



INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

## **SEADMETE LÜLITUS-SÖÖSTVOOLUDE PROFIILIDE ANALÜÜS JA MÕJU VÕRGULE**

### **PROFILING OF THE DEVICE INRUSH CURRENTS AND THE EFFECTS TO THE DISTRIBUTION NETWORKS**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane:

Jan Kulikov

Üliõpilaskood:

204104AAAM

Juhendaja:

Lauri Kütt, vanemlektor

Tallinn 2022

(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 magistritööle esitatud nõuetele

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

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina, Jan Kulikov

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose *Seadmete lülitus-sööstvoolude profiilide analüüs ja mõju võrgule*,

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.

18.05.2022 (*kuupäev*)

---

<sup>1</sup> *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 loominguulise 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 LÜHIKOKKUVÕTE

*Autor:* Jan Kulikov

*Lõputöö liik:* Magistritöö

*Töö pealkiri:* Seadmete lülitus-sööstvoolude profiilide analüüs ja mõju võrgule

*Kuupäev:*  
18.05.2022

79 lk (*lõputöö lehekülgede arv koos lisadega*)

*Ülikool:* Tallinna Tehnikaülikool

*Teaduskond:* Inseneriteaduskond

*Instituut:* Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

*Töö juhendaja:* vanemlektor Lauri Kütt

*Töö konsultant:* Laur Valgur

*Sisu kirjeldus:*

Pooljuht-toitemuundurid on laialt levinud paljudes valdkondades, kuid vaatamata sellele on nende lülitus-sööstvoolusid ja kaasnevaid protsesse uuritud vähe. Antud töö eesmärk on mõõtmiste teel leida erinevate pooljuht-toitemuunduriga seadmete lülitusvoolude profiile ning kirjeldada neid matemaatiliselt.

Töö sissejuhatuses on kirjeldatud pooljuht-toitemuundurite struktuuri, suurte lülitusvoolude tekkimise põhjust ja nende piiramismeetodeid, samuti on käsitletud uuritavate protsesside teoreetilist alust. Teises on kirjeldatud lülitusvoolude mõõtmine katsestendiga ning teostatud mõõtmistulemuste graafilise osa analüüs. Töö kolmas osa sisaldab matemaatilise mudeli kirjeldust, selle alusel teostatud ahela komponentide arvutusi ja arvutis simulatsiooni tulemusi.

Vajalikud mõõtmised on teostatud ostsilloskoobiga ja töödeldud *Excel* tarkvaras. Lülitusvoolude profiilid on jaotatud visuaalsel vaatlusel. Arvutimudeli loomiseks on kasutatud *Spice* tarkvara.

Töö tulemustena on esitatud erinevate seadmete lülitus-sööstvoolude profiilid, antud kaasnevate protsesside teoreetiline selgitus, loodud matemaatiline mudel ja pakutud meetod ahelate komponentide väärtuste määramiseks mõõtmistulemuste alusel.

*Märksõnad:* elektrialelad, muundurid, eksperimendid, SPICE (tarkvara), magistritööd

## ABSTRACT

<i>Author:</i> Jan Kulikov	<i>Type of the work:</i> Master Thesis
<i>Title:</i> Profiling of the device inrush currents and the effects to the distribution networks	
<i>Date:</i> 18.05.2022	<i>79 pages (the number of thesis pages including appendices)</i>
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisor of the thesis:</i> Senior Lecturer Lauri Kütt	
<i>Consultant:</i> Laur Valgur	
<i>Abstract:</i> <p>Switched-mode power supply devices are widely spread in numerous fields. However, occurring inrush currents and following processes are not studied sufficiently. A proposal of this Thesis is to distinguish various inrush current profiles of switched-mode power supplies experimentally, and to explain them mathematically.</p> <p>Principles of switched-mode power supplies, explanations of high inrush currents and their limiting options are presented in the Introduction. An Introduction also contains theoretical basics of the studied processes. An analysis of the visual part of measurement results is described in the Second part of the Thesis. The Third part includes an explanation of the mathematical model, calculations of the circuit components based on this model, and circuit simulation results.</p> <p>Featured measurements are conducted using oscilloscope and processed in <i>Excel</i> software. Inrush current profiles are sorted visually. Simulation is performed using <i>Spice</i> software.</p> <p>As a result of the Thesis, various inrush current profiles are described, a theoretical explanation of following processes is provided, the mathematical model is created, and the method for calculating circuit component values based on measurement results is proposed.</p>	
<i>Keywords:</i> electric circuits, converters, experiments, master's theses	

# LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema: **Seadmete lülitus-sööstvoolude profiilide analüüs ja mõju võrgule**

Lõputöö teema inglise keeles: **Profiling of the device inrush currents and the effects to the distribution networks**

Üliõpilane: **Jan Kulikov, 204104AAAM**

Eriala: **Energiamuundus- ja juhtimissüsteemid**

Lõputöö liik: **magistritöö**

Lõputöö juhendaja: **Lauri Kütt**

Lõputöö kaasjuhendaja:  
(ettevõtte, amet ja kontakt)

Lõputöö ülesande  
kehtivusaeg: **2021/2022 Kevad**

Lõputöö esitamise tähtaeg: **18.05.2022**

---

Üliõpilane (allkiri)

---

Juhendaja (allkiri)

---

Õppekava juht (allkiri)

---

Kaasjuhendaja (allkiri)

## 1. Teema põhjendus

Mikrovõrkude ja väikevõrkude võrkude võimekus tagada toitemuunduriga seadmete võrku ühendamisel tekkiv lülitus-sööstvool võib olla ebapiisav, et ära hoida erinevaid pingelohkuseid ja nendele vastavalt näiteks rikkeolukordade automaatika rakendumist. Antud töös on vaadeldud sööstvoolude võimalikke profiile tarvitite ühendamisel võrku, nende esinemise profiile. Töö tulemusena saab esitada seadmete võrku ühendatavate seadmete oodatavate sööstvoolude profiilid majapidamiste võrguga ühendamisel.

## 2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on mõõtmiste teel leida eeldatavad lülitus-sööstvoolude profiilid erinevate pooljuht-toitemuundurite kaudu varustatavatele seadmetele, milliste

toitesisendi juures alalisvoolupoolele olevad suured kondensaatorid tingivad tugevate laadimisvoolu-impulsside esinemise.

### **3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:**

1. Kui tugevad on vooluimpulsid, millised esinevad erinevate pooljuhtmuunduriga tarvitite võrku ühendamisel?
2. Kuidas kirjeldada tüüpilisemaid lülitus-vooluimpulsse matemaatiliselt?
3. Kuidas iseloomustada lülitus-vooluimpulsse elektrilise aseskeemiga?
4. Milline on mitmete seadmete koos-võrkulülitamisel kumulatiivne efekt ja milliseid pingelohke see võib põhjustada?

### **4. Lähteandmed**

Katsetatavate seadmete lähteparameetrid teabelehtedelt. Erinevate sööstvoolu piiramise ahelate kirjeldused teabelehtedelt ja kirjandusallikatest. Mõõtmiste kaudu selgitatud parameetrid.

### **5. Uurimismeetodid**

Vooluimpulsside mõõtmine ja salvestamine ostsilloskoobiga. Mõõteandmete töötlemine Excelis. Katselisel alusel vormistatud sarnaste trendide leidmine, visuaalsel vaatlusel sorteerimine. Analüütiliselt ekvivalentsete elektriahelate koostamine, ahelate kontroll. Mõõtetulemuste ja aseskeemil sooritatud mudeldamise tulemuste võrdlus.

### **6. Graafiline osa**

Mõõtetulemused esitatud tabelitena ja graafikutel. Katseskeemide kirjeldused ja skeemid. Aseskeemide kirjeldused, võrdlus esitatud graafiliselt. Katseseadmete fotod ja skeemid. Graafiline osa on nii töö põhiosas kui ka lisades.

### **7. Töö struktuur**

1. Sissejuhatus. Pooljuhtmuundurite struktuur ja komponentide rollid.
2. Lülitus-sööstvoolud ja nende oodatav profiil
3. Katsete ülesseadmise skeem, katseseadme kirjeldus ja mõõteriistad
4. Katsetamisel olevad tarvitid, nende ülesehitus ja parameetrid
5. Katsetulemuste ülevaade, vooluimpulsside tüüpilised profiilid
6. Tarvitite skeemide selgitused ja kondensaatorite laadimise aseskeemid

7. Tarvitite lüükvoolu-aseskeemi kujundamine koos võrgu parameetritega.
8. Mõõtmistulemuste ja aseskeemi-mudeltulemuste võrdlus
9. Järeldused ja kokkuvõte

## **8. Kasutatud kirjanduse allikad**

Kirjandusallikateks on erinevas toiteallikate skeemid ja andmelehed, teemaga seotud teadusartiklid.

1. EVS-EN IEC 61000-4-11:2020. Elektromagnetiline ühilduvus (EMÜ). Osa 4-11: Katsetus- ja mõõtetehnika. Pingelohkude, lühikatkestuste ja pingemuutuste taluvuse katsetused seadmetele sisendvooluga kuni 16 A faasi kohta
2. PMP21098 170W Auxless AC/DC Power Supply Reference Design with 80 PLUS Gold Compatible Performance, <https://www.ti.com/tool/PMP21098>
3. Lamp Inrush Current Computation Tool for Optimal eXtreme Switch Usage, <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN4049.pdf>
4. A wavelet-based energy profile approach for discrimination between fault and inrush current, <https://ieeexplore.ieee.org/document/4524381>

## **9. Lõputöö konsultandid**

Laur Valgur – katseseadme ülesehitus

## **10. Töö etapid ja ajakava**

Detsember 2021 - Erialgsed katsed sooritatud, katsetingimuste täpsustamine

Jaanuar 2022 – Täiendavad katsed sooritatud, erinevad toitemuundurid

Veebruar 2022 – Katsetulemuste esialgne töötlemine, muundurite aseskeemide kirjeldused

Märts 2022 – Seadmete ja võrgu aseskeemide koostamine ja mudeldamine, võrdlus katsetulemustega

Aprill 2022 – Töö tulemuste vormistamine ja analüütiline kirjeldamine

Mai 2022 – Lõppjäreldeste vormistamine, töö viimistlemine

18.05.2022 – Lõputöö esitamine



# SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE .....	4
ABSTRACT .....	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE .....	6
EESSÕNA .....	11
Lühendite ja tähiste loetelu .....	12
SISSEJUHATUS .....	13
1 TEOREETILISED ALUSED .....	15
1.1 Pooljuht-toitemuundurite struktuur .....	15
1.2 Lülitusvoolude piiramismeetodid toitemuundurites .....	16
1.2.1 NTC ja PTC-termistor .....	16
1.2.2 Aktiivtakisti .....	17
1.2.3 Lahendus möödaviiguga .....	17
1.2.4 MOSFET transistor .....	18
1.2.5 Teised meetodid .....	18
1.2.6 Põhilahenduste võrdlus .....	19
1.3 Lülitus-sööstvoolude teooria .....	20
1.3.1 Eeldatav lülitusvoolude kujunemine .....	25
2 PRAKTILINE OSA .....	28
2.1 Lülitusvoolude mõõtmise katsete ettevalmistused ja mõõteriistad .....	28
2.1.1 Katseseade ja mõõteriistad .....	28
2.1.2 Mõõtmiste metoodika .....	29
2.2 Katsetatud tarvitite kirjeldus .....	30
2.2.1 Leedlambid .....	30
2.2.2 Muud seadmed .....	33
2.3 Katsetulemuste ülevaade .....	34
2.3.1 Leedlambid .....	35
2.3.2 Muud seadmed .....	40
2.3.3 Mitme seadme kooslülitus .....	43
2.3.4 Katsetulemuste kokkuvõte .....	45
3 ANALÜÜTILINE OSA .....	47
3.1.1 Kasutatud meetodite kirjeldus .....	47
3.2 Katsetendi ja näidistarvitite parameetrite määramine .....	48
3.2.1 Takistuse ja induktiivsuse arvutamine .....	49
3.2.2 Mahtuvuse arvutamine .....	53

3.3 Toitemuunduri parameetrite täpsustamine teise katsemeetodiga .....	57
3.3.1 Katsemeetodite hinnang.....	60
3.4 Võrgu parameetrite määramine .....	61
3.4.1 Katsed ja tulemuste analüüs.....	61
3.4.2 Aseskeemi kujunemine .....	67
3.5 Toitemuundurite mõju võrgule analüüs ja mudeli koostamine.....	68
3.5.1 Ahela parameetrite mõju siirdeprotsessile .....	74
KOKKUVÕTE .....	76
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	77
LISAD .....	79
L1 Katsestendi foto.....	79

## **EESSÕNA**

Käesoleva lõputöö teema on sõnastatud Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi vanemlektor Lauri Kütt 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 ja nõuande eest, insener Martin Parkerile töö praktilise osaga seotud abi eest ning bakalaureuseõppe tudengitele Frantz Gregor Tompsile, Jan Tinnole ja Rauno Reale mõõtmiste osalise teostamise eest.

## Lühendite ja tähiste loetelu

NTC – negatiivne temperatuuritegur (ingl k *Negative Temperature Coefficient*)

PTC – positiivne temperatuuritegur (ingl k *Positive Temperature Coefficient*)

PFC – võimsusteguri kompenseerimine (ingl k *Power Factor Correction*)

VAC – vahelduvpinge (ingl k *Volt, Alternating Current*)

VDC – alalispinge (ingl k *Volt, Direct Current*)

DC/DC muundur – alalispinge pooljuht-toitemuundur (ingl k *Direct Current / Direct Current*)

## SISSEJUHATUS

Tänapäeva elektriseadmete toiteahelates on laialt kasutatud pooljuht-toitemuundurid. Nende seadmete hulka kuuluvad nii tööstus- kui ka olmeseadmed: mootorite sagedusmuundurid, väikepinge toiteplokid (nt arvuti ja mobiiltelefonide laadimise adapterid), leedlampide- ja valgustite toiteplokid ning muud tarvitid. Toitemuunduri tööpõhimõte ja selles kasutatavad komponendid tingimata avaldavad mõju toitevõrgu pingekvaliteedile. Mikro- ja väikevõrkude võimekus tagada toitemuunduriga seadmete võrku ühendamisel tekkiv lülitus-sööstvool võib olla ebapiisav, et ära hoida erinevaid pingelohkusi ja nendele vastavalt näiteks rikkeolukordade automaatika rakendumist.

Pooljuht-toitemuundurite juures on kõige rohkem uuritud nende kasuteguri tõstmise võimalused, harmoonilistega põhjustatud häiringud, hinna ja kvaliteedi küsimused. Samuti on käsitletud teatud määral lülitusvoolude piiramise vajadus ja vastavad lahendused. Lülitusvoolude suurusi, profiile ning nende mõju võrgule on uuritud puudulikult, eriti vähe jääb praktilistest tulemustest.

Antud töös vaadeldakse sööstvoolude võimalikke profiile tarvitite ühendamisel võrku ning nende esinemise profiile. Töö eesmärgiks on mõõtmiste teel leida eeldatavad lülitus-sööstvoolude profiilid erinevate pooljuht-toitemuundurite kaudu varustatavatele seadmetele, milliste toitesisendi juures alalisvoolupolel olevad suured kondensaatorid tingivad tugevate laadimisvoolu-impulsside esinemise.

Töö käigus määratakse erinevate pooljuhtmuunduriga tarvitite võrku ühendamisel vooluimpulsside tugevus. Seejärel antakse matemaatiline kirjeldus tüüpilisematele lülitus-vooluimpulssidele ning teostatakse nende iseloomustus elektrilise aseskeemiga. Samuti on uuritud mitmete seadmete koos-võrkulülitamisel kumulatiivne efekt ja sellest tingitud võimalikud pingelohud. Töö tulemusena esitatakse võrku ühendatavate seadmete oodatavate sööstvoolude profiilid majapidamiste võrguga ühendamisel.

Töö praktiline osa põhineb pinge- ja vooluimpulsside mõõtmisel ja salvestamisel ostsilloskoobiga. Mõõteandmete töötlemiseks on kasutatud *MS Excel* tarkvara. Katsetrendid on määratud ja sorteeritud visuaalsel vaatlusel. Aseskeemide mudelite koostamiseks ja katsetamiseks on kasutatud *Spice* tarkvara.

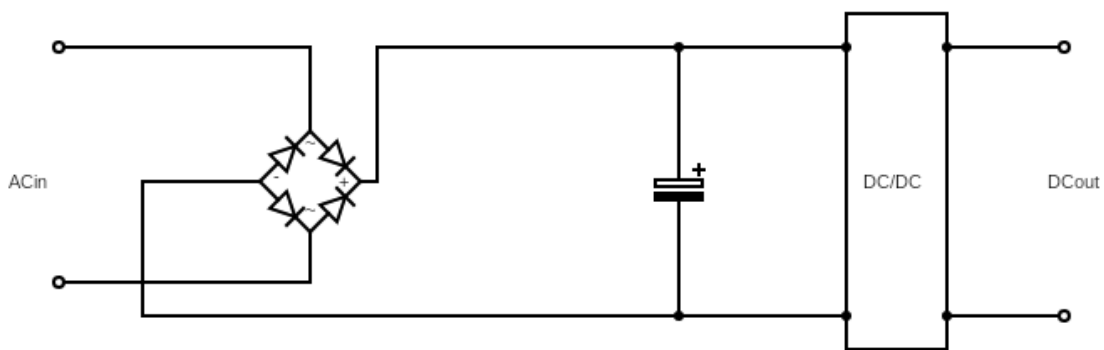
Töö struktuur kujuneb alljärgnevalt:

1. Sissejuhatus. Pooljuhtmuundurite struktuur ja komponentide rollid
2. Lülitus-sööstvoolude teooria, lülitusvoolude oodatavad profiilid
3. Katsete ülesseadmise skeem, katseseadme kirjeldus ja mõõteriistad
4. Katsetamisel olevad tarvitid, nende ülesehitus ja parameetrid
5. Katsetulemuste ülevaade, vooluimpulsside tüüpilised profiilid
6. Komponentide arvutamine, kasutatud meetodite kirjeldus
7. Tarvitite löökvoolu-aseskeemi kujundamine koos võrgu parameetritega
8. Mõõtmistulemuste ja aseseemi-mudeltulemuste võrdlus
9. Toitemuunduri mõju võrgule analüüs
10. Järeldused ja kokkuvõte

# 1 TEOREETILISED ALUSED

## 1.1 Pooljuht-toitemuundurite struktuur

Pooljuht-toitemuundurite toiteahelad sisaldavad suuremahulisi puhver-kondensaatoreid ning reeglina ka passiivfiltreid (nt  $LC$ -filter). Lülituse alghetkel kondensaatoreid laadimise tõttu tekkivad suured lülitusvoolud (sööstvoolud), mis võivad ulatuda 10 kuni mitusada nimivoolu suurust kestvusega u. 100  $\mu$ s kuni 5 ms sõltuvalt muunduri topoloogiast, toitepinge faasinurgast lülituse hetkel ning toitevõrgu impedantsist [1]. Tüüpiline toitemuunduri toiteahela põhimõtteline skeem on toodud Joonisel 1.1.



Joonis 1.1. Toitemuunduri toiteahela põhimõtteline skeem. Sõltuvalt topoloogiast puhverkondensaatoreid võib asuda nii enne kui ka peale DC/DC muundurit. Skeemil tähistatud: ACin – vahelduvvoolu sisend, DCout – alalisvoolu väljund

Tekkivad sööstvoolud võivad kahjustada nii seadme enda kui ka toitevõrgu komponente (nt lüliteid, kontaktoreid jne) ning samuti põhjustada pinget muutusi võrgus. Pooljuhtkomponentide juures on samuti oluline efektiivselt juhtida tekkivat soojusenergiat, mis piiramatute lülitusvoolude puhul toob ette kadusid ja seadmete termilist stressi. Mitu ühte toiteahelasse ühendatud piiramatute lülitusvooluga seadmete lülitamine võib põhjustada toitevõrgu kaitseseadme (nt automaatkaitseülilite) tahtmatu rakendumise [1] [2] [3].

Kuna elektriseadmete arv kasvab pidevalt, sööstvoolude piiramine on üldjuhul mõistlik kõikidele toitemuunduritega seadmetele ning on tungivalt soovituslik seadmetele nimivõimsusega üle 300 VA. Lülitusvoolude piiramine on samuti vajalik ka alalispinge rakendustes, näiteks DC/DC muundurites [1].

## 1.2 Lülitusvoolude piiramismeetodid toitemuundurites

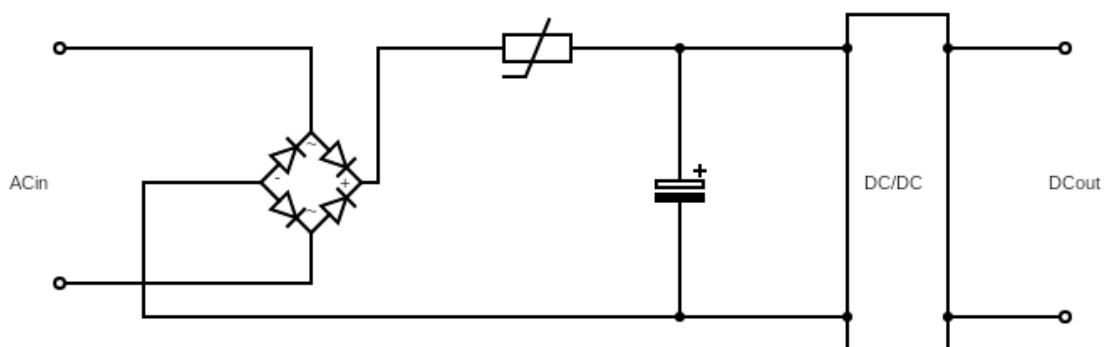
Lülitusvoolude piiramismeetodide arusaamine on antud töö raames oluline seetõttu, et erinevad meetodid mõjutavad lülitusvoolu kujunemist omamoodi. Teades seadmes kasutatud lülitusvoolu piiramismeetodit saab hinnata lülitusvoolu kuju.

Sööstvoolude piiramiseks on mitu lahendust. Lahenduse valik sõltub seadmele esitatavatest nõuetest, muunduri topoloogiast ning kindlasti ka seadme hinnaklassist. Kõige laiemalt on levinud möödaviiguga aktiivtakistiga, NTC-termistoriga ja MOSFET-transistoriga (väljatransistoriga) skeemid või viimase kahe kombinatsioon.

### 1.2.1 NTC ja PTC-termistor

Jadamisi ühendatud NTC-termistor on lihtne ja laialt levinud viis lülitusvoolu piiramiseks. Põhimõtte seisneb selles, et enne lülitust termistori takistus on suur ning peale lülitust hakkab vähenema vastavalt termistori temperatuuri kasvule.

Termistori asukoht muunduri tüüpskeemil on näidatud Joonisel 1.2.



Joonis 1.2. Skeem lülitusvoolu piiramiseks termistoriga. Termistor võib olla paigaldatud nii enne kui ka peale alaldit

Sellel lahendusel on ka mitu puudusi. Välja lülitatud seadme komponentide temperatuur sõltub väliskeskkonna temperatuurist; seega külmades oludes NTC-termistori takistus võib olla nii suur, et seadme käivitamiseks vajalik vool ei pruugi olla saavutatud. Vastupidi, kõrge temperatuuriga keskkonnas termistori takistus võib olla liiga väike, et avaldada vajalik mõju voolu piiramiseks [1] [4].

Samuti NTC-termistori lahendus ei ole tõhus juhul, kui seadet on ette nähtud lülitada sisse ja välja lühikeste ajavahemikutega või kui on oodata sageli esinevaid



toitekatkestusi. Siin võib tekkida olukord, kui kondensaator on jõudnud tühjaks laadida, aga termistor on veel märgatavalt kõrge temperatuuriga; seega seadme taaskäivitamisel võib esineda suur lülitusvool.

Muunduri projekteerimisel peab arvestama ka kadudega, mida põhjustab termistori takistus. Termistori puhul on tegemist ebatäpse komponendiga, kus parimal juhul tagatakse  $\pm 10\%$  takistuse täpsus, seega lihtne termistori lahendus üldjuhul sobib toitemuunduritele, millele ei esitata eriti kõrgeid töökindluse nõudeid.

PTC-termistori takistus kasvab temperatuuriga, seega seda on mõistlik kasutada seal, kus NTC-termistor ei ole efektiivne (näiteks kõrge temperatuuriga keskkonnas) [4] [5].

### **1.2.2 Aktiivtakisti**

Aktiivtakisti jadamisi integreerimine ahelasse mingil määral piirab lülitusvoolu, aga samas toob ette püsikadusid. Selline lahendus on sobilik pigem väiksematele muunduritele ning siis, kui kõrge kasutegur ei ole eesmärgiks.

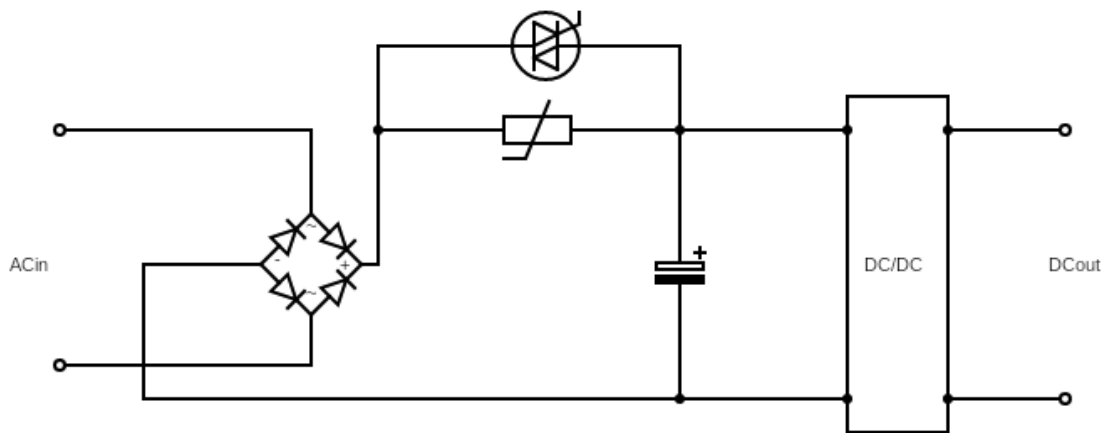
Üks viis skeemi parandamiseks on aktiivtakisti šuntimine NTC-termistoriga. See variant annab võimalust kasutada termistori lahendust ka külmades oludes, kuna aktiivtakisti ja termistori summaarne takistus on tavaliselt piisav lülitusvoolu piiramiseks, samas aga võimaldab seadme käivituse. Töörežiimi saavutamisel termistori takistus on piisavalt väike, et tekitada aktiivtakistist möödaviik. Puuduseks on kindlasti see, et aktiivtakisti toob ahelasse lisakadusid [4].

### **1.2.3 Lahendus möödaviiguga**

Termistori ja aktiivtakisti lahenduste tõhususe tõstmiseks teostatakse möödaviigu püsirežiimi saavutamisel. Sel juhul termistorit kasutatakse otsesel eesmärgil voolu piiramiseks ning see ei too lisakadusid ning jahtub kiiremini, tagamas lülitusvoolu kaitse seadme võimalikul kiirel taaskäivitamisel. Aktiivtakistiga skeemil möödaviiguga samuti välditakse aktiivtakisti püsikadusid.

Üldiselt möödaviiguga lahendus on sobilik ka suurematele ja kallimatele seadmetele, loomulikult aga selline lahendus teeb skeemi keerulisemaks, kuna nii rele kui türistor vajavad eraldi toite- ja juhtimisahelaid. Lisakomponendid kindlasti toovad ka omaette lisakadusid [1] [6].

Joonisel 1.3 on toodud lahenduse asukoht tüüpskeemil (*TRIAC*-iga (sümostoriga) skeem).



Joonis 1.3. Skeem lülitusvoolu piiramiseks möödaviiguga termistoriga

Siin peab mainima, et kasutatakse nii mehaanilisi kui ka pooljuhtreleid (*TRIAC*, türistori või transistori baasil). Mehaaniline relee ei tekita elektroonilisi häiringuid ning seda on mõistlik kasutada seal, kus on oluline häiringuvaba toiteahel. Mistahes relee valikul tuleb jälgida, et selle summaarne takistus oleks lülitusvoolu piiramiseks kasutatava termistori või aktiivtakisti takistusest väiksem.

#### 1.2.4 MOSFET transistor

Aja jooksul on pakutud mitu võimalust transistori rakendamiseks lülitusvoolude piiramiseks, ning kõige tõhusamad siin on nn aktiivpiiramismeetodid.

Põhimõtte seisneb selles, et lülituse hetkel transistor on avatud ning järelkult hüppelist sööstvoolu ei teki. Seejärel transistorit juhitakse sujuvalt soovitud lülitusvoolu väärtuse saavutamiseks. Transistor võib olla rakendatud nii lineaarses kui ka kõrgsageduslülitus töörežiimis. Lineaarne režiim on lihtsam, kõrgsageduslülitus eeldab lisaks keerulisemat juhtimisahelat. Hästi projekteeritud skeemil lülitusvoolu tase ideaalsel juhul võib olla viidud nimivoolu taseme lähedale [1] [4] [7].

#### 1.2.5 Teised meetodid

Lülitusvoolu amplituud vahelduvvoolu ahelas sõltub toitepinge faasinurgast lülituse hetkel. Muunduri lülitus faasinurga nullväärtuse lähedal aitab lülitusvoolu vähendada,

kuigi ei lahenda probleemi täielikult. Seda lahendust võib teostada pooljuhtrelega sisseehitatud faasinurga jälgimisahelaga [1]. Ilmselt oma suhtelise keerukuse tõttu antud skeem ei leidnud suurt populaarsust tööstuses.

Lülitusvoolu piirajaks DC-DC muundurites võib kasutada ka jadamisi ühendatud induktiivpooli, kuigi see lahendus ei leia suurt kasutust induktori suurte gabariitide ning resonantsi tekkimisohtu tõttu [8].

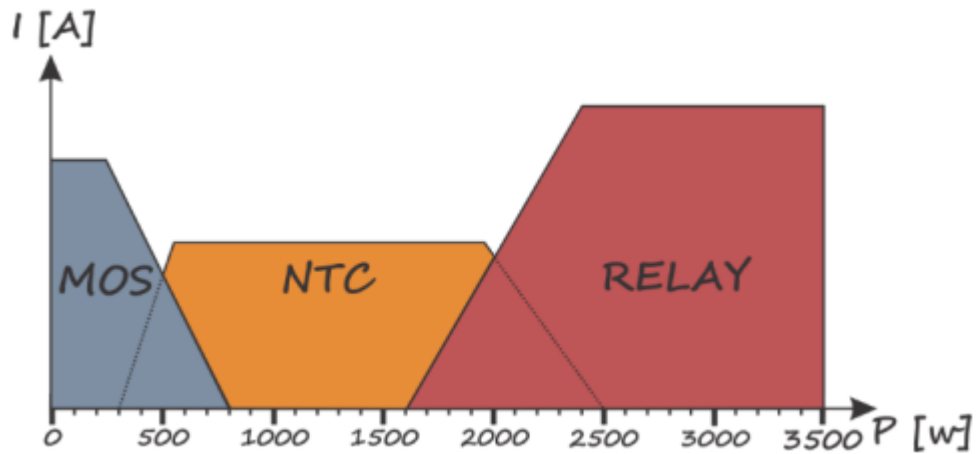
### **1.2.6 Põhilahenduste võrdlus**

Kõige laiemalt on levinud möödaviiguga aktiivtakistiga, NTC-termistoriga ja MOSFET-transistoriga skeemid või viimase kahe kombinatsioon. Skeeme võib võrrelda järgmiste omaduste järgi [9] [10]:

- lülitusvoolu piiramisvõime, kahanevalt:
  1. MOSFET – lülitusvool võib olla viidud nimivoolu tasemele
  2. Releega lülitatav aktiivtakisti – lülitusvool sõltub aktiivtakisti takistusest
  3. NTC-termistor – lülitusvool sõltub termistori takistusest ning tavaliselt jääb vahemikusse ~5 ... 10 korda nimivoolust suurem
  
- siirdeprotsessi võimsuskaod, kasvavalt:
  1. MOSFET – võimsuskaod sõltuvad transistori tüübist, eriti nimipingest
  2. Releega lülitatav aktiivtakisti
  3. NTC-termistor

Hinnapoolest termistori lahendus on teistest kordades odavam.

Joonisel 1.4 on toodud kolme põhilahenduste võrdlus voolutugevuse ja võimsuse alusel.



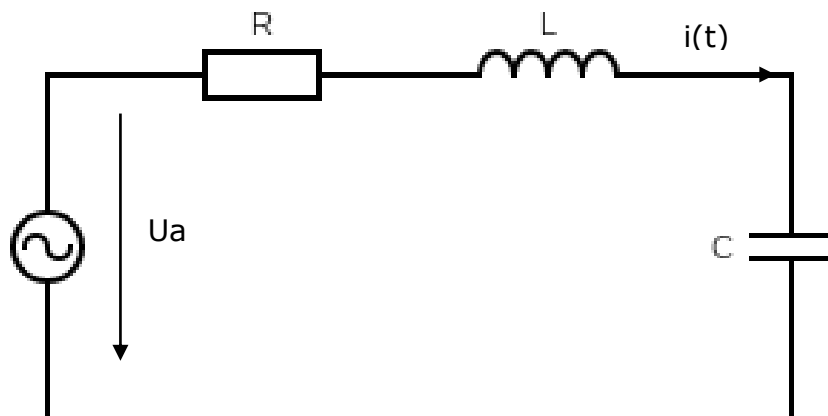
Joonis 1.4. Lülitusvoolude meetodite rakenduse soovitusel lähtudes voolutugevusest ja võimsusest. Joonisel on tähistatud MOS – transistoriga skeem, NTC – termistoriga skeem, RELAY – releega skeem [10]

Vahekokkuvõttena võib öelda, et odavamates seadmetes nagu leedlamp, universaalne toiteplokk ja muud sarnased on oodata termistoriga lahendust. Kallimates väikese võimsusega seadmetes võib eeldada pigem transistoriga lahendusi.

### 1.3 Lülitus-sööstvoolude teooria

Nii tarvitite (muundurite) kui ka võrgu parameetrite uurimine põhineb  $RLC$ -ahela omadustel. Eeldatakse, et tegemist on  $RLC$ -jadaahelaga.

Joonisel 1.5 on toodud  $RLC$ -jadaahela aseskeem.



Joonis 1.5.  $RLC$ -jadaahela aseskeem

Eeldatakse, et voolukõver RLC-ahelas kujuneb eksponendi järgi [11] [12]:

$$i(t) = Ae^{st} \quad (1.1)$$

Kirchoffi pingeseadusest tulenevalt

$$Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i dt = 0 \quad (1.2)$$

mis Laplace'i operaatori kasutamisel saab kuju

$$\frac{R}{L}s + s^2 + \frac{1}{LC} = 0 \quad (1.3)$$

ning lahendades  $s$  järgi

$$s_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} = -a \pm \sqrt{a^2 - \omega_0^2} = -a \pm b \quad (1.4)$$

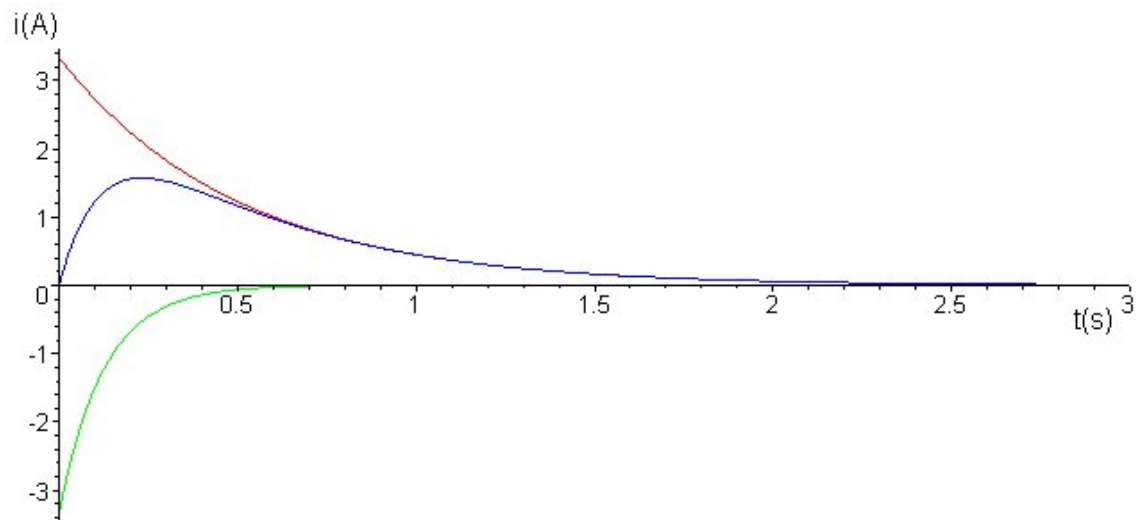
kus  $a$  on nn sumbuvasagedus ja  $\omega_0$  on resonantssagedus.

Sellel võrrandil on kolm komplekti lahendust:

- 1)  $\left(\frac{R}{2L}\right)^2 > \frac{1}{LC}$  ehk  $a^2 > \omega_0^2$ ; siis on mõlemad juured reaalarvud ning süsteem on ülesummutatud (aperioodiline funktsioon);
- 2)  $\left(\frac{R}{2L}\right)^2 < \frac{1}{LC}$  ehk  $a^2 < \omega_0^2$ ; siis on mõlemad juured kompleksarvud ning süsteem on alasummutatud;
- 3)  $\left(\frac{R}{2L}\right)^2 = \frac{1}{LC}$  ehk  $a^2 = \omega_0^2$ ; siis on juured võrdsad ning süsteem on kriitiliselt summutatud.

Seega lõplik lahendus ja näidisgraafikud ülesummutatud süsteemis:

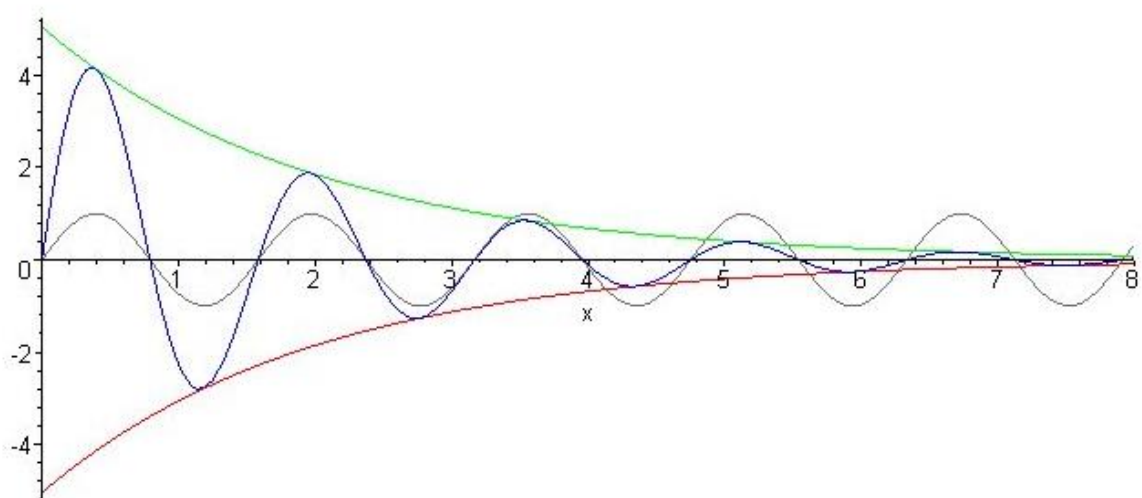
$$i(t) = Ae^{s_1 t} + Be^{s_2 t} \quad (1.5)$$



Joonis 1.6. Ülesummutatud süsteemi näidis [11]

alasummutatud süsteemis:

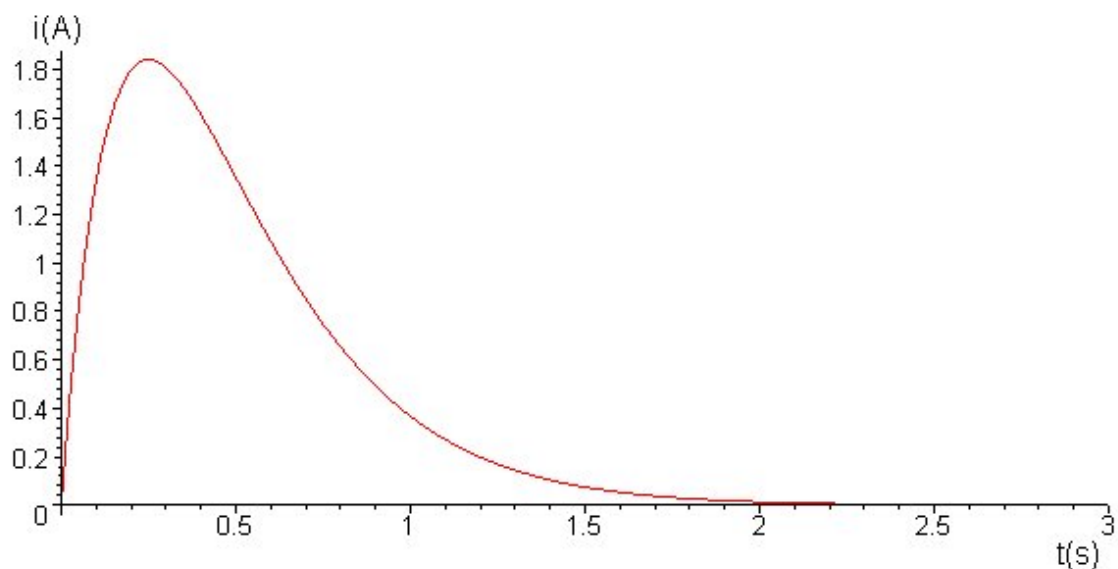
$$i(t) = Ee^{s_1 t} \sin(bt) \quad (1.6)$$



Joonis 1.7. Alasummutatud süsteemi näidis [11]

ja kriitiliselt summutatud süsteemis:

$$i(t) = A_2 t e^{s_1 t} \quad (1.7)$$



Joonis 1.8. Kriitiliselt summutatud süsteemi näidis [11]

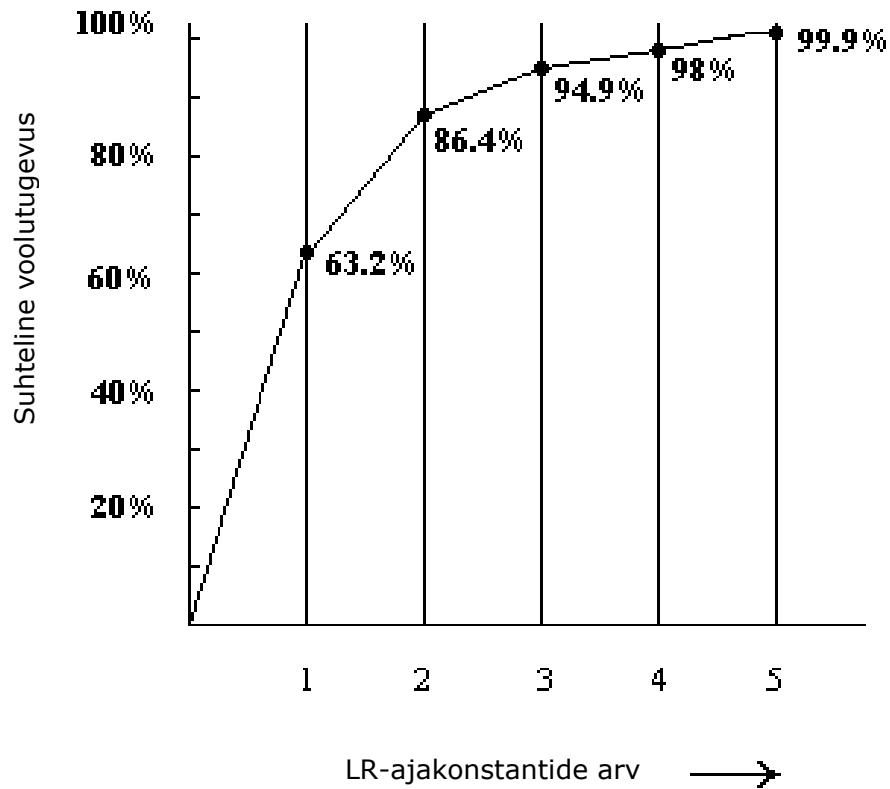
kus  $A$ ,  $A_2$ ,  $B$  ja  $E$  on integreerimiskonstandid. Esimeses lähenduses integreerimiskonstant on leitav alljärgnevalt:

$$A = \frac{U_{in}}{R} \quad (1.8)$$

Võrrandi 1.4 alusel võib öelda, et mahtuvuse mõju siirdeprotsessi kiirusele on suhteliselt väike, seega eeldatakse, et protsessi esimese osa ajakonstant kujuneb induktiivsuse ja aktiivtakistuse suhest:

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{1}{2\alpha} \quad (1.9)$$

Samas on teada, et eksponentsiaalselt kujuneva kõvera väärtused on kindlalt seotud ajakonstandiga:



Joonis 1.9. Voolu seos ajakonstandiga LR-ahelas [13]

Arvestades, et induktiivelemendi vool lülitushetkel ei saa muuta hüppeliselt, võib kirjutada [14]

$$A = \frac{U_a}{L(s_1 - s_2)} \quad ( 1.10 )$$

ning seega

$$L = \frac{U_a}{A(s_1 - s_2)} \quad ( 1.11 )$$

Protsessi teine osa on ettenähtavalt seotud kondensaatori laadimisvooluga, seega ajakonstant esineb järgnevalt:

$$\tau = RC \quad ( 1.12 )$$

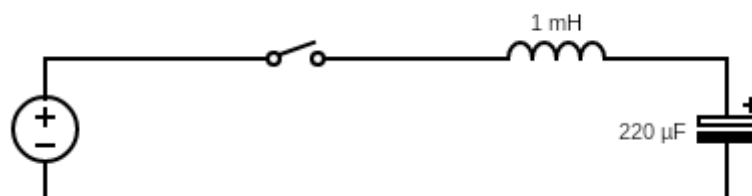


### 1.3.1 Eeldatav lülitusvoolude kujunemine

Lülitusvoolu kuju ja tippväärtus muunduriga ahelas sõltuvad puhverkondensaatori mahtuvusest, ahela aktiivtakistusest ning induktiivsuse suurusest. Ahela aktiivtakistus koosneb aktiivtakistite takistuse ja muude komponentide aktiivtakistuse summast. Summaarne induktiivsus kujuneb suures osas induktorite, trafode ja juhtmete induktiivsuste summast.

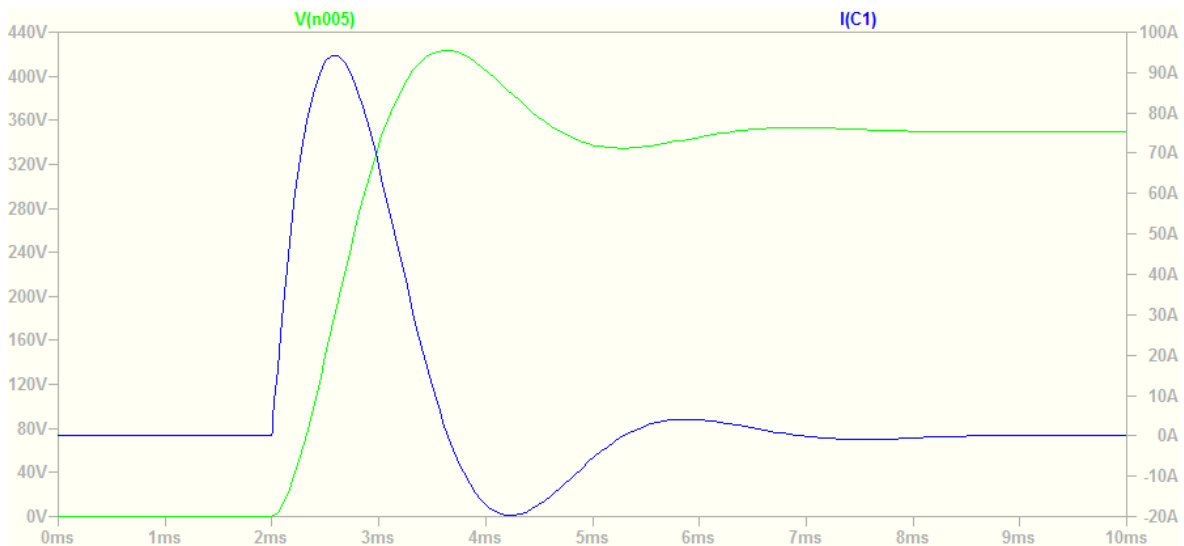
Lülitusprotsessi modelleerimiseks tarkvaras *LTSpice* on koostatud põhimõtteline aseskeem. Antud mudelis ei arvestata võrgu mõjuga protsessile. Komponentide väärtused on võetud arvestades praktilisi skeeme ning on arvestatud ka komponentide parasiittakistustega.

Esimene katse on teostatud *LC*-ahelaga ehk skeemiga ilma lülitusvoolu piiranguteta ning parasiittakistusi arvestamata.



Joonis 1.10. Ideaalse *LC*-ahela aseskeem

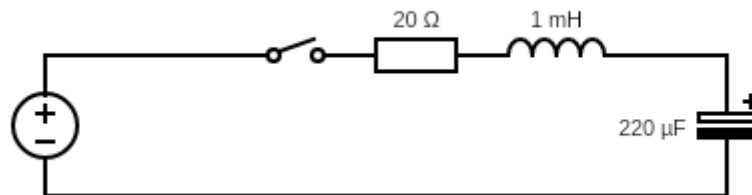
Katse tulemuseks on kriitiliselt summutatud protsess, mis eeldatavasti võib toimuda piiramatul lülitusvoolu korral. Graafikul on esitatud kondensaatoril mõõdetud pinge ja vool.



Joonis 1.11. LC-ahela esmase modelleerimise tulemus

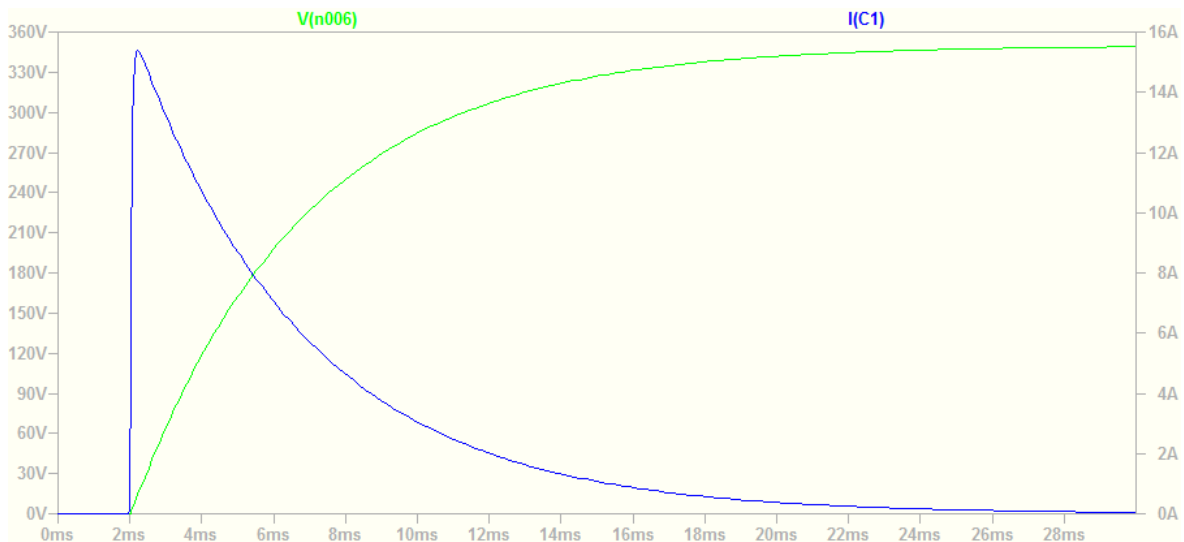
Graafikust on näha, et pinge ja voolu faasid erinevad, kuna tegemist on reaktiivkomponente sisaldava ahelaga.

Teises katses ahelasse on jadamisi lisatud takisti ning seega moodustatud *RLC*-jadaahel.



Joonis 1.12. Ideaalse RLC-ahela aseskeem

Joonis 1.13 võib näha lülitusvoolu kujunemine ahelas, kus esineb aktiivtakistust. Jällegi, graafikul on esitatud kondensaatoril mõõdetud pinge ja vool.



Joonis 1.13. RLC-ahela esmase modelleerimise tulemus

Esitatud tulemused võimaldavad teha esmaseid järeldusi lülitusvoolude kujunemise kohta. Esiteks võib järeldada, et aktiivtakistuse lisamisega ahelasse väheneb lülitusvoolu tippväärtus ning siirdeprotsess aeglustab, kuna süsteemi ajakonstandi väärtus on sõltuvuses  $R$  suurusega.

Samuti on oluline märkida, et esimesel ja teisel katsel erinevad ka voolu ja pinget kõverate kujud – põhjuseks on see, et muutub süsteemi sumbuvus, mis sõltub  $R$ ,  $L$  ja  $C$  seosest.

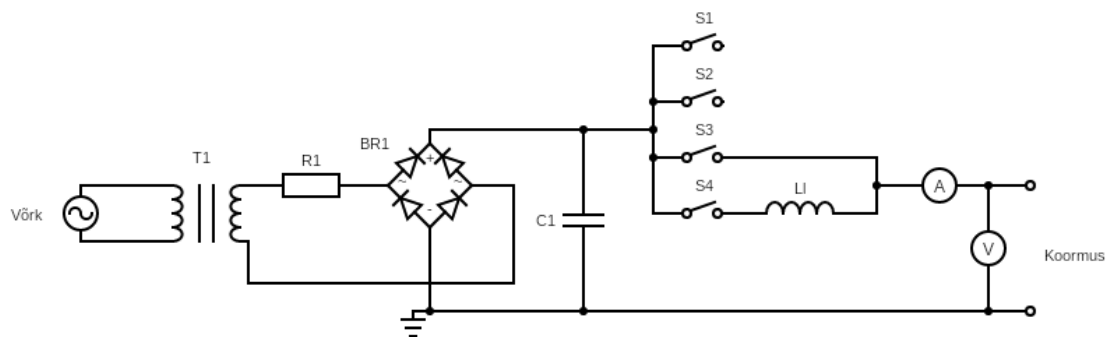
Järgnevalt töös esitatud mõõtetulemused näitavad, et vaatamata oma lihtsusele sooritatud katsed andsid esimeses lähenduses rahuldavaid tulemusi.

## 2 PRAKTILINE OSA

### 2.1 Lülitusvoolude mõõtmise katsete ettevalmistused ja mõõteriistad

#### 2.1.1 Katseseade ja mõõteriistad

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi laboris on projekteeritud ja koostatud katseseade, mis võimaldab luua nn tehisevõrgu. Seadme skeem on toodud Joonisel 2.1 ning seadme foto Lisas 1.



Joonis 2.1. Katseseadme põhimõtteline skeem

Skeemil näidatud lülitid S1 – S4 on transistorid, mis on juhitud mikrokontrollerist *Arduino Uno* arvutis koostatud programmiga. Niiviisi on loodud neli väljundit, mis võimaldavad luua erinevad tingimused koormuse ühendamiseks. Antud töö raames on kasutatud järgmised kombinatsioonid:

- väljund 3: otseühendus;
- väljund 4: induktor  $L_i$  100  $\mu\text{H}$  (mõõdetud 92,6  $\mu\text{H}$ ).

Trafo *T1* nimiaandmed:

- Võimsus  $S = 1$  kVA;
- Primaarnimipinge  $U_{1n} = 230$  V;
- Sekundaarnimipinge  $U_{2n} = 400$  V;

- $U_{kmax} = 7 \%$

Olles võrgust galvaaniliselt eraldatud, katseseade võimaldab vältida võrgu soovimatu mõju katsetulemustele. Katseseadme toiteväljund on alalispingel, kuna niiviisi on võimalik vältida vahelduvpinge juures esineva lülitushetke mõju lülitusvoolule; siirdeprotsessi sagedus on võrgupingest kordades suurem, seega alalispingega imiteeritakse protsessi üks teatud ajahetk. Tänu elektroonilistele lülititele katseseade võimaldab ka mõõtmiste automatiseerimist, mis märgatavalt vähendab käsitsi tehtava kordava töö mahu.

Suure mahtuvusega kondensaator  $C_1$  hoiab pinget kosntantsena, imiteerides tugeva võrgu omadusi.

Katseseadme küljes on ette nähtud ühekohaline pistikupesa katsetatava tarviti ühendamiseks.

Katseseadme projekteerimine, kokkupanek, katsetamine ning juhtimisosa koostamine ei kuulunud antud töö mahtu.

#### **Teised mõõtmiste käigus kasutatud mõõteriistad:**

- Ostsillograaf *Rohde&Schwarz RTH1004*, seerianumber 104961, tarkvara versioon 1.80.3.4, kalibreeritud veebruar 2022. a, koos pingeproovikuga *CalTest CT2593-1* ning vooluproovikutega *Rohde&Schwarz RT-ZC10* ja *RT-ZC20*;
- Multimeeter *Beha-Amprobe AM-555-EUR*

### **2.1.2 Mõõtmiste metoodika**

Tarvitite lülitusvoolude mõõtmised on läbi viidud Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi 3. korruse laboris. Iga tarviti juures on teostatud kaks katset eelnevalt mainitud tingimustel.

Trafo sisendpinge on reguleeritud sellisena, et saada väljundpinge transistoril  $U_1 = 350$  V.

Mõõtetulemused on registreeritud ostsillograafiga ning salvestatud .csv kujul. Mõõtetulemuste failid on töödeldud *Excel* tarkvaras.

Mõõtetulemuste juures on oluline voolu ja pinge kuju ning voolukõvera tippväärtus. Näidisgraafikutel on esitatud otseühendusega mõõtmiste tulemused, kui pole mainitud teisiti.

## **2.2 Katsetatud tarvitite kirjeldus**

Katsetatud tarvitid on kodumajapidamistes kasutatavad seadmed: leedlambid, väikepinge toiteplokid ning arvuti kuvar sisseehitatud toiteplokiaga.

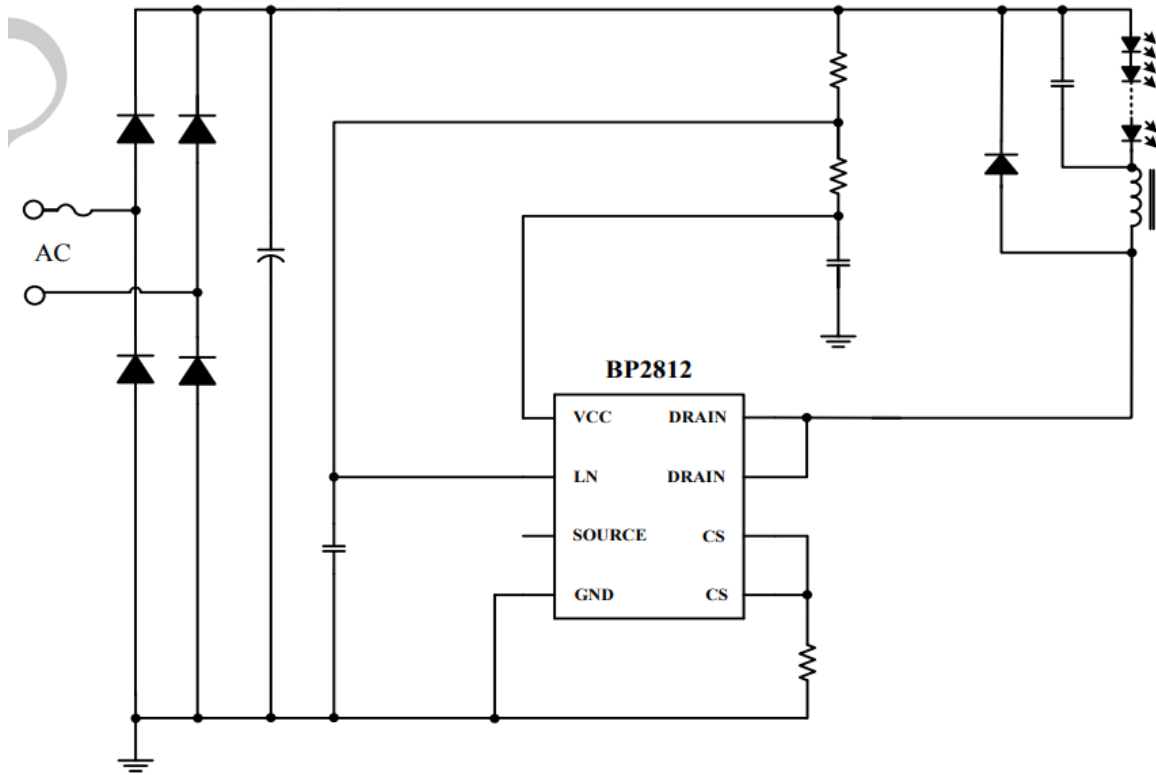
Kõik katsetatud seadmed on vabalt kättesaadavad ning katse ajal ei olnud modifitseeritud ega muud moodi muudetud.

### **2.2.1 Leedlambid**

E27, E14 ja muude soklitega leedlambid on tulnud hõõg- ja halogeenlampide asemele ning on laialt kasutatud kodumajapidamistes.

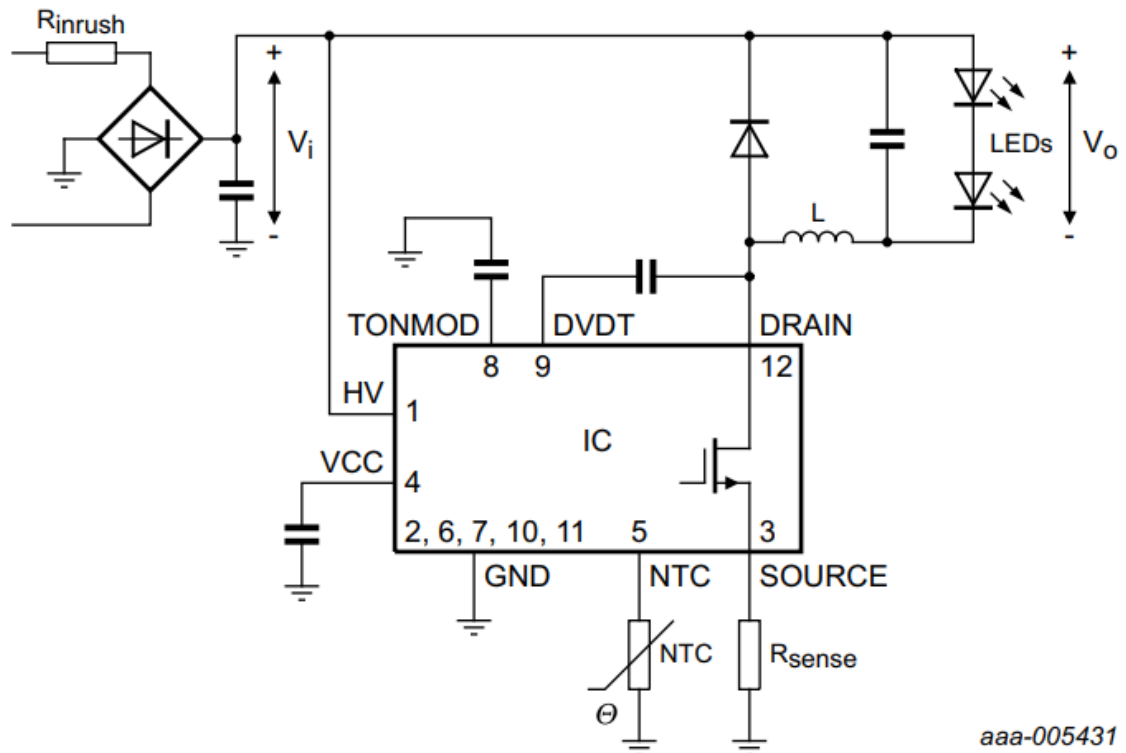
Leedide toiteks kasutatakse kõrgsagedusel töötavaid pooljuht-toitemuundureid [15]. Joonistel 2.2 – 2.5 on toodud erinevate leedlampides kasutatavate integraallülituste näited.

Joonisel 2.2 näidatud skeem põhineb *buck*-tüübi muunduril. Antud lahendus on põhimõtteliselt väga lihtne ning ei võimalda valgustusvoo reguleerimist (hämardamist). Lülitusvoolu piiramist pole ette nähtud.



Joonis 2.2. Integraallülituse BP2812 rakenduse näide [16]

Joonisel 2.3 toodud näitel tegemist on samuti *buck*-muunduriga, kuigi see lahendus näeb ette ületemperatuuri ja lühise kaitset. Lisaks sisestusele on paigaldatud aktiivtakisti lülitusvoolu piiramiseks. Ühes antud skeemi praktilises rakenduses on kasutatud puhverkondensaator mahtuvusega 330  $\mu\text{F}$  [15].

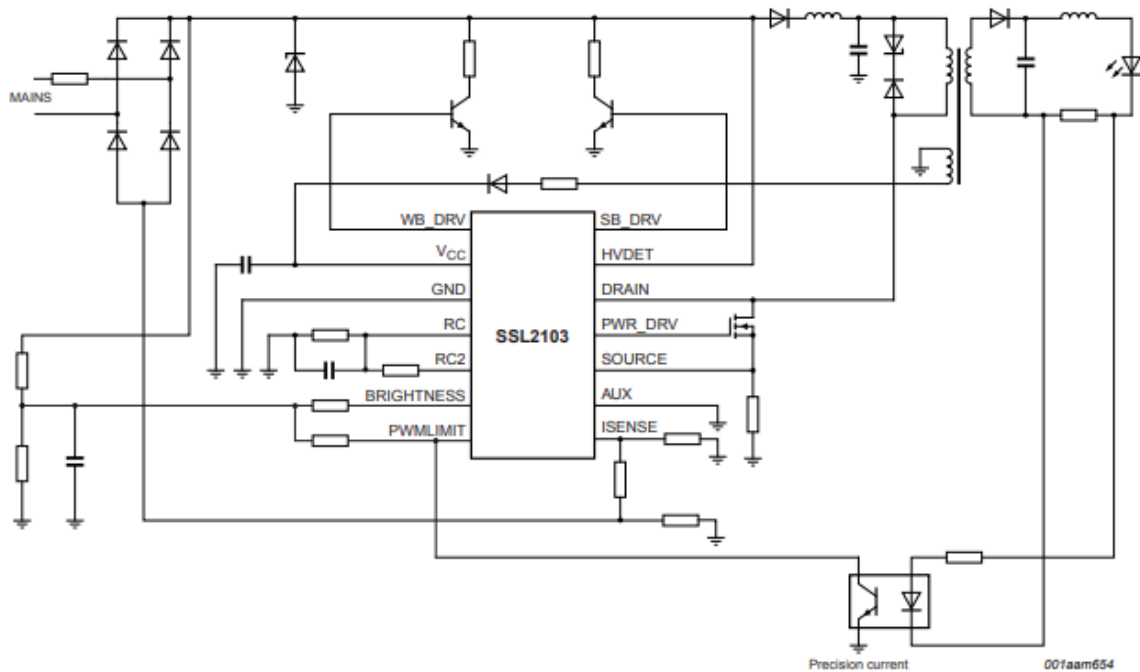


aaa-005431

Joonis 2.3. Integraallülituse SSL21082AT rakenduse näide [17]

Joonisel 2.4 toodud lahenduse juures on tegemist *flyback*-muunduriga. Antud lahendus võimaldab hämardamist ning näeb ette ka lülitusvoolu piiramist aktiivtakistiga.





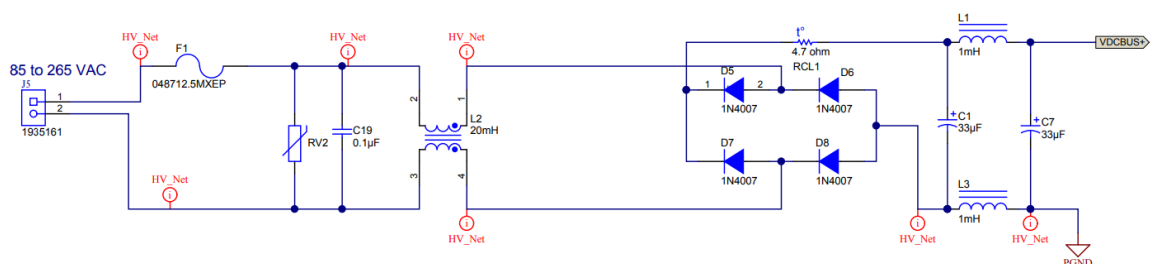
Joonis 2.4. Integraallülituse SSL2103T rakenduse näide [19]

Antud töö raames on katsetatud erinevate tootjate E27 sokliga leedlampid võimsusega 6 kuni 12,5 W. Kuna katsetatud lampide sisemist ülesehitust pole täpselt teada, eespool toodud skeemid aitavad siirdeprotsessidest paremini aru saada.

## 2.2.2 Muud seadmed

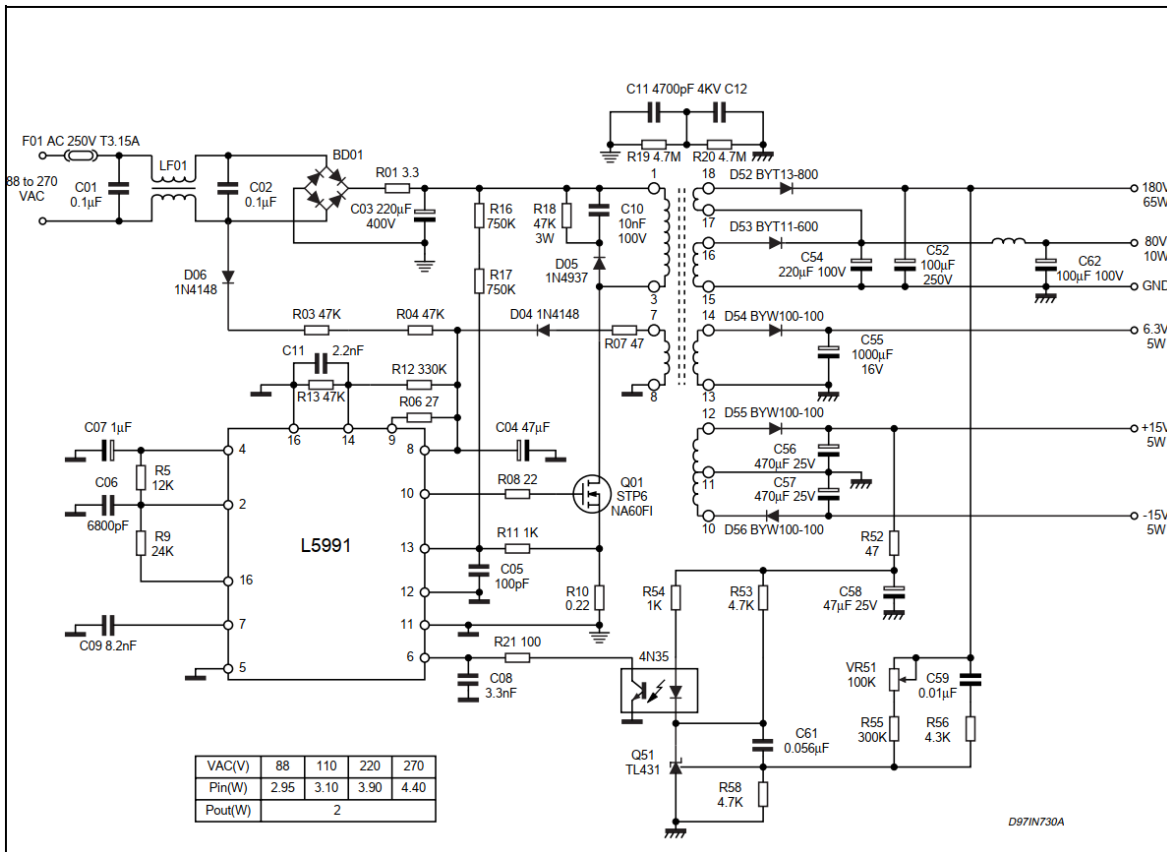
Peale leedlampe töö raames on katsetatud üldotstarbiline AC/DC toiteplokk, sülearvuti toiteplokk ning arvuti kuvar sisseehitatud toiteplokkiga.

Joonisel 2.5 on toodud näidis sülearvuti 12 V isoleeritud toiteplokkist, nimelt selle toiteahela osa. Diiodsilla ja LC-filtri vahele on paigaldatud termistor lülitusvoolu piiramiseks.



Joonis 2.5. Sülearvuti toiteploki toiteahela näidis (Texas Instruments TIDA-00709) [20]

Joonisel 2.6 on näidatud kuivari toiteploki võimalik lahendus. Siin on samuti tegemist isoleeritud toiteploki ja lülitusvoolu piiramiseks on arvatavasti ette nähtud tavaline aktiivtakisti.



Joonis 2.6. Arvuti kuivari toiteploki näidislahendus (ST L5991) [21]

Toodud näidistest on näha, et leedlampide muunduritega võrreldes tegemist on keerulisemate ahelatega.

### 2.3 Katsetulemuste ülevaade

Mõõtmistulemuste alusel koostatud volugraafikute põhjal võib eristada erinevaid siirdeprotsessi profiili. Esimesed katsed on teostatud leedlampidega ning seejärel toiteplokiidega.

### 2.3.1 Leedlambid

Kokku on mõõdetud 29 erinevat lampi. Lampide toiteks on kasutatud E27 sokliga lauavalgusti, mis on omakorda ühendatud katseseadme pistikupesasse.

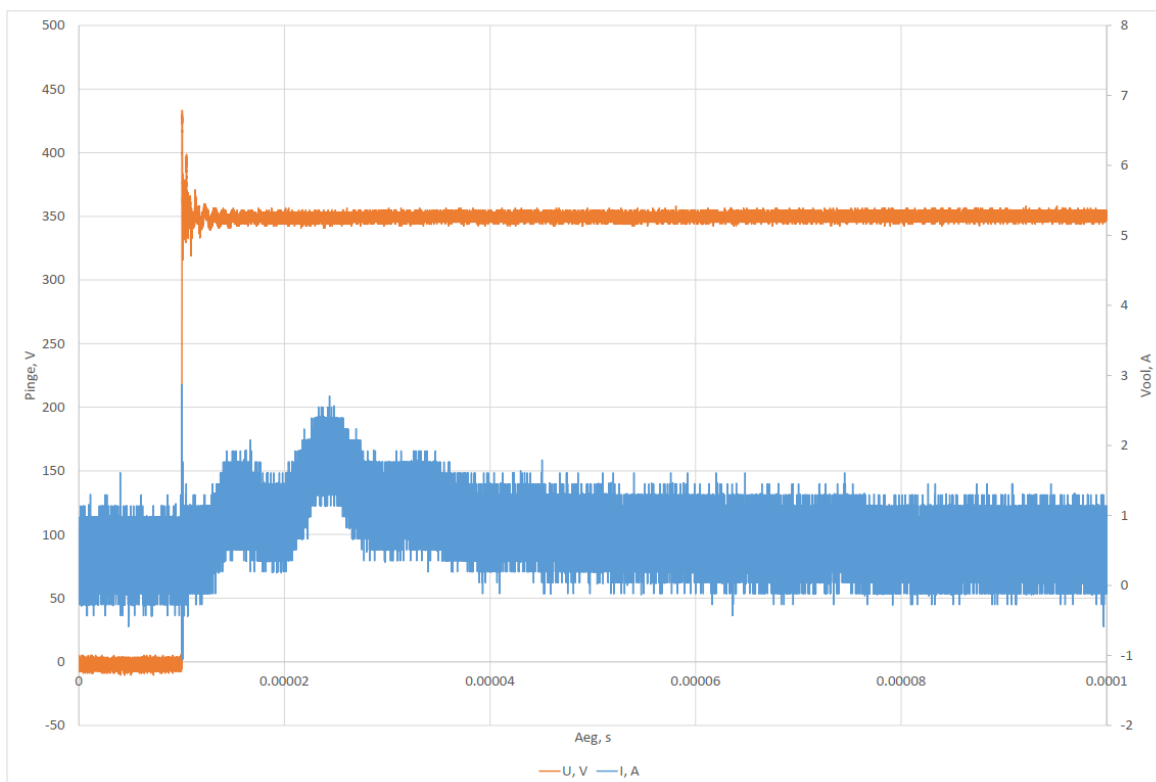
Alljärgnevalt on esitatud ühe lambi mõõtetulemusi igast profiilitüübist. Iga näidise juures on toodud ka umbkaudne võimsusteguri arvutus koormuse iseloomustamiseks.

**Tüüp 1 profiil** esineb kvaliteetsemate lampide juures. Selliseid lampe on 3 tükki ning näidiseks on siin *Osram AA78537 9 W* leedlamp. Lambi nimivooluks on deklareeritud 40 mA, seega 230 V juures võimsustegur  $\cos\varphi \approx 0,98$ .

Voolukõvera järgi saab eeldada, et antud muunduris on rakendatud lülitusvoolu piiramine, kuna puuduvad järsud voolutipud. Voolu tippväärtus on 2,5 A, mis on suhteliselt mõistlik number võrreldes teiste katsetatud lampidega; kuigi antud juhul lülitusvool on nimivoolust ikkagi 62,5 korda suurem.

Voolugraafiku alusel eeldame, et antud süsteem on kriitiliselt summutatud.

1. profiili näidislambi mõõtetulemused on esitatud Joonisel 2.7.



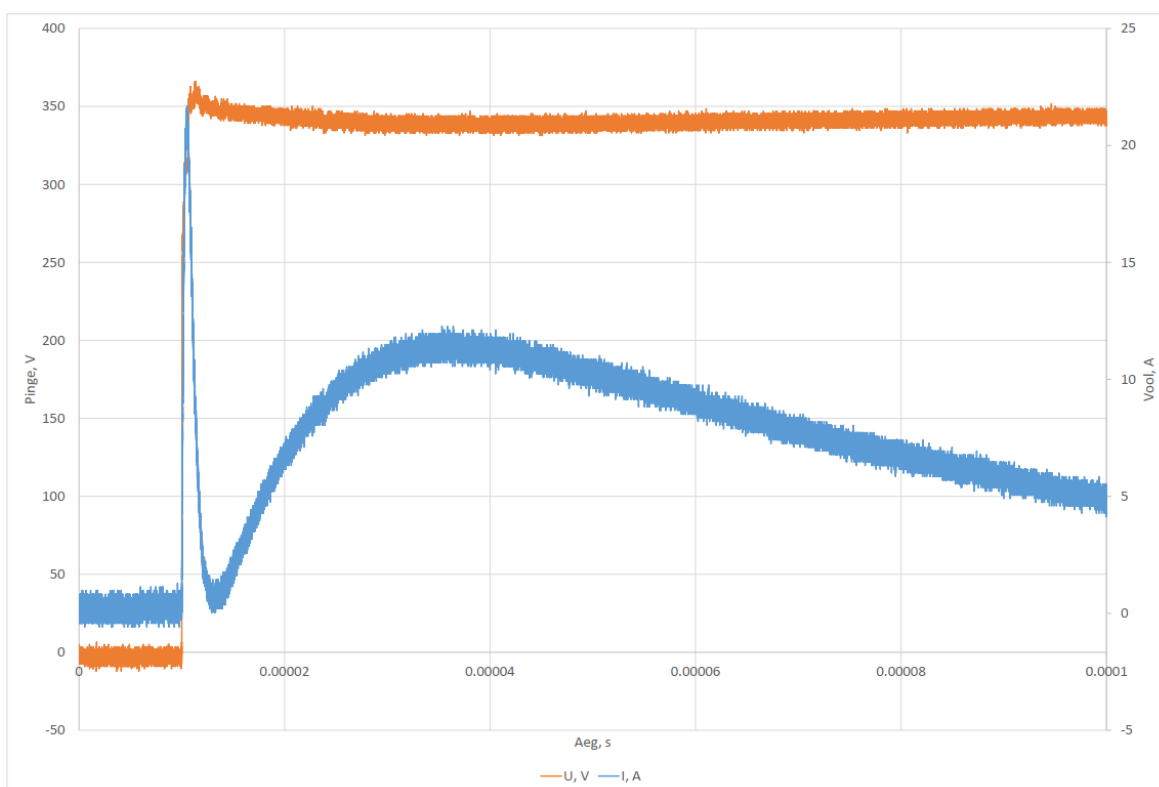
Joonis 2.7. Leedlambi 1. profiili tüüpiline siirdeprotsess

**Tüüp 2 profiil** esineb samuti viiel lambil. Näidiseks on *Neolux NB32767* 8,5 W lamp. Selle lambi nimivooluks on 68 mA, järelkult  $\cos\varphi \approx 0,54$ .

Antud profiili juures esineb kaks voolumaksimumi. Esimese järsu voolutipu väärtus on 21,5 A, teine tipp esineb 12 A juures. Seega siirdeprotsessi võib jagada kaheks ülesummutatud protsessiks erinevate parameetritega. Selline voolukuju on ilmselt tingitud muunduri struktuurist.

Võib öelda, et selles muunduris arvatavasti pole ette nähtud meetmeid lülitusvoolu piiramiseks.

2. profiili näidislambi mõõtetulemused on esitatud Joonisel 2.8.

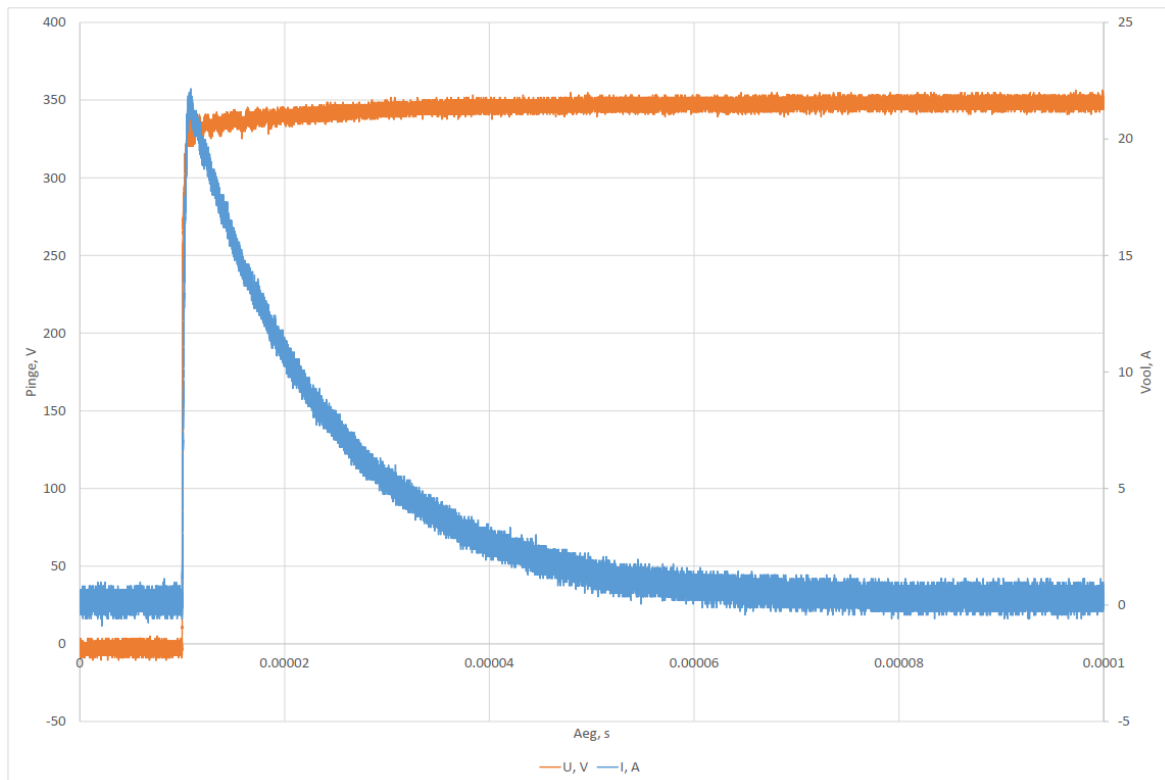


Joonis 2.8. Leedlambi 2. profiili tüüpiline siirdeprotsess

**Tüüp 3 profiiliga** lampe esineb neli tükki. Näidiseks on tundmatu tootja 6 W lamp seerianumbriga *21136073*. Lambi nimivool on 53 mA, seega  $\cos\varphi \approx 0,49$ .

Voolu maksimumväärtus on 21,8 A. Siin siirdeprotsess kulgeb sarnaselt  $RC$ -ahelates esineva voolukõvera järgi. Sarnaselt eelmise näidisega, lülitusvoolu piiramist siin ilmselt ei rakendata. Voolukuju järgi võib eeldada, et tegemist on ülesummutatud süsteemiga.

3. profiili näidislambi mõõtetulemused on esitatud Joonisel 2.9.

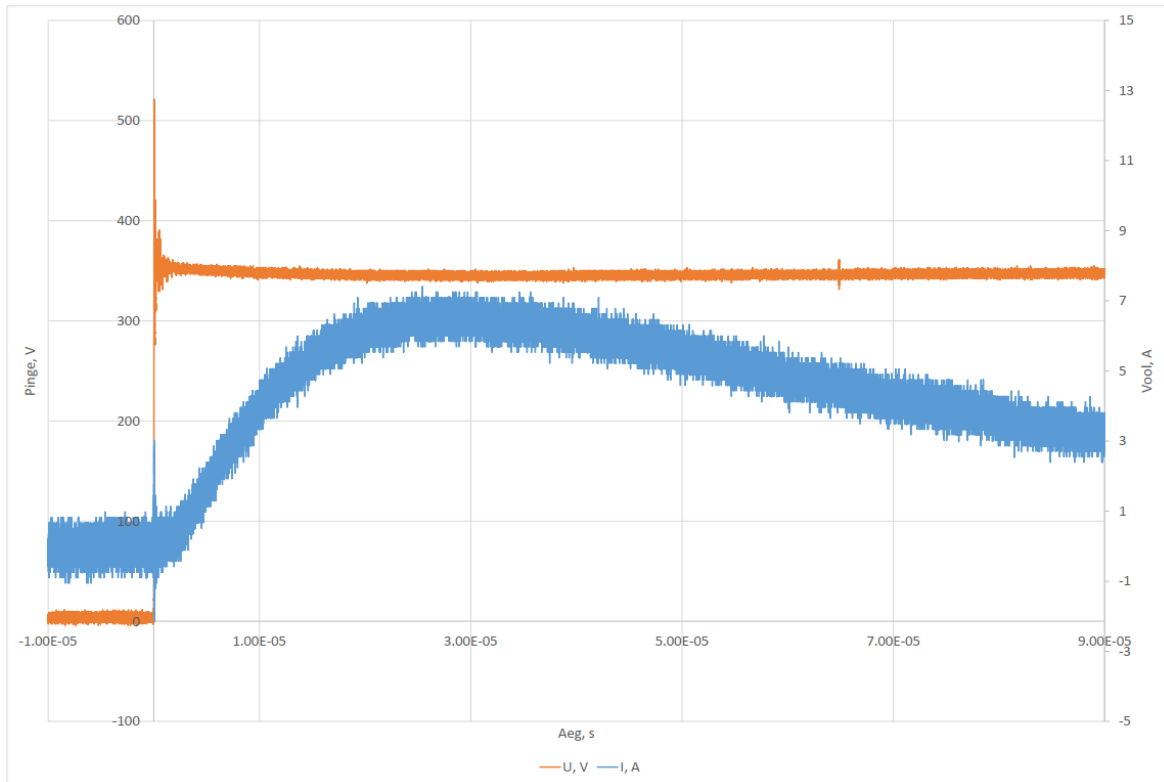


Joonis 2.9. Leedlambi 3. profiili tüüpiline siirdeprotsess

**Tüüp 4 profiil** esineb samuti neljal lambil. Siin on näidiseks *AIRAM 4711542* 8,5 W lamp. Selle nimivool on 74 mA ning seega  $\cos\varphi \approx 0,50$ .

Antud lambi lülitusvoolu tipuväärtus esineb 6,9 A juures. Sellest lähtudes võib eeldada, et lülitusvool on mingil määral piiratud ning tegemist on jällegi ülesummutatud süsteemiga.

4. profiili näidislambi mõõtetulemused on esitatud Joonisel 2.10.

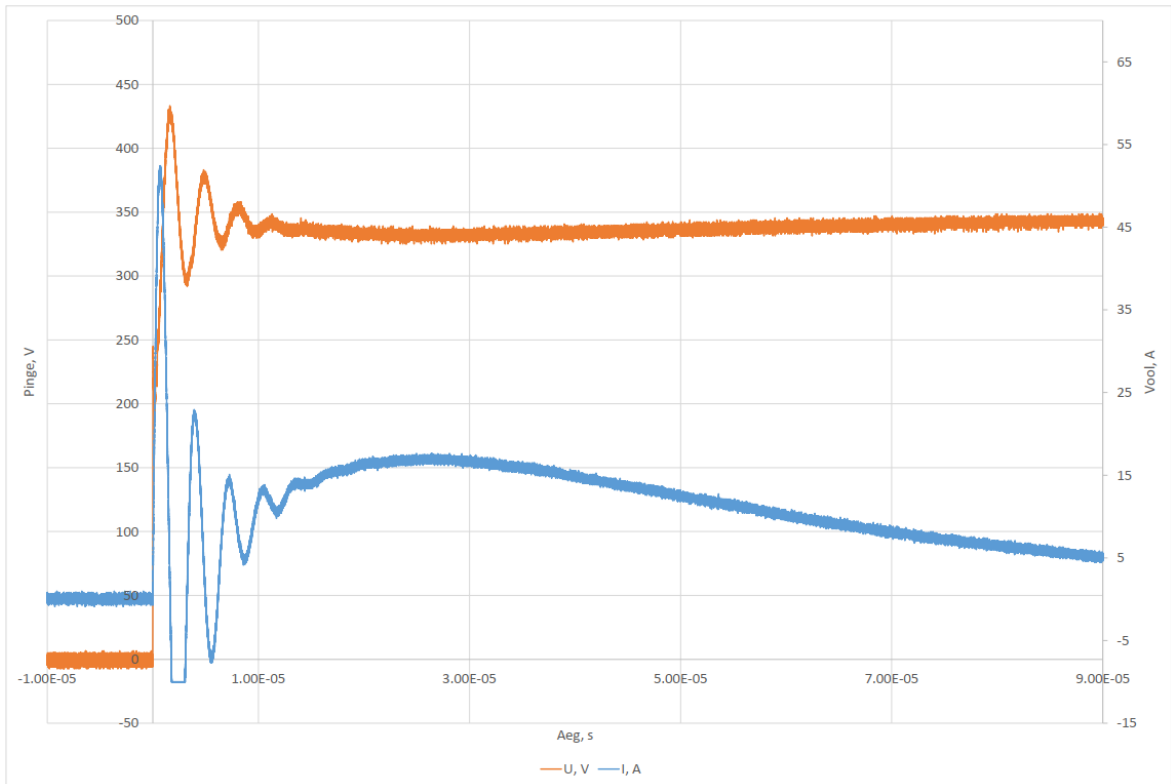


Joonis 2.10. Leedlambi 4. profiili tüüpiline siirdeprotsess

**Tüüp 5 profiil** esineb ühel lambil, milleks on *Henske A60 9 W* lamp nimivooluga 95 mA ning mille  $\cos\varphi \approx 0,41$ .

Antud lambi lülitusvool ulatub väärtuseni 50 A ning siin selgelt esineb nii ala- kui ka ülesummutatud süsteemi tunnuseid. Protsessi teine osa on suhteliselt aeglane. Võib eeldada, et lülitusvoolu piiramist ei ole ette nähtud.

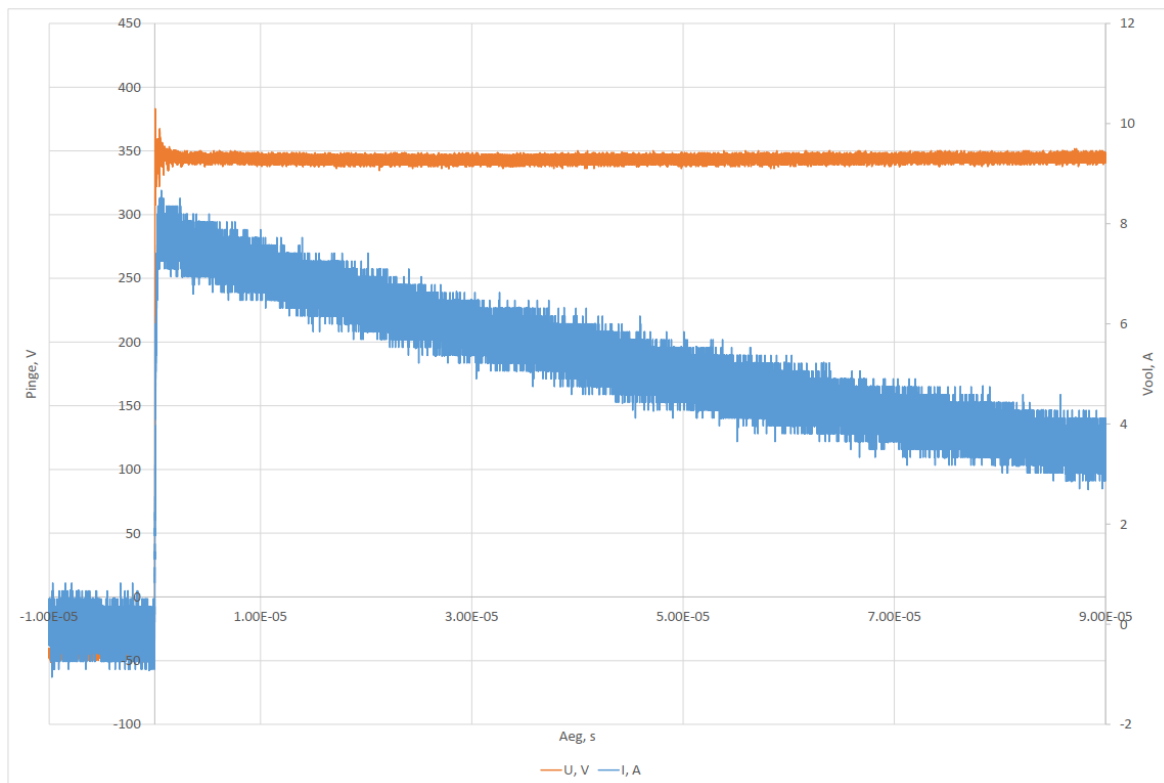
5. profiili näidislambi mõõtetulemused on esitatud Joonisel 2.11.



Joonis 2.11. Leedlambi 5. profiili tüüpiline siirdeprotsess

**Tüüp 6 profiil** on määratud 12 lambile. Voolukuju meenutab tüüp 3 profiili, kuid siin siirdeprotsess on pikem – see võib olla tingitud sellest, et ahelas esineb suurem aktiivtakistus. Toodud näidises voolu tippväärtus esineb 8 A juures. Tegemist on samuti ülesummutatud süsteemiga.

6. profiili näidislambi mõõtetulemused on esitatud Joonisel 2.12.



Joonis 2.12. Leedlambi 6. profiili tüüpiline siirdeprotsess

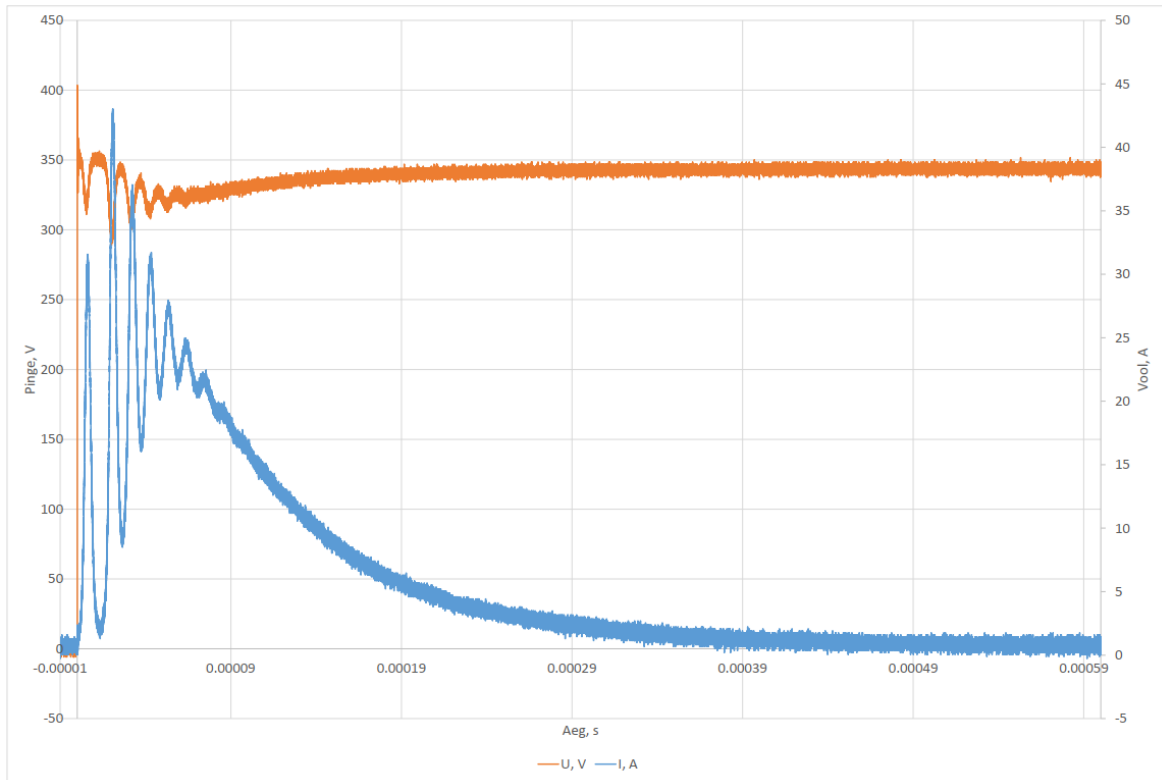
### 2.3.2 Muud seadmed

Esimese seadmena peale leedlampe on mõõdetud 230 VAC / 9 VDC, 1,5 A toiteplokk *DVE DSA-0151A-09*, nimisisendvool on 0,4 A.

Siirdeprotsess meenutab leedlambi tüüp 5 profiili, kuid kestab umbes 0,5 ms. Antud juhul voolutipp on 44 A juures.

Toiteploki mõõtetulemused on esitatud Joonisel 2.13.



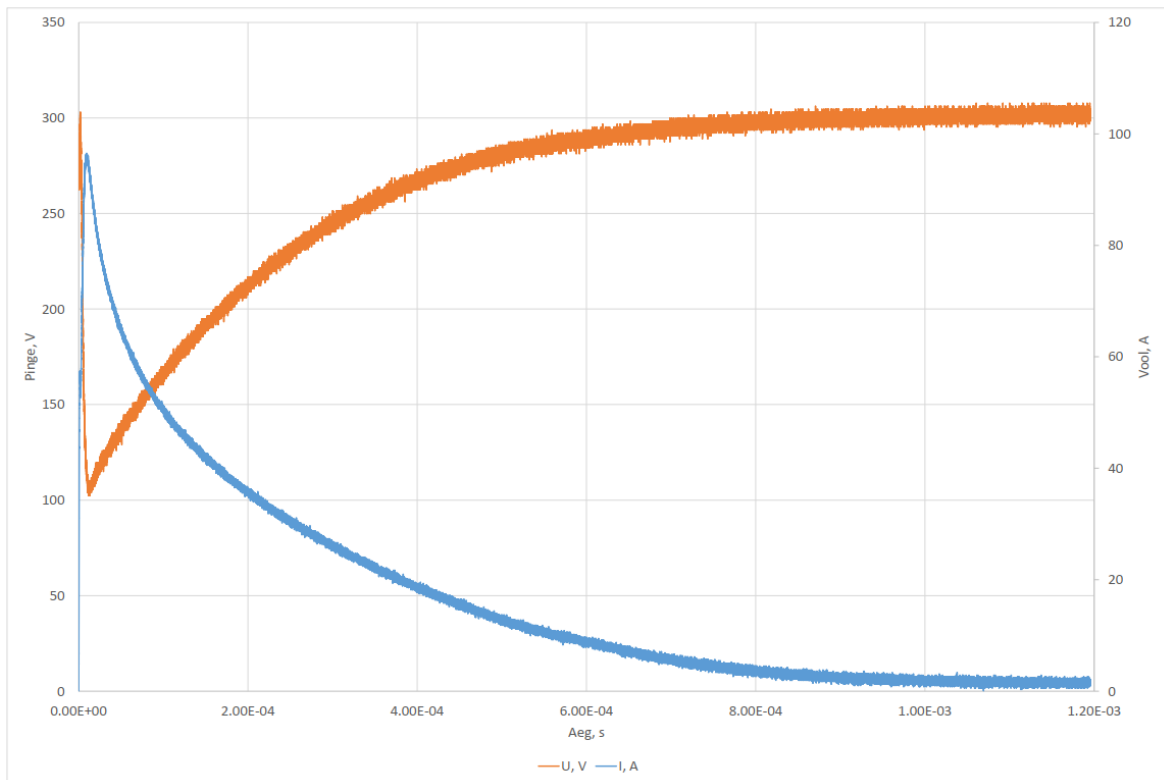


Joonis 2.13. 9 VDC toiteploki lülituse siirdeprotsess

Järgmisena on katsetatud sülearvuti toiteplokk *ASUS AD883020*, 19 VDC, 1 (230 V) / 2,4 (19 V) A. Siin on tegemist tüüpilise ülesummutatud süsteemi siirdeprotsessiga. Voolumaksimum esineb 95 A juures ning kogu siirdeprotsess kestab umbes 1,2 ms.

Antud toiteploki ühendamisel pistikupesasse esineb visuaalselt ja akustiliselt eristatav kaarlahendus.

Arvuti toiteploki mõõtetulemused on esitatud Joonisel 2.14.

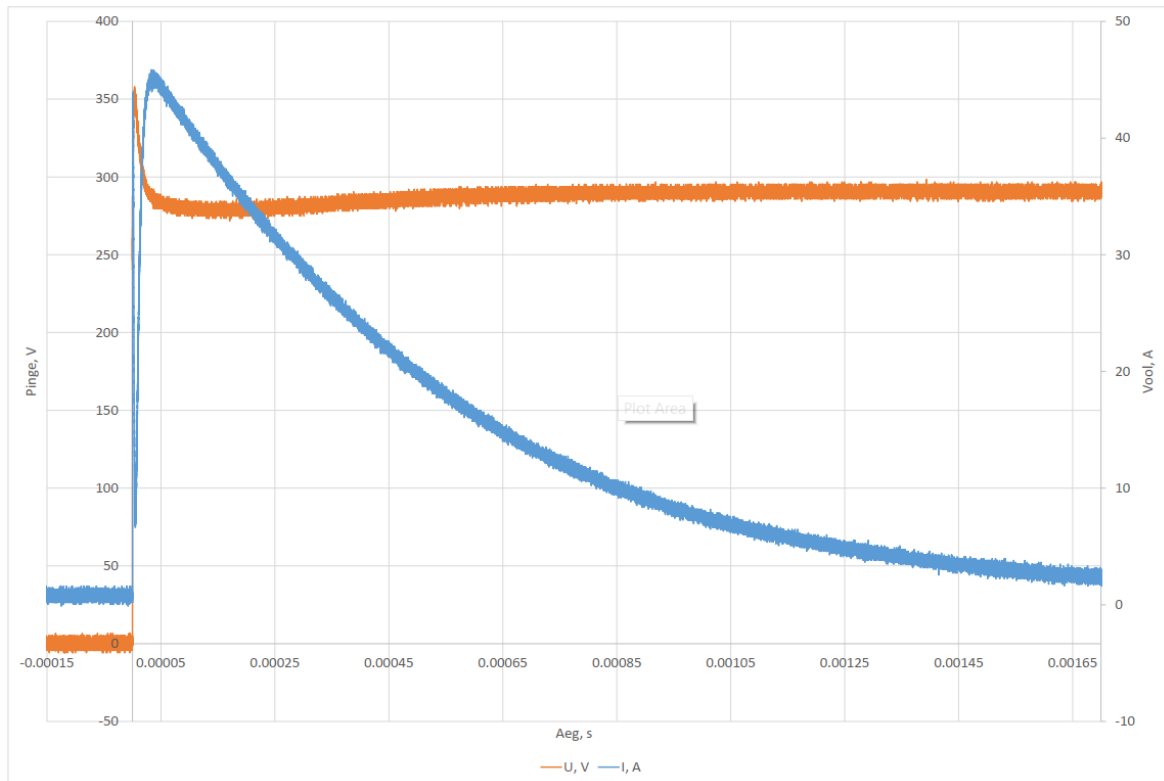


Joonis 2.14. Arvuti toiteploki lülituse siirdeprotsess

Viimasena on mõõdetud arvuti kuvar *HP E22 G4 FHD* nimivõimsusega 23 W. Tootelehes ei ole toodud toiteploki nimivoolu.

Jällegi mõõdetud tulemusena on ülesummutatud süsteemi tunnusgraafik. Voolu maksimumväärtus esineb 44 A juures, protsess kestab umbes 2 ms. Graafikust on näha, et vahetult peale lülitushetke esineb kaks kiiret voolutippu.

Kuvari mõõtetulemused on esitatud Joonisel 2.15.

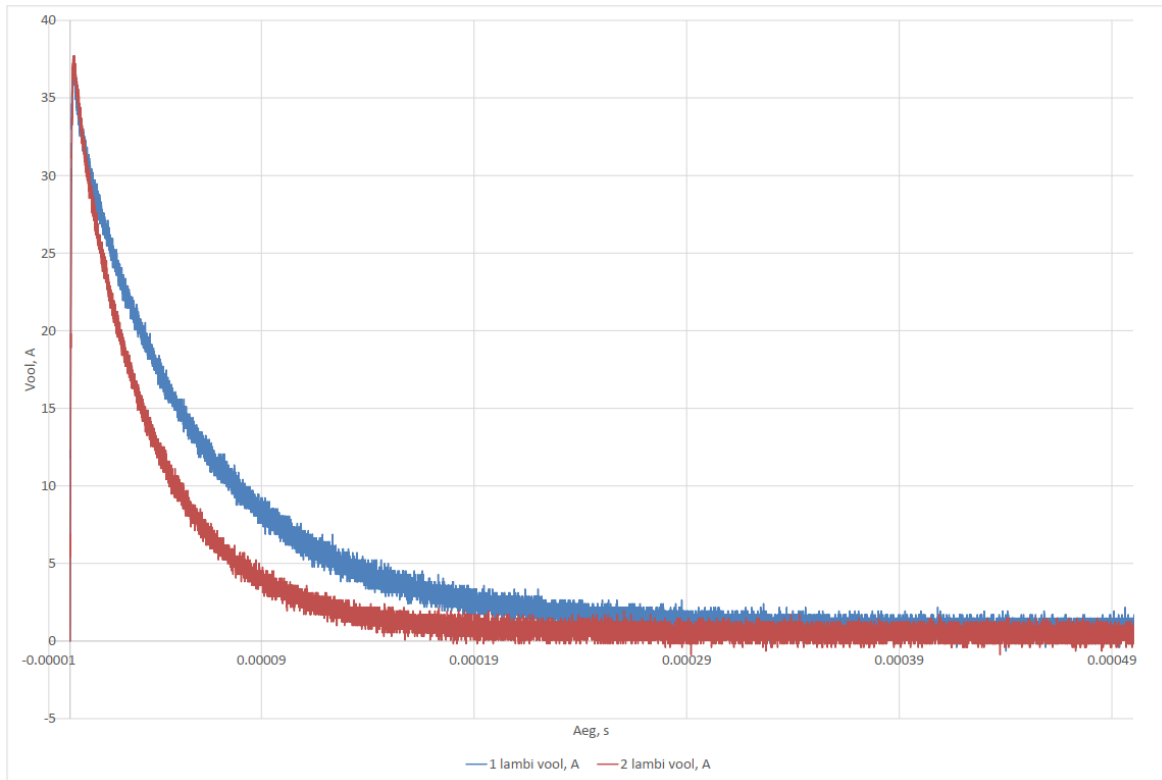


Joonis 2.15. Arvuti kuvari lülituse siirdeprotsess

### 2.3.3 Mitme seadme kooslülitus

Kooslülituse efekti eeluurimiseks on rööbiti ühendatud kaks 3. profiili leedlambi – *LED House* 12 W ja *V-TAC* 11 W lamp. Lampide toiteks on kasutatud kaks samasugust lauavalgustit, mis on ühendatud katseseadme pistikupesasse läbi pikendusjuhtme.

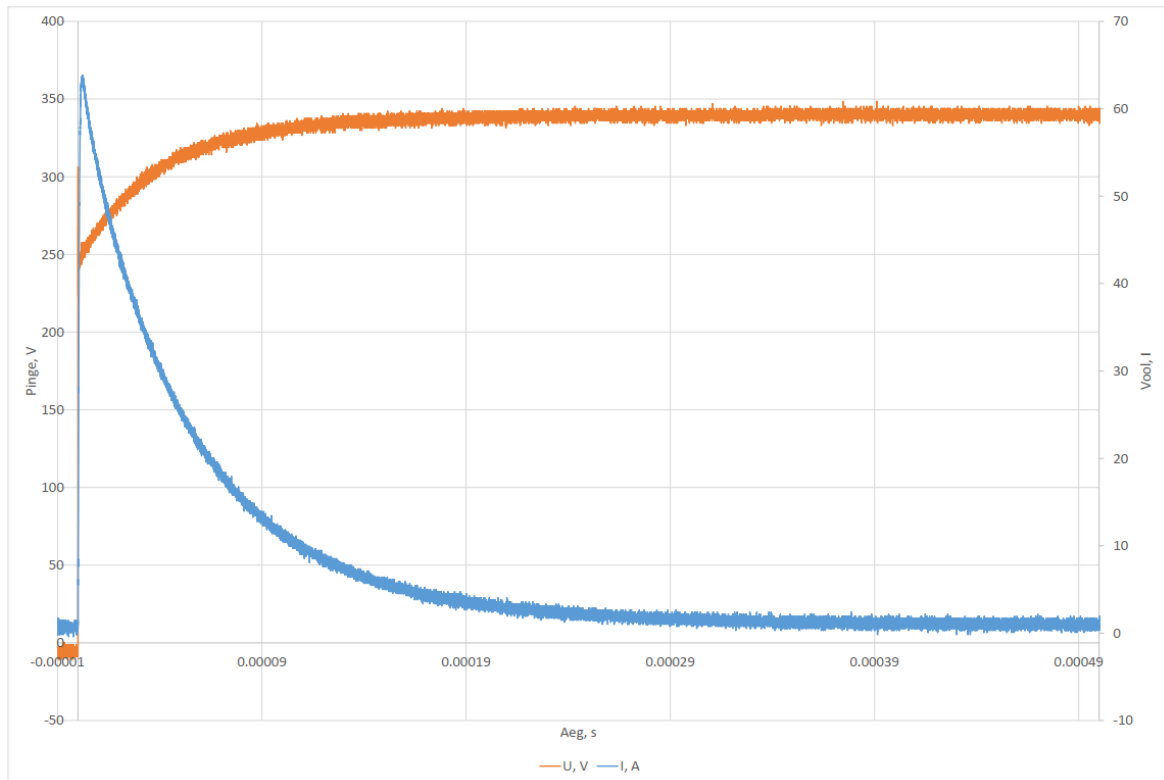
Lampidel esinevad üsna sarnased siirdeprotsessid. Mõlemad voolumaksimumid on 37 A juures. Lampide voolukõverate võrdlus on toodud Joonisel 2.16.



Joonis 2.16. Kahe lambi voolukõverate võrdlus

Kahe lambi kooslülituse tulemus on esitatud Joonisel 2.17. Graafikust on näha, et voolutipp ulatub 63 amprini. Siit saab järeldada, et toitemuundurite kooslülituse summaarne vool ei ole võrdeline nende muundurite lülitusvoolude aritmeetilise summaga, kuna antud juhul see peaks olema umbes 74 A. Esimese siirdeprotsessi osa kiirus oluliselt ei muutu, kuid on märgatav protsessi teise osa aeglustus.

Pinge algväärtus on 250 V juures, mis on märgatavalt madalam kui eraldi mõõdetud tüüp 3 profiili lambil.



Joonis 2.17. Kahe lambi kooslülituse siirdeprotsess

### 2.3.4 Katsetulemuste kokkuvõte

Leedlampide katsetulemuste analüüs võimaldab tuletada mitu järeldusi.

Näidiseks toodud lampide võimsus jääb vahemikku 6 – 9 W ning võimsustegur on keskmiselt 0,5 juures. Madal võimsustegur näitab, et leedlampi näol tegemist on mittelineaarse koormusega ning võimsusteguri kompenseerimist (*PFC*) ei rakendata. Siirdeprotsessi pikkus jääb vahemikku umbes 0,1 – 0,2 ms.

Vaatamata sarnasustele võimsuses ja võimsusteguris, lampide lülitusvoolud kujunevad erinevalt. Voolugraafiku alusel on määratud 6 siirdeprotsessi profiili. Ülesummutatud süsteeme esineb kõige rohkem, kuid on ka ala- ja kriitiliselt summutatud süsteeme. Voolutipu väärtused jäävad vahemikku 2,5 – 50 A. Kõige kriitilisemal juhtumil lülitusvool ületab nimivoolu umbes 500 korda – siit võib järeldada, et enamus tootjaid ei rakenda lülitusvoolu piiramismeetmeid.

Teiste seadmete mõõtetulemustes saab samamoodi leida nii sarnasusi kui ka erinevusi.

Siirdeprotsessi kestvus on lampidega võrraldes suurem ning ulatub 2 ms-ni. Voolugraafikud on põhimõtteliselt sarnased leedlampide graafikutega.

Esinevate lülitsuvoolude väärtused on suurusjärgus 40 – 100 A; 9 V toiteploki lülitusvool on nimivoolust umbes 110 korda suurem. See jällegi näitab, et lülitusvoolu piiramist ei esine või see on väheefektiivne, kuigi arvuti toiteploki ja kuvari näol tegemist on kallimate seadmetega.

Ülesummutatud protsessides esineb väga kiire voolu tõus ning aeglane langus. Esimeses lähenduses võib öelda, et see võib olla tingitud väikese induktiivsusega, suure mahtuvusega ning suhteliselt suure aktiivtakistusega.

Erinevusi esineb ka pinge kujunemise juures. Suurema osa lampidel pinge stabiliseerub kiiresti, kuid lülitushetkel esineb ülevise, mis võib ulatuda 500 V väärtuseni. Lambi 5. profiili ja 9 V toiteploki juures pinge siirdeprotsessil esineb võnkumisi. Arvuti toiteploki ja kuvari juures on näha, et pinge kujunemine võtab rohkem aega. Samuti on see märgatav ka kahe lambi kooslülituse katsel.

Reaalses võrgus lülitusvoolude tipud on arvatavasti mõnevõrra väiksem võrgu suurema takistuse tõttu.

## 3 ANALÜÜTILINE OSA

Analüütilise osa eesmärk on pakkuda meetod aseskeemide koostamiseks mõõdetud parameetrite alusel.

Edaspidi kirjeldatud katsed on esitatud alljärgnevalt:

- katsestendi ja näidistarvitite takistuse ja induktiivsuse leidmine esimese katsemeetodiga
- katsestendi mahtuvuse leidmine teise katsemeetodiga
- katsestendi mahtuvuse kontrollarvutus esimese katsemeetodiga
- näidistarvitite mahtuvuse leidmine esimese katsemeetodiga
- näidistarvitite takistuse, induktiivsuse ja mahtuvuse leidmine teise katsemeetodiga
- võrgu takistuse, induktiivsuse ja mahtuvuse leidmine esimese katsemeetodiga

### 3.1.1 Kasutatud meetodite kirjeldus

Töös kasutatud meetodid põhinevad graafiliste mõõtmistulemuste analüüsil, mis toetub eeltoodud teoreetilistele alustele.

Eeldame, et nii mõõdetud seadme kui ka katsestendi näol on tegemist *RLC*-jadaahelaga ning eelnevalt toodud seosed kehtivad.

Katsestendi parameetrite arvutamine põhineb ahela ajakonstantite ja komponentide väärtuste seostel. **Esimese katsemeetodi** põhimõtteline algoritm kujuneb järgnevalt:

- 1) voolugraafiku korrastamine;
- 2) voolutipu ja lineaarosa väärtuste ja nende ajade määramine;
- 3) ajakonstandi ning summaarse induktiivsuse ja takistuse arvutamine;
- 4) takistuse ja induktiivsuse leidmine iteratsiooniga (parameetrite leidmiseks on vaja vähemalt kolme katse tulemusi);
- 5) lisainduktiivsuse leidmine (vajadusel)

Tarvitite komponentide väärtuste leidmiseks on loodud **teine katsemeetod** alljärgneva lahenduse algoritmiga:

- 1) voolugraafiku korrastamine, ebavajalikke mõõteandmete eemaldamine;
- 2) süsteemi iseloomu määramine voolu kuju järgi (kas ala, -üle või kriitiliselt summutatud);
- 3) voolukomponentide avaldise koostamine karakteristikliku võrrandi järgi;
- 4) integreerimiskonstantide väärtuste eeldatavate väärtuste leidmine;
- 5) muutujate  $a$  ja  $b$  väärtuste otsimine iteratsiooniga, mille eesmärgiks on arvutatud ja mõõdetud vooluväärtuste summaarse ruutvea minimeerimine;
- 6) integreerimiskonstantide väärtuste täpsustamine iteratsiooniga;
- 7) mõõdetud ja arvutatud tulemuste graafikute visuaalne võrdlus;
- 8) süsteemi komponentide väärtuste arvutamine võrrandite süsteemiga. Süsteemi koostamiseks on vaja vähemalt kahe katse (antud juhul otseühendusega ja lisainduktoriga) arvutustulemusi;
- 9) mõõdetava tarviti komponentide arvutamine arvestades katseseadme komponente väärtusi.

Mõlema meetodi näited on toodud järgmistes jaotistes. Arvutused on enamasti sooritatud *Excel* tarkvaras ning ei ole täies mahus töös esitatud.

## **3.2 Katsestendi ja näidistarvitite parameetrite määramine**

Tarvitite komponentide väärtuste määramiseks on tarvis teada katsestendi takistust  $R_{ks}$ , induktiivsust  $L_{ks}$  ja mahtuvust  $C_{ks}$ .

Takistuse ja induktiivsuse leidmiseks on aluseks võetud Jaotises 2.3.3 toodud kahe lambiga katse mõõtetulemused. Antud katses mõõdetud leedlampide mõõtmistulemused on kõikidest lampidest kõige lähedam teoreetilistele.

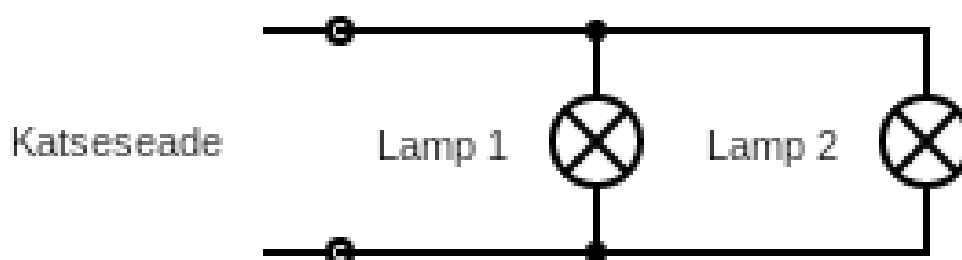
Mahtuvuse leidmiseks on teostatud lisaks eraldi kontrollkatse.



### 3.2.1 Takistuse ja induktiivsuse arvutamine

Takistuse ja induktiivsuse leidmiseks kasutatud meetod põhineb eelnevalt toodud eeldusel, et protsessi kiirust suures osas mõjuvad summaarne takistus  $R_s$  ja induktiivsus  $L_s$ , mis koosnevad omakorda katsestendi ja tarviti takistuse ja induktiivsuse summast.

Katse põhimõtteline skeem on toodud Joonisel 3.1. Lambid on katsetatud nii eraldi kui ka kooslülitusel.



Joonis 3.1. Kahe lambiga katse põhimõtteline skeem

Katsete algandmed on toodud Tabelis 3.1. Lisainduktoriga katsete juures on toodud ainult arvutustes kasutatud andmed.

Tabel 3.1. Algandmed katsestendi parameetrite määramiseks

Katse nr	Katseahel	Voolutipu aeg $t_{max}$ , $\mu s$	Lineaarosa aeg $t_{lin}$ , $\mu s$	Voolu tippväärtus $I_{max}$ , A	Voolu lineaarosa väärtus $I_{lin}$ , A	Toitepinge $U_a$ , V
1	Lamp nr 1	1,4	0,4	37,5	23,7	307
2	Lamp nr 2	1,8	0,5	37,7	23,8	305

3	Lamp nr 1 + Lamp nr 2	2,4	0,5	63,8	40,3	251
4	Lamp nr 1, lisainduktoriga	5,0	-	-	-	-
5	Lamp nr 2, lisainduktoriga	5,0	-	-	-	-

Antud andmete alusel on arvatud summaarne alalisvoolutakistus  $R_s$ , ajakonstandi määrav summaarne induktiivsus  $L_s$  ning ajakonstandi  $\tau$  ja voolutipu aja  $t_{max}$  suhe  $t_s$ . Kuna voolu lineaarosa väärtus  $I_{lin} \approx 0,632 * I_{max}$ , siis  $\tau = t_{lin}$ .

Arvutuste aluseks olevad valemid:

$$R_s = \frac{U_a}{I_{max}}$$

kus  $U_{in}$  on katsestendi pistikupesal mõõdetud pinge;

$$L_s = \tau R_s$$

$$t_s = \frac{\tau}{t_{max}}$$

Arvutustulemused on koondatud Tabelisse 3.2.

Tabel 3.2. Katsestendi parameetrite määramise vahetulemused

Katse nr	Summaarne takistus $R_s, \Omega$	Summaarne induktiivsus $L_s, \mu H$	Voolutipu aja ja ajakonstandi suhe $t_s$
1	8,2	3,3	0,28
2	8,1	3,8	0,26
3	3,9	2,1	0,22

Edaspidi kasutatud numbrindeksid viitavad katse järjekorranumbrile Tabelis 1.

Esiteks arvutatakse katsestendi ja tarvitite ekvivalentsed takistused  $R_{ks}$ ,  $R_1$  ja  $R_2$ , kusjuures

$$\begin{cases} R_1 = R_{s1} - R_{ks} \\ R_2 = R_{s2} - R_{ks} \end{cases}$$

Samas eeldatakse, et teoreetiline kolmanda katse takistus

$$R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_{ks}$$

peaks olema võrdne eelnevalt arvutatud takistusega  $R_{s3}$ . Siit tuleneb tingimus

$$(R_3 - R_{s3})^2 \rightarrow 0$$

mis on iteratsiooni aluseks; selle tulemusena ongi  $R_{ks}$  väärtus. Iteratsioon on teostatud *MS Excelis* tööristaga *Solver*.

Arvutuste tulemustena saadud väärtused:

$$R_{ks} \approx 0,5 \Omega,$$

$$R_1 = 7,7 \Omega,$$

$$R_2 = 7,6 \Omega,$$

$$R_3 = 4,3 \Omega.$$

Osade katsete tulemustest selginud takistuse väärtused osutusid esitatud väärtusest suuremateks, mis võib olla tingitud katsestendi sageduskarakteristikutest. Sageduskarakteristikute täpne iseloom ei ole antud töö tegemise ajal määratud.

Katsestendi induktiivsuse arvutamise lahenduskäik on põhimõtteliselt samasugune. Sarnaselt takistuste arvutustega

$$\begin{cases} L_1 = L_{s1} - L_{ks} \\ L_2 = L_{s2} - L_{ks} \end{cases}$$

ja

$$L_3 = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2} + L_{ks}$$

ning

$$(L_3 - L_{s3})^2 \rightarrow 0$$

Induktiivsuse arvutuste tulemused:

$$L_{ks} = 0,6 \mu H,$$

$$L_1 = 2,8 \mu H,$$

$$L_2 = 3,3 \mu H,$$

$$L_3 = 2,1 \mu H.$$

Viimasena on teostatud lisainduktiivsuse  $L_l$  kontrollarvutus.

Arvutustulemuste alusel leitav ajakonstant

$$\tau_1 = \frac{L_1 + L_{ks} + L_l}{R_1 + R_{ks}} \text{ ja } \tau_2 = \frac{L_2 + L_{ks} + L_l}{R_2 + R_{ks}}.$$

Samas oletame, et sama tarviti otseühenduse ja lisainduktoriga lülitamisel suhe  $t_s$  jääb mõlemal juhul konstantseks, näiteks

$$t_{s1} = \frac{\tau_1}{t_{max1}} = \frac{\tau_4}{t_{max4}} = t_{s4} \text{ ja } t_{s2} = \frac{\tau_2}{t_{max2}} = \frac{\tau_5}{t_{max5}} = t_{s5},$$

seega

$$\tau_4 = t_{max4} t_{s1} \text{ ja } \tau_5 = t_{max5} t_{s2}.$$

Tulemuse leidmiseks on jällegi rakendatud iteratsioon, mille tingimuseks

$$(\tau_4 - \tau_1)^2 \rightarrow 0$$

ning

$$(\tau_5 - \tau_2)^2 \rightarrow 0$$

mille tulemuseks

$L_{l1} = 8,2 \mu H$  ja  $L_{l2} = 6,9 \mu H$ ; nende aritmeetiline keskmine ongi lisainduktiivsuse väärtus:

$$L_l = 7,5 \mu H.$$

Lisainduktiivpooli puhul ei ole teada selle omaresonantssagedus antud ahelas. Selle määramiseks oleks vaja täpsemalt selgitada induktiivpooli rööpmahtuvuse väärtust. Antud lõputöös esitatava analüüsi kontekstis lähtutatakse induktiivpooli lihtsamast mudelist, mis on antud lõputöö kontekstis piisavalt täpne.

### 3.2.2 Mahtuvuse arvutamine

Katsestendi mahtuvuse määramiseks on rakendatud katsemeetod 2 ning selleks teostatud 6 katset teadaolevate takistusega ja mahtuvusega:

katse 1: aktiivtakisti  $9,9 \Omega$  + kondensaatorpatarei  $96,9 \mu\text{F}$ , otseühendus;

katse 2: aktiivtakisti  $19,2 \Omega$  + kondensaatorpatarei  $96,9 \mu\text{F}$ , otseühendus;

katse 3: aktiivtakisti  $48,6 \Omega$  + kondensaatorpatarei  $96,9 \mu\text{F}$ , otseühendus;

katse 4: aktiivtakisti  $9,9 \Omega$  + kondensaatorpatarei  $96,9 \mu\text{F}$ , lisainduktoriga;

katse 5: aktiivtakisti  $19,2 \Omega$  + kondensaatorpatarei  $96,9 \mu\text{F}$ , lisainduktoriga;

katse 6: aktiivtakisti  $48,6 \Omega$  + kondensaatorpatarei  $96,9 \mu\text{F}$ , lisainduktoriga.

Võrrandi 1.4 alusel on koostatud järgmine võrrandisüsteem:

$$\begin{cases} a_1 = \frac{R}{2L_s} \\ a_2 = \frac{R}{2(L_s + L_l)} \end{cases}$$

kus  $a_1$  ja  $a_2$  on vastavalt otseühendusega ja induktoriga katsete sumbuvuussagedus ning  $L_s$  ja  $R_s$  on katsestendi ja mõõdetava ahela summaarne induktiivsus ja takistus.

Järelikult

$$R_s = 2L_s a_1 \quad (3.1)$$

ning

$$L_s = \frac{L_l a_2}{a_1 - a_2} \quad (3.2)$$

Samas on teada, et

$$b_1 = \sqrt{\left(\frac{R_s}{2L_s}\right)^2 - \frac{1}{L_s C_s}} = \sqrt{a_1^2 - \frac{1}{L_s C_s}}$$

seega

$$C_s = \frac{1}{L_s(a_1^2 - b_1^2)} \quad (3.3)$$

Voolukõvera võrrandi teadmine võimaldab leida  $a_1$ ,  $a_2$  ja  $b_1$  väärtused iteratsioonimeetodiga tingimusega

$$(i_a - i_m)^2 \rightarrow 0$$

kus  $i_a$  on arvatud ja  $i_m$  mõõdetud vooluväärtus.

Arvutuse korrektsuse hindamiseks induktiivsus on arvatud võrrandite 1.11 ja 3.2 järgi (edaspidi vastavalt variant 2 ja variant 1). Variant 1 ei andnud usaldusväärseid tulemusi ning ei ole järgnevalt esitatud.

Tabelis 3.3 on esitatud variandi 2 alusel teostatud arvutuste tulemused.

Tabel 3.3. Katsestendi mahtuvuse arvutuse vahetulemused, variant 2

Katse nr	Arvatatud summaarne induktiivsus $L_s$ , $\mu\text{H}$	Arvatatud summaarne takistus $R_s$ , $\Omega$	Arvatatud summaarne mahtuvus $C_s$ , $\mu\text{F}$	Arvatatud katseahela takistus $R_L$ , $\Omega$
1	3,7	11,5	74,9	11,0
2	5,5	20,6	72,1	20,1
3	12,7	46,3	65,5	45,8

Kuna arvatud kondensaatori mahtuvuse tulemused ei ühti, edasi on proovitud ka jadaühenduse mudel.

Mahtuvuse jadaühenduse arvutus:

$$C_{ks} = \left( \frac{1}{C_s} - \frac{1}{C_1} \right)^{-1}$$

Jadaühenduse arvutuse tulemused on koondatud Tabelisse 3.4. Arvutustes esineb negatiivseid väärtusi, kuigi üldine trend on positiivne.

Tabel 3.4. Katsestendi mahtuvuse arvutuse tulemuste võrdlus, jadaühendus

Katse nr	Arvutatud katsestendi mahtuvus $C_{ks}$ , $\mu\text{F}$ ; variant 1	Arvutatud katsestendi mahtuvus $C_{ks}$ , $\mu\text{F}$ ; variant 2	Arvutatud katsestendi mahtuvus $C_{ks}$ , $\mu\text{F}$ ; keskmine
1	-	330,4	-
2	-	281,8	-
3	651,1	201,9	231,3
Keskmine	339		

**Tulemuste täpsustamiseks on teostatud kontrollarvutus** ajakonstandi meetodiga (katsemeetod 1).

Takistus on arvutatud sarnaselt Jaotises 3.2.1 tood näidisele.

Kuna langeva voolukõvera lineaarosa väärtus  $I_{lin} \approx 0,378 * I_{max}$ , siis  $\tau = t_{lin} - t_{max}$ .

Vastavad vahetulemused on esitatud Tabelis 3.5.

Tabel 3.5. Katsestendi mahtuvuse kontrollarvutuse vahetulemused

Katse nr	Arvutatud summaarne takistus $R_s$ , $\Omega$	Voolutipu aeg $t_{max}$ , $\mu\text{s}$	Lineaarosa aeg $t_{lin}$ , ms	Ajakonstant $\tau$ , ms
1	11,4	4,3	0,9	0,9
2	20,3	5,7	1,5	1,5
3	47,6	15,6	3,5	3,5

Võrrandi 3.12 järgi saab tuletada

$$C_s = \frac{\tau}{R_s}$$

ning tulemused on esitatud Tabelis 3.6.

Tabel 3.6. Katsestendi mahtuvuse kontrollarvutuse tulemused

Katse nr	Arvutatud summaarne mahtuvus $C_s$ , $\mu F$	Arvutatud katsestendi mahtuvus (jadaühendus) $C_{ks}$ , $\mu F$
1	75,8	348,3
2	73,6	306,2
3	73,2	298,8
Keskmine		318

Rööpühenduse järgi arvutatud katsestendi mahtuvus jällegi annab negatiivseid tulemusi, seega kasutusele on võetud jadaühenduse arvutuste keskmine tulemus ehk katsestendi resuldeeruv ekvivalentne mahtuvus

$$C_{ks} = 329 \mu F.$$

**Lampide ekvivalentne mahtuvus** on arvutatud esimese katsemeetodi järgi. Vajalikud andmed on esitatud Tabelis 3.7 ning ülejäänud andmed on võetud Tabelist 3.1. Arvutuse tulemused on samuti esitatud Tabelis 3.7, kusjuures on jällegi kasutatud jadaühenduse mudel:

$$C_1 = \left( \frac{1}{C_s} - \frac{1}{C_{ks}} \right)^{-1}$$



Tabel 3.7. Tarvitite mahtuvuse arvutuse algandmed ja tulemused

Katse nr	Katseahel	Lineaarosa aeg $t_{lin2}$ , $\mu$ s	Ajakonstant $\tau_2$ , s	Voolu lineaarosa väärtus $I_{lin2}$ , A	Summaarne mahtuvus $C_s$ , $\mu$ F	Tarviti ekvivalentne mahtuvus $C_1$ , $\mu$ F
1	Lamp nr 1	37,8	36,4	13,9	4,4	4,5
2	Lamp nr 2	36,6	34,8	13,9	4,3	4,4
3	Lamp nr 1 + lamp nr 2	54,5	51,1	23,6	13,3	13,8

Leitud parameetrid täpsustatakse teise katsemeetodiga järgmises jaotises.

### 3.3 Toitemuunduri parameetrite täpsustamine teise katsemeetodiga

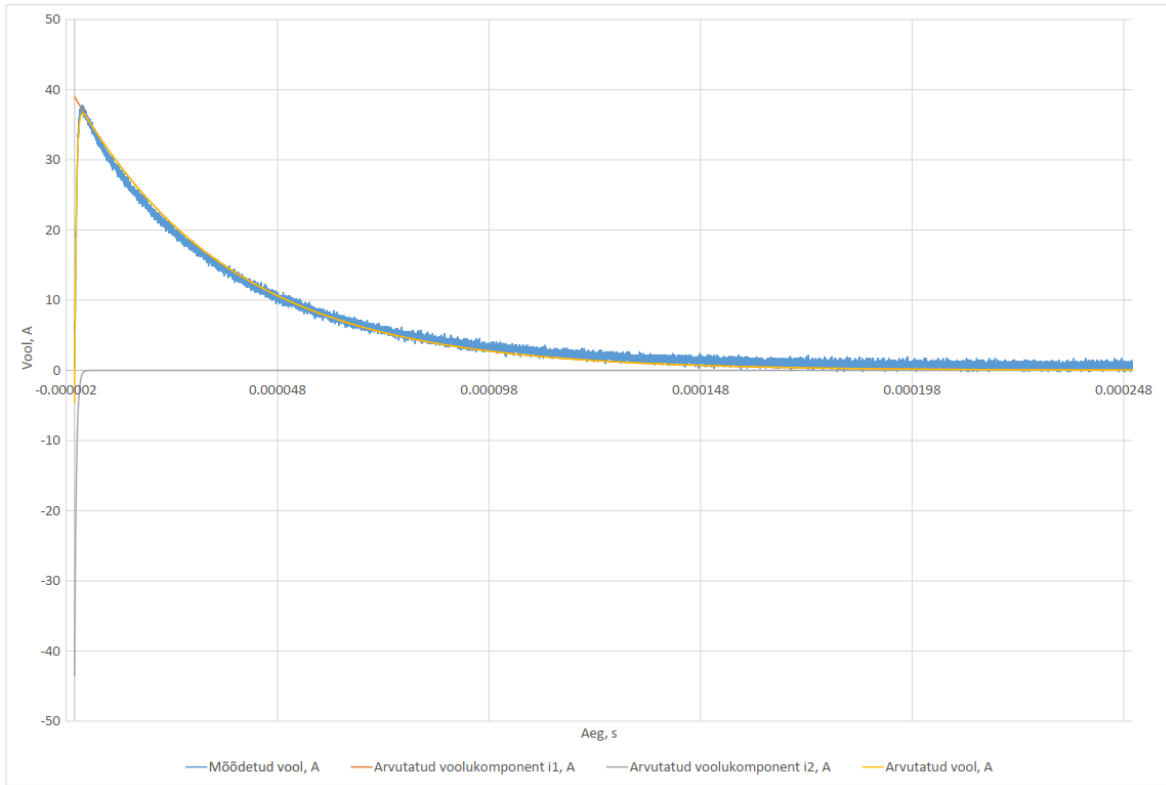
Antud jaotises on toodud näidis teise katsemeetodi kasutamisest Jaotises 2.3.3 mõõdetud lampidega.

Arvutuste aluseks on otseühenduse ja induktoriga katsete tulemused.

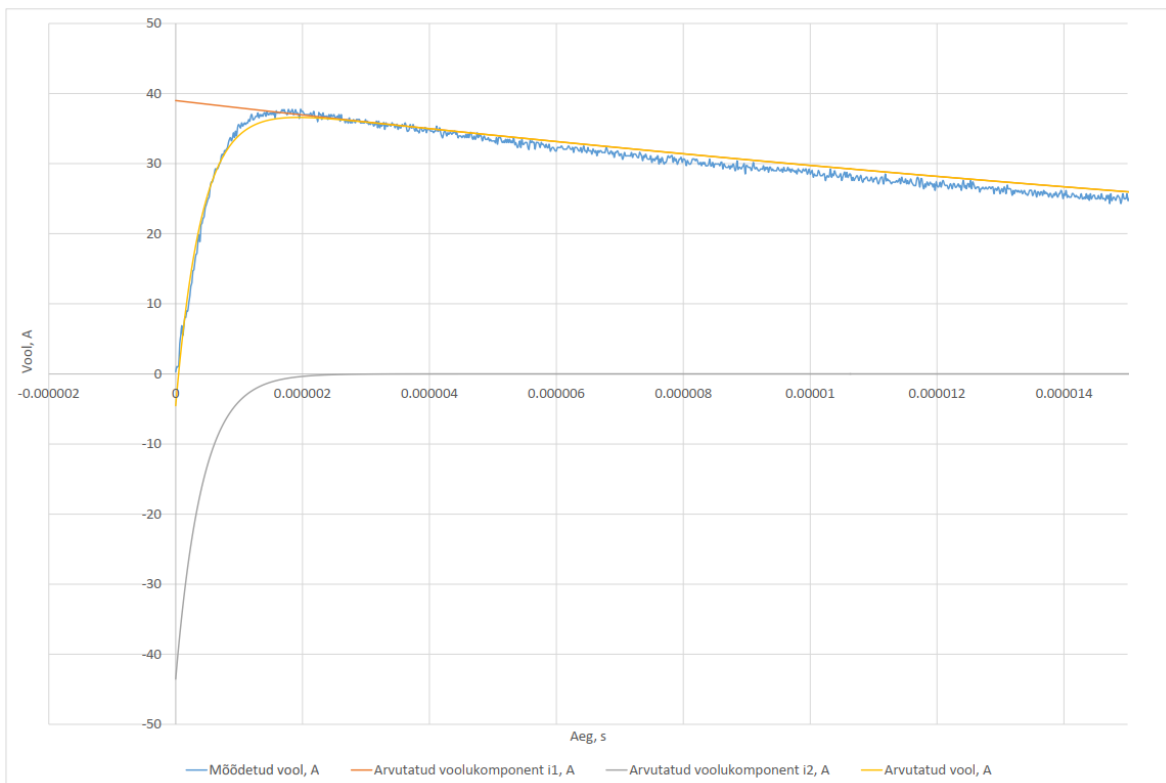
Arvutuste tulemused on esitatud graafiliselt ning koondatud numbriliselt tabelitesse.

Näidiseks on analüüsitud lamp nr 2.

Joonistel 3.2 ja 3.3 on näidatud mõõdetud ja iteratsiooni tulemusena arvutatud voolu kõverad ning arvutatud voolu eksponendi komponendid. Graafikutel on toodud otseühendusega mõõtetulemused.



Joonis 3.2. Lambi nr 2 mõõdetud ja arvutatud voolu võrdlus



Joonis 3.3. Lambi nr 2 mõõdetud ja arvutatud voolu võrdlus, suurendatud

Jooniseid võrreldes võib öelda, et arvutatud voolu graafik suures osas langeb mõõdetud voolu omaga ning seega arvutuse täpsust võib esimeses lähenduses lugeda piisavaks.

Induktiivsuse arvutuse juures on jällegi esitatud kaks variandi ning võrdlus katsestendi induktiivsuse ja takistuse määramise juures toodud lahendusega (katsemeetod 1).

Iteratsiooni tulemustena saadud väärtused:

$$a_1 = 1217436 \text{ rad/s},$$

$$a_2 = 353681 \text{ rad/s},$$

$$b_1 = 1190366 \text{ rad/s};$$

Nende alusel arvutatud parameetrid on toodud Tabelis 3.8.

Tabel 3.8. Toitemuunduri parameetrite määramise vahetulemused

	<b>Arvutatud summaarne takistus <math>R_s, \Omega</math></b>	<b>Arvutatud summaarne induktiivsus <math>L_s,</math> <math>\mu\text{H}</math></b>	<b>Arvutatud summaarne mahtuvus <math>C_s, \mu\text{F}</math></b>
Variant 1	7,4	3,1	5,0
Variant 2	9,2	3,8	4,1
Eelnevalt toodud graafiline meetod	8,1	3,8	4,3

Järgmisena on arvutatud lambi komponentide väärtused arvestades varem leitud katsestendi parameetreid ning võrreldud esimese meetodiga leitud väärtustega. Tulemused on koondatud Tabelisse 3.9.

Tabel 3.9. Toitemuunduri parameetrite määramise tulemused

	<b>Arvutatud lambi ekv. takistus <math>R_1</math>, <math>\Omega</math></b>	<b>Arvutatud lambi ekv. induktiivsus <math>L_1</math>, <math>\mu\text{H}</math></b>	<b>Arvutatud lambi ekv. mahtuvus <math>C_1</math>, <math>\mu\text{F}</math></b>
Variant 1	6,9	2,5	5,1
Variant 2	8,7	3,2	4,1
Eelnevalt toodud graafiline meetod	7,6	3,3	4,4
Keskmine	<b>7,7</b>	<b>3,0</b>	<b>4,5</b>

Mõlemad kasutatud meetodid ja nende variandid andsid samas suurusjärgus tulemusi.

Takistuse suurim erinevus keskmisest on  $1 \Omega$ , induktiivsuse juures on see umbes  $0,5 \mu\text{H}$ , mahtuvuse juures umbes  $0,6 \mu\text{F}$ .

### 3.3.1 Katsemeetodite hinnang

Esitatud katsemeetodite juures peab arvestama järgmiste arvutustulemuste täpsust mõjutavate teguritega:

- mõõteriistade omadusest tulenev mõõteviga;
- iteratsiooni viga;
- ajakonstandite määramise viga;
- reaalsete protsesside erinevus teoreetilistest.

Üldiselt võib ikkagi öelda, et toodud meetodid võimaldavad saada rahuldavaid tulemusi. Iga arvutuse juures on igal juhul mõistlik teostada kontrollarvutus teise meetodiga.

Peab arvestama, et leitud komponentide väärtused on ekvivalentsed aseskeemi suurused ning ei pruugi langema kokku reaalsete komponentide väärtusega.

### 3.4 Võrgu parameetrite määramine

Madalpingevõrgu impedants kujuneb aktiiv- ja reaktiivtakistusest, kusjuures viimane on tingitud võrgus esinevate induktiivsuste ja mahtuvuste suurustest. Antud töös on lähtutud eeldusest, et võrgu lõplik aseseem saab esitada lihtsa RLC-jadaahelaga. Samuti on eeldatud, et võrgu summaarne aktiivtakistus on reaktiivtakistusest märgatavalt suurem.

Toitevõrgu impedantsi referentsväärtused seadmete häiringute parameetrite katsete läbiviimiseks on käsitletud tehnilises raportis *IEC/TR 60725:2012*. Kolmefaasilise võrgu nimivooluga kuni 100A faasi kohta soovitatud impedantsi väärtused on toodud raporti Tabelis 8 ning allpool Tabelis 3.10 [22].

Tabel 3.10. Impedantsi referentsväärtused katsete läbiviimiseks

Juht	Impedants, $\Omega$
Faasijuht	$0,24 + j0,15$
Neutraaljuht	$0,16 + j0,10$
Kokku	$0,40 + j0,25$

Antud raportis ei käsitleta eraldi võrgu mahtuvuse ja induktiivsuse suurusi, mis on vajalikud täpsema mudeli koostamiseks ning katsete tulemuste analüüsiks. Nende suuruste määramiseks on teostatud vastavad mõõtmised ja arvutused.

#### 3.4.1 Katsed ja tulemuste analüüs

Võrgu parameetrite määramiseks on kasutatud esimene katsemeetod. Koormuseks on jällegi kaks eelnevalt katsetatud leedlambi. Kontrollarvutus on teostatud teise katsemeetodiga.

Võrgu katsete mõõtmised on teostatud Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi 3. korruse laboris seinapistikupesas ning Energeetika maja alajaama madalpingejaotla ruumis jaotuskilbi EK1 toidetavast pistikupesas. Jaotuskilp EK1 saab toidet otse madalpingejaotlast, seega siin on tegemist tugeva võrguga. 3. korruse labori jaotuskilp on madalpingejaotlast kaugem ning võrk on mõnevõrra nõrgem.

Mõõtmiskohtade asukoht on näidatud toiteskeemil Joonisel 3.4.

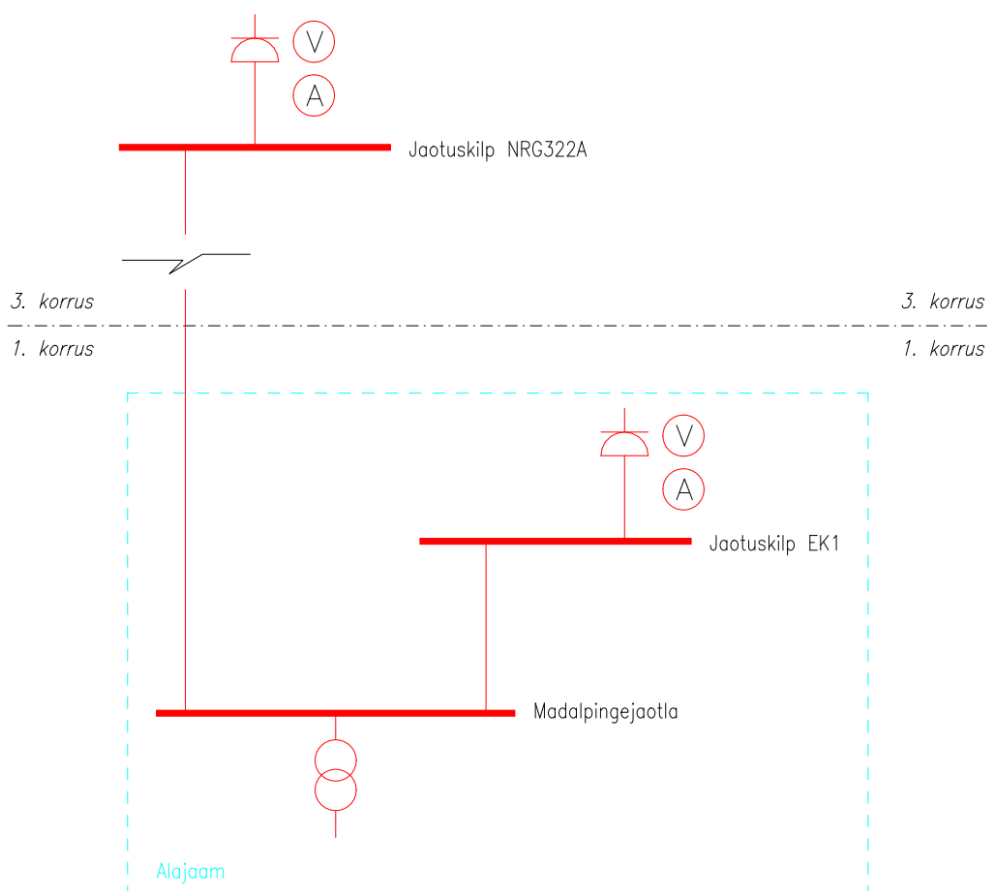
Katsete algandmed:

Mõõdetud võrgupinge laboris  $U_{rms-labor} = 234 V$ ,

mõõdetud võrgupinge alajaamas  $U_{rms-alajaam} = 236 V$ ,

mõõdetud lisakaabli 3G1,5, 2x30m induktiivsus  $L_{kaabel} = 24 \mu H$ ,

mõõdetud lisakaabli 3G1,5, 2x30m aktiivtakistus  $R_{kaabel} = 1,1 \Omega$ ,



Joonis 3.4. Energeetikamaja põhimõtteline ühejooneline toiteskeem koos mõõtepunktidega

Lambi nr 2 nimiparameetrid on arvatud eelnevalt ning Lambi nr 1 parameetrid on leitud sarnaselt (arvutuskäigu siin näidatud ei ole, kuna see on lambiga nr 2 põhimõtteliselt samasugune).

Nii laboris kui alajaamas on teostatud kuue lülituskombinatsiooni mõõtmised, mille algandmed on esitatud Tabelis 3.11.

Tabel 3.11. Võrgu parameetrite määramise katsete algandmed

Katse nr	Katseahel	Voolutipu aeg $t_{max}$ , $\mu$ s	Lineaarosa aeg $t_{lin1}$ , $\mu$ s	Voolu tippväärtus $I_{max}$ , A	Voolu lineaarosa väärtus $I_{lin1}$ , A	Toitepinge $U_{in}$ , V
<i>Katsed laboris</i>						
1	Lamp nr 1	14,4	4,3	33,2	21,0	315
2	Lamp nr 2	10,8	3,6	33,9	21,4	326
3	Lamp nr 1 + Lamp nr 2	21,0	6,5	51,1	32,3	325
4	Lamp nr 1, lisakaabliga 3G1,5, 2x30 m	23,2	5,0	21,1	13,3	278
5	Lamp nr 2, lisakaabliga 3G1,5, 2x30 m	12,0	3,5	24,2	15,3	328
6	Lamp nr 1 + lamp nr 2, lisakaabliga 3G1,5, 2x30 m	29,0	6,7	37,7	23,8	329
<i>Katsed alajaamas</i>						
7	Lamp nr 1	7,0	2,3	35,1	22,2	315

8	Lamp nr 2	6,4	2,2	36,2	22,9	333
9	Lamp nr 1 + Lamp nr 2	12,0	2,3	40,4	25,5	298
10	Lamp nr 1, lisakaabliga 3G1,5, 2x30 m	12,4	4,1	31,0	19,6	329
11	Lamp nr 2, lisakaabliga 3G1,5, 2x30 m	13,3	4,0	26,3	16,6	314
12	Lamp nr 1 + lamp nr 2, lisakaabliga 3G1,5, 2x30 m	19,4	6,2	39,5	24,9	326

Järgnevalt on teostatud arvutused esimese katsemeetodi järgi sarnaselt eelnevalt toodud näidistega. Nende tulemused on esitatud Tabelis 3.12.

Tabel 3.12. Võrgu parameetrite määramise katsete vahetulemused

<b>Katse nr</b>	<b>Summaarne takistus <math>R_{S_1}</math> <math>\Omega</math></b>	<b>Summaarne induktiivsus <math>L_{S_1}</math> <math>\mu\text{H}</math></b>	<b>Summaarne mahtuvus <math>C_{S_1}</math> <math>\mu\text{F}</math></b>
<i>Katsed laboris</i>			
1	9,5	41,0	4,5
2	9,6	34,9	3,4
3	6,4	41,2	8,0



4	13,2	65,8	4,4
5	13,6	47,2	3,7
6	8,7	58,5	7,8
<i>Katsed alajaamas</i>			
7	9,0	20,8	5,4
8	9,2	20,3	3,4
9	7,4	16,7	7,3
10	10,6	44,0	5,1
11	11,9	47,3	2,7
12	8,3	51,4	7,1

Võrgu ekvivalentne takistus ja induktiivsus on leitud iteratsioonimeetodiga, mahtuvus on arvatud jadaühenduse valemiga. Antud arvutuste aluseks on lisakaabliga ja ilma lisakaablita katsete algandmed. Lõpptulemused on esitatud Tabelis 3.13.

Tabel 3.13. Võrgu parameetrite määramise lõpptulemused, katsemeetod 1

Mõõtmise koht	Arvutatud ekvivalentne võrgu takistus $R_v, \Omega$	Arvutatud ekvivalentne võrgu induktiivsus $L_v, \mu H$	Arvutatud ekvivalentne võrgu mahtuvus $C_v, \mu F$
Labor	1,8	38,5	18,7
Alajaam	1,3	28,8	23,1

**Järgnevalt on teostatud kontrollarvutus** teise katsemeetodiga võttes aluseks lambi nr 2 mõõtetulemused laboris ja alajaamas.

Tabel 3.14. Võrgu parameetrite määramise kontrollarvutuse tulemused

Mõõtmise koht	Arvutatud ekvivalentne võrgu takistus $R_v, \Omega$	Arvutatud ekvivalentne võrgu induktiivsus $L_v, \mu H$	Arvutatud ekvivalentne võrgu mahtuvus $C_v,$ $\mu F$
Labor	1,7	41,4	28,9
Alajaam	1,4	19,7	28,7

Tulemuste analüüsina on eemaldatud suure keskmisest kõrvalekaldega numbrid ning lõplikud parameetrid on määratud järgnevalt:

Labori mõõtepunkt:

$$R_v = 1,7 \Omega, L_v = 40 \mu H, C_v = 23 \mu F;$$

Alajaama mõõtepunkt:

$$R_v = 1,3 \Omega, L_v = 25 \mu H, C_v = 25 \mu F;$$

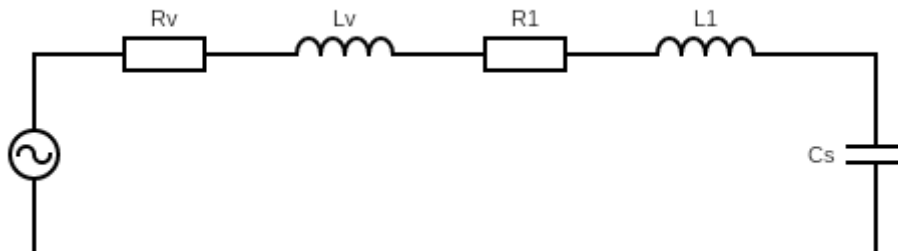
Saadud tulemused kinnitavad varem toodud eeldust, et alajaama mõõtepunktis võrk on tugevam kui laboris – seda näitavad väiksem takistus ja induktiivsus.

Võrgu mahtuvuse suuruse hindamine on keerulisem, kuna madalpingevõrgu analüüsil mahtuvust tavaliselt ei käsitleta. Antud töö raames võib lugeda tulemust vastuvõetavaks.

Peab mainima, et võrgu parameetrid sõltuvad mingil määral ka mõõtmise hetkel võrku ühendatud seadmetest. Kuna mõõtmiste vahel esineb teatud ajavahemik, see võib mõjutada ka mõõtmis- ja arvutustulemusi.

### 3.4.2 Aseskeemi kujunemine

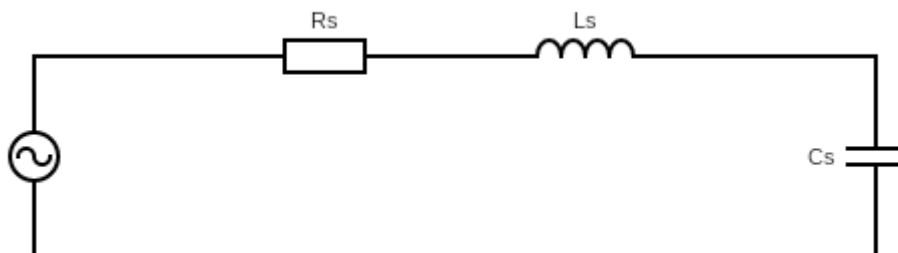
Lõplik aseskeem koostatakse arvestades ülaltoodud mõõtmis- ja arvutustulemusi. Lõppkokkuvõtena võib öelda, et jadaahela mudel andis rahuldavaid tulemusi ning seega aseskeem kujuneb järgnevalt:



Joonis 3.5. Lõplik aseskeem

kus  $R_v$  ja  $L_v$  on võrgu takistus ja induktiivsus ning  $R_1$  ja  $L_1$  on võrku ühendatud tarviti takistus ja induktiivsus;  $C_s$  on vaadeldava süsteemi kogumahtuvus. Arvutustulemuste analüüs näitab, et rööpmahtuvusi antud juhul ei esine või nad ei mõjuta vaadeldavaid protsesse.

Skeemi võib näidata ka lihtsamal kujul:



Joonis 3.6. Lihtsustatud aseskeem

kus  $R_s$  ja  $L_s$  on süsteemi takistus ja induktiivsus.

Esitatud aseskeem on aluseks simulatsiooni mudeli loomiseks.

## 3.5 Toitemuundurite mõju võrgule analüüs ja mudeli koostamine

Siirdeprotsessi analüüsiks ja arvutimudeli koostamiseks on näidiseks võetud katsed nr 2 ja 3 Tabelist 3.11. Komponentide ekvivalentsed väärtused on võetud vastavalt eelnevalt toodud arvutustele.

Komponendid *Spice* mudelis on tähistatud järgnevalt:

*R1* - võrgu ekvivalentne takistus

*L1* - võrgu ekvivalentne induktiivsus

*R2* - tarviti ekvivalentne takistus

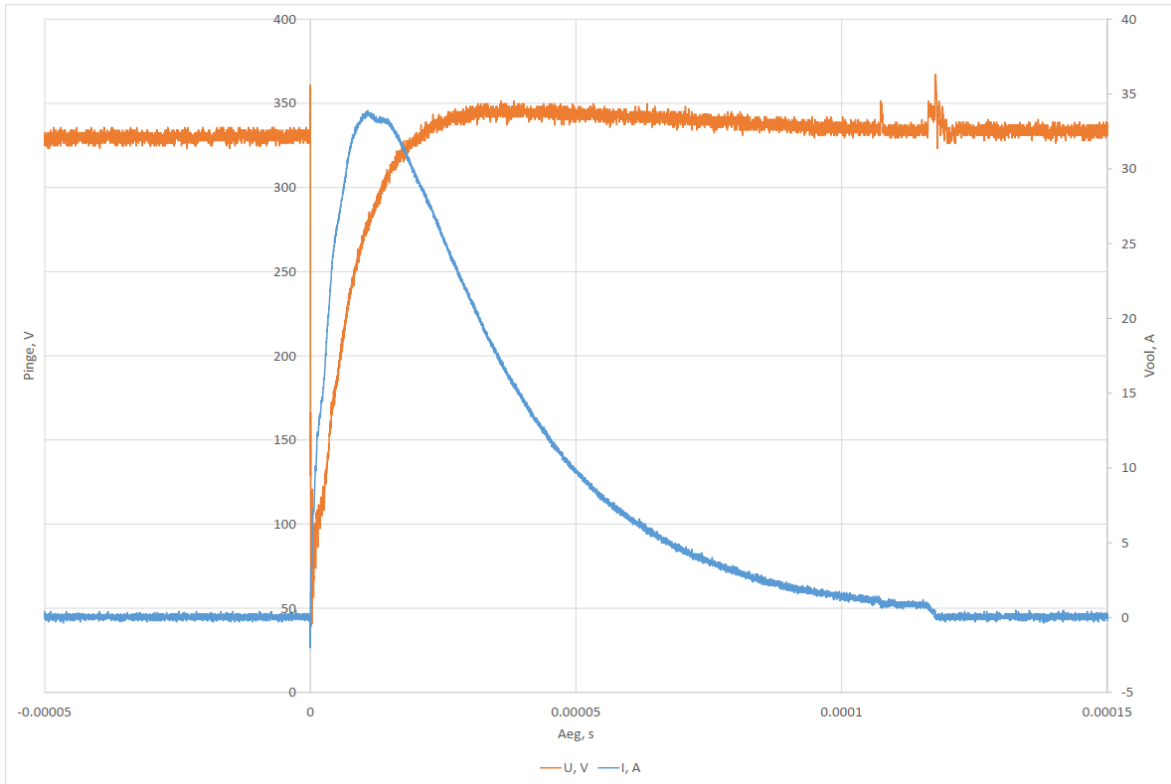
*L2* - tarviti ekvivalentne induktiivsus

*C1* - süsteemi ekvivalentne mahtuvus

Lülitushekt simulatsioonis esineb pinge siinuse tipppunktis. Graafikutel on näidatud ahela vool ja toitepoolne pinge.

Mõõtmistulemuste lülituspunkt on siinuse maksimumi lähedal (umbes 325 V juures).

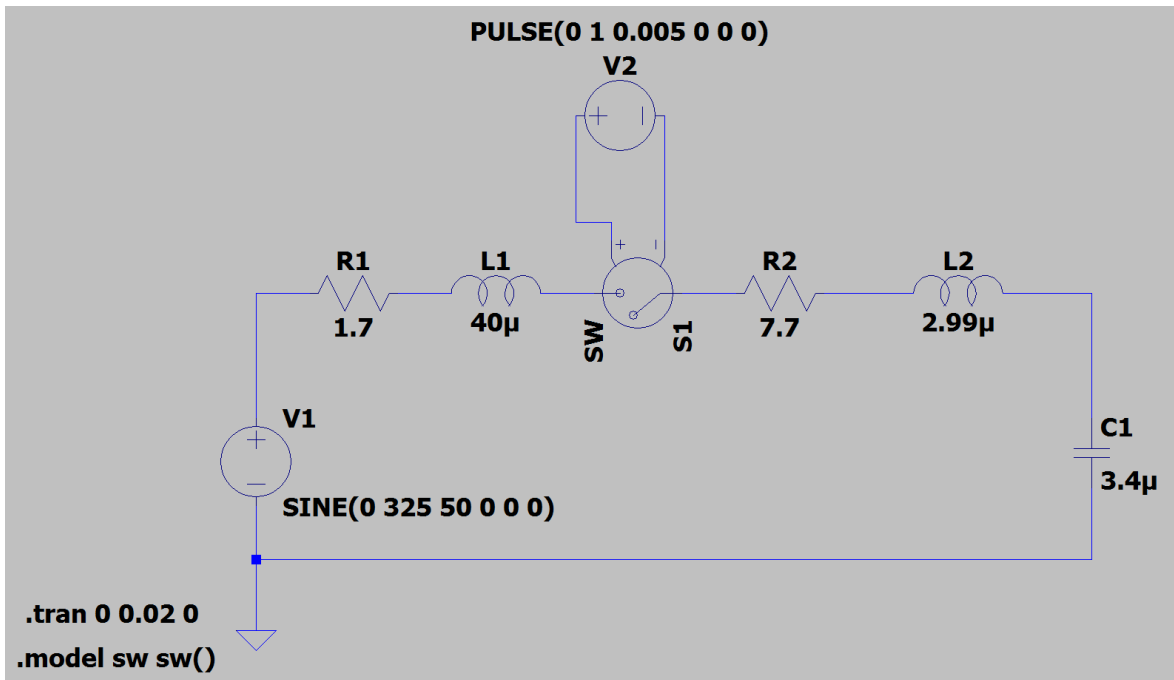
Katse nr 2 mõõtmistulemused on esitatud Joonisel 3.7.



Joonis 3.7. Katse nr 2 mõõtmistulemused

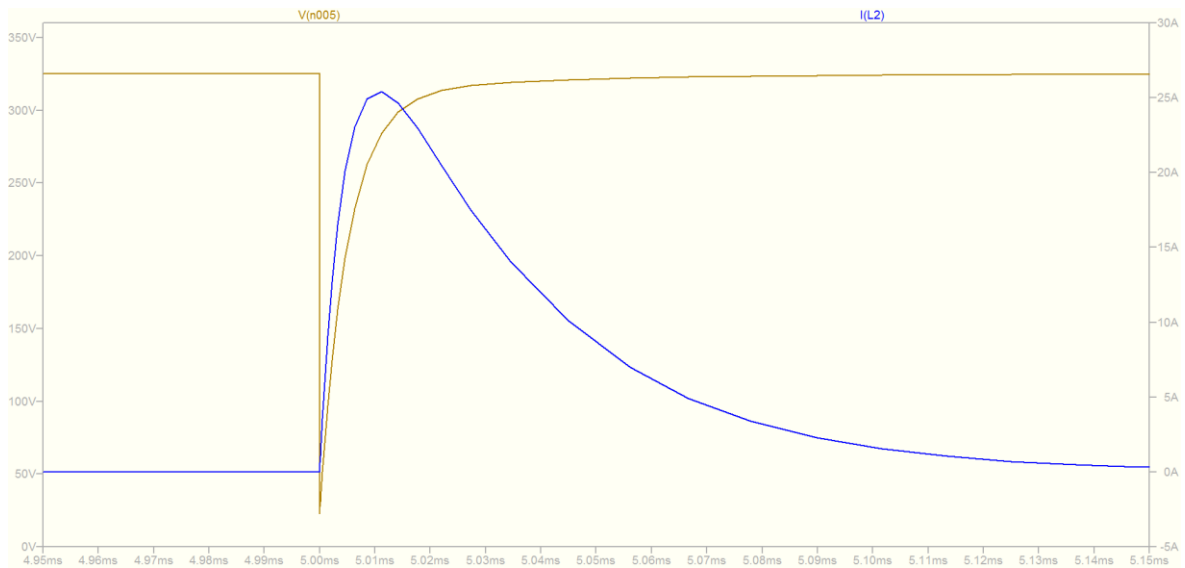
Lülituse ajal võrgu pinge lühiajaliselt langeb umbes 50 V tasemeni. Voolu tippväärtus on 34 A juures. Kogu protsessi kestvus on umbes 0,12 ms.

Katse nr 2 *Spice* mudel on esitatud Joonisel 3.8.



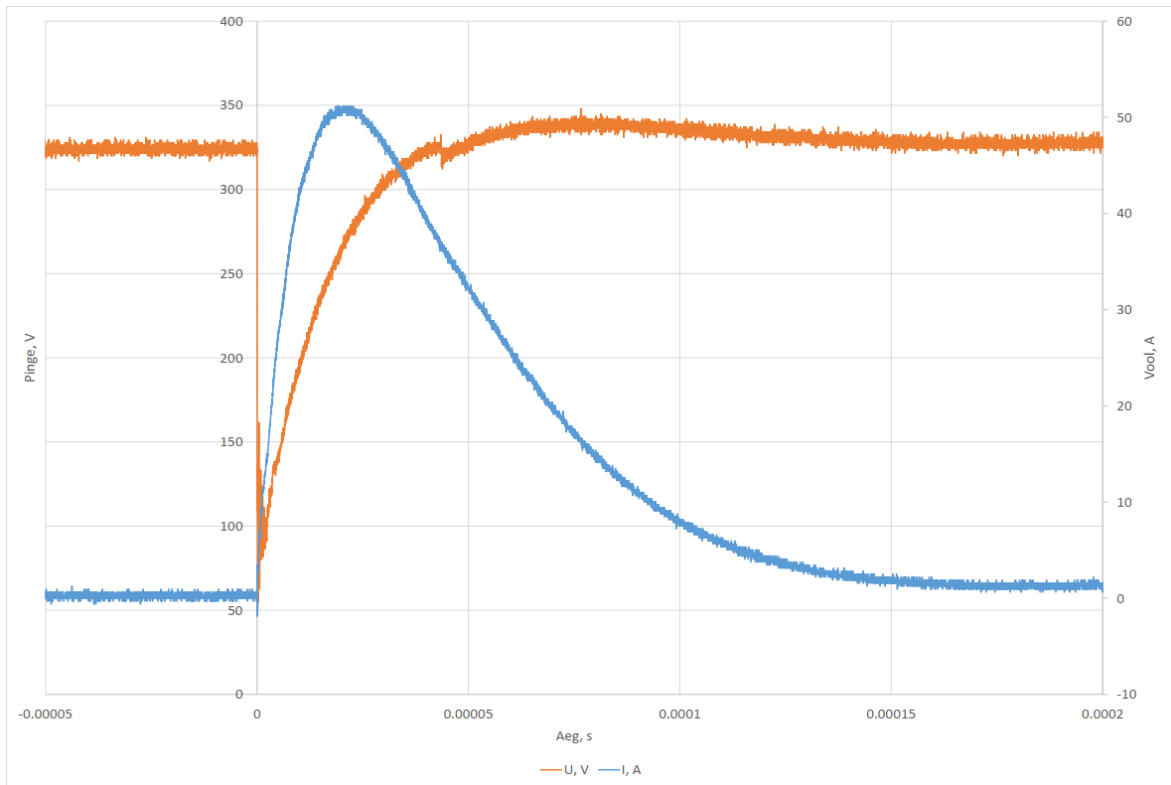
Joonis 3.8. Katse nr 2 Spice mudel

Katse nr 2 simulatsiooni tulemused on esitatud Joonisel 3.9.



Joonis 3.9. Katse nr 2 simulatsiooni tulemused. V(n005) on allika pinge ja I(L2) on induktori L2 vool

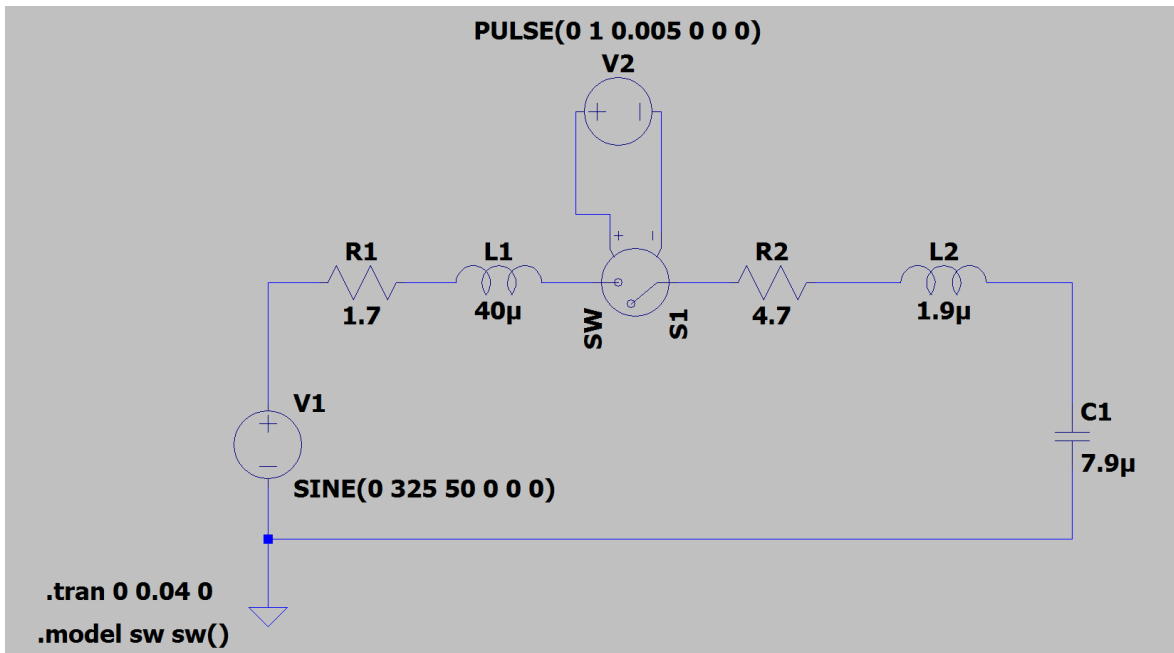
Katse nr 3 mõõtmistulemused on esitatud Joonisel 3.10.



Joonis 3.10. Katse nr 3 mõõtmistulemused

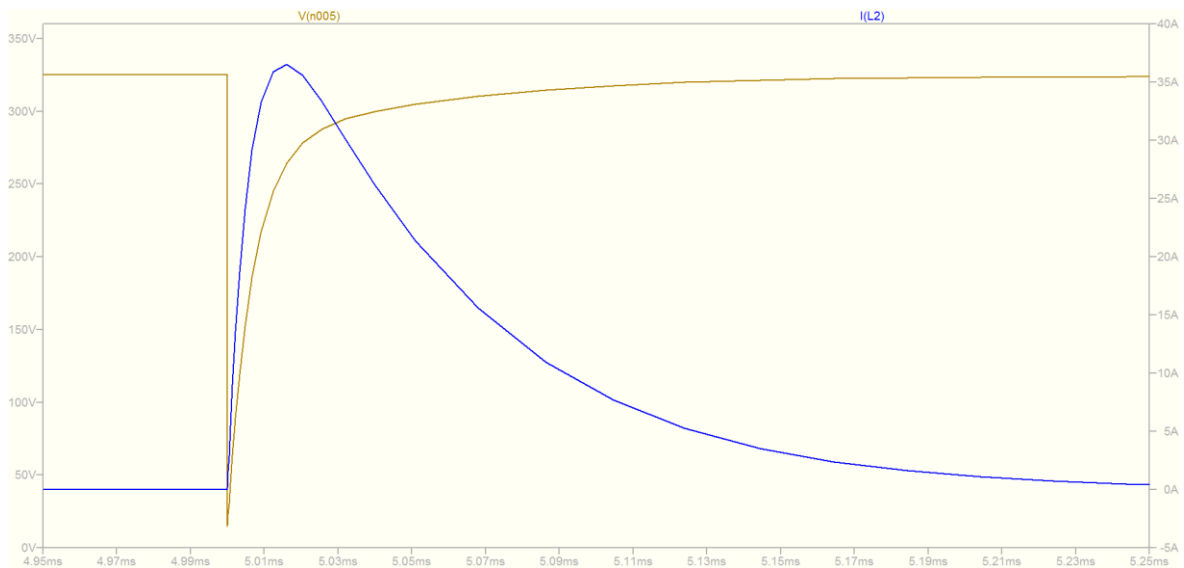
Sarnaselt eelmise katsega, võrgu pinge lülitushetkel langeb umbes 50 V tasemeni. Voolu tipphetk on 50 A juures. Siirdeprotsessi kestvus on umbes 0,17 ms.

Katse nr 3 *Spice* mudel on esitatud Joonisel 3.11.



Joonis 3.11. Katse nr 3 Spice mudel

Katse nr 3 simulatsiooni tulemused on esitatud Joonisel 3.12.



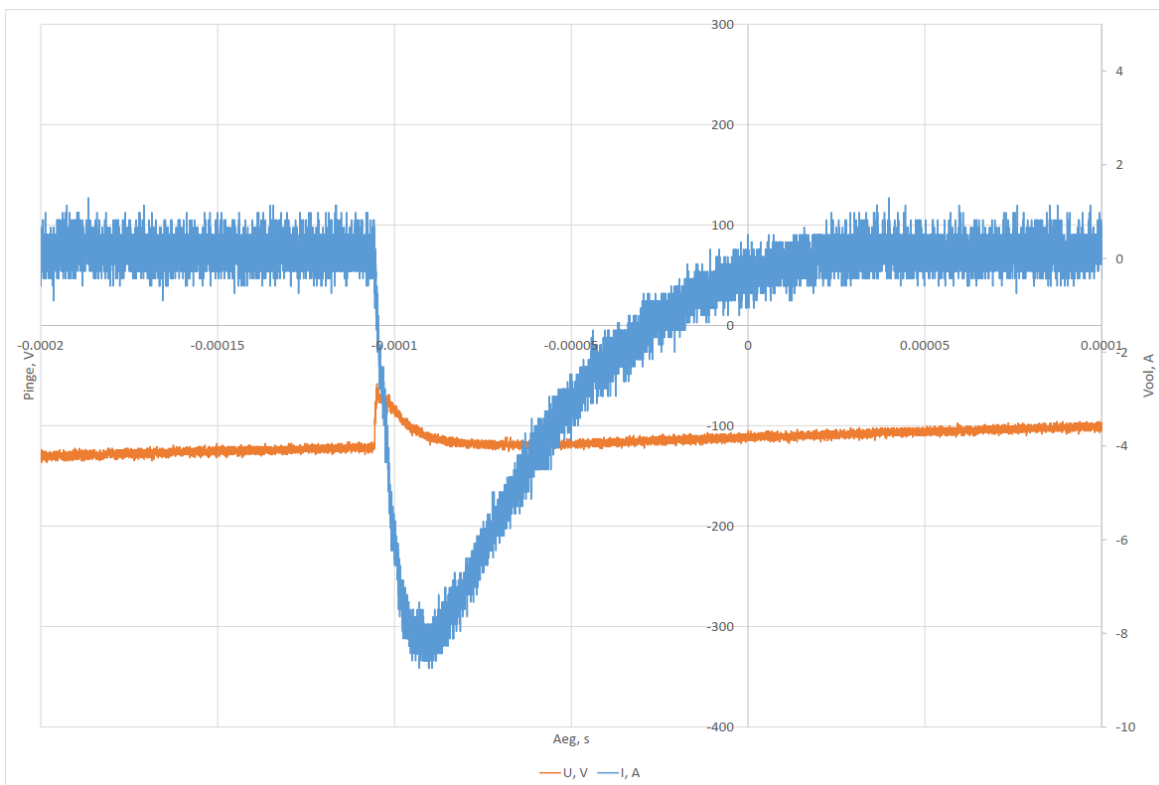
Joonis 3.12. Katse nr 3 simulatsiooni tulemused. V(n005) on allika pinge ja I(L2) on induktori L2 vool

Teostatud arvutuste tulemusena on koostatud lihtsad, kuigi usaldusväärsed aseskeemi mudelid.



Pinge ja voolu kuju langeb kokku mõõdetud tulemustena, samuti ühtib siirdeprotsesside kestvus. Voolu maksimumväärtus erineb mõõdetud tulemusest nr 2 katse korral u 7 A ja nr 3 katse korral u 14 A. Arvatavasti see on tingitud võrgu takistuse arvutuse ebatäpsusest.

Võrdluseks on toodud kahe lambi kooslülituse siirdeprotsess laboris -105 V juures.



Joonis 3.13. Kooslülituse siirdeprotsess pinge 1/3 väärtuse lähedal

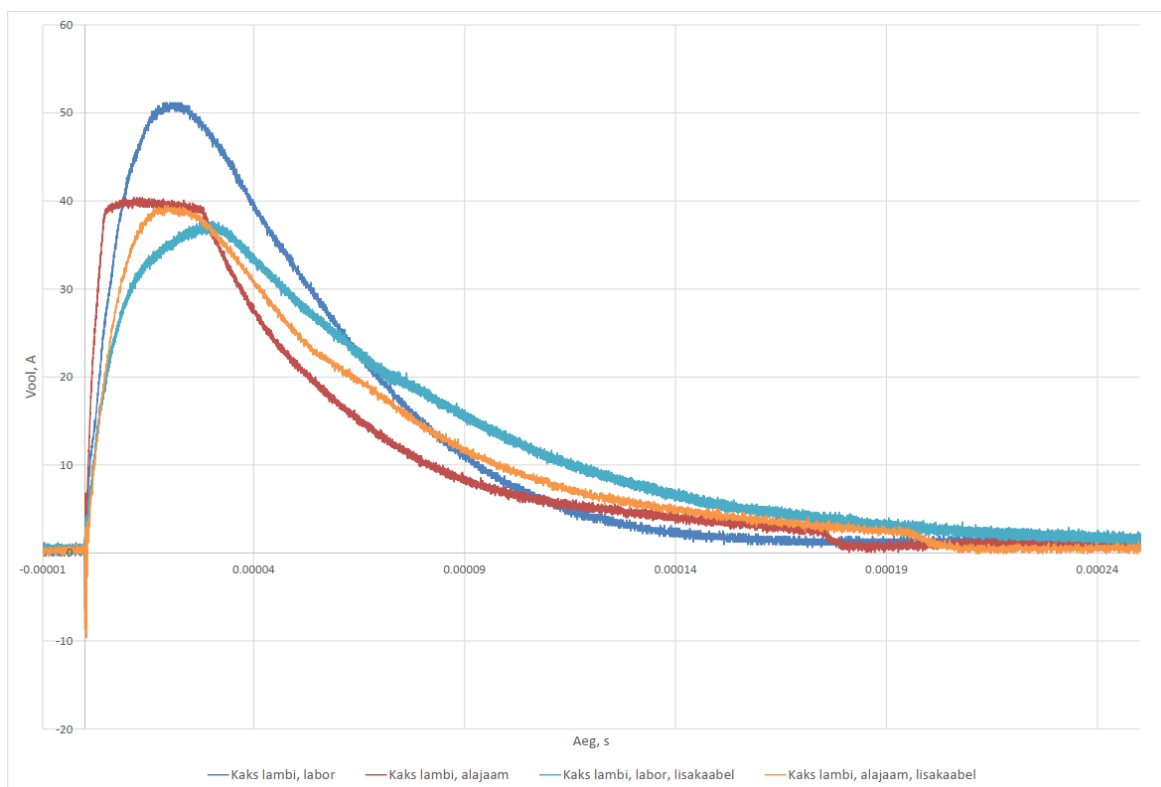
Graafikust on näha, et antud juhul lülitusvoolu maksimumväärtus on -8,5 A, mis on ~5,9 korda vähem kui 325 V juures. Pinge väärtus langeb lühiajaliselt -60 V väärtuseni.

Nii mõõtmistulemused kui simulatsioon näitavad, et maksimaalse pingega katsetes võrgupinge langeb lülituse hetkel 50 V tasemeni. Pinge taastamise protsess kestab umbes 0,1 ms, mis on täisperioodist 200 korda kiirem. Siit võib järeldada, et vaatamata pingelohu sügavusele see jääb võrgule märkamata oma kiiruse tõttu.

### 3.5.1 Ahela parameetrite mõju siirdeprotsessile

Ahela parameetrite mõju hindamiseks lülitusvooludele on näidiseks võetud Tabeli 3.13 katsete nr 3, 6, 9 ja 12 mõõtmistulemused.

Lülitusvoolude kõverad on koondatud Joonisele 3.14.



Joonis 3.14. Siirdeprotsessi kujunemine erinevates ahelates

Protsesside olulised ajalised parameetrid on esitatud Tabelis 3.15 numbriliselt.

Tabel 3.15. Siirdeprotsesside ajalised parameetrid

Katseahel	Voolutipu aeg $t_{max}, \mu s$	Lineaarosa aeg $t_{lin1}, \mu s$	Lineaarosa aeg $t_{lin2}, \mu s$
Lamp nr 1 + lamp nr 2, labor	21,0	5,0	50,5
Lamp nr 1 + lamp nr 2, lisakaabliga 3G1,5, 2x30 m, labor	29,0	6,7	68,0

Lamp nr 1 + lamp nr 2, alajaam	12,0	2,3	66,0
Lamp nr 1 + lamp nr 2, lisakaabliga 3G1,5, 2x30 m, alajaam	19,4	6,2	78,2

Graafiliste ja numbriliste tulemuste kokkuvõte kinnitab eelnevalt toodud teooriat.

Siirdeprotsessid labori võrgus on üldiselt aeglasemad, seega voolu tõusukiirus on ka väiksem. Voolutipu väärtus laboris ja alajaamas erinevad umbes 2 A võrra, voolutipu ajahetk laboris esineb 7 – 8  $\mu$ s hiljem.

Rohkem mõjutab voolutipu väärtust ja protsessi kiirust ahelasse lisatud kaabel. Laboris esinev lülitusvool lisakaabliga ahelas on lisakaablita ahelaga võrraldes umbes 13 A väiksem.

Kokkuvõtena võib öelda, et mida suurem on induktiivsuse ja takistuse väärtus, seda aeglasem on siirdeprotsess.

## KOKKUVÕTE

Antud töö käsitleb pooljuht-toitemuundurite lülitusvoolude suurusi, profile, nende matemaatilise kirjelduse ja mudeli ning mõju võrgule analüüsi.

Töös on kirjeldatud pooljuht-toitemuundurite struktuuri ning põhjendatud suurte lülitusvoolude tekkimise põhjused. Seejärel on toodud lülitusvoolude piiramismeetodite põhimõtted ja näidised.

Praktiliste mõõtmiste tulemused on sorteeritud esitatud seadme oletatava skeemi alusel ning jagatud tüüpide kaupa lülitusvoolude profiilide järgi. Iga profiili juurde on lisatud selle iseloomustus ja põhilised näitajad.

Võrgu ja tarvitite mudeli koostamiseks on teostatud mõõtmised nii katsestendiga kui ka avalikus võrgus. Mõõtmistulemuste analüüsi tulemusena pakutakse kaks katsemeetodit ahela komponentide arvutamiseks. Mõlemad meetodid on suhteliselt mahukad ja nõuavad kontrollarvutusi, kuid võimaldavad leida lahendusi mitme tundmatuga süsteemis.

Arvutuste tulemusena on leitud võrgu ja referentstarvitite ekvivalentsed komponentide väärtused. Arvutustulemuste alusel on koostatud aseskeem, mis arvestab nii võrgu kui ka tarviti parameetreid. Aseskeemi põhjal luuakse arvuti simulatsiooni mudelid. Mudelite tulemused on piisavalt lähedal mõõtmistulemustele ning neid võib lugeda usaldusväärseteks.

Töö lõpus uuritakse ka toitemuunduri lülitusprotsessi mõju toitevõrgule. Siin peab arvestama, et töös vaadeldud mõõtmistulemused on saadud suhteliselt tugevas võrgus ning tulemused nõrgas võrgus võivad tunduvalt erineda.

Töös on võrdselt käsitletud nii praktika kui teooria, seega antud töö omab nii teoreetilist kui ka praktilist väärtust. Magistritöoga on loodud eeldus teema edaspidiseks uurimiseks, mis võib sisaldada näiteks võrgu parameetrite täpsustamist, kasutatud arvutusmeetodite täiendust ja täiendavaid simulatsioone läbiviimist.

Eriti huvitavaks ja ka oluliseks jääb lülitusvoolude küsimus pooljuht-toitemuunduritest varustatavates mikroorkudes. Loodetavasti käesoleva töö tulemused on kasulikud antud teema edaspidistes uuringutes.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] R. Elliott, „Inrush Current Mitigation,” 2010. [Võrgumaterjal]. Available: <https://sound-au.com/articles/inrush.htm>.
- [2] „Inrush Current Protection for LED Lighting Retrofits,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.ametherm.com/blog/inrush-current/inrush-current-protection-led-lighting-retrofits/>.
- [3] „Led Driver Inrush Currents,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://adlt.com.sg/%EF%BB%BFled-driver-inrush-currents/>.
- [4] „Six countermeasures to limit startup surge current of SMPS,” 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.onelectrontech.com/six-countermeasures-current-limit-smps-startup-inrush-current/>.
- [5] „PTC Thermistors vs. NTC Thermistors for Inrush Current,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.ametherm.com/ptc-thermistors-vs-ntc-thermistors-for-inrush-current>.
- [6] „Inrush-current limiter circuits (ICL) with Triacs and Thyristors (SCR) and controlled bridge design tips,” STMicroelectronics, 2016.
- [7] „Inrush Current – A Guide to the Essentials,” 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <https://recom-power.com/en/rec-n-inrush-current--a-guide-to-the-essentials-119.html?0>.
- [8] „Controlling Inrush Current in DC-DC Power Converters,” VPT.
- [9] „Inrush Current Limiting for Solid State Devices Using NTC Aktiivtakisti,” IEEE, 2017.
- [10] „Modelling, Simulations and Design Considerations for Inrush Current Limiting Topologies,” Annual Journal of Electronics, 2014.
- [11] M. Whiteley, „Circuit Theory and Analysis. Section 7,” University of Surrey, 2002. [Võrgumaterjal]. Available: <http://info.ee.surrey.ac.uk/Teaching/Courses/ee1.cct/circuit-theory/section7/index.html>. [Kasutatud 2022].
- [12] E. V. Colla, „Transients and Oscillations in RLC Circuits,” University of Illinois, 2014.

- [13] „Chart of LR Time Constants for Series Charge Rate,” [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.pmcgibbon.net/teachcte/electron/chartrl.htm>. [Kasutatud 2022].
- [14] „RLC Second Order Systems”.
- [15] „Teardown: 60-W-equivalent LED bulbs,” 2015. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.powerelectronicstips.com/teardown-60-w-equivalent-led-bulbs/>.
- [16] „BP2812 datasheet,” BPS.
- [17] „SSL21082AT datasheet,” Silergy corp., 2013.
- [18] „SSL2103 datasheet,” Silergy corp., 2016.
- [19] „TIDA-00709 36W Auxillary Power Supply,” Texas Instruments, 2016.
- [20] „L5991 Primary Controller With Standby,” STMicroelectronics.
- [21] „Technical Report IEC/TR 60725:2012 "Consideration of reference impedances and public supply network impedances for use in determining the disturbance characteristics of electrical equipment having a rated current  $\leq 75$  A per phase",” The British Standards Institution, 2012.

# LISAD

## L1 Katsesendi foto

