdot 10^{-4}$	$8{,}2 \cdot 10^{-7}$	8,69
2.5	$1{,}4 \cdot 10^{-7}$	$1{,}4 \cdot 10^{-4}$	$1{,}4 \cdot 10^{-6}$	9,18
2.6	$1{,}4 \cdot 10^{-7}$	$1{,}4 \cdot 10^{-4}$	$1{,}9 \cdot 10^{-6}$	8,81
2.7	$1{,}0 \cdot 10^{-7}$	$1{,}4 \cdot 10^{-4}$	$3{,}3 \cdot 10^{-6}$	8,45
2.8	$1{,}6 \cdot 10^{-7}$	$1{,}4 \cdot 10^{-4}$	$4{,}2 \cdot 10^{-6}$	9,06
2.9	$1{,}4 \cdot 10^{-7}$	$1{,}4 \cdot 10^{-4}$	$3{,}2 \cdot 10^{-6}$	8,66
2.10	$3{,}3 \cdot 10^{-7}$	$7{,}0 \cdot 10^{-5}$	$2{,}4 \cdot 10^{-5}$	11,8
2.11	$1{,}4 \cdot 10^{-7}$	$1{,}3 \cdot 10^{-4}$	$1{,}2 \cdot 10^{-6}$	9,70
2.12	$3{,}2 \cdot 10^{-6}$	$6{,}7 \cdot 10^{-5}$	$2{,}5 \cdot 10^{-5}$	11,8
2.13	$6{,}0 \cdot 10^{-8}$	$1{,}4 \cdot 10^{-4}$	$7{,}4 \cdot 10^{-7}$	8,95
2.14	$1{,}2 \cdot 10^{-7}$	$1{,}4 \cdot 10^{-4}$	$1{,}1 \cdot 10^{-6}$	9,56
2.15	$1{,}2 \cdot 10^{-7}$	$1{,}4 \cdot 10^{-4}$	$9{,}0 \cdot 10^{-7}$	8,69
2.16	$5{,}0 \cdot 10^{-7}$	$1{,}2 \cdot 10^{-4}$	$2{,}2 \cdot 10^{-5}$	21,2
2.17	$6{,}4 \cdot 10^{-7}$	$1{,}1 \cdot 10^{-4}$	$2{,}3 \cdot 10^{-5}$	24,5
2.18	$6{,}0 \cdot 10^{-7}$	$1{,}2 \cdot 10^{-4}$	$2{,}4 \cdot 10^{-5}$	21,7

3.2 Mikrovõrgu olukordade katsetamine

Hindamaks seadmetel esinevaid lülitusvoolude summaarset mõju mikrovõrgu talitlusele, valiti katsetatava võrgu moodustavateks osadeks mikrovõrgule omaste parameetritega komponendid ning teostati katsed. Katsetulemuste objektiivsuse tagamise eesmärgil jälgiti, et sisendparameetrina lülitushetkel esinev pinge hetkväärtus oleks igal katsel võimalikul lähedasel tasemel.

Eesmärgiga jäljendada lülitusi mikrovõrgus ning selgitada välja lülitusvoolude iseloom rakendati katsetel erinevaid toiteviise. Seejuures selgitamaks lülitusvoolude kujunemist kaasaegsete jõuelektroonsete autonoomsete toiteallikaga ahelates kasutati inverteriga varustatud bensiingeneraatorit. Mikrovõrku jäljendati erinevate pikkustega kaablitega

ning mitme tarviti koosühendusega. Koos lülitatavateks tarvititeks valiti 15 LED-lampi võimsustega vahemikus 8-14 W.

Katsetel rakendatud erinevad toiteviisid olid järgnevad:

- ühendus võimalikult ideaalse võrguga ehk loodud katsemaketiga;
- otseühendus reaalse võrguga ehk NRG-õppehoone võrguga;
- ühendus läbi 5 kVA isolatsioonitrafo;
- ühendus autonoomse allikaga ehk inverteriga generaatoriga.

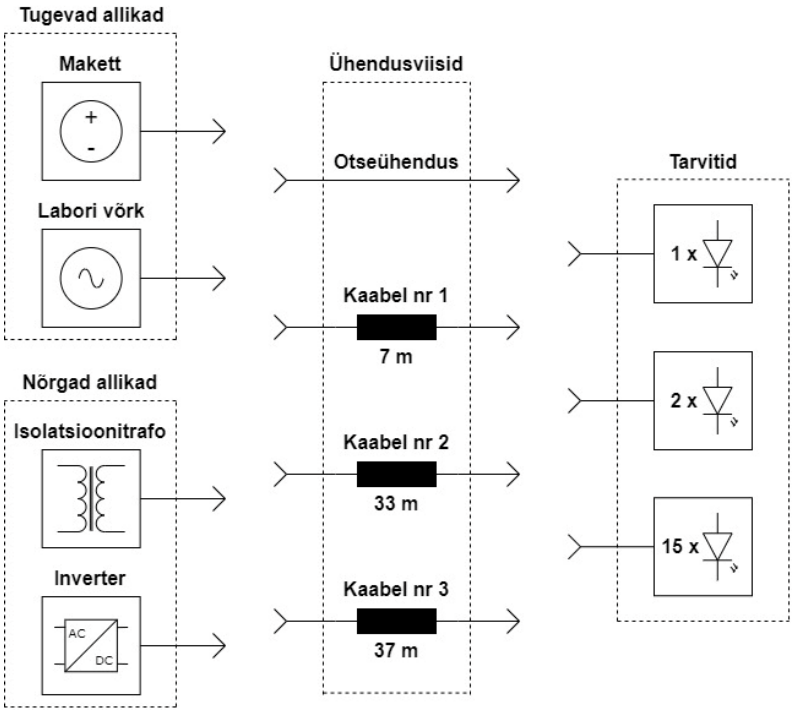
Kasutatud kaablite pikkused olid järgnevad (ristlõige 1,5 mm^2):

- kaabel nr 1 – 7 meetrit;
- kaabel nr 2 – 33 meetrit;
- kaabel nr 3 – 37 meetrit rullis.

Valitud generaatoriks oli täpsemalt Kohler-SDMO I-PRO 2000 C5, mille olulisemad elektrilised parameetrid on järgnevad [4]:

- sagedus – 50 Hz;
- nimivõimsus – 2 kW;
- nimipinged – 230 V vahelduvvoolul ja 12 V alalisvoolul;
- faaside arv – 1.

Katsete seeriad koosnesid erinevatest kombinatsioonidest, kus erinesid kasutatavad ühendus kaablid ja lülitatavate tarvitite arv (vt Joonis 3.3). Lähtuvalt tarvitite arvust viidi läbi katsed kahe ja ühe tarvitiga ning kõigi ehk viieteistkümne tarvitiga. Veendumaks katsetulemuste korrektsuses korraldati iga kombinatsiooni puhul kolm katset.



Joonis 3.3. Mikrovõrgu olukordi moodustavad komponendid

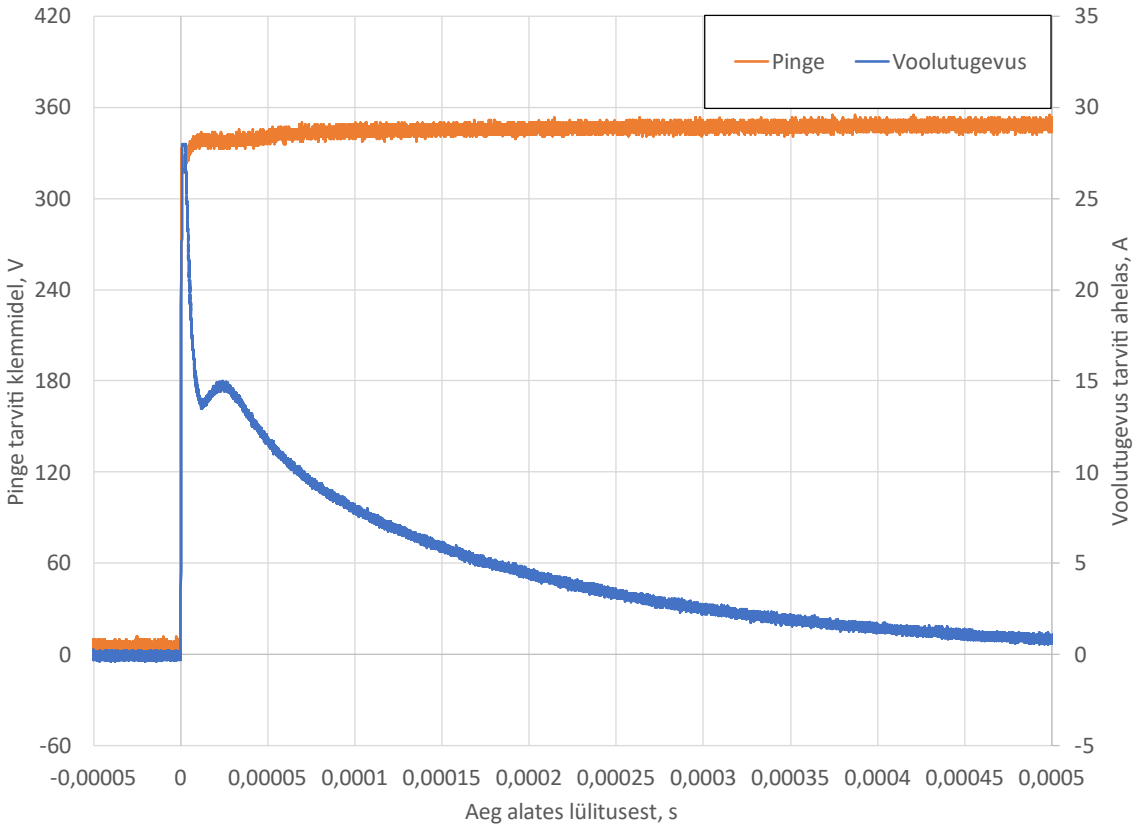
Esmalt viidi läbi katsed ideaalset võrku imiteerides ehk kasutades rajatud katsemaketti. Maketil uuriti lülitusvoolusid erinevate ühenduste korral ning lisaks iga ühendusviisi juures rakendati kahe LED-lambi ühenduste variatsioone ning 15 LED-lambi koosühendust (vt Tabel 3.5). Katsetulemused on kantud tabelisse 3.6 ning näide katsel esinenud pinge- ka voolu-lainekujudest on joonisel 3.4.

Tabel 3.5. Kombinatsioonid tarvitite katsetamisel katsemaketiga

Katse nr	Ühendusviis	Tarviti
3.1	Kaabel nr 1	LED-lamp nr 1
3.2		LED-lamp nr 2
3.3		LED-lambid nr 1 ja 2
3.4		15 LED-lampi
3.5	Kaabel nr 2	LED-lamp nr 1
3.6		LED-lamp nr 2
3.7		LED-lambid nr 1 ja 2
3.8		15 LED-lampi
3.9	Kaabel nr 3	LED-lamp nr 1
3.10		LED-lamp nr 2
3.11		LED-lambid nr 1 ja 2
3.12		15 LED-lampi

Tabel 3.6. Katsetulemused tarvitite katsetamisel katsemaketiga

Katse nr	**Voolu tõusu aeg vahemikus 0-30% tippväärtusest Δt_1, s**	**Voolu languse aeg vahemikus 100-37% tippväärtusest Δt_2, s**	**Ajahetk voolu tippväärtusel t_{max}, s**	**Voolu tippväärtus I_{max}, A**
3.1	$1{,}2 \cdot 10^{-7}$	$1{,}8 \cdot 10^{-5}$	$8{,}4 \cdot 10^{-6}$	10,5
3.2	$5{,}8 \cdot 10^{-6}$	$1{,}4 \cdot 10^{-4}$	$8{,}6 \cdot 10^{-7}$	17,2
3.3	$2{,}0 \cdot 10^{-7}$	$5{,}9 \cdot 10^{-5}$	$9{,}2 \cdot 10^{-7}$	28,0
3.4	$4{,}6 \cdot 10^{-7}$	$2{,}4 \cdot 10^{-4}$	$4{,}7 \cdot 10^{-6}$	85,5
3.5	$1{,}2 \cdot 10^{-7}$	$1{,}7 \cdot 10^{-5}$	$1{,}0 \cdot 10^{-5}$	10,5
3.6	$2{,}0 \cdot 10^{-7}$	$1{,}8 \cdot 10^{-4}$	$2{,}0 \cdot 10^{-6}$	13,9
3.7	$5{,}4 \cdot 10^{-7}$	$8{,}3 \cdot 10^{-5}$	$4{,}1 \cdot 10^{-6}$	24,6
3.8	$1{,}6 \cdot 10^{-6}$	$3{,}0 \cdot 10^{-4}$	$1{,}5 \cdot 10^{-5}$	74,9
3.9	$2{,}4 \cdot 10^{-7}$	$1{,}9 \cdot 10^{-5}$	$1{,}0 \cdot 10^{-5}$	14,1
3.10	$1{,}8 \cdot 10^{-7}$	$2{,}0 \cdot 10^{-4}$	$2{,}0 \cdot 10^{-6}$	13,7
3.11	$6{,}0 \cdot 10^{-7}$	$9{,}6 \cdot 10^{-5}$	$4{,}1 \cdot 10^{-6}$	23,7
3.12	$1{,}7 \cdot 10^{-6}$	$3{,}1 \cdot 10^{-4}$	$1{,}5 \cdot 10^{-5}$	74,4



Joonis 3.4. Katse maketiga, kaabliga nr 1 ning LED-lampidega nr 1 ja 2

Tugevat vahelduvvoolu-jaotusvõrku esindava olukorra katsed teostati kasutades õppehoone toitevõrku. Kuna antud võrgus juba eksisteerivad pikad ühendused, siis täiendavaid kaableid katsesse ei lisatud ning muutusid seega vaid tarvitite kombinatsioonid. Katsetulemused on esitatud tabelis 3.7 ning näide katsel esinenud pinge- ka voolu-lainekujudest on joonisel 3.5.

Katsetamisele kuuluvate kombinatsioonide järjekord oli järgnev:

1) katse LED-lambiga nr 1;

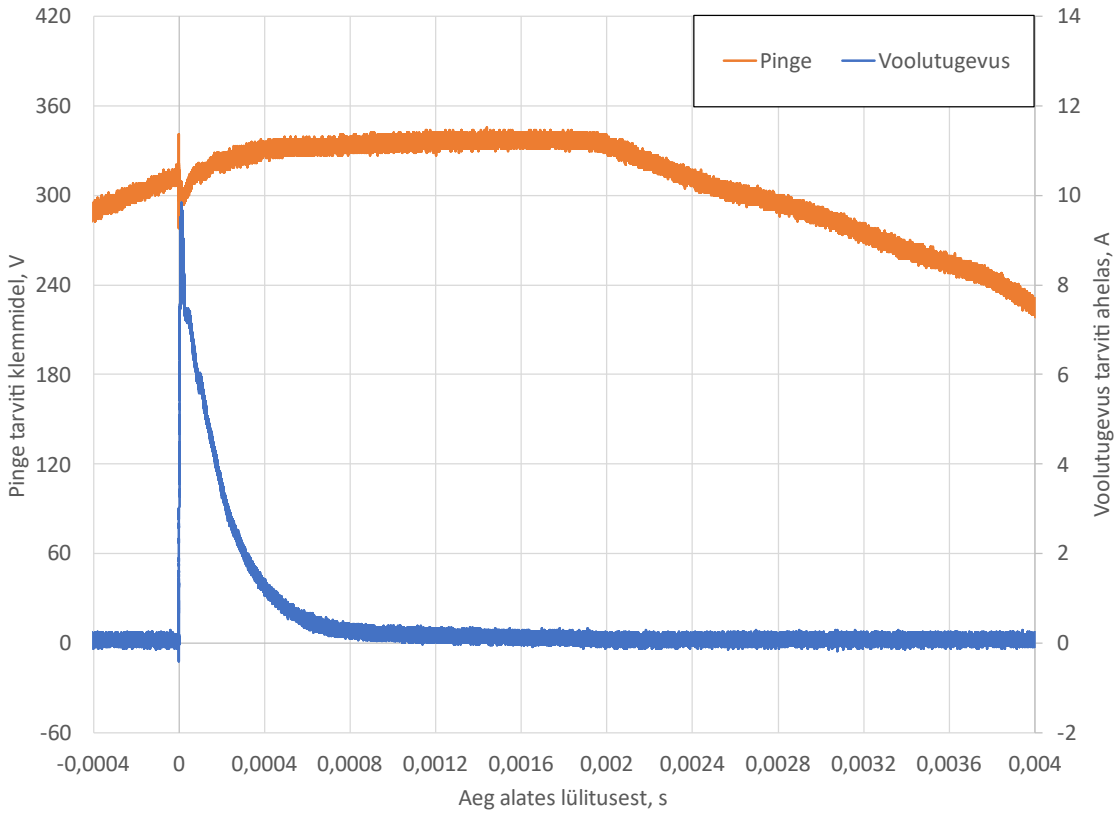
2) katse LED-lambiga nr 2;

3) katse LED-lampidega nr 1 ja 2;

4) katse 15 LED-lambiga.

Tabel 3.7. Katsetulemused tarvitite katsetamisel otseühenduses labori võrguga

Katse nr	**Voolu tõusu aeg vahemikus 0-30% tippväärtusest Δt_1, s**	**Voolu languse aeg vahemikus 100-37% tippväärtusest Δt_2, s**	**Ajahetk voolu tippväärtusel t_{max}, s**	**Voolu tippväärtus I_{max}, A**
4.1	$7{,}0 \cdot 10^{-7}$	$2{,}8 \cdot 10^{-5}$	$8{,}9 \cdot 10^{-6}$	6,6
4.2	$8{,}6 \cdot 10^{-7}$	$2{,}1 \cdot 10^{-4}$	$3{,}6 \cdot 10^{-5}$	9,1
4.3	$1{,}1 \cdot 10^{-6}$	$1{,}9 \cdot 10^{-4}$	$1{,}1 \cdot 10^{-5}$	9,8
4.4	$6{,}2 \cdot 10^{-7}$	$2{,}5 \cdot 10^{-4}$	$8{,}6 \cdot 10^{-6}$	68,2

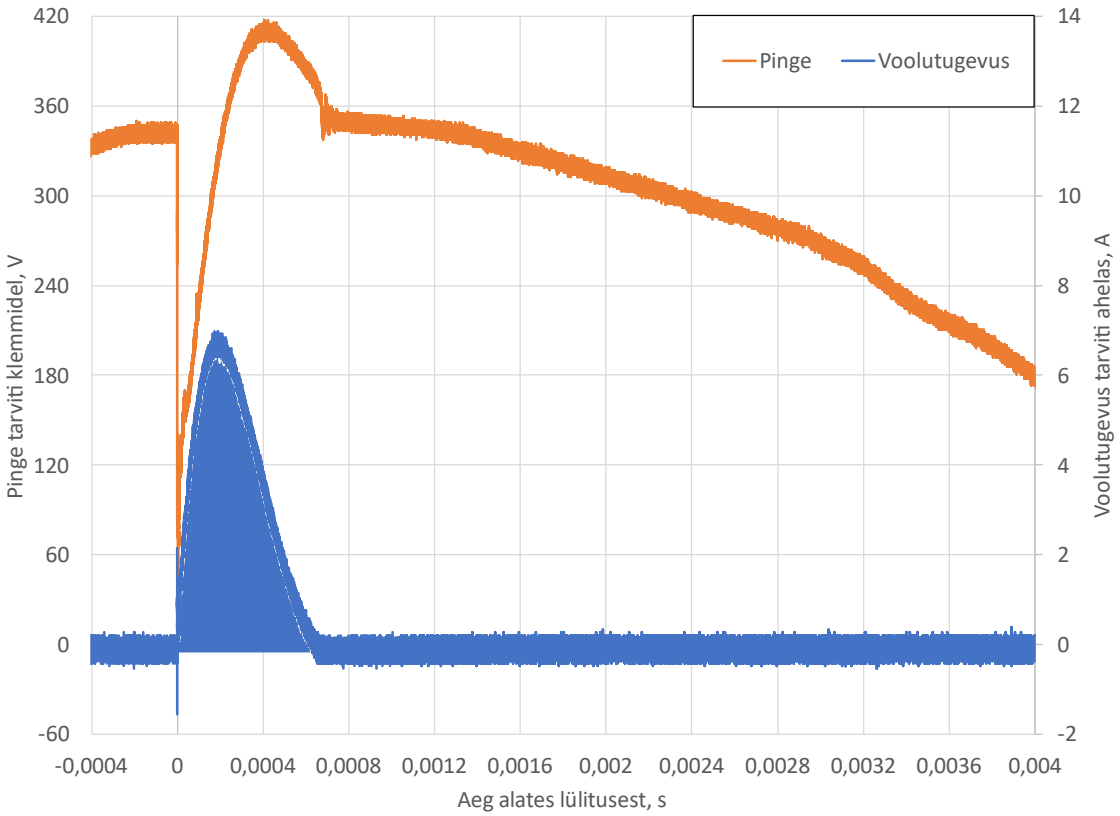


Joonis 3.5. Katse otseühenduses labori võrguga ning LED-lampidega nr 1 ja 2

Seejärel teostati katsed kasutades vahelduvvoolu toiteahelas suhteliselt väikese võimsusega (5 kVA) isolatsioonitrafot. Kasutatavad tarvitite kombinatsioonid ning nende järjekord jäi võrreldes eelmise katseseeriaga samaks. Katsetulemused on kantud tabelisse 3.8 ning näide katsel esinenud pinge- ka voolu-lainekujudest on joonisel 3.6.

Tabel 3.8. Katsetulemused tarvitite katsetamisel ühenduses labori võrguga läbi isolatsioonitrafo

Katse nr	**Voolu tõusu aeg vahemikus 0-30% tippväärtusest Δt_1, s**	**Voolu languse aeg vahemikus 100-37% tippväärtusest Δt_2, s**	**Ajahetk voolu tippväärtusel t_{max}, s**	**Voolu tippväärtus I_{max}, A**
5.1	$9{,}6 \cdot 10^{-6}$	$7{,}3 \cdot 10^{-5}$	$7{,}7 \cdot 10^{-5}$	3,7
5.2	$2{,}7 \cdot 10^{-5}$	$2{,}9 \cdot 10^{-4}$	$1{,}9 \cdot 10^{-4}$	5,0
5.3	$2{,}2 \cdot 10^{-5}$	$2{,}6 \cdot 10^{-4}$	$2{,}0 \cdot 10^{-4}$	7,0
5.4	$1{,}0 \cdot 10^{-4}$	$6{,}4 \cdot 10^{-4}$	$7{,}0 \cdot 10^{-4}$	27,9



Joonis 3.6. Katse ühenduses labori võrguga läbi isolatsioonitrafo ning LED lampidega nr 1 ja 2

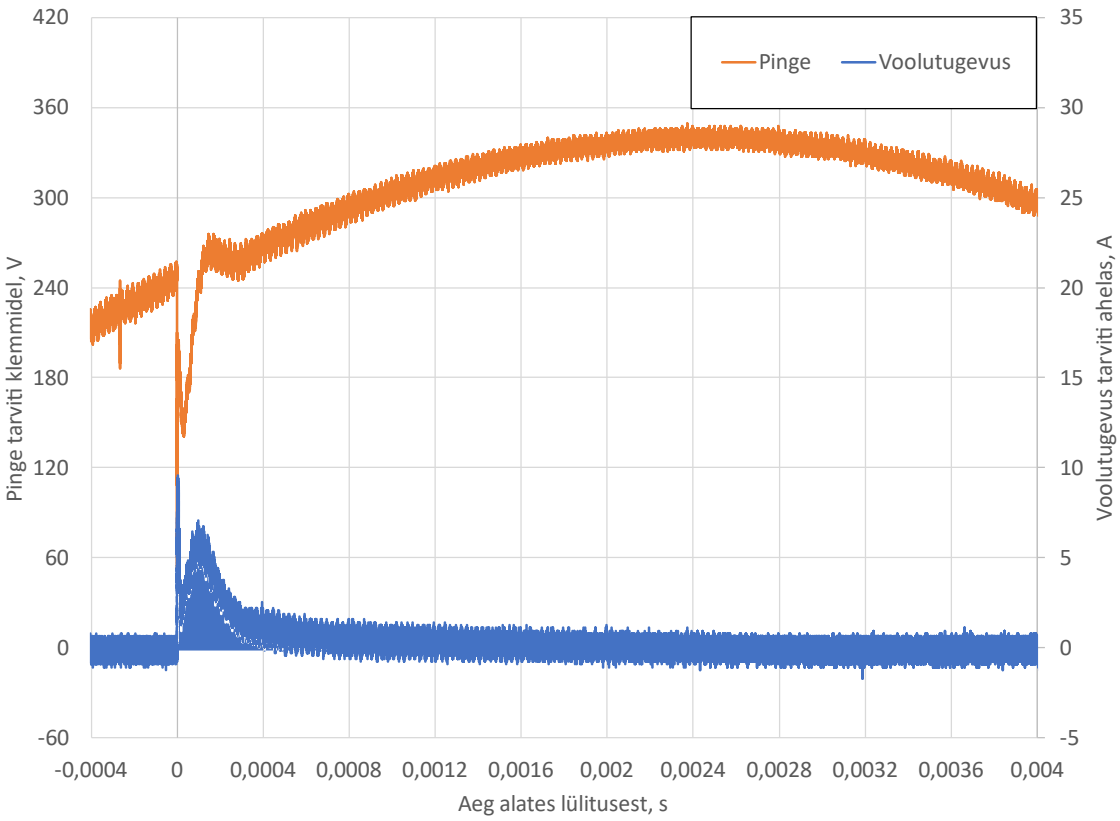
Viimases seerias viidi läbi katsed kasutades toiteks autonoomset pooljuht-toitemuunduriga (inverteriga) generaatorit. Katsetel rakendatud kombinatsioonid ja nende järjekord on välja toodud tabelis 3.9. Katsetulemused on kantud tabelisse 3.10 ning näide ühest katsest joonisel 3.7.

Tabel 3.9. Kombinatsioonid tarvitite katsetamisel autonoomse toitemuunduriga generaatoriga

Katse nr	**Ühendusviis**	**Tarviti**
6.1	Kaabel nr 1	LED-lamp nr 1
6.2		LED-lambid nr 1 ja 2
6.3		15 LED-lampi
6.4	Kaabel nr 2	LED-lamp nr 1
6.5		LED-lambid nr 1 ja 2
6.6		15 LED-lampi
6.7	Kaabel nr 3	LED-lamp nr 1
6.8		LED-lambid nr 1 ja 2
6.9		15 LED-lampi

Tabel 3.10. Katsetulemused tarvitite katsetamisel autonoomse toitemuunduriga generaatoriga

Katse nr	**Voolu tõusu aeg vahemikus 0-30% tippväärtusest Δt_1, s**	**Voolu languse aeg vahemikus 100-37% tippväärtusest Δt_2, s**	**Ajahetk voolu tippväärtusel t_{max}, s**	**Voolu tippväärtus I_{max}, A**
6.1	$8{,}6 \cdot 10^{-7}$	$5{,}8 \cdot 10^{-5}$	$3{,}6 \cdot 10^{-6}$	11,8
6.2	$7{,}2 \cdot 10^{-7}$	$1{,}8 \cdot 10^{-4}$	$4{,}1 \cdot 10^{-6}$	9,6
6.3	$1{,}2 \cdot 10^{-6}$	$1{,}4 \cdot 10^{-3}$	$5{,}1 \cdot 10^{-6}$	22,8
6.4	$1{,}1 \cdot 10^{-6}$	$6{,}4 \cdot 10^{-5}$	$5{,}9 \cdot 10^{-6}$	9,6
6.5	$1{,}2 \cdot 10^{-6}$	$2{,}0 \cdot 10^{-4}$	$5{,}9 \cdot 10^{-6}$	11,8
6.6	$7{,}5 \cdot 10^{-6}$	$8{,}2 \cdot 10^{-4}$	$5{,}3 \cdot 10^{-6}$	19,6
6.7	$8{,}2 \cdot 10^{-7}$	$5{,}5 \cdot 10^{-5}$	$5{,}9 \cdot 10^{-6}$	11,3
6.8	$1{,}7 \cdot 10^{-6}$	$1{,}9 \cdot 10^{-4}$	$7{,}1 \cdot 10^{-6}$	9,6
6.9	$1{,}4 \cdot 10^{-6}$	$1{,}1 \cdot 10^{-3}$	$8{,}7 \cdot 10^{-6}$	19,5



Joonis 3.7. Katse generaatoriga, kaabliga nr 1 ning LED-lampidega nr 1 ja 2

4 KATSETULEMUSTE ANALÜÜS

4.1 Aegsuuruste arvutamine

Katsetel salvestatud lülitusvoolude lainekujudest selgitatakse katsemaketi katsetamisel esinenudvoolu muutumise kiirused $\Delta t_{1,2}$ ja neile tuginevalt ajakonstandid $\tau_{1,2}$ (vt Jaotis 2.2). Ajakonstantide leidmine on arvutuslikult kujutatud valemites (4.1) ja (4.2) ning saadud tulemused on esitatud tabelites 4.1 ja 4.2.

$$\tau_1 = \frac{\Delta t_1}{0{,}3} = \frac{9{,}0 \cdot 10^{-7}}{0{,}3} = 3{,}0 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{s} \tag{4.1}$$

$$\tau_2 = \frac{\Delta t_2}{0{,}63} = \frac{7{,}0 \cdot 10^{-5}}{0{,}63} = 1{,}1 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{s} \tag{4.2}$$

Eelnevalt arvutatud suurustele leitakse seejärel nende pöördväärtused $s_{1,2}$. Arvutuskäik on kujutatud valemites (4.3) ja (4.4). Nimetud arvutatud suurused on kantud on kantud tabelitesse 4.1 ja 4.2.

$$s_1 = \frac{1}{\tau_1} = \frac{1}{3{,}0 \cdot 10^{-6}} = 3{,}3 \cdot 10^{5} \tag{4.3}$$

$$s_2 = \frac{1}{\tau_2} = \frac{1}{1{,}1 \cdot 10^{-4}} = 9{,}0 \cdot 10^{3} \tag{4.4}$$

Tabel 4.1. Arvutatud aegsuurused samasuguste LED-lampide korral

Katse nr	τ_1**, s**	τ_2**, s**	s_1	s_2
1.1	$3{,}0 \cdot 10^{-6}$	$1{,}1 \cdot 10^{-4}$	$3{,}3 \cdot 10^{5}$	$9{,}0 \cdot 10^{3}$
1.2	$1{,}8 \cdot 10^{-6}$	$1{,}2 \cdot 10^{-4}$	$5{,}6 \cdot 10^{5}$	$8{,}2 \cdot 10^{3}$
1.3	$2{,}1 \cdot 10^{-6}$	$1{,}1 \cdot 10^{-4}$	$4{,}7 \cdot 10^{5}$	$8{,}9 \cdot 10^{3}$
1.4	$2{,}7 \cdot 10^{-6}$	$1{,}4 \cdot 10^{-4}$	$3{,}8 \cdot 10^{5}$	$7{,}1 \cdot 10^{3}$
1.5	$4{,}0 \cdot 10^{-6}$	$1{,}4 \cdot 10^{-4}$	$2{,}5 \cdot 10^{5}$	$7{,}2 \cdot 10^{3}$
1.6	$4{,}0 \cdot 10^{-6}$	$1{,}4 \cdot 10^{-4}$	$2{,}5 \cdot 10^{5}$	$7{,}2 \cdot 10^{3}$

Tabel 4.2. Arvutatud aegsuurused erinevate LED-lampide korral

Katse nr	τ_1, **s**	τ_2, **s**	s_1	s_2
2.1	$2{,}7 \cdot 10^{-7}$	$2{,}2 \cdot 10^{-4}$	$3{,}8 \cdot 10^{6}$	$4{,}5 \cdot 10^{3}$
2.2	$5{,}3 \cdot 10^{-7}$	$2{,}0 \cdot 10^{-4}$	$1{,}9 \cdot 10^{6}$	$4{,}9 \cdot 10^{3}$
2.3	$4{,}7 \cdot 10^{-7}$	$2{,}5 \cdot 10^{-4}$	$2{,}1 \cdot 10^{6}$	$4{,}0 \cdot 10^{3}$
2.4	$2{,}7 \cdot 10^{-7}$	$2{,}2 \cdot 10^{-4}$	$3{,}8 \cdot 10^{6}$	$4{,}5 \cdot 10^{3}$
2.5	$4{,}7 \cdot 10^{-7}$	$2{,}2 \cdot 10^{-4}$	$2{,}1 \cdot 10^{6}$	$4{,}5 \cdot 10^{3}$
2.6	$4{,}7 \cdot 10^{-7}$	$2{,}2 \cdot 10^{-4}$	$2{,}1 \cdot 10^{6}$	$4{,}6 \cdot 10^{3}$
2.7	$3{,}3 \cdot 10^{-7}$	$2{,}2 \cdot 10^{-4}$	$3{,}0 \cdot 10^{6}$	$4{,}6 \cdot 10^{3}$
2.8	$5{,}3 \cdot 10^{-7}$	$2{,}2 \cdot 10^{-4}$	$1{,}9 \cdot 10^{6}$	$4{,}6 \cdot 10^{3}$
2.9	$4{,}7 \cdot 10^{-7}$	$2{,}2 \cdot 10^{-4}$	$2{,}1 \cdot 10^{6}$	$4{,}6 \cdot 10^{3}$
2.10	$1{,}1 \cdot 10^{-5}$	$1{,}1 \cdot 10^{-4}$	$9{,}1 \cdot 10^{4}$	$9{,}0 \cdot 10^{3}$
2.11	$4{,}7 \cdot 10^{-7}$	$2{,}0 \cdot 10^{-4}$	$2{,}1 \cdot 10^{6}$	$4{,}9 \cdot 10^{3}$
2.12	$1{,}1 \cdot 10^{-5}$	$1{,}1 \cdot 10^{-4}$	$9{,}4 \cdot 10^{4}$	$9{,}4 \cdot 10^{3}$
2.13	$2{,}0 \cdot 10^{-7}$	$2{,}2 \cdot 10^{-4}$	$5{,}0 \cdot 10^{6}$	$4{,}5 \cdot 10^{3}$
2.14	$4{,}0 \cdot 10^{-7}$	$2{,}2 \cdot 10^{-4}$	$2{,}5 \cdot 10^{6}$	$4{,}5 \cdot 10^{3}$
2.15	$4{,}0 \cdot 10^{-7}$	$2{,}2 \cdot 10^{-4}$	$2{,}5 \cdot 10^{6}$	$4{,}5 \cdot 10^{3}$
2.16	$1{,}7 \cdot 10^{-6}$	$1{,}9 \cdot 10^{-4}$	$6{,}0 \cdot 10^{5}$	$5{,}3 \cdot 10^{3}$
2.17	$2{,}1 \cdot 10^{-6}$	$1{,}7 \cdot 10^{-4}$	$4{,}7 \cdot 10^{5}$	$5{,}9 \cdot 10^{3}$
2.18	$2{,}0 \cdot 10^{-6}$	$1{,}8 \cdot 10^{-4}$	$5{,}0 \cdot 10^{5}$	$5{,}4 \cdot 10^{3}$

4.2 Mudeli takistuse ja induktiivsuse arvutamine

Mudeli takistuse R_m leidmisel lähtutakse varasemalt leitud esimesest ajakonstandist τ_1 leituna kahe samasuguse LED-lambiga katsetest ning lisatakistuse ja induktiivsuse väärtustest R_{lisa} ja L_{lisa}. Arvutamisel võetakse aluseks valem (4.5), kusjuures ekvivalentsete takistuste R_{ekv} ja induktiivsuste L_{ekv} kujunemine on kujutatud valemis (4.6).

$$\tau_1 = \frac{L_{ekv}}{R_{ekv}} \tag{4.5}$$

$$\begin{cases} L_{ekv} = L_m + L_{lisa} \\ R_{ekv} = R_m + R_{lisa} \end{cases} \tag{4.6}$$

Järgnevalt on moodustatud eelnevatest seostest lähtuvalt võrrandsüsteem valemis (4.7), kus τ_{11} tähistab esimest ajakonstanti leituna lisatakistusega katsest ning τ_{12} esimest ajakonstanti leituna lisainduktiivsusega katsest.

$$\begin{cases} \dfrac{L_m}{R_m + R_{lisa}} = \tau_{11} \\ \dfrac{L_m + L_{lisa}}{R_m} = \tau_{12} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \dfrac{L_m}{R_m + 2} = 3{,}0 \cdot 10^{-6} \\ \dfrac{L_m + 4{,}6 \cdot 10^{-6}}{R_m} = 1{,}8 \cdot 10^{-6} \end{cases} \tag{4.7}$$

Võrrandsüsteemi lahendamisel selgitatud mudeli summaarsete takistuste R_m ja induktiivsuste L_m väärtustele tuginevalt viidi seejärel läbi kontrollarvutused valemiga (4.8) hindamaks leitud väärtuste õigsust. Kontrollarvutustega selgitatakse väärtus suurusele τ_{13} ehk ajakonstandile, mis on leitud lisatakistuse ja -induktiivsusega katsest ning võrreldakse saadud tulemusi tabelis 4.1 antud tulemustega. Suuruste R_m, L_m ja τ_{13} arvutatud väärtused on kantud tabelitesse 4.3 ja 4.4.

$$\tau_{13} = \frac{L_{mt} + L_{lisa}}{R_{mt} + R_{lisa}} = \frac{20{,}5 \cdot 10^{-6} + 4{,}6 \cdot 10^{-6}}{8{,}8 + 2} = 2{,}3 \cdot 10^{-6}\ s \tag{4.8}$$

Kontrollarvutuses leitud τ_{13} väärtused erinevad algses arvutuses leitud väärtustest enamjaolt maksimaalselt ligi 0,1 µs võrra, mida võib lugeda tühiseks erinevuseks. Seega võib katsemaketi takistuste R_m ja induktiivsuste L_m leitud väärtusi pidada usaldusväärseteks.

Tabel 4.3. Arvutatud takistused ja induktiivsused samasuguste LED lampide korral

Katse	R_{ekv}, **Ω**	L_{ekv}, **µH**
1 LED-lamp	28,6	2,35
2 LED-lampi	58,7	3,94

Tabel 4.4. Arvutatud takistused ja induktiivsused erinevate LED-lampide korral

Katse	R_{ekv}, **Ω**	L_{ekv}, **µH**
LED-lamp nr 1, ideaalne ühendus	19,8	5,9
LED-lamp nr 1, reaalne ühendus	25,7	7,5
LED-lamp nr 1, mikrovõrk-ühendus	26,3	9,3
LED-lamp nr 1, ideaalne ühendus	-	-
LED-lamp nr 1, ideaalne ühendus	25,0	5,4
LED-lambid nr 1, 2 ja 3, mikrovõrk-ühendus	20,0	3,7

4.3 Mudeli mahtuvuse arvutamine

Ekvivalentse mahtuvuse leidmisel lähtutakse algsetest katsetulemustest, kus arvutustel kasutatavateks on pinge ja voolu hetkväärtused *i(t)* ajavahemikus t_0 kuni t_1 ning pinge tarviti klemmidel (t_1). See on ühtlasi pinge U_C, mis iseloomustab silukondensaatoritel esineva pinge taset laadimisvoolu sumbudes. Aegsuurus t_0 kirjeldab ajahetke, kui voolutugevus alustab tõusmist ning t_1 ajahetke, kui voolu siirdeprotsess on sumbunud. Seejuures on suurus t_1 kirjeldatav ka läbi ajakonstandi τ_2 valemiga (4.9).

$$t_1 = t_0 + 3\tau_2 = 2{,}4 \cdot 10^{-6} + 3 \cdot 1{,}1 \cdot 10^{-4} = 3{,}4 \cdot 10^{-4}\ s \tag{4.9}$$

Kondensaatorites salvestunud laeng Q_C on leitav integraaliga valemis (4.10) ning seejärel on võimalik valemi (4.11) kaudu arvutada ka summaarsed mahtuvused C_{ekv}, mis on kantud tabelitesse 4.5 ja 4.6.

$$Q_C = \int_{t_0}^{t_1} i(t)\, dt = \int_{2{,}4 \cdot 10^{-6}}^{3{,}4 \cdot 10^{-4}} i(t)\, dt = 2{,}8 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{C} \tag{4.10}$$

$$C_{ekv} = \frac{Q_C}{U_C} = \frac{2{,}8 \cdot 10^{-4}}{343{,}9} = 0{,}8 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{F} \tag{4.11}$$

Tabel 4.5.Arvutatud mahtuvused samasuguste LED lampide korral

Katse	**C_{ekv}, µF**
1 LED-lamp	1,61
2 LED-lampi	3,37

Tabel 4.6 Arvutatud mahtuvused erinevate LED lampide korral

Katse	**C_{ekv}, µF**
LED-lamp nr 1, ideaalne ühendus	4,21
LED-lamp nr 1, reaalne ühendus	3,81
LED-lamp nr 1, mikrovõrk-ühendus	3,77
LED-lamp nr 1, ideaalne ühendus	-
LED-lamp nr 1, ideaalne ühendus	4,12
LED-lambid nr 1, 2 ja 3, mikrovõrk-ühendus	11,09

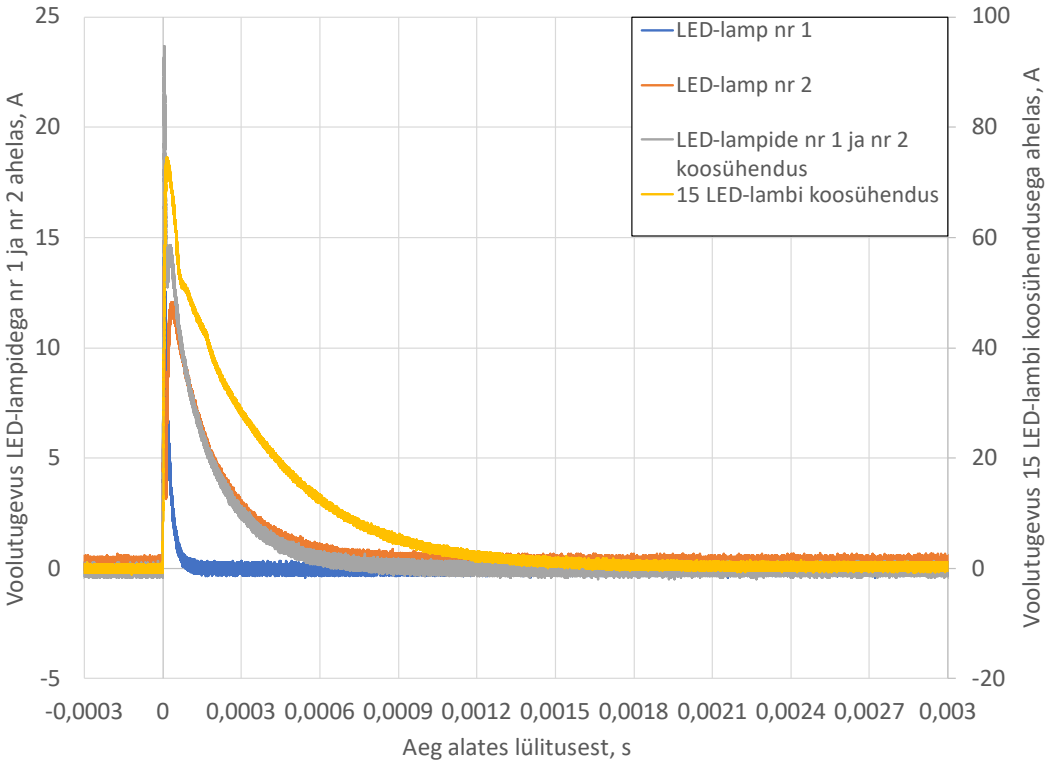
5 HINNANGUD

5.1 Tarvitite mõju lülitusvoolule

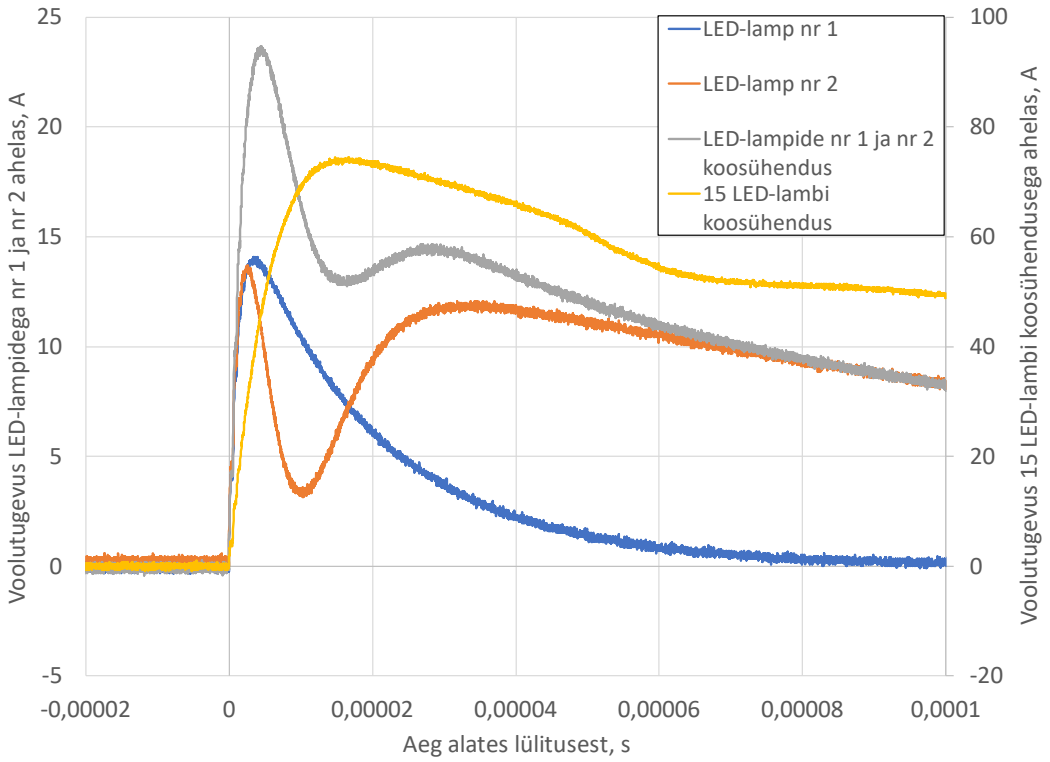
Rakendades mikrovõrku erineva arvu tarviteid selgub nende mõju lülitusvoolu profiilile ja tugevusele. Läbiviidud katsete tulemuste alusel ilmneb, kuidas koormuse suurenemine mõjutab lülitusvoolu väärtust ning siirdeprotsessi kestust (vt Joonis 5.1), kusjuures suuremate koormuste korral (15 LED-lambi samaaegne sisselülitus) võivad lülitusvoolude hetväärtused küündida kuni 75 A-ni. Märkimisväärne on ka suuremate koormuste korral voolu sumbumiseks kuluv aeg, mis teatud juhtudel on lausa 2 ms.

Vaadeldes täpsemalt lülitusvoolude lainekuju lülituste hetkedle saab kirjeldada, kuidas lülitusvoolud mitme tarviti korral moodustuvad. Jooniselt 5.2 nähtub, kuidas LED-lampide nr 1 ja nr 2 koosühenduse korral mõlema lambi erldiseisvad voolu hetkväärtused summeeruvad. Seeläbi suureneb lülitusvoolu väärtus mõlema lülitusvoolu võrra ning moodustub kombineeritud profiil.

Lisaks on täheldatav ka mitme tarviti rööpühenduses, eriti 15 tarviti korral esineva lülitusvoolu aeglasem tõus ning laugem voolutipp, mis viitab ka varasemalt mainitud aeglasemale sumbumisele. Antud olukord on tõenäoliselt tingitud asjaolust, kus mitme tarviti induktiivsed komponendid liituvad ning mõjutavad seetõttu voolu tõusu selle kiirust piirates.



Joonis 5.1. Lülitusvoolud erineva tarvitite arvu korral kasutades maketti ja kaablit nr 3



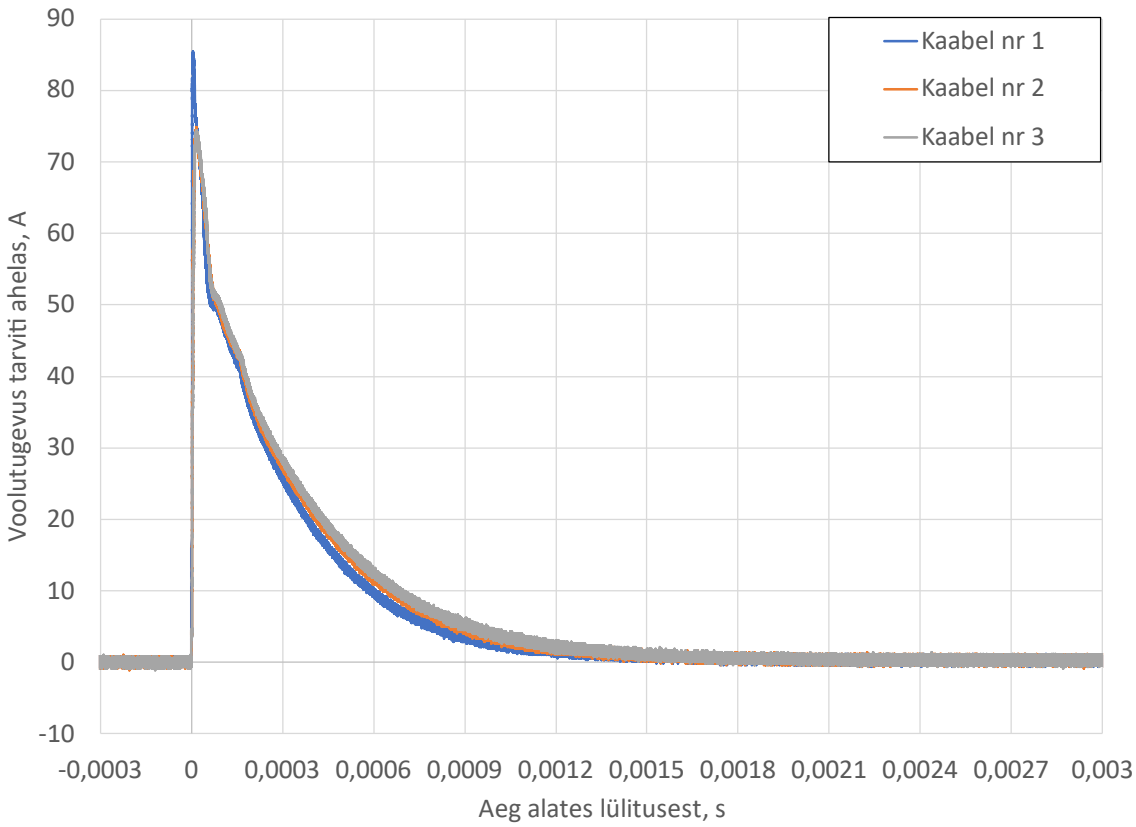
Joonis 5.2. Lülitusvoolud erineva tarvitite arvu korral kasutades maketti ja kaablit nr 3 (suurendatud vaade)

5.2 Ühendusviiside mõju lülitusvoolule

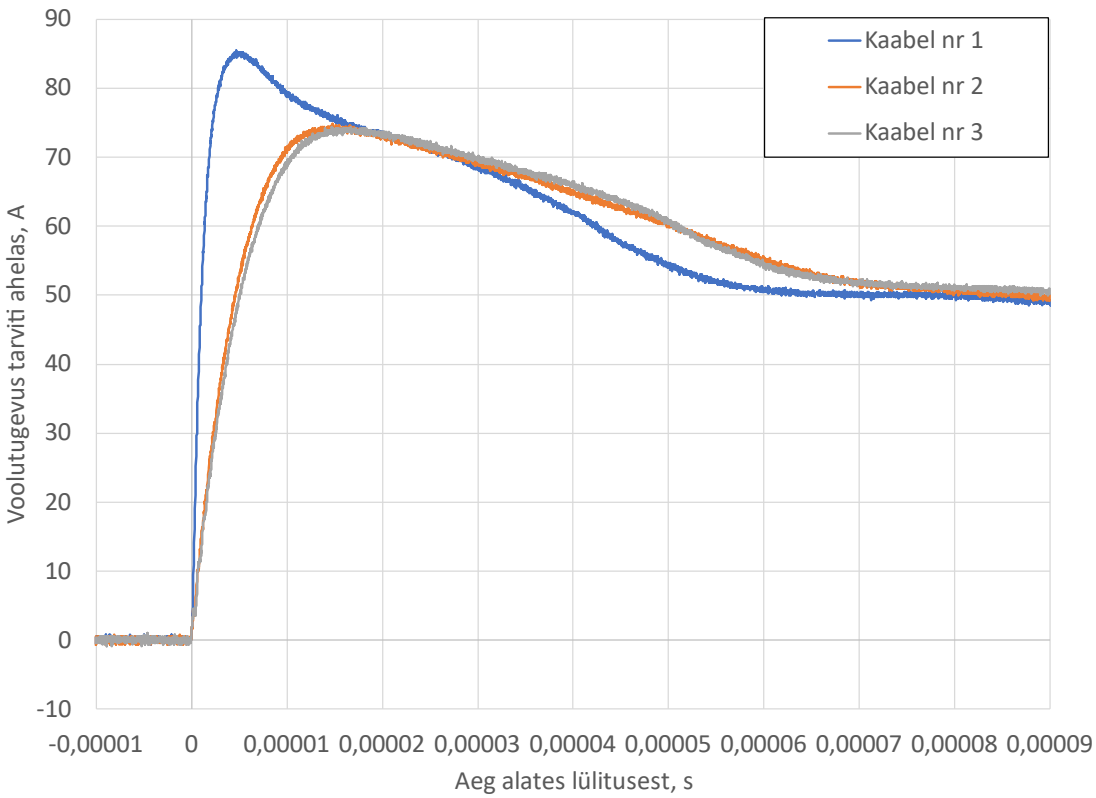
Teostades katseid erineva pikkusega kaablitega ei nähtu esmapilgul, et kaablite pikkusel oleks lülitusvooludele märgatav mõju, st voolude tugevused ja profiilid jäävad hinnanguliselt samadeks (vt Joonis 5.3).

Selgub, et kaablite pikkused omavad lülitusvooludele mõnevõrra sarnast mõju võrreldes lülitatavate tarvitite arvuga. Nimelt on jooniselt 5.4 nähtav, kuidas kõige lühema ehk 7 m pikkuse kaabli nr 1 korral on voolu tõus märksa kiirem kui teiste kaablite korral ning ka voolu pööre langemisele järsem. Mõnevõrra kiirem näib olevat ka voolu tõus kaablil nr 2 võrreldes kaabliga nr 3, kuigi viimane on vaid 4 m võrra pikem. Voolu kasvu piiravaks teguriks siin on induktiivsus, mis on pikematel kaablitel suurema väärtusega. Voolutugevuse kasvu määrava ajakonstandi väärtust kirjeldab valem (5.1).

$$\tau = \frac{L}{R} \tag{5.1}$$



Joonis 5.3. Lülitusvoolud erinevate ühendusviiside korral kasutades maketti ja 15 tarvitit



Joonis 5.4. Lülitusvoolud erinevate ühendusviiside korral kasutades maketti ja 15 tarvitit (suurendatud vaade)

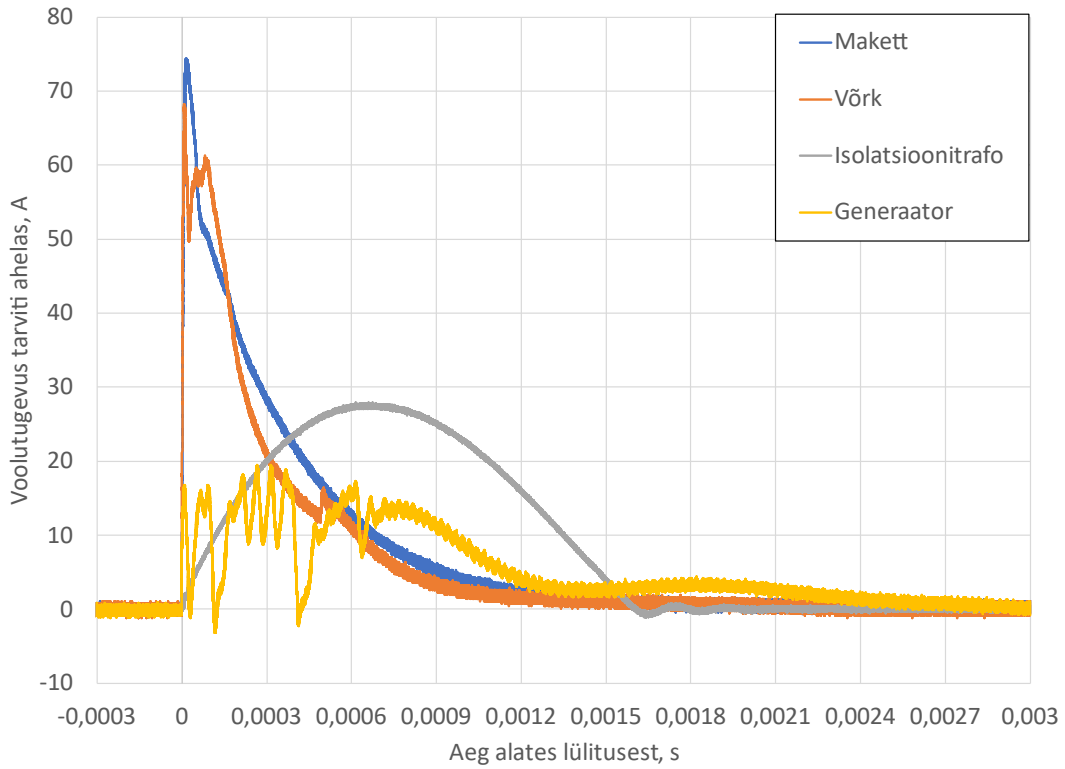
5.3 Toiteviiside mõju lülitusvoolule

Katsetades lülitusvoolude tekitamiseks erinevaid toiteallikaid osutusid tulemused küllaltki varieeruvaks (vt Joonis 5.5). Rakendades toiteks tugevaid allikaid, töö käigus rajatud maketti ning otseühendust labori võrguga olid tulemused suhteliselt sarnased, kuid nõrka võrku imiteerivate isolatsioonitrafo ja generaatori kasutamisel ilmnesid selgelt eristatavad ja iseloomulikud jooned.

Loodud maketi ehk võimalikult ideaalse pingeallika ja tugeva võrgu korral on täheldatav voolu väga stabiilne tõus ja sumbumine, mida on kirjeldatud muuhulgas eelnenud jaotiste joonistel. Kasutades toiteks otseühendust õppehoone võrgust järgib lülitusvoolu suurus ja profiil ideaalse pingeallikaga sama trendi. Kuigi on märgata mõningaid ebastabiilsusi, peab siiski labori võrk lülitusvoolule hästi vastu ning seega võib labori võrku pidada tugevaks võrguks.

Ühendades tarvitite ja labori võrgu vahele isolatsioonitrafo, on voolukujus selgelt märgata antud trafost tingitud mõju. Trafo suur induktiivsus aeglustab voolutugevuse kasvu, mille tõttu moodustub pika kestusega siirdeprotsess, kus lõpliku sumbumiseni jõutakse pikema ajaga kui 2 ms. Isolatsioonitrafo sümmeetrilisel ja poolperioodi meenutaval lainekujul on voolu tippväärtuseks ligi 28 A, mis on enam kui kaks korda väiksem võrreldes lülitusvooludega kasutades maketti ja otseühendust võrguga.

Pooljuhtmuunduriga varustatud generaatori katsetest ilmnes selgelt antud seadme funktsioon piirata tugevaid voolusid. Nähtub, et voolu tõustes maksimaalse lubatud piirini, mis on ligikaudu 20 A, katkestatakse vool ajutiselt selle madaldamiseks. Kuna rakendatud koormus on suur, ei piisa vaid ühest taastamisprotsessist ning vool jääb ligi 0,7 ms pikkuseks ajavahemikuks võnkuma. Seejärel algab sumbumisprotsess, mille kestvus on tunduvalt pikem kui 2 ms. Seega võib väita, et antud generaator oli kasutatud toiteallikatest lülitusvooludele kõige tundlikum. Ühtlasi on oodata sellise toiteallika poolt genereeritava pinge suurimat mõjutamist lülitusvoolude tõttu.



Joonis 5.5. Lülitusvoolud erinevate toiteviiside korral kasutades 15 tarvitit ja kaablit nr 3

5.4 Pingelohkude kujunemine

Pingelohkusid vaadeldi salvestatud pinge- ja voolu lainekujudena erinevate toiteviiside korral ning näited käsitletavatest pingelohkudest on toodud joonisel 5.6. Alloleval joonisel kujutatud pingelohud esinesid joonisel 5.5 kujutatud lülitusvoolude tagajärjel.

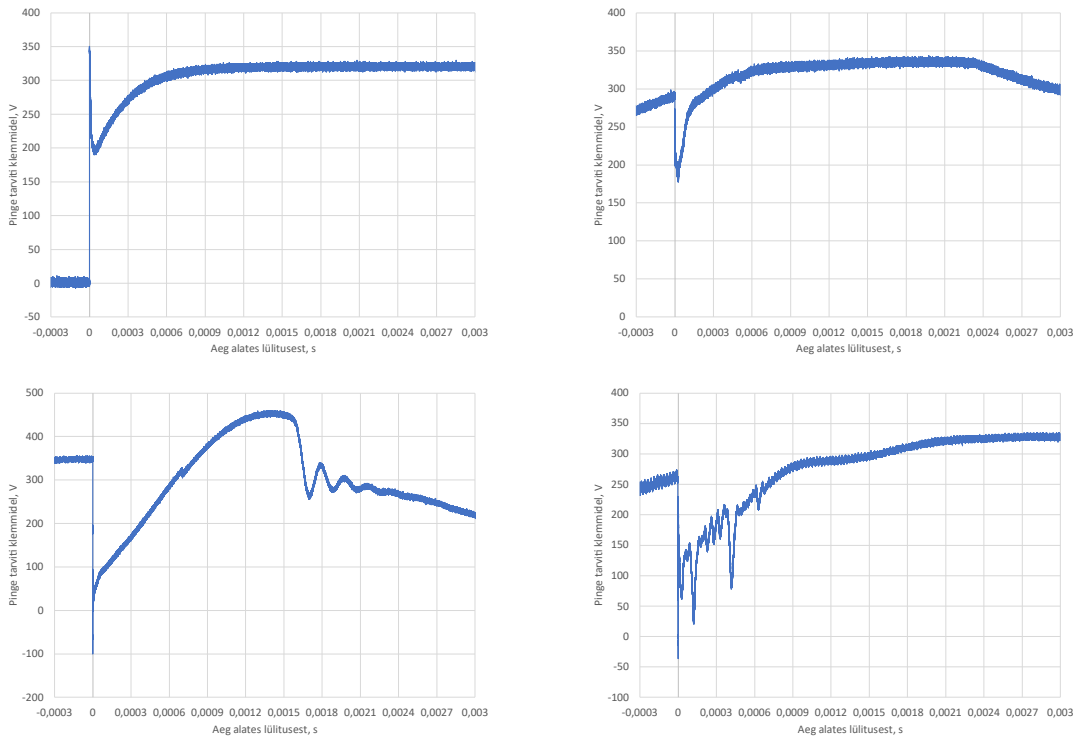
Samaselt lülitusvooludega on ideaalse pingeallika katsemaketi ja labori võrguga teostatud katsetest ilmnenud pingelohud stabiilsed ning pingete kõikumine jääb vahemikku 150 V ehk pingelohu suurus on ligi 44% võrreldes nimipingega. Seekord on täheldatav aga võrguga otseühenduse kasutamisel kiirem pinge taastumine kui maketi puhul. Nimelt taastub pinge võrguga otseühenduse korral 0,5 ms sees, ent maketi korral hoopis ligikaudu 1,5 ms jooksul. Antud asjaolu on tingitud katsemaketi enda ahelate võimekusest.

Isolatsioonitrafo kasutamisel on iseloomulik pinge tugev kõikumine siirdeprotessis. Nimelt muutub lülituse järgselt pinge vahemikus 50 – 450 V kestusega ligi 1,7 ms. Seejuures kujuneb pingelohu suuruseks ligi 85% ning pingekühmu suuruseks ligi 132%

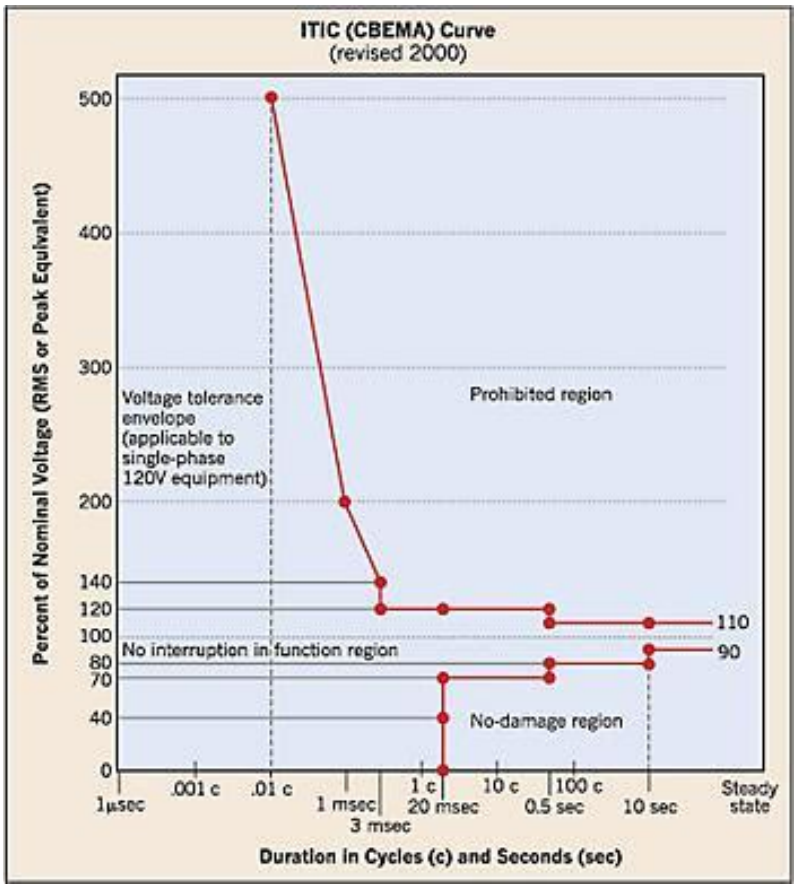
nimipingest. Antud tugeva impulsi järel leiab aset veel täiendav sumbuv võnkumine, mis kestab veel lisaks 1 ms. Just kõrgenenud amplituudi ning pika kestvuse tõttu pidada isolatsioonitrafoga esinevaid pingelohkusid tarvititele ohtlikuimaks.

Nõrgima võrgu olukorras generaatoriga katsel pingelohku vaadeldes on selgelt tuvastatav vastavus esinenud lülitusvooluga. Samadel ajahetkedel, mil langes voolutugevus langeb nüüd ka pinge, mis kinnitab ajutist toite katkestamist voolu piiramise eesmärgil. Generaatori puhul jääb pingelohu väärtus suurusjärku 250 V ehk ligi 74% nimipingest ning pinge suudetakse valdavalt taastada 1 ms vältel. Teatav ebastabiilsus on siiski märgatav ka järgneva 1 ms jooksul.

Üldjuhul langevad võrkudes esinevate pingelohkude väärtused erinevatel põhjustel kõige sagedasemalt vahemikku 0,85 – 0,9 nimipingest kestusega 10 – 500 ms [5]. Küll aga nähtub, et lülitusvoolude tõttu on on pinge võimalik kukkumine kuni ligi 15%-ni nimipingest ning seda väga kiiresti. Seega võib lülitusvooludega kaasnevate pingelohkude mõjusid pidada küllaltki tõsiseltvõetavateks, kusjuures standardi EN 61000-3-34 kohaselt hakkavad pingelohud tõsisemat mõju avaldama juba olukorras, kus nende väärtus ulatub üle 30% nimipingest [6]. Pingelohkude ja -kühmude suuruste mõju võrgule iseloomustab ka graafik joonisel 5.7, millelt nähtub, et pinge langemisel alla 70% nimipingest tekivad võrgus häiringud ning pingekühmud osutuvad kahjulikuks pinge tõusmisel üle 120% nimipingest.



Joonis 5.6. Pingelohud kasutades maketti (üleval vasakul), võrgu otseühendust (üleval paremal), isolatsioonitrafot (all vasakul) ja generaatorit (all paremal) koos 15 tarviti ja kaabliga nr 3



Joonis 5.7. ITIC sätestatud piirid pingelohkudele [7]

Pingelohkude mõju hindamiseks ITIC [7] piiride alusel on selgelt näha, et probleemide alguse hinnang on 1 perioodi pikkuste (20 ms) katkestuste puhul. Antud töös ei esinenud küll sedavõrd pikki katkestuslõike.

Pingelohu esinemine on oodatav seni, kui laetakse kõikide sisse lülitatud tarvitite kondensaatorid. Siin töös kasutatud LED lampide kondensaatorite mahtuvused on suhteliselt väikesed, tingituna tarviti väikesest võimsustarbest. Lülitades sisse 15 LED lambist koosneva valgustusketi, kujuneb sisselülitusvool tugevaks ka juhul, kui lampide endi summaarne võimsus on suhteliselt madal. Siin oli 15 LED lambi võimsus kokku ligi 150 W, kuid kasutatud ahelad ja allikad olid rohkem kui suurusjärk tugevamad.

Katsete tulemustest ja mõõdetud siirdeprotsesside põhjal võib eeldada, et pingelohud võidav esineda oluliselt tugevama mõjuga, kui tarvitite võimsused lähenevad neid varustava allika võimsusele.

KOKKUVÕTE

Käesolevas töös kuulusid uurimise alla seadmete sisselülitustest tulenevad tugevad sööstvoolud ning nende tagajärjel moodustuvad pingelohud. Lülitusvoolusid vaadeldi võrgu erinevate omaduste korral ning jälgiti nende mõju voolude kujunemisele. Hinnangute moodustamisel võeti aluseks katsetest leitud lülitusvoolude lainekujud.

Uurimuse läbiviimiseks rakendati katsemaketti, mis omadustelt jäljendab ideaalset ja tugevat võrku. Maketi ülesehituse kaudu minimeeriti liigsed induktiivsused ning suure mahtuvusliku komponendi kujundamise teel võimaldati tugeva võrgu imiteerimine. Teiseks võrreldi tugevaid sisselülitusvoolusid suure hoone tugevas madalpingevõrgus. Mikrovõrke ja nõrkasid võrke esindasid isolatsioonitrafo järele ühendatud tarvitid ja autonoomse allikana inverter-toitemuunduriga generaator.

Uurimistöö tulemustena selgus, et lülitusvoolude ja pingelohkude kujunemisele avaldavad võrgu ja tarvitite omadused märkimisväärset mõju ning seda kõige enam hetkvoolude väärtustele ja siirdeprotsessi sumbumisele. Näiteks moodustusid väiksevõimsuseliste tarvitite korral lülitusvoolude tippväärtused võrreldes tarvitite nimivooludega kuni 600-kordseks. Seejuures püsis teatud juhtudel suurema koormuse korral vool võrgus tugevana kuni ühe vahelduvvoolu perioodi ulatuses. Pikkade ühenduste lisandumisel olid märgatavad laugemad voolutipud, millest võis järeldada induktiivse komponendi suurenemist võrgus.

Täiendavalt ilmnes nõrgemate võrkude võimekus tugevatele sööstvooludele vastu pidada ning neist taastuda. Autonoomse toiteallika ehk generaatori korral oli näha tugevat reaktsiooni lülitusvoolule, kus voolu piiramise eesmärgil esines mitu katkestust. Katkestustele järgnes veel koormusvoolu sumbuv võnkumine, mis kestuselt ületas tunduvalt vastavate protsesside sumbumisajad tugevas võrgus.

Tugevad ja nõrgad võrgud olid selgelt eristatavad ka pingelohkusid vaadeldes, kusjuures sarnaselt lülitusvooludega tulid erisused sisse impulsside tippväärtustes ja protsesside stabiliseerumises. Nõrkades võrkudes esinevad pingelohud on ligi kaks korda sügavamad ning pinge stabiliseerumiseks on vaja samuti vähemalt kaks korda rohkem aega.

Seega võib lülitusvoolusid ning nendest tingitud pingelohkusid pidada tõsiseks ohuks mikrovõrkude toimimisele. Viimaste aastatega on tekkinud juurde palju tarbijaid, kelle mikrovõrkud saavad toite autonoomsetest allikatest, näiteks päikesepaneelidest ja akudest. Rohepöörde hoogustumisega tuleb seega paralleelselt teadvustada ka vajadust tulla toime lülitusvooludega taastuvenergia allikate juures ning seda põhjusel, et võrguvabad süsteemid on üles ehitatud just pooljuhtmuunduritele.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

[1] *Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products*, 2009/125/EC, EC. [Online]. Loetud aadressil: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:32009L0125&from=EN. Kasutatud: 24.03.2023.

[2] J. Kulikov, "Seadmete lülitus-sööstvoolude profiilide analüüs ja mõju võrgule", [Magistritöö], Inseneriteaduskond, TalTech, Tallinn, Eesti, 2022. [Online]. Loetud aadressil: https://digikogu.taltech.ee/et/Item/8b2d7d81-95f9-4858-960b-9b08779db8d8. Kasutatud: 24.03.2023.

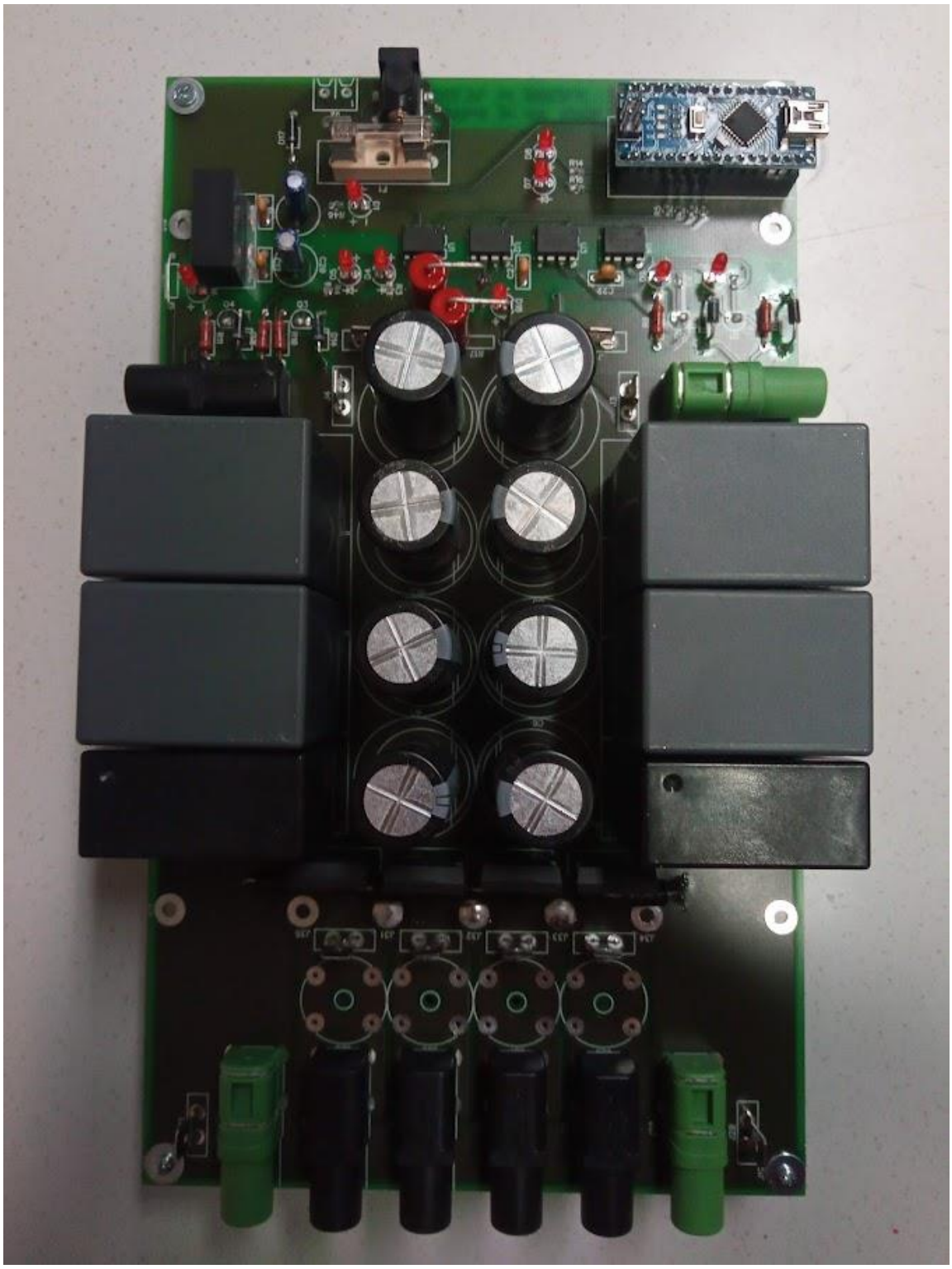
[3] M. Whiteley, „Circuit Theory and Analysis. Section 7. The over-damped case", University of Surrey, 2002. [Online]. Loetud aadressil: http://info.ee.surrey.ac.uk/Teaching/Courses/ee1.cct/circuit-theory/section7/overdamped.html. Kasutatud: 02.04.2023.

[4] *INVERTER PRO 2000 C5*, Datasheet, Kohler-SDMO, France, 2021. [Online]. Loetud aadressil: https://portable.kohlerpower.com/download.php?direct_dl=true&file=L2hvbWUvc2hvcC93d3cvcG9ydGFibGUua29obGVyLXNkbW8vaW1hZ2VzL0ltYWdlLzM0OTkyMzEwMDMwMzktRU4ucGRm. Kasutatud 25.04.2023.

[5] T. Vinnal, M. Jarkovoi, L. Kütt, „Voltage Dips and Swells in Low Voltage Networks of Estonia", *2018 IEEE 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, Riia, 2018, pp. 1-6. Loetud aadressil: https://doi.org/10.1109/RTUCON.2018.8659899. Kasutatud: 06.05.2023.

[6] *European standard EN 61000-3-34. Testing and measurement techniques - Voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity tests for equipment with input current more than 16 A per phase*, EVS-EN 61000-4-34:2007, EVS. [Online]. Loetud aadressil: https://www.evs.ee/et/evs-en-61000-4-34-2007. Kasutatud: 06.05.2023.

[7] Power Quality In Electrical Systems, *ITIC Curve - Power Acceptability Curve For Information Technology Equipment*, 2011. [Online]. Loetud aadressil: http://www.powerqualityworld.com/2011/04/itic-power-acceptability-curve.html. Kasutatud: 06.05.2023.

LISAD

Lisa 1 Katsemaketi foto