



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

REAKTIIVVÕIMSUST KOMPENSEERIVATE
KONDENSAATORITE DIMENSIONEERIMINE
MOONUTATUD VÕRGUPINGE KORRAL

PLANNING LEVELS OF THE POWER FACTOR CORRECTION CAPACITORS UPON
DISTORTED SUPPLY VOLTAGE

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Heigo Pikkor

Üliõpilaskood: 176645

Juhendaja: professor Lauri Kütt

Tallinn, 2020

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.

“.....” 202.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 202.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”202... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Heigo Pikkor

Lõputöö liik: Magistritöö

Töö pealkiri: Reaktiivvõimsust kompenseerivate kondensaatorite dimensioneerimine moonutatud võrgupinge korral

Kuupäev: 03.01.2020

66 lk

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja: professor Lauri Kütt

Töö konsultant: Muhammad Naveed Iqbal

Sisu kirjeldus:

Töö eesmärgiks on uurida reaktiivvõimsuse kompenseerimiseks kasutatavate kondensaatorite omadusi ning elektrivõrgus esinevate kõrgemate harmoonikute mõju nendele. Esmalt vaadeldi reaktiivvõimsuse kompenseerimise vajalikkust ning eri meetodeid kompenseerimiseks, seejärel tutvuti kondensaatori oluliste parameetritega üldiselt ning seejärel uuritavate kondensaatorite põhjal. Järgnevalt võeti vaatluse alla kondensaatori rööptakistuse mõõtmine kahel eri meetodil ning vajalike parameetrite määramine takistuse täpsemaks määramiseks. Peale rööptakistuse, uuriti ka jadatakistuse mõõtmismeetodeid ning teostati vastavalt neile mõõtmised. Viimasena võeti vaatluse alla kondensaatori kuumenemine – selle seos jadatakistusega ning kuumenemine eri pingeharmonikute tasemetel korral.

Kondensaatori rööptakistuse mõõtmisel ei saavutatud usaldusväärseid mõõtmistulemusi, jadatakistuse korral LCR-meetri abil saadud tulemused olid samas suurusjärgus tootjapoolse väärtusega, kuid täpsema meetodi puhul oli erinevus suurem. Läbi kuumenemise leitud jadatakistuse väärtus oli samas suurusjärgus LCR-meetriga mõõtmistel.

Märksõnad: kondensaator, jadatakistus, rööptakistus, kuumenemine, harmoonikud.

ABSTRACT

<i>Author:</i> Heigo Pikkor	<i>Type of the work:</i> Master Thesis
<i>Title:</i> Planning levels of the power factor correction capacitors upon distorted supply voltage	
<i>Date:</i> 03.01.2020	<i>66 pages</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> Professor Lauri Kütt	
<i>Consultant:</i> Muhammad Naveed Iqbal	
<i>Abstract:</i> <p>Purpose of this thesis is to find out how power factor correction capacitors are affected by higher harmonics in power grid. First, necessity of power factor correction and methods were observed, also power factor correction capacitors parameters overall and ones that will be taken into examination, got acquainted. After that, capacitor equivalent parallel resistance (EPR) measuring methods and gathering all the necessary information for precise EPR values were introduced and measured. After EPR, equivalent series resistance (ESR) were researched and different measuring methods were applied to get ESR values. Lastly, capacitor heating to get ESR values were examined. Also, different voltage harmonics were applied to capacitor to see effects to it.</p> <p>Capacitor EPR measuring results were unprecise, ESR measuring with LCR-meter gave better results, according datasheet values. But when more precise method was used, values were way too high. ESR value which was found using heating measuring results, gave nearly the same results as LCR-meter gave.</p>	
<i>Keywords:</i> capacitor, ESR, EPR, heating, harmonics.	

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	Reaktiivvõimsust kompenseerivate kondensaatorite dimensioneerimine moonutatud võrgupinge korral
Lõputöö teema inglise keeles:	Planning levels of the power factor correction capacitors upon distorted supply voltage
Üliõpilane:	Heigo Pikkor, 176645
Eriala:	Energiamuundus- ja juhtimissüsteemid
Lõputöö liik:	magistritöö
Lõputöö juhendaja:	professor Lauri Kütt
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	31.01.2020
Lõputöö esitamise tähtaeg:	03.01.2020

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

1. Teema põhjendus

Tänapäeva elektrivõrgus on palju mittelineaarseid tarbijaid, mille tulemusena ei ole võrgupinge puhtalt siinuseline. See aga mõjutab kõiki seadmeid, mis on elektrivõrku ühendatud. Tööstustes kasutatakse reaktiivvõimsuse kompenseerimiseks kondensaatoreid, mida samuti harmoonikud mõjutavad. Seetõttu võeti uurimise alla, kuidas omavahel sõltuvad kondensaatori parameetrid ning nende soojenemine eri harmoonikute tasemetel korral. Varasemates uurimistöodes on vaadeldud kondensaatorite parameetreid ning soojenemise mõju eraldi, kuid antud lõputöös vaadeldi neid ühise tervikuna ning prooviti leida nendevahelisi seoseid.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on uurida erineva nimipingega kondensaatorite kuumenemise sõltuvust pingekujust ning pinge arväärtusest.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

1. Kuidas sõltub kondensaatori kuumenemine kondensaatori nimipingest?
2. Kuidas sõltub kondensaatori kuumenemine pingekujust?
3. Kuidas sõltub kondensaatori kuumenemine rakendatavast pingest?

4. Lähteandmed

Lõputöö teostamiseks vajalikud lähteandmed saadakse peamiselt mõõtmiste teel.

5. Uurimismeetodid

Tulemuseni plaanitakse jõuda mõõtmistega ning mõõtmistulemuste analüüsi teel. Andmete töötlemiseks kasutatakse Exceli arvutisvalemeid ning matemaatilisi mudeleid, samuti kasutatakse analüüsiks vajalike sisendväärtuste arvutamiseks Mathcadi.

6. Graafiline osa

- Kondensaatori eluea sõltuvus pingest ja temperatuurist
- Ajakonstandi määramiseks vajalike parameetrite määramine
- Tööstuses esinevate harmoonikutega pingel ning siinuspingel soojenemine

Graafiline osa on ainult lõputöö põhiosas.

7. Töö struktuur

SISSEJUHATUS

1. REAKTIIVVÕIMSUSE KOMPENSEERIMINE KONDENSAATORITEGA

- 1.1 Kondensaatorite tüübid ning ehitus
- 1.2 Võimalikud meetodid ning skeemid
 - 1.2.1 Kindla võimsusega kompenseerimine
 - 1.2.2 Reguleeritava võimsusega kompenseerimine

2. KONDENSAATORI OLULISEMAD PARAMEETRID

- 2.1 Kondensaatori kaod ja aseskeem
- 2.2 Lubatust kõrgema pinge ning temperatuuri mõju kondensaatorile
- 2.3 Kondensaatoril esinevad kaod
- 2.4 Katseseadmete valik
- 2.5 Uuritavate kondensaatorite parameetrid

3. KONDENSAATORI RÖÖPTAKISTUSE MÄÄRAMINE

- 3.1 Mõõtesondi- ja isolatsioonitakistuste arväärtuste määramine ajakonstandi abil
- 3.2 Mõõteahela skeem koos lisatakistitega
- 3.3 Mõõtesondi- ja isolatsioonitakistuste arväärtuste määramine RC-jadaahelas
- 3.4 Kondensaatorite pingelangu mõõtmine

4. KONDENSAATORI JADATAKISTUSE MÕÕTMINE

- 4.1 Kondensaatori jadatakistuse mõõtmine LCR-meetriga
- 4.2 Kondensaatori jadatakistuse täpsem määramine

5. KONDENSAATORITE KADUDEST TINGITUD KUUMENEMISE MÕÕTMINE

- 5.1 Kondensaatorite soojenemine 50 Hz ja 150 Hz juures siinuspingel

5.2 Kõrgemate harmooniliste sageduste mõju kondensaatori soojenemisele

6. KÕRGEMATE HARMOONILISTE SAGEDUSTE MÕJU KONDENSAATORI SOOJENEMISELE

6.1 Temperatuuri mõõtmine tööstuses esinevatel pingekujudel

6.1.1 Puidutööstus

6.1.2 Metallitööstus

6.1.3 Töötlev tööstus

6.2 Mõõtmistulemuste analüüs

KOKKUVÕTE

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Lõputöös kasutatakse allikatena raamatuid, artikleid, tootjapoolseid andmelehti ning IEC tehnilisi kirjeldusi.

1. EPCOS AG, „Film Capacitors. General technical information, “ TDK Group, 2018.
2. T. Vinnal, M. Jarkovoi ja L. Kütt, „Harmonic Currents and Voltages in LV Networks of Estonia : Measurement Results, Case Studies,“ 2018 IEEE 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), pp. 1-7, 2018.
3. M. Nahvi ja J. Edminister, Schaum's outline of electric circuits, fourth edition, New York: McGraw-Hill, 2003.7
4. Electronicon, „Key components for power factor correction in 50 Hz mains,“ Electronicon Kondensatoren GmbH, Gera, 2018.

9. Lõputöö konsultandid

Muhammad Naveed Iqbal - Mathcadi programmeerimine ning mõõtmiste läbiviimine

Marek Jarkovoi – mõõtemetoodika määratlemine, mõõteseadmete seadistamine ning mõõtmiste läbiviimine

10. Töö etapid ja ajakava

Teoreetilise osa kirjutatud	(20.11)
Mõõtmised teostatud	(30.11)
Mõõtmistulemuste analüüs teostatud	(06.12)
Töö mustand valmis juhendajale läbilugemiseks saatmiseks	(16.12)
Juhendajale teiseks läbilugemiseks saatmine	(23.12)
Töö lõplik versioon valmis esitamiseks	(30.12)

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	3
ABSTRACT	4
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	5
EESSÕNA.....	10
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU.....	11
SISSEJUHATUS.....	12
1. REAKTIIVVÕIMSUSE KOMPENSEERIMINE KONDENSAATORITEGA	13
1.1 Kondensaatorite tüübid ning ehitus	16
1.2 Võimalikud meetodid ning skeemid	16
1.2.1 Kindla võimsusega kompenseerimine	17
1.2.2 Reguleeritava võimsusega kompenseerimine	18
2. KONDENSAATORI OLULISEMAD PARAMEETRID	20
2.1 Kondensaatori kaod ja aseskeem	21
2.2 Lubatust kõrgema pinge ning temperatuuri mõju kondensaatorile.....	23
2.3 Kondensaatoril esinevate aktiivkadude hajumine	26
2.4 Katseseadmete valik	27
2.5 Uuritavate kondensaatorite parameetrid	28
3. KONDENSAATORI RÖÖPTAKISTUSE MÄÄRAMINE	29
3.1 Mõõtesondi- ja isolatsioonitakistuste arvvaartuste määramine ajakonstandi abil.....	29
3.2 Mõõteahela skeem koos lisatakistitega	32
3.3 Mõõtesondi- ja isolatsioonitakistuste arvvaartuste määramine RC-jadaahelas	34
3.4 Kondensaatorite pinge kahanemise mõõtmine	35
4. KONDENSAATORI JADATAKISTUSE MÕÕTMINE	38
4.1 Kondensaatori jadatakistuse mõõtmine LCR-meetriga	38

4.2 Kondensaatori jadatakistuse täpsem määramine	39
5. KONDENSAATORITE KADUDEST TINGITUD KUUMENEMISE MÕÕTMINE	45
5.1 Kondensaatorite soojenemine 50 Hz ja 150 Hz juures siinuspingel	46
6. KÕRGEMATE HARMOONILISTE SAGEDUSTE MÕJU KONDENSAATORI SOOJENEMISELE	51
6.1 Temperatuuri mõõtmine tööstuses esinevatel pingekujudel	53
6.1.1 Puidutööstus	54
6.1.2 Metallitööstus	55
6.1.3 Töötlev tööstus.....	56
6.2 Mõõtmistulemuste analüüs	57
KOKKUVÕTE.....	60
SUMMARY	62
KASUTATUD KIRJANDUS.....	64

EESSÕNA

Antud lõputöö teema on sõnastanud Tallinna Tehnikaülikooli Inseneriteaduskonna Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi professor Lauri Kütt. Töö raames teostatud mõõtmised viidi läbi Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi laborites. Mõõtmiste läbiviimisele aitasid kaasa Muhammad Naveed Iqbal, kes aitas seadistada toiteplokki ning Matlabis parameetrite määramist. Lisaks sooviks eraldi tänada Marek Jarkovoid, kes oli suureks abiks mõõtmiste ettevalmistamisel ning mõõtemetoodika määratlemisel.

Lisaks soovib lõputöö autor soovib tänada kõiki, kes ei ole eelnevalt mainitud, kuid on andnud oma panuse lõputöö valmimisele.

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

<i>ESR</i>	Ekvivalentne jadatakistus
<i>EPR</i>	Ekvivalentne rööptakistus
<i>EL</i>	Jadainduktiivsus

SISSEJUHATUS

Seoses mittelineaarsete tarbijate kasutuselevõtule nii tööstuses kui ka kodustes majapidamistes suureneb reaktiivvõimsuse osakaal elektrivõrgus. See omakorda toob kaasa kadude suurenemise, mis avaldab negatiivset mõju nii elektrisüsteemile kui ka looduskeskkonnale. Võttes arvesse, et hetkel toodetakse suurem osa elektrienergiast taastumatutest energiaallikatest, on keskkonnamõju otseselt märgatav. Reaktiivvõimsuse kompenseerimise korral väheneb selle ülekandmine üle elektrivõrgu, vähendades sellega ka elektrisüsteemi kadusid.

Reaktiivvõimsuse kompenseerimiseks kasutatakse kondensaatoreid, mis on elektrivõrku ühendatuna mõjutatud võrgus esinevate kõrgemate harmoonikute poolt. Kõrgemate harmoonikute mõju kondensaatorile avalduvad välisel vaatlusel selle kuumenemisega. Kui kondensaator kuumeneb üle lubatud piiride, võib see kaasa tuua kondensaatori eluea lühenemise või riknemise. Selle vältimiseks on võimalik kasutada kõrgema pingeklassiga kondensaatoreid. Selleks, et saada aru, mis erinevus on eri pingeklassiga kondensaatoritel, võetakse vaatluse alla kondensaatori rööptakistus, mis on otseselt seotud selle dielektriku omadustega. Lisaks vaadeldakse jadatakistust, kuna see mõjutab kondensaatori kuumenemist seda läbiva voolu toimet. Teades kondensaatori parameetreid, on paremini arusaadav, milles seisneb erinevus erineva pingeklassiga kondensaatorite vahel. Samuti uuritakse kondensaatorite kuumenemist, rakendades sellele nii siinuse kujulist kui ka moonutatud pinget.

Lõputöös esmalt tutvutakse eri tüüpi kondensaatoritega ning ühendusviisidega. Samuti tutvutakse, miks kasutatakse filterreaktoreid. Seejärel vaadeldakse kondensaatorite parameetreid ning kondensaatoril esinevaid kadusid. Lisaks tutvutakse kõrgema temperatuuri ning pinge mõjuga kondensaatori elueale. Järgnevalt mõõdetakse kondensaatori rööptakistust kahel eri meetodil. Lisaks mõõdetakse ka kondensaatori jadatakistust kahel erineval meetodil. Viimasena vaadeldakse kondensaatori kuumenemist nii siinuspinge kui ka moonutatud pinge korral. Lisaks uuritakse jadatakistuse arvutamist läbi kondensaatori kuumenemise.

Arvutiprogrammidest kasutatakse lõputöö koostamisel matemaatiliste mudelite koostamisel Excelit ning Mathcadi ja jooniste tegemiseks Eplan Electric P8.

1. REAKTIIVVÕIMSUSE KOMPENSEERIMINE

KONDENSAATORITEGA

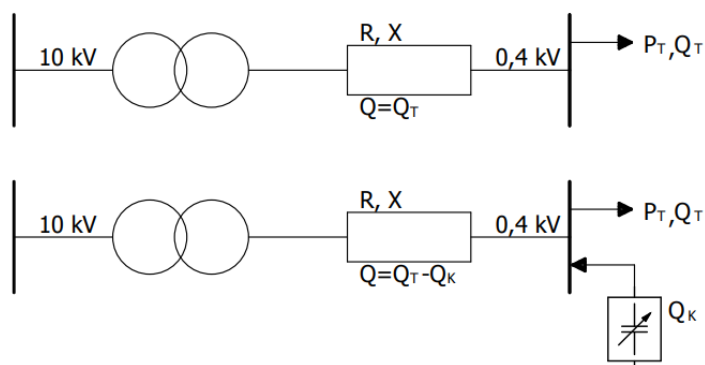
Suur osa tööstustes ning kodumajapidamistes kasutatavatest koormustest on induktiivse iseloomuga. Nende suurel hulgal käitamine vähendab võimsustegurit elektrivarustussüsteemis. Võimsustegur on vahelduvvoolusüsteemis arvutatav valemiga 1.1.

$$\cos \varphi = \frac{I_{aktiiv}}{I_{kogu}} \quad (1.1)$$

kus I_{aktiiv} – siinuspingega samas faasis olev voolukomponent, A,

I_{kogu} – tarbitava voolu efektiivväärtus, A.

Parimaks peetakse võimsusteguri väärtust, mis on ligilähedane ühele, mis omakorda viitab ka heale pingekvaliteedile; madalam võimsustegur viitab suuremate kadudega, so vähemefektiivsele elektrisüsteemile. Madal efektiivsus toob kaasa elektrivõrgus kasutatavate seadmete ning elektriliinide kuumenemise, mille kompenseerimiseks tuleb neid üledimensioneerida. Viimane toob kaasa aga kõrgema investeringukulu. [1] Joonisel 1.1 on kujutatud elektrivõrgu lihtsustatud skeem ilma ning koos reaktiivvõimsuse kompenseerimise kondensaatoriga.



Joonis 1.1. Elektrivõrk enne ning pärast reaktiivvõimsuse kompenseerimist [2]

Joonisel on kujutatud keskpingeliini, jõutrafot, madalpingeline ning tarbija liitumispunkti. Madalpinge poolel on kujutatud aktiivvõimsuse kadusid ülekandevõrgus R ning reaktiivvõimsuse kadusid reaktiivtakistusel X . P_T ning Q_T on vastavalt tarbitav aktiivvõimsus ning reaktiivvõimsus. Kadusid elektrisüsteemis saab vähendada, ühendades elektrivõrku reaktiivvõimsuse kompenseerimiseks kondensaatorid, võimsusega Q_K . Selle tulemusena väheneb ülekantav reaktiivvõimsus Q_K võrra. [2] Ülekantava reaktiivvõimsuse leidmiseks kasutatakse valemit 1.2.

$$Q = Q_T - Q_K \quad (1.2)$$

Võimsusteguri rakendust aitab paremini väljendada võimsuste kolmnurk. Võimsuskolmnurk koosneb kolmest komponendist: aktiivvõimsus P , reaktiivvõimsus Q ja näivvõimsus S . Antud suuruste arväärtused avalduvad järgnevalt:

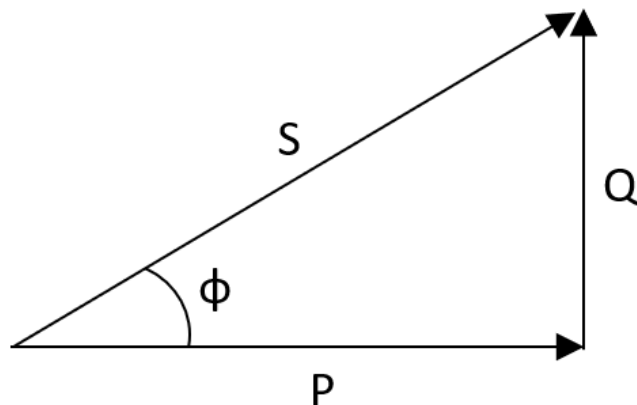
$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi = I^2 \cdot r = U^2 \cdot g \quad (1.3)$$

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi = I^2 \cdot x = U^2 \cdot b \quad (1.4)$$

$$S = U \cdot I = I^2 \cdot z = U^2 \cdot y \quad [3] \quad (1.5)$$

kus U – pinge efektiivväärtus, V,
 I – voolu efektiivväärtus, A,
 $\cos \varphi$ – võimsustegur,
 $\sin \varphi$ – reaktiivvõimsuse väärtust määrav tegur,
 r – aktiivtakistus, Ω ,
 x – reaktiivtakistus, Ω ,
 z – näivtakistus, Ω ,
 g – aktiivjuhtivus, $1/\Omega$,
 b – reaktiivjuhtivus, $1/\Omega$,
 y – näivjuhtivus, $1/\Omega$.

Valemities 1.3, 1.4 ja 1.5 toodud suuruste omavaheline seos on võimsuste kolmnurk, mida on kujutatud joonisel 1.2. [4]



Joonis 1.2. Võimsuste kolmnurk

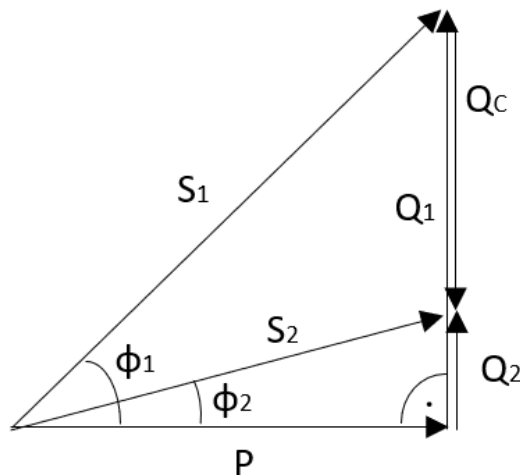
Kui tarvitid on lineaarsed ning pinge sinusoidaalne, avaldub võimsustegur järgnevalt:

$$pf = \cos(\varphi) \quad [3] \quad (1.6)$$

Võrrand 1.6 ei anna edasi tegelikku võimsusteguri olemust, sest üldjuhul reaalses elektrivõrgus tarvitid on mittelineaarsed ning pinge moonutatud. Võimsustegur on suhe aktiivvõimsuse ning näivvõimsuse vahel, mis on toodud valemis 1.7.

$$pf = \frac{P}{S} \quad (1.7)$$

Valemist 1.7 järeldeb, et mida väiksem on reaktiivvõimsuse arvvärtus, seda suurem on võimsustegur. [5] Valemis 1.7 toodud seost aitab lahti seletada täpsustatud võimsuste kolmnurk, mis on kujutatud joonisel 1.3. Q_1 tähistab joonisel algset reaktiivvõimsust, Q_C kondensaatoritega toodetavat reaktiivvõimsust ning Q_2 reaktiivvõimsust peale kompenseerimist. S_1 kujutab näivvõimsust enne ja S_2 peale kompenseerimist ning vastavad näivvõimsuse nurgad on vastavalt ϕ_1 ja ϕ_2 . [6]



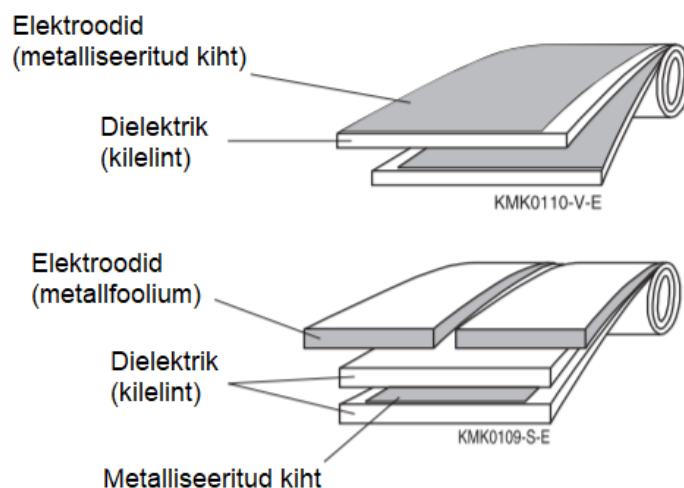
Joonis 1.3. Võimsuste kolmnurk reaktiivenergia kompenseerimisel kondensaatoritega

Kompenseerimise korral moodustab suurema osa tarvitite poolt tarbitavast reaktiivvõimsusest kondensaatorite poolt antav reaktiivvõimsus Q_C ; võrgust tarbitav reaktiivvõimsus Q_2 moodustab kogu tarbitavast reaktiivvõimsusest Q_1 väikse osa. Samuti on paranenud võimsustegur võrgu poolt vaadelduna, sest algne pinge ja voolu vahelise vektori nurk ϕ_1 on vähenenud nurgani ϕ_2 . Paranenud võimsustegur järeldeb muuhulgas võrrandist $\cos(\phi_1) > \cos(\phi_2)$. [5]

1.1 Kondensaatorite tüübid ning ehitus

Tänapäeval kasutatakse peamiselt reaktiivenergia kompenseerimisel plastkilekondensaatoreid.

Joonisel 1.4 on kujutatud tüüpilisi plastkilekondensaatorite kihtide paiknemisi.



Joonis 1.4. Plastkilekondensaatorite kihid [7]

Peamised dielektrikud, mida plastkilekondensaatorites kasutatakse on polüpropüleen (PP), polüetüleentereftalaat (PET), polüetüleentereftalaat (PEN) ja polüfenüleensulfid (PPS). Kõige enam kasutatakse neist polüpropüleeni, sest antud materjalil on väga head eneseerandamise omadused, samuti on polüpropüleenil madal ning stabiilne kaotegur. [8]

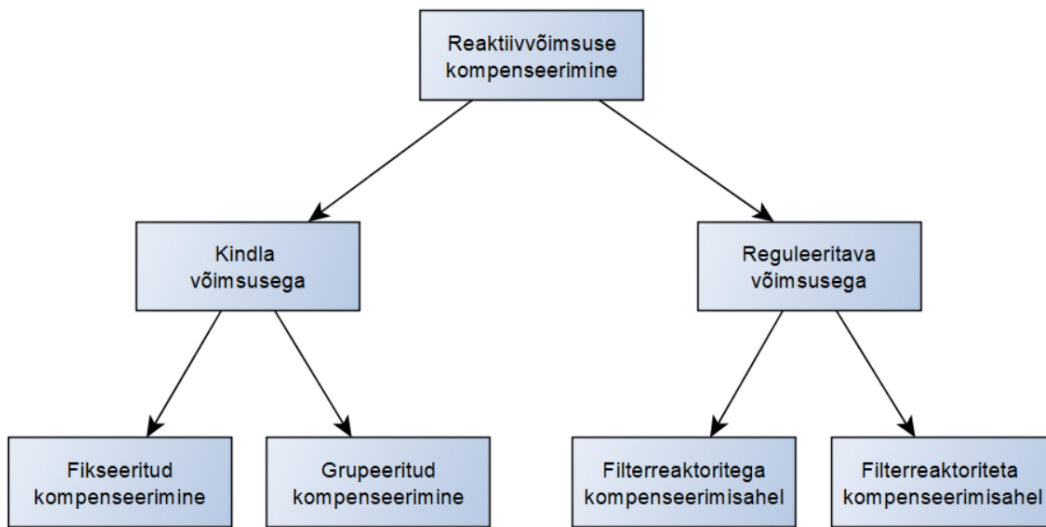
Selleks, et kondensaatorite dielektriline tugevus suureneks, samas mõõtmed ning hind väheneks, mängib suurt rolli dielektriku ja metalliseerimise tehnoloogiate järjepidev arendamine [9]

Metalliseerimiseks kasutatakse tüüpiliselt alumiiniumi, tsinki või alumiiniumi ja tsingi sulamit. Protsessi käigus kantakse plastkile peale õhuke kiht metalli, millele tehakse seejärel mitmeid füüsikalisi-keemilisi töötusi, et suurendada aurustunud metallide külge jäämist dielektrikule ning õhukese metallikihi kaitsmiseks. Metallikihi paksus on tüüpiliselt 200 Ångströmi ehk 0,02 μm . võrreldes metallfooliumiga, mis on ligikaudu 300 korda paksem, on metalliseeritud kihi energiatihedus tunduvalt parem. [8, 9]

1.2 Võimalikud meetodid ning skeemid

Reaktiivvõimsuse kompenseerimise süsteeme võib jagada kaheks: kindla võimsusega ning reguleeritava võimsusega kompenseerimiseks. Kindla võimsusega kompenseerimine jaguneb

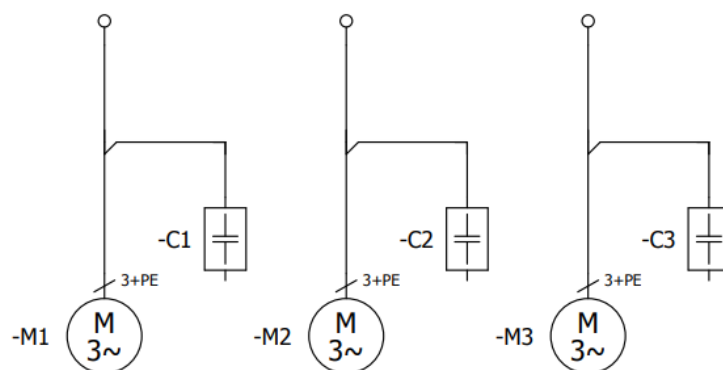
omakorda kaheks: fikseeritud ning grupeeritud kompenseerimiseks. Joonisel 1.5 on kujutatud erinevate meetodite jaotumist. [10]



Joonis 1.5. Reaktiivvõimsuse kompenseerimise meetodid [10]

1.2.1 Kindla võimsusega kompenseerimine

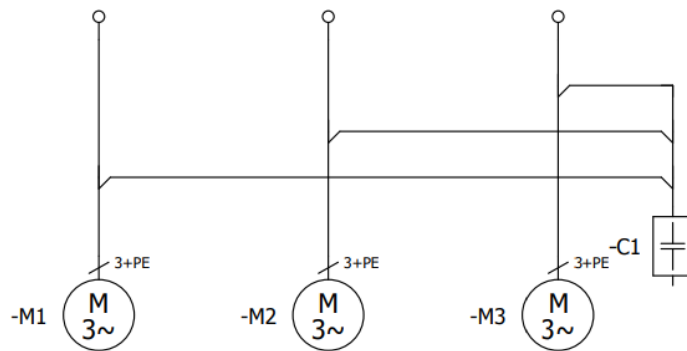
Fikseeritud kompenseerimise korral kompenseeritakse reaktiivvõimsust igal induktiivsel koormusel eraldi, seda seadme lähedal, eesmärgiga vähendada koormust ühenduskaablites. Tavaliselt kasutatakse antud meetodit üksikute, püsiva koormusega ning püsiva võimsusega seadmetel. Joonisel 1.6 on kujutatud fikseeritud kompenseerimise tööskeemi. [10]



Joonis 1.6. Fikseeritud kompenseerimise tööpõhimõte

Grupeeritud kompenseerimise korral ühendatakse üks kondensaator mitme samaaegselt töötava kindla induktiivse koormusega. Sellist viisi kasutatakse näiteks grupeeritud mootorite või

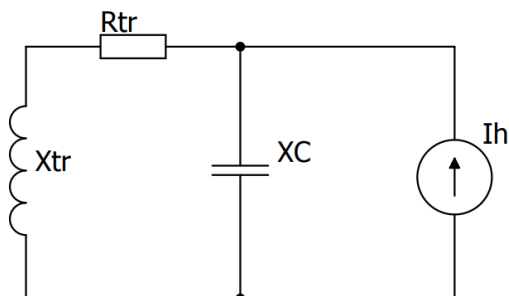
gaaslahenduslampide juures. Joonisel 1.7 on kujutatud grupeeritud kompenseerimise tööpõhimõtet. [10]



Joonis 1.7. Grupeeritud kompenseerimise tööpõhimõte

1.2.2 Reguleeritava võimsusega kompenseerimine

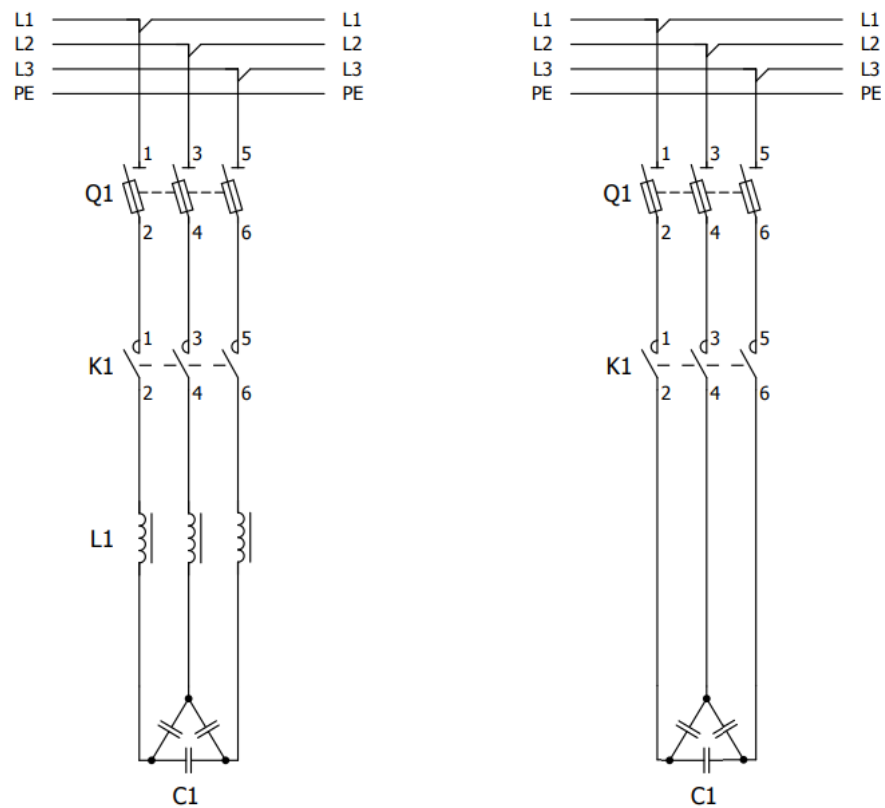
Reguleeritava võimsusega kompenseerimine jagatakse kaheks: filterreaktoritega ning ilma filterreaktoriteta kompenseerimine. Filterreaktoreid kasutatakse selleks, et vältida rööpresonantsi kompenseerimise kondensaatori ning elektrisüsteemi kaablis esineva induktiivsuse vahel. [11] Rööpresonantsi korral mõnel harmooniku sagedusel omandavad pingekomponentide väärtused väga kõrged tasemed. Sellisel juhul võib reguleeritava võimsusega kompenseerimisseade hakata üha rohkem astmeid sisse lülitama, et saavutada etteantud võimsusteguri väärtus ning resonants esineb jätkuvalt mingi aja tagant. [12] Reaktori lisamisel elektriahelasse suurendatakse paralleelresonantsi sagedust kõrgemaks kui võrgus esinev kõrgem harmooniline sagedus [11]. Rööpresonantsi olukorda kajastav põhimõtteskeem on kujutatud joonisel 1.8.



Joonis 1.8. Rööpresonantsi põhimõtteskeem

Filterreaktorite negatiivseks küljeks on reaktori kuumenemine, mis suurendab kadusid ning vähendab seeläbi kompenseerimisseadme efektiivsust. Seetõttu kasutatakse juhul kui kõrgemate

harmoniliste komponentide tase võrgus on madalam, ilma filterreaktoriteta kompenseerimisahelaid. Filterreaktoreid ei pea kasutama juhtudel, kui mittelineaarsete tarbijate summaarne võimsus on väiksem kui 10% trafo nimivõimsusest. Võttes arvesse, et üha rohkem võetakse kasutusele mittelinearsete tarbijaid, on soovituslik kasutada filterreaktoreid kompenseerimisseadmes. [10] Joonisel 1.9 on vasakul pool kujutatud filterreaktoritega ning paremal ilma reaktoriteta reaktiivvõimsuse kompenseerimisseadme jõuahel.



Joonis 1.9. Reaktiivvõimsuse kompenseerimise jõuahelad

2. KONDENSAATORI OLULISEMAD PARAMEETRID

Kondensaatori üks olulisemaid parameetreid on nimimahtuvus C_n . Nimimahtuvus on mahtuvuse väärtus, millele vastavaks on kondensaator välja töötatud ning seda mõõdetakse 1 kHz lähedastel sagedustel, maksimaalselt 20 °C juures maksimaalselt vahelduvpingel 5 V. [13]

Teine oluline parameeter on nimipinge U_n . Nimipinge on vahelduvvooluga elektrisüsteemis efektiivväärtus maksimaalselt lubatud vahelduvpingest normaaltöös. Impulsspinge U_{pk} ei tohiks ületada nimipinget ka rikkeolukordades, see tähendab et $U_n \geq U_{pk}$. [10, 13]

Kondensaatori reaktiivvõimsus määratakse selle mahtuvuse ning elektrivõrgu sageduse ning pinge põhjal. Reaktiivvõimsus leitakse valemit 2.1 kasutades. [10]

$$Q_C = 2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot C_n \cdot U_n^2 \quad (2.1)$$

kus Q_C – mahtuvuslik reaktiivvõimsus, var,

f_n – elektrivõrgu nimisagedus, Hz. [10]

Kondensaatori temperatuurikategooria määrab ära, millises temperatuurivahemikus peab olema ümbritseva keskkonna temperatuur, et kondensaator ei saaks kahjustada ning eluiga ei lüheneks märkimisväärselt. [10] Kondensaatori temperatuuriklassid on määratud IEC tehnilises aruandes IEC 60831-1 ning on toodud välja toodud tabelis 2.1.

Tabel 2.1. Kondensaatori suurimad lubatud temperatuurid [14]

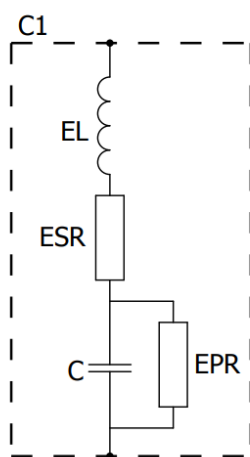
Tähis	Lubatud suurim keskkonna temperatuur, °C
A	40
B	45
C	50
D	55

Kondensaatorit iseloomustav suurus, mida tavaliselt välja ei tooda, on selle nimivool. Nimivool on kondensaatorit läbiv voolu efektiivväärtus nimipingel ja -sagedusel. Seejuures jäetakse arvestamata harmoonilismoonutused, lülitustel tekkivad transiendid ning mahtuvuse erinevus tolerantside piires. Voolu leidmiseks kasutatakse valemit 2.2. [10]

$$I = \frac{Q_C}{U_n} = 2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot C_n \cdot U_n \quad (2.2)$$

2.1 Kondensaatori kaod ja aseskeem

Mahtuvuslikule toimele täiendavalt tuleb rõhku pöörata kondensaatorite eri tüüpi kadudele. Nende paremaks mõistmiseks on joonisel 2.1 on kujutatud reaalse kondensaatori aseskeem. IEC 60384-1 kohaselt tehtud aseskeemil kujutab C kondensaatori mahtuvust, ESR jadatakistust, EPR rööptakistust ning EL jadainduktiivsust. [15]



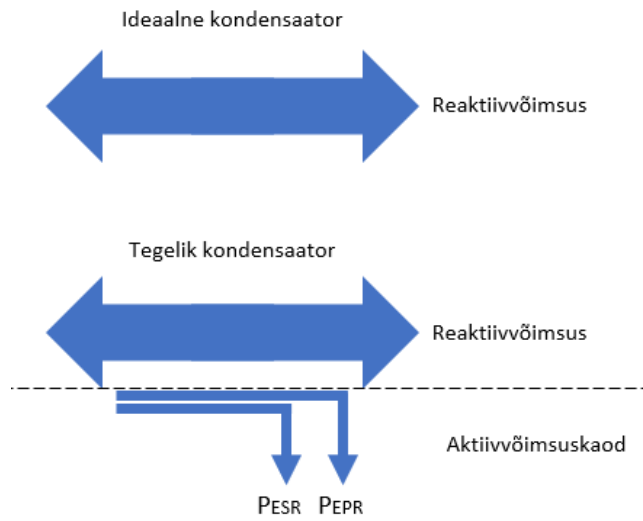
Joonis 2.1. Kondensaatori aseskeem

Jadatakistuse määravad elektrijuhil (kilele kantud metallikihil), juhtmetel ning kontaktklemmidel esinevad kaod. Eelnevalt mainitud kaod suurenevad sageduse kasvades kiiresti. Antud suurus suureneb ka kondensaatori mahtuvuse suurenemisel. Lisaks esinevad kondensaatoris kaod ka dielektrikus. Dielektrikus esinevaid kadusid põhjustavad polariseerimisele ja repolariseerimisele kuluv energia, mis toimub dielektrikus kahe vastupidise suunaga kahe järjestikuse poolperioodi vältel vahelduvvoolu korral. Dielektrikuskaod on sõltuvad dielektrikuna kasutatavast materjalist. Polüpropüleenil korral on kaod sagedussõltumatud, samas polüestri puhul kaod suurenevad sageduse kasvamisega. [7, 16]

Jadainduktiivsuse põhjustab suures osas juhtmete ning kesta poolt põhjustatav induktiivsus, samuti elektrit juhtiva metallikihti läbiva voolu poolt tekitatav magnetväli. Üldjuhul valmistatakse kondensaatorid sellisel viisil, et nende induktiivsus on väga väike. Sel põhjusel jadainduktiivsust eraldi antud lõputöö raames ei uurita ning järgnevatel skeemidel seda kujutatud ei ole. [7, 16]

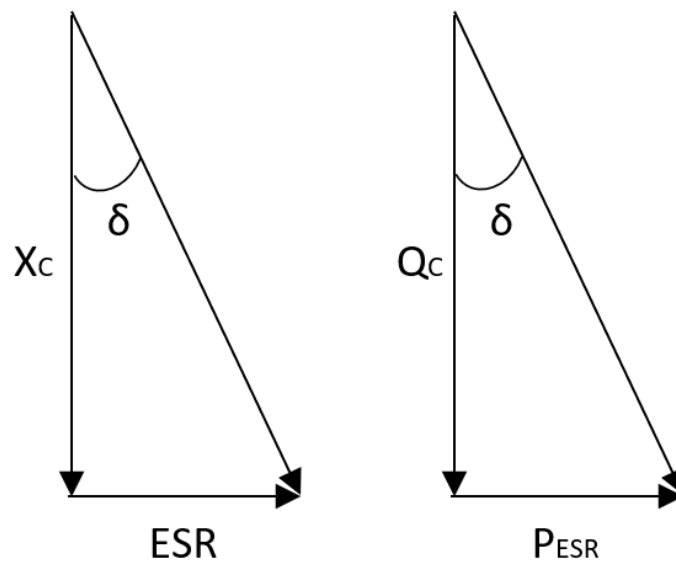
Rööptakistuse suuruse määrab kondensaatori isolatsioonitakistus. Isolatsioonitakistuse suuruse määrab dielektrikuna kasutatava materjali omadused ning kvaliteet, samuti kondensaatori üldine ehitus. Temperatuuri ning õhuniiskuse suurenedes isolatsioonitakistus väheneb. Joonisel 2.2 on kujutatud ideaalset ning tegeliku kondensaatori põhimõttelist erinevust. Ideaalse kondensaatori

korral puuduvad seadmel kaod, mis tegelikul kondensaatoril on olemas – jadatakistuse tõttu aktiivvõimsuskadu P_{ESR} ning rööptakistusel tõttu aktiivvõimsuskadu P_{EPR} . [7, 13]



Joonis 2.2. Ideaalne ja tegelik kondensaator

Dielektrikuskadu ($\tan \delta$) on jadatakistuse ning mahtuvustakistuse või aktiivvõimsuse ning reaktiivvõimsuse omavahelist suhet näitav arv. Plastkilekondensaatoritel määratakse $\tan \delta$ siinuspingel 1 kHz sagedusel. [13, 17] Joonisel 2.3 on kujutatud kaonurga tangensi määramist graafiliselt nii takistuste kui ka võimsuste järgi.



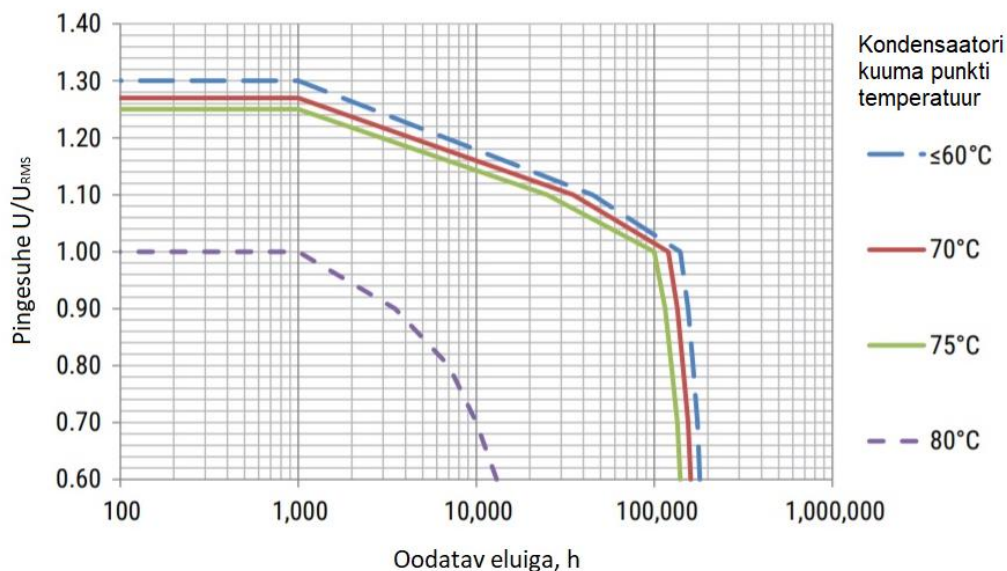
Joonis 2.3. Kaonurga tangens

Kaonurga tangensi leidmiseks kasutatakse valemit 2.3.

$$\tan \delta = \frac{ESR}{X_C} = \frac{P_{ESR}}{Q_C} \quad (2.3)$$

2.2 Lubatust kõrgema pinge ning temperatuuri mõju kondensaatorile

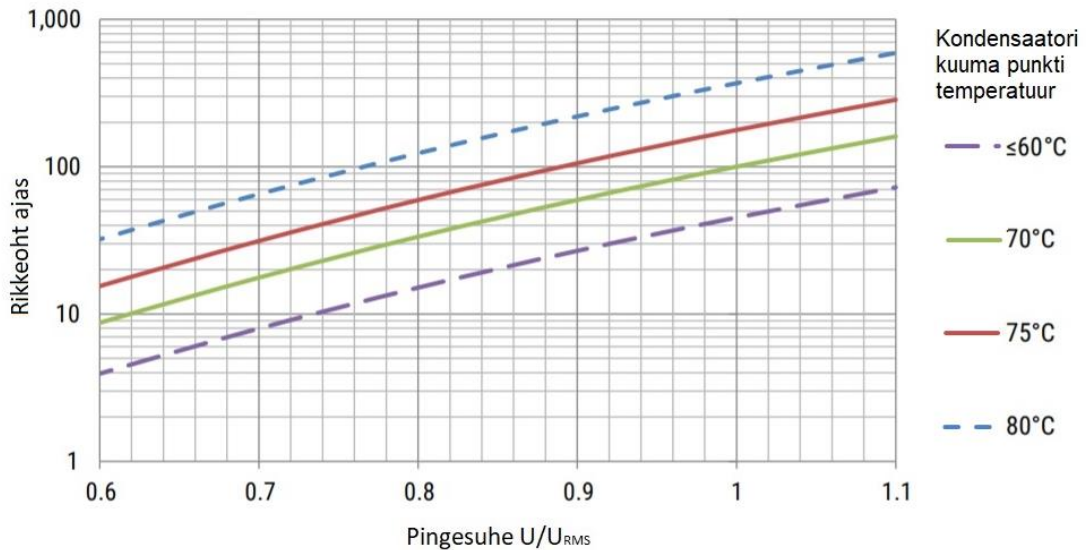
Joonisel 2.4 on kujutatud Kemet C44P-C20 tooteseeria kondensaatorite oodatava eluea suhet pingest ning kondensaatori maksimaalsest temperatuurist.



Joonis 2.4. Kondensaatori eluea sõltuvus pingest ja temperatuurist [18]

Graafikult on näha, et kondensaatori temperatuuridel 60 °C, 70 °C ja 75 °C on keskmine eluiga üle 100000 tunni, vastavalt ligikaudu 180000, 160000 ning 140000 tundi juhul kui kondensaatori pinge on kuni 0,6 korda selle nimipingest. Nimipingel on vastavalt keskmised eluead 150000, 125000 ning 100000 tundi. Kondensaatori keskmine eluiga hakkab märkimisväärselt vähenema, kui talle rakendatav pinge on üle lubatava: 1,2 korda üle nimipinge on vastavate kondensaatorite eluead vastavalt 5000, 4000 ja 3000 tundi. Temperatuuridel kuni 75 °C on kondensaatori eluead samas suurusjärgus, aga selle ületamisel väheneb kondensaatori eluiga märkimisväärselt – näiteks 0,6 kordsel pingel 130000-lt tunnilt 13000-le. Sellest omakorda jäeldub, et antud kondensaatoritüübi puhul on 75 °C maksimaalne kuuma punkti temperatuur, et säilitada selle eeldatav eluiga.

Joonisel 2.5 on kujutatud pinge ning rikkeohu ajas (inglise keeles *FIT*-failures in time) sõltuvust kondensaatori kuuma punkti temperatuurist.



Joonis 2.5. kondensaatori rikkeohtu sõltuvus pingest ja temperatuurist [18]

Jooniselt 2.5 on näha, et rikkeoht suureneb ligikaudu lineaarselt pinge kasvades. Samuti on näha, et kondensaatori nimipingel on rikete tõenäosuste väärtus vastavalt temperatuurile: 60 °C – 45, 70 °C - 100, 75 °C – 190 ning 80 °C - 390 riket miljardi töötunni kohta. Sellest sõltuvalt, et pinge suurenedes suureneb rikkeoht ning väheneb oodatav eluiga, on paika pandud piirmäärad, kui pikalt on lubatud kondensaatoril töötada pingega, mille väärtus on üle selle nimipinge. IEC 60831-1 kohaselt kondensaatoritele lubatud pingetasemed on toodud tabelis 2.2.

Tabel 2.2. Kondensaatorite lubatud pingetasemed [14]

Pinge kordsus $\frac{U}{U_n}$	Maksimaalne kestus tööaja jooksul
1	Pidevalt
1,1	24 tunni jooksul 8 tundi
1,15	24 tunni jooksul 30 minutit
1,2	5 min
1,3	1 min

Tabelis 2.2 toodud pinge väärtused kehtivad iga kondensaatorite pingestatud perioodi vältel. Olukorras, kus pingestamine kestab vähem kui 24 tundi, kehtivad erandid, mis on ka tabelis eraldi välja toodud. [14]

Kondensaatoril esinevat kaovõimsust väljendab valem 2.4.

$$P_k = I_C^2 \cdot ESR \quad (2.4)$$

kus I_C – kondensaatorit läbiva voolu efektiivväärtus.

Kondensaatorit läbiva voolu leidmiseks kasutatakse valemit 2.5.

$$I_C = \frac{U_C^2}{ESR} \quad (2.5)$$

Valem 2.5 kehtib ainult tingimusel, et toitepinge on siinuseline ehk pinges ei esine kõrgemaid harmoonikud. Valemis 2.6 on toodud seos tegeliku kaovõimsuse P_u ning tegeliku võrgupinge U ning siinuselise pinge U_n korral esineva nimi-kaovõimsuse P_n vahel on vahel.

$$\frac{P_u}{P_n} = \frac{U^2}{U_n^2} \quad (2.6)$$

Näiteks 1,1-kordse ülepinge korral suurenevad kaod 1,21 korda ning 1,2-kordse ülepingega 1,44 korda. Selle avaldise lähtekoht peitub ka voolu väärtuses, mis on toodud valemis 2.7.

$$\frac{P_u}{P_n} = \frac{I^2}{I_n^2} \quad (2.7)$$

Valemis 2.7 on tegemist voolude efektiivväärtustega. Arvestada tuleb, et kondensaatori näivtakistus kõrgematel sagedustel on madalam. Seega, olukorras, kus harmoonikud esinevad, kasutatakse voolu leidmiseks valemit 2.8.

$$I_{Ci} = \frac{U(f_i)}{X_C} = U(f_i) \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_i \cdot C \quad (2.8)$$

kus I_{Ci} – kondensaatori vool i -dat järku harmooniku korral, A,
 f_i – i -ndat järku harmooniku sagedus, Hz,
 $U(f_i)$ – pinge i -ndat järku harmooniku sagedusel, V.

Kõrgemate harmoonikute esinemisel tuleb pidada silmas asjaolu, et olukorras, kus siinuselise ning koos harmoonikutega oleva pinge efektiivväärtus on võrdsed, ei ole eralduvad võimsused omavahel võrdsed. See on tingitud sellest, et kõrgema sagedusega pinge toob kaasa ka tugevama voolu sellel sagedusel, tänu näivtakistuse sagedussõltuvusele.

Kuumenemist põhjustavad peamiselt dielektrikuskaod ning oomilised kaod ehk Joule'i kaod. Dielektrikus esinevad kaod põhisagedusel P_{Dn} avalduvad valemis 2.9.

$$P_{Dn} = I_n^2 \cdot \underbrace{X_C \cdot \tan \delta}_{\text{Kaotakistus}} = 2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot C \cdot U_n^2 \cdot \tan \delta \quad (2.9)$$

Tingimustes, kus toitepinges esinevad märkimisväärsel tasemel pingeharmoonikud, avalduvad dielektrikus esinevad kaod valemis 2.10.

$$P_D = 2 \cdot \pi \cdot C \cdot \tan \delta \left[\sum_{i=1}^n f_i \cdot U(f_i)^2 \right] \quad (2.10)$$

Valemite 2.9 ja 2.10 põhjal saab öelda, et kaovõimsus suureneb kõrgemate harmooniliste komponentide esinemisel sageduse kordselt. Seda võrreldes olukorraga, kus kõrgemaid

harmoonilisi elektrisüsteemis ei esine. Teise osa kadudest moodustavad Joule'i kaod, mis on kujutatud valemis 2.11. [18]

$$P_J = ESR \cdot [\sum_{i=1}^n I(f_i)^2] \quad (2.11)$$

Joule'i kadude arvutusvalem on võrreldav dielektrikuskadude omaga, mille arvutamiseks kasutatakse valemit 2.12.

$$P_J = \sum_{i=1}^n ESR \cdot [2 \cdot \pi \cdot C \cdot U(f_i) \cdot f_i]^2 = ESR \cdot 4 \cdot \pi^2 \cdot C^2 \cdot [\sum_{i=1}^n (U(f_i) \cdot f_i)^2] \quad (2.12)$$

Seega kondensaatori võimsuskad kokku avalduvad valemis 2.13.

$$P_{kogu} = \sum_{i=1}^n [P_D(f_i) + P_J(f_i)] \quad (2.13)$$

2.3 Kondensaatoril esinevate aktiivkadude hajumine

Selleks, et kondensaatori sees eralduv energia saaks hajuda ümbritsevasse keskkonda, peab kondensaatori sisemise kuuma punkti temperatuur olema kõrgem kui väliskesta temperatuur ning väliskesta temperatuur peab olema omakorda kõrgem kui ümbritseva keskkonna temperatuur. Temperatuurihüpe kuuma punkti ja kondensaatori kesta vahel on toodud valemis 2.14.

$$\Delta T_{KP} = P_{kogu} \cdot R_{T-KP} \quad (2.14)$$

kus ΔT_{KP} – temperatuurihüpe kuuma punkti ja keskkonna vahel, °C,

R_{T-KP} – termiline takistus kuuma punkti ja keskkonna vahel, $\frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$.

Termilise takistuse arväärtus on üldjuhul antud kondensaatori andmelehes. Valemiga 2.14 leitud temperatuurihüppe abil on võimalik leida kuuma punkti temperatuur. Kuuma punkti leidmise valem on toodud valemis 2.15. [18]

$$T_{KP} = T_{KK} + \Delta T_{KP} \quad (2.15)$$

kus T_{KP} – kuuma punkti temperatuur, °C,

T_{KK} – ümbritseva keskkonna temperatuur, °C.

Kondensaatoril eralduvat soojust sekundi jooksul võib jagada kaheks: ülekandesoojus õhu konvektsioonil ja ülekandesoojus kiirguse mõjul. Valemis 2.16 on toodud arvutusvalem ülekandesoojuse arvutamiseks konvektsiooni mõjul. [19]

$$Q_d' = \alpha \cdot (T_k - T_0) \cdot A \quad (2.16)$$

kus Q_d' – ülekandesoojus konvektsiooni mõjul, W,

α – õhu konvektsiooni ülekandetegur, $\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$,

T_k – kondensaatori kesta kõrgeim temperatuur, °C,

T_0 – ümbritseva keskkonna temperatuur, °C ,

A – kondensaatori pindala, m².

Õhu konvektsiooni ülekandetegur arvutatakse valemiga 2.17.

$$\alpha = 1,5 \cdot (T_k - T_0)^{0,35} \quad (2.17)$$

Kondensaatori kestalt kiirguslikult hajuv võimsus on leitav valemi 2.18 abil.

$$Q_f' = \sigma \cdot \varepsilon \cdot [(273 + T_k)^4 - (273 + T_0)^4] \cdot A \quad (2.18)$$

kus Q_f' – eralduv soojus kiirguse mõjul, W,

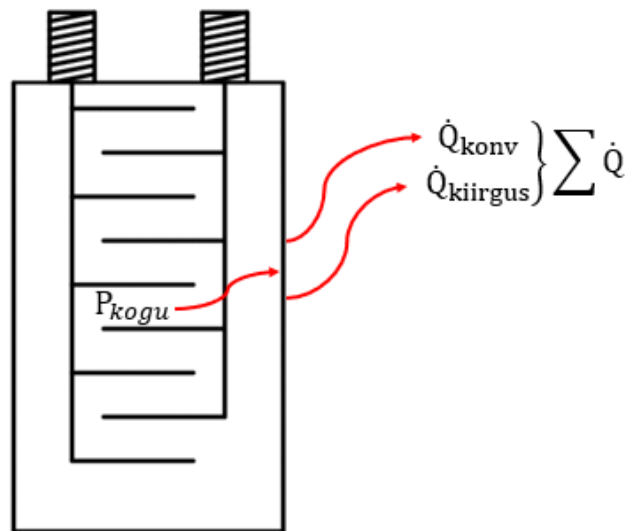
ε – kesta kiirgustegur, sõltub pinna omadustest, vahemikus 0...1,

σ - Stefan–Boltzmanni konstant, $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ W/m².

Valemis 2.18 on silmas peetud, et mõõtmised toimuvad siseruumides ning õhu liikumise kiirus on vähem kui $0,2 \frac{m}{s}$. Soojusülekanne sõltub kesta värvist. Kondensaator, mille kest on valmistatud alumiiniumist, on soojusülekanne 0,02 kuni temperatuurini 25 °C Valemist 2.16 ning 2.18 lähtuvalt on summaarne soojuseraldus toodud valemis 2.19. [19, 20, 21]

$$Q' = Q_a' + Q_f' \quad (2.19)$$

Joonisel 2.6 on kujutatud kondensaatoris eralduva võimsuse ning selle muundumise soojuseks.



Joonis 2.6. Kondensaatoris eralduva soojuse hajutamise põhimõtteskeem

2.4 Katseseadmete valik

Katseseadmete valikul osutus määravaks olemasolevate seadmete valik Elektroenergeetika ja Mehhatroonika instituudi katselaborites. Järgnevalt on toodud loetelu seadmetest, mida kasutati mõõtmise läbiviimiseks:

- Ostsilloskoop ja mõõtesonidid
 - Picoscope 2000 Series,
 - TPI P250 mõõtesonidid 250 MHz x100.
- Alalisvoolu toiteallikas
 - 3-faasiline autotrafo,
 - Täisperioodalaldi koos silukondensaatoriga,
 - Maksimaalne pinge 800 V DC.
- Vahelduvvoolu-toitallikas Chroma 61505
 - Ühefaasiline väljund,
 - Maksimaalne väljundpinge 300 V AC,
 - Maksimaalne väljundvõimsus 4000 VA,
 - Maksimaalne väljundsagedus 1000 Hz. [22]
- Andmeloger Keysight 34972A
 - Temperatuuri mõõtmine ning andmete salvestamine,
 - Kondensaatori temperatuuri mõõtmiseks Pt1000 andurid,
 - Ümbritseva keskkonna temperatuuri mõõtmiseks Pt100 termopaar.

2.5 Uuritavate kondensaatorite parameetrid

Kondensaatorid, mille parameetreid antud töös lähemalt uuritakse, on ühefaasilised kondensaatorid, mille tootjaks on Kemet. Tabelis 2.3 on toodud võrdluses olevate kondensaatorite peamised parameetrid. Kondensaatorite mahtuvuse valik tulenes kasutatava vahelduvvoolu-toiteallika võimekusest.

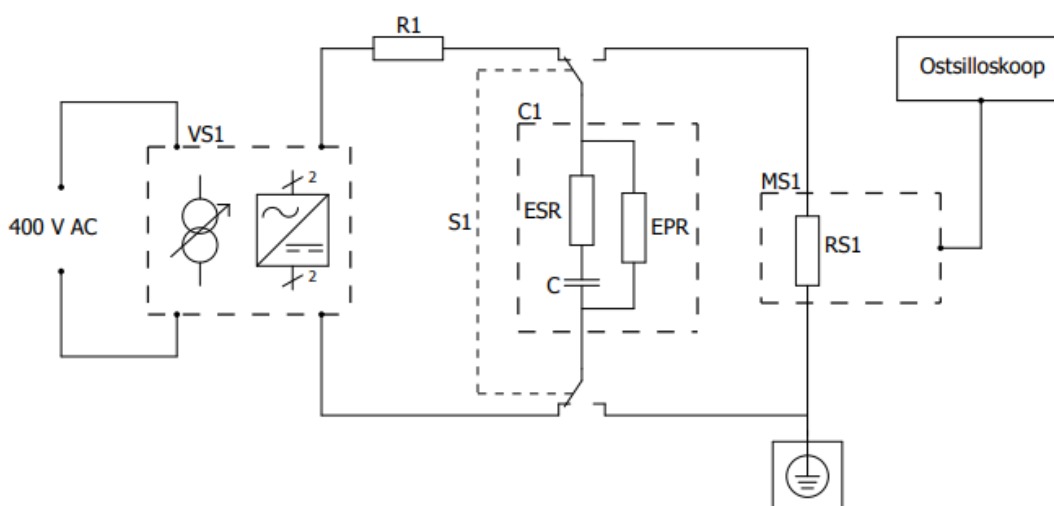
Tabel 2.3. Uuritavate kondensaatorite parameetrid [23]

Parameeter \ Tüüp	C44AHFP5100ZA0J	C44AJFP5100ZA0J	C44AMFP5100ZD0J	C44APGP5100ZE0J
$C, \mu\text{F}$	10	10	10	10
$U_n, \text{V AC}$	330	400	450	500
$U_n, \text{V DC}$	600	700	850	1200
$ESR, \text{m}\Omega$	5	3	5	3
I_{RMS}, A	16	18	25	25
I_{PEAK}, A	400	500	500	2500
Diameeter, mm	45	50	50	55
Kõrgus, mm	80	101	101	138
Töötemperatuur, °C	-40 ... +85	-40 ... +85	-40 ... +85	-40 ... +85

3. KONDENSAATORI RÖÖPTAKISTUSE MÄÄRAMINE

3.1 Mõõtesondi- ja isolatsioonitakistuste arvvärtuste määramine ajakonstandi abil

Antud mõõtmismetoodika põhineb IEC 60384-1 isolatsioonitakistuse mõõtmise põhimõtetel. [15] Mõõtesondi takistuse leidmiseks kasutatakse kaht mõõtesondi, millega mõõdetakse ühel ja samal kondensaatoril pinge muutust. Joonisel 3.1 on kujutatud antud mõõteskeemi, kus VS1 on muudetava pingega ning alaldiga toiteplokk, R1 takistus vähendamaks kondensaatori laadimisvoolu, S1 kahe kontaktiga ümberlülitit, et eraldada toiteahel ning mõõteahel täielikult. C1 kujutab uuritavat kondensaatorit ning MS1 (MS2) diferentsiaal mõõtesondi koos tema sisetakistusega RS1 (RS2), mis omakorda on ühendatud Picoscope tooteseeria 2000 ostsilloskoobiga.



Joonis 3.1. Rööptakistuse mõõteahela põhimõtteskeem ühe mõõtesondiga

Sellise katseskeemiga uuritakse kondensaatori klemmipinge väärtuse kujunemist. Teooria kohaselt on rööptakistuse tõttu täheldatav kondensaatori pinge kahanemine, tänu kadudele takistitel EPR ja RS1. Pinge mõõtmiseks:

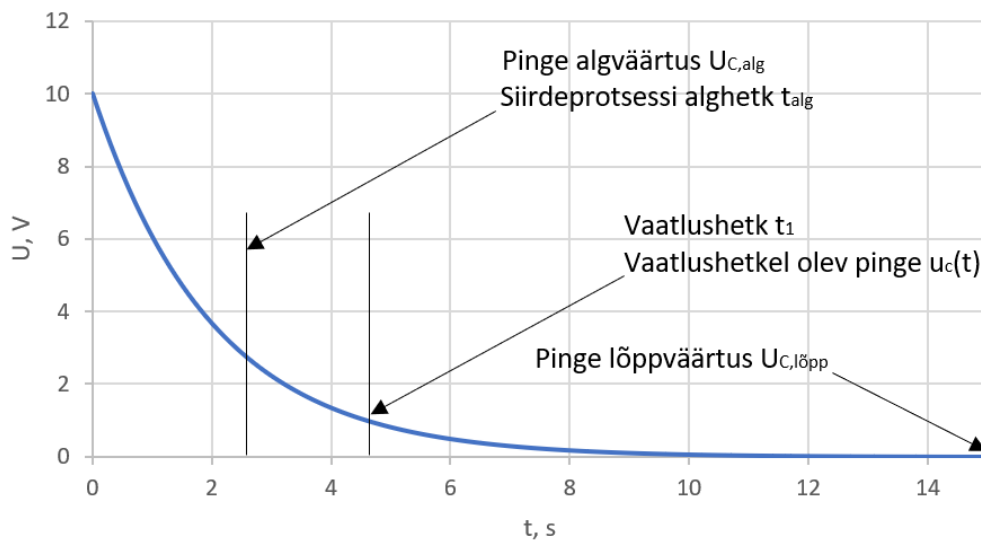
1. Lülitatakse lüliti asendisse, mille korral kondensaator on ühendatud toiteallikaga ja kondensaator C omandab toiteallika klemmipingega võrdse pinge.
2. Lülitatakse lüliti S1 asendisse, mille korral kondensaatori klemmipinge on mõõdetav mõõtesondiga MS1. Sellisel juhul on kondensaatori tühjenemine tingitud EPR ja RS1 rööpühendusest.

Mõõtetulemusteks on pingekõver, mis on eksponentsiaalselt kahanev. Antud pingekõveralt saab välja lugeda andmed, et leida ajakonstant, kasutades selleks valemit 3.1:

$$\tau = - \frac{t_1 - t_{alg}}{\ln\left(1 - \frac{U_C(t) - U_{C,alg}}{U_{C,lõpp} - U_{C,alg}}\right)} \quad (3.1)$$

- kus τ – ajakonstant, s,
 t_1 – vaadeldava perioodi lõpphetk, s,
 t_{alg} – vaadeldava perioodi alghetk, s,
 $U_C(t)$ – Pinge vaadeldava perioodi lõpphetkel, V,
 $U_{C,alg}$ – Pinge vaadeldava perioodi alghetkel, V,
 $U_{C,lõpp}$ – Pinge siirdeprotsessi lõpus, V. [24]

Valemis 3.1 toodud tundmatuid aitab paremini mõista joonis 3.2, kus on kõik vajalikud suurused välja toodud ajakonstandi leidmiseks.



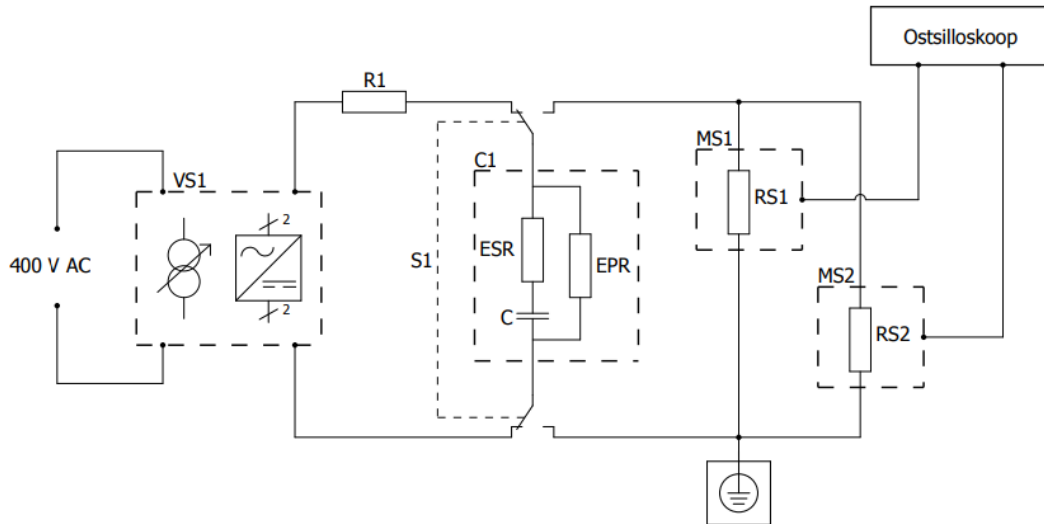
Joonis 3.2. Ajakonstandi määramiseks vajalike suuruste leidmine

Ajakonstandi kasutades saab leida summaarse ahela takistuse, kasutades valemit 3.2.

$$\tau = R \cdot C \Rightarrow R = \frac{\tau}{C} \quad (3.2)$$

Siin katses on summaarseks takistuseks $R = EPR \parallel R_{S1}$. [24] Kuna tegemist on kahe tundmatuga, siis tuleb sooritada täiendav katse, seekord R_{S1} määramiseks. Selleks viiakse läbi kahe mõõtesondiga katse.

Kahe mõõtesondiga katse sooritatakse analoogse skeemiga kui ühe sondiga katse. Täiendavalt ühendatakse sondiga MS1 rööbiti MS2, muus osas jääb mõõteahel samaks. Joonisel 3.3 on kujutatud kahe rööbiti oleva mõõtesondiga mõõteahelat.



Joonis 3.3. Rööptakistuse mõõteahela põhimõtteskeem kahe mõõtesondiga

Selle tulemuse põhjal määratakse uuesti pinge kahanemise ajakonstant, kuid siin on nüüd takistust määravaks rööpühendus $R = EPR \parallel R_{S1} \parallel R_{S2}$.

Saadud takistuste väärtused saab asendada võrrandisüsteemi 3.3 järgnevalt:

- mõõtes ühe sondiga MS1 on tulemuseks $a = \frac{\tau_1}{C}$,
- mõõtes ühe sondiga MS2 on tulemuseks $b = \frac{\tau_2}{C}$ ning
- mõõtes kahe sondiga MS1 ja MS2 rööbiti ahelas $d = \frac{\tau_3}{C}$.

Selle alusel saame koostada võrrandisüsteemi.

$$\begin{cases} \frac{R_{S1} \cdot EPR}{R_{S1} + EPR} = a \\ \frac{R_{S2} \cdot EPR}{R_{S2} + EPR} = b \\ \frac{R_{S1} \cdot R_{S2} \cdot EPR}{R_{S1} + R_{S2}} = d \end{cases} \quad (3.3)$$

Antud võrrandisüsteemi lahendamiseks kasutati Mathcadi loodud lahendusvalemit ning programm väljastas nii esimese kui ka teise mõõtesondi sisetakistuse väärtused, lisaks ka kondensaatori isolatsioonitakistuse. Saadud tulemused on toodud tabelis 3.1.

Tabel 3.1. Mõõtmistulemused

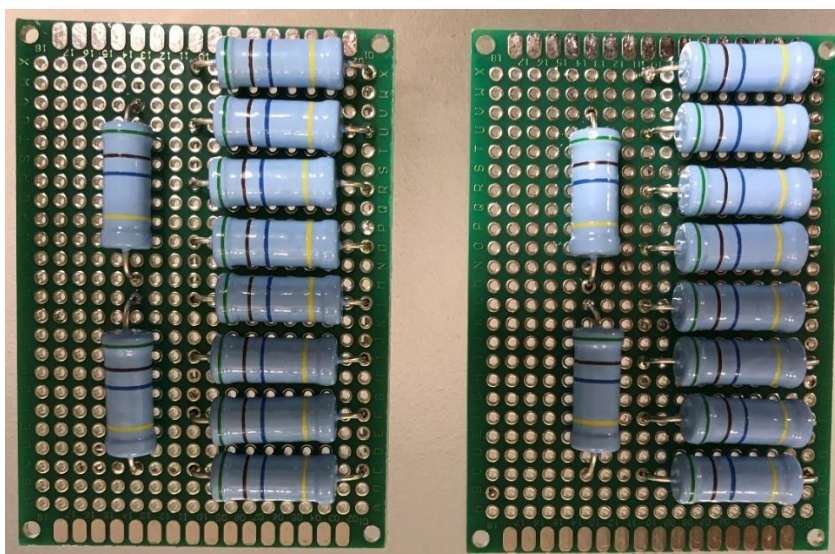
	a	b	d	R_{S1}	R_{S2}	EPR
$R, M\Omega$	103	108	52	101	107	Ei lahendu positiivse märgiga

Mõõtmistulemustest on näha, et mõõtesondide takistuste väärtused on õiges suurusjärgus, sest tootja on määratud takistuse väärtuseks 100 M Ω . Samas isolatsioonitakistuse arväärtus ei ole reaalne, sest takistuse väärtus antud juhul ei tohiks tulla negatiivne. Mittelahendumise põhjuseks võib olla asjaolu, et EPR väärtus on RS1 ja RS2 suhtes niivõrd suur, et kujutab mõõtmistäpsusega piiratud suurust, ning tulemus „d“ on seotud mõõtemääramatusega.

Seetõttu prooviti järgnevalt mõõteahela takistust suurendada, et viia RS1 ja RS2 rolli väikesemaks ning võimaldaks määrata täpsemini EPR suurt väärtust.

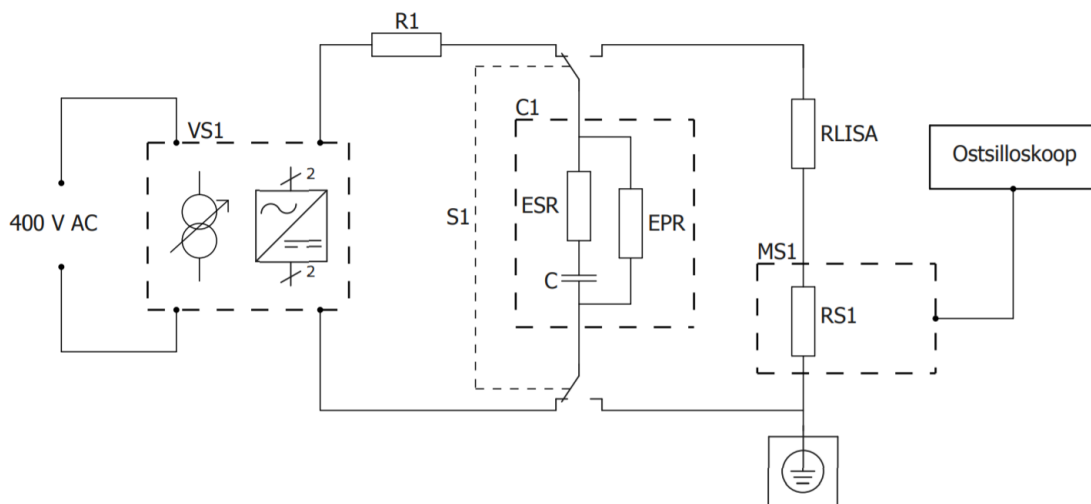
3.2 Mõõteahela skeem koos lisatakistitega

Esialgsete mõõtmistulemuste kohaselt tuli kondensaatori isolatsioonitakistus negatiivne. Üks põhjus, mis võis põhjustada ebausaldusväärsed mõõtmistulemused, on asjaolu, et kondensaatori ekvivalentne rööptakistus ning mõõtesondi sisetakistuse erinevus on suur. Selleks, et vähendada takistuste erinevust ning seeläbi suurendada mõõtetäpsust, oli valmistatud kaks suure takistusega lisatakistit. Mõlemad takistid koosnevad kümnest 51 M Ω nimitakistusega takistist. Joonisel 3.4 on kujutatud valmis tehtud takistiplokke.



Joonis 3.4. Lisatakistite plokid

Joonisel 3.5 on kujutatud mõõteahela skeemi koos lisatakistiga R_{LISA} .



Joonis 3.5. Mõõteahela põhimõtteskeem koos lisatakistiga

Enne mõõtmiste teostamist tuleb määrata lisatakistuste takistuse arväärtused. Selleks võtame arvesse varasemalt leitud mõõtesondide takistuse arväärtused ning asendame need võrrandisüsteemi 3.4. Muus osas on antud võrrandisüsteem analoogne võrrandisüsteemiga 3.3.

$$\begin{cases} \frac{(R_{S1} + R_{LISA1}) \cdot EPR}{R_{S1} + R_{LISA1} + EPR} = a \\ \frac{(R_{S2} + R_{LISA2}) \cdot EPR}{R_{S2} + R_{LISA2} + EPR} = b \\ \frac{R_{S1} \cdot R_{S2} \cdot EPR}{R_{S1} + R_{S2}} = d \end{cases} \quad (3.4)$$

Antud katsest saadud mõõtmistulemused on toodud tabelis 3.2.

Tabel 3.2. Mõõtmistulemused

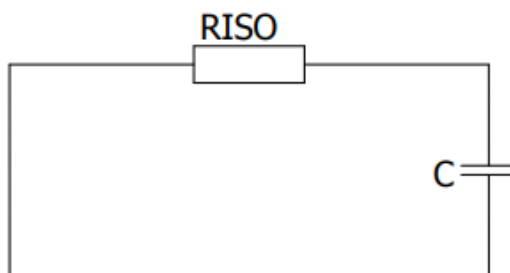
	a	b	d	R_{LISA1}	R_{LISA2}	EPR
$R, M\Omega$	632	625	53	409	398	Ei lahendu positiivse märgiga

Antud mõõtmistulemuste puhul on ebausaldusväärsed nii lisatakistuse kui ka isolatsioonitakistuse arväärtused. Võttes arvesse, et jadamisi on pandud lisatakistil kümme 51 M Ω takistit, oleks pidanud mõõtmistulemus olema, võttes arvesse tootjapoolset tolerantsi $\pm 10 \%$, 510 \pm 51 M Ω . Samuti on isolatsioonitakistuse arväärtus samuti negatiivne nagu eelneval mõõtmisel, samuti on kahe mõõtmistulemuse vahe neljakordne. Teostati kordusmõõtmised samu parameetreid ning kondensaatoreid kasutades, samuti muutes ostsilloskoobi mõõtmisparameetreid, samuti eri tüüpi ning pingega kondensaatoreid, kuid usaldusväärseid tulemusi selle meetodiga ei saavutatud.

3.3 Mõõtesondi- ja isolatsioonitakistuste arvväertuste määramine

RC-jadaahelas

Meetod, kuidas isolatsioonitakistuse mõõtmist teostada ilma ajakonstanti kasutamata, seisneb selles, et siirdeprotsessi alguses ja lõpus oli pinge muut pigem lineaarne kui selgelt eksponentsiaalne. Sellest tulenevalt võib pinge muutu lähendada lineaarseks ning seeläbi leida isolatsioonitakistuse väärtust. Joonisel 3.6 on kujutatud RC-jadaahela põhimõtteskeem.



Joonis 3.6. RC-jadaahel

Kondensaatori laengu muut avaldub valemis 3.5.

$$\Delta Q_C = C \cdot (U_{C0} - U_{C1}) \quad (3.5)$$

kus U_{C0} – Pinge vaadeldava perioodi alghetkel, V,
 U_{C1} – Pinge vaadeldava perioodi lõpphetkel, V.

Kondensaatori vool ning seeläbi kondensaatori isolatsiooni vool on leitav valemiga 3.6.

$$I_C = \frac{dQ_C}{dt} \Rightarrow I_I = \frac{\Delta Q_C}{\Delta t} \quad (3.6)$$

Kui pinge muutuse ulatus on väike (mõni %), siis saab isolatsioonitakistuse leida keskmise pinge kaudu, valemiga 3.7.

$$R_I = \frac{\bar{U}}{I_I} \quad (3.7)$$

Keskmine pinge on toodud valemis 3.8.

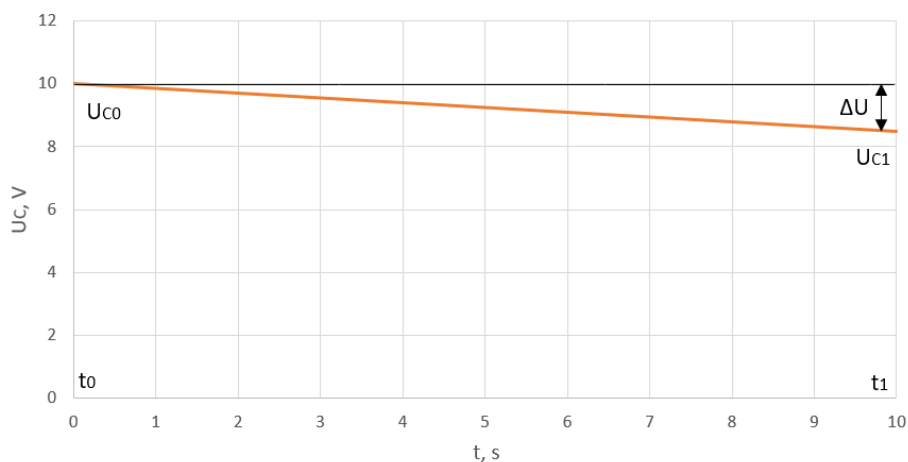
$$\bar{U} = \frac{U_{C0} + U_{C1}}{2} \quad (3.8)$$

Asendades valemisse 3.7 keskmise pinge valemi 3.8 ning kondensaatori voolu avaldise 3.6, kus laeng on omakorda asendatud avaldisega 3.5, avaldub isolatsioonitakistuse arvutusvalem valemis 3.9.

$$R_I = \frac{(U_{C0} + U_{C1}) \cdot |t_0 - t_1|}{2 \cdot C \cdot (U_{C0} - U_{C1})} \quad (3.9)$$

Kus t_0 – vaadeldava perioodi algthetk, s,
 t_1 – vaadeldava perioodi lõppthetk, s. [25]

Valemis 3.9 toodud suurusi aitab paremini mõista joonis 3.7.



Joonis 3.7. Pinge lineaarne muutus

Arvutusvalemite 3.4 ning 3.9 kasutades saab leida mõõtesondide ning kondensaatori isolatsioonitakistuse. Tabelis 3.3 on toodud isolatsioonitakistuse ning mõõtesondide takistuste arväärtused, leituna läbi RC-jadaahela arvutusvalemite.

Tabel 3.3. Mõõtmistulemused

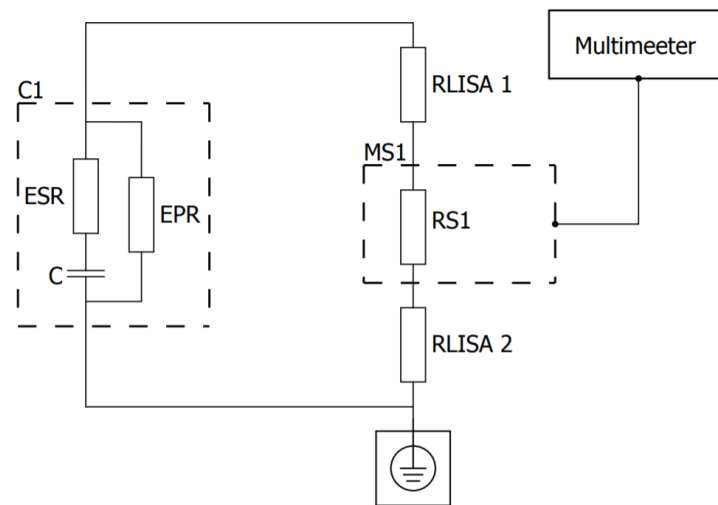
	a	b	d	R _{s1}	R _{s2}	EPR
R, MΩ	98	99	49	97	98	Ei lahendu positiivse märgiga

Tabelist 3.3 on näha, et analoogselt varasematele mõõtmistele, on ka sel juhul mõõtesondide takistused 100 MΩ lähedal, mis on tootjapoolne väärtus. Isolatsioonitakistus seevastu on negatiivse väärtusega ning kahe varasema mõõtmistulemuse vahel. Mõõtmistulemuste analüüsil saadud isolatsioonitakistuse arväärtus on ka antud meetoil mitteisaldusväärne ning sellest lähtuvalt antud meetodil kondensaatori isolatsioonitakistust määrata.

3.4 Kondensaatorite pinge kahanemise mõõtmine

Kuna varasem katse ei andnud usaldusväärseid tulemusi, teostati järgnev katse, et hinnata kondensaatorite isolatsioonitakistust klemmipinge kahanemisega ajas, läbi pideva mõõtevahendi

kasutamisetä. Selleks vaadeldi pikemate perioodide vältel, kui palju on kondensaatori pinge vähenenud. Joonisel 3.8 on kujutatud mõõteahela skeemi.



Joonis 3.8. Mõõteahela põhimõtteskeem

Joonisel 3.9 on kujutatud katse läbiviimist.



Joonis 3.9. Pingelangu mõõtmine

Tabelis 3.4 on toodud eri kondensaatorite pinged aja möödudes. Kõik kondensaatorid said algselt laetud pingeni 100 V. Mõõtevahend (multimeeter) ühendati kondensaatoriga ainult ajaks, mis oli minimaalselt vajalik pinge määramiseks.

Tabel 3.4. Mõõtmistulemused

Kondensaator	t, h														
	0	1	2	3	4	5	19	20	21	22	23	24	25	86	276
	U, V														
C1.1	98,8	98,7	98,6	98,6	98,5	98,4	98,3	98,3	98,2	98,1	98,1	98	98	97,9	97,8
C1.2	98,4	98,3	98,1	98,1	98,1	98	97,9	97,9	97,9	97,8	97,8	97,7	97,6	97,6	97,5
C2.1	98,9	98,7	98,6	98,6	98,5	98,5	98,4	98,4	98,4	98,3	98,3	98,2	98,2	98,1	98
C2.2	98,5	98,4	98,4	98,3	98,2	98,2	98,1	98,1	98,1	98	98	97,9	97,9	97,8	97,7
C3.1	98,8	98,6	98,5	98,5	98,5	98,3	98,3	98,2	98,2	98,1	98,1	98	98	97,9	97,8
C3.2	98,5	98,5	98,4	98,4	98,4	98,3	98,2	98,1	98,1	98	98	98	98	97,9	97,8
C4.1	98,3	98,2	98,1	98,1	98,1	98	97,9	97,9	97,8	97,8	97,8	97,8	97,7	97,5	97,5
C4.2	98,4	98,3	98,3	98,3	98,2	98,1	98	98	98	98	98	97,8	97,8	97,6	97,5

Eelnevalt välja toodud tabelist on näha, et sõltumata asjaolust, kas mõõtmisi tehti iga tunni või jäi kahe mõõtmise vahele 14, 61 või isegi 190 tundi, pinge kahanemine jäi samasse suurusjärku. Sellest võib järeldada, et pinge ei vähenenud isolatsioonilekke tõttu, vaid mõõtesondil endal. Sellest võib omakorda järeldada, et kondensaatori isolatsioonitakistus, mis on leitav vastavalt valemile 3.9, on märkimisväärselt suurem kui on mõõteahela takistus, milleks on 1100 MΩ. Sellest lähtuvalt ei leitud sobivat, mõistliku täpsusega meetodikat, millega määrata kondensaatori isolatsioonitakistust olemasolevate seadmetega.

Sellise isolatsioonitakistuse korral saab järeldada, et kadu läbi isolatsioonitakistuse on väga väike ning pigem suurusjärke väikesema intensiivsusega kui muude kaomehhanismide puhul. Seepärast edaspidi kondensaatori isolatsioonitakistust EPR siin töös kaomehhanismide juures ei arvestata.

4. KONDENSAATORI JADATAKISTUSE MÕÕTMINE

4.1 Kondensaatori jadatakistuse mõõtmine LCR-meetriga

Alustavalt mõõdeti kondensaatori jadatakistust ning mahtuvust Agilent U1733C LCR-meetriga.

Joonisel 4.1 on kujutatud mõõteseadet.



Joonis 4.1. LCR-meeter [26]

Tabelis 4.1 on toodud mõõtmistulemused, kasutades LCR-meetrit.

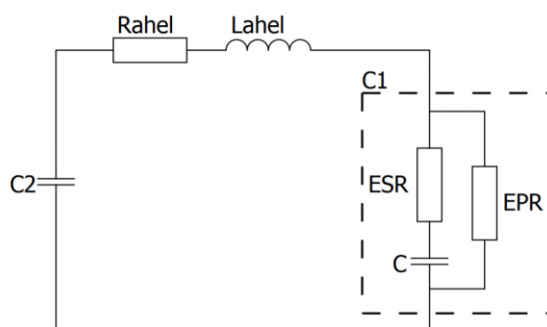
Tabel 4.1. Mõõtmistulemused LCR-meetriga

Kondensaator	U_n, V	$ESR, m\Omega$	$C, \mu F$
C1.1	330	26,1	10,071
C1.2	330	30,2	9,977
C1.3	330	30,7	10,002
C2.1	400	26,4	9,814
C2.2	400	40,2	9,888
C2.3	400	33,7	9,906
C3.1	450	36,4	9,880
C3.2	450	37,2	9,826
C4.1	500	31,2	9,815
C4.2	500	34,7	9,791

Tulemustest on näha, et ESR väärtused on vähemalt 5 korda suuremad kui on toodud kondensaatori andmelehel. Seepärast sooritati täiendavad jadatakistuse mõõtmised, millega määrata täpsemalt ESR väärtused. Mahtuvuse C mõõdetud väärtused on aluseks edasisteks arvutusteks.

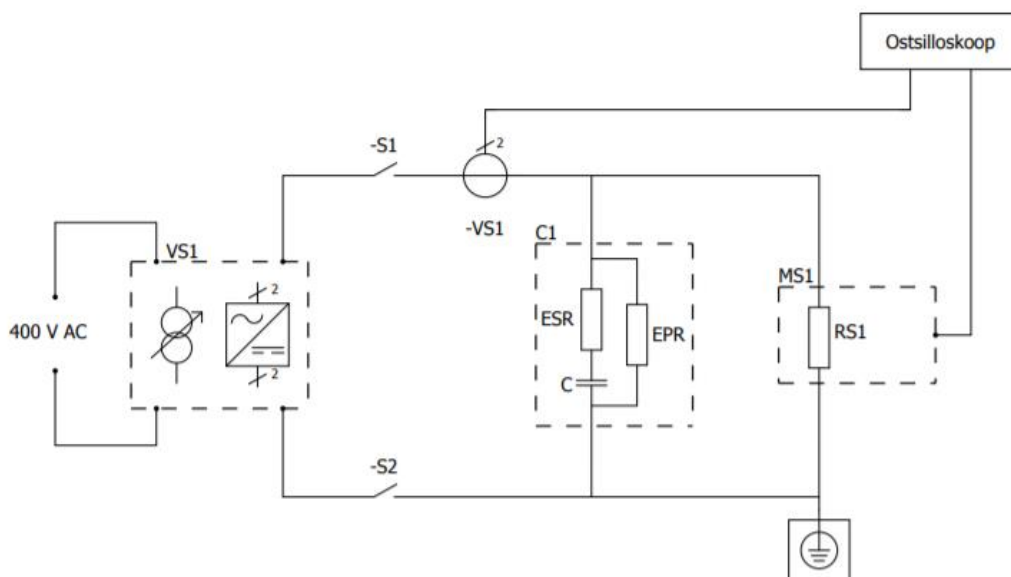
4.2 Kondensaatori jadatakistuse täpsem määramine

Antud jadatakistuse mõõtmine põhineb RLC-jadaahelal ning selle omadustel. Antud ahela siirdeprotsessil avalduvad mõjutajatena kõik kolm parameetrit: ESR, L kui ka C. Sellest lähtuvalt on võimalik nende parameetrite määramine. Joonisel 4.2 on kujutatud mõõtmiste jaoks koostatud RLC-jadaahela põhimõtteskeem.



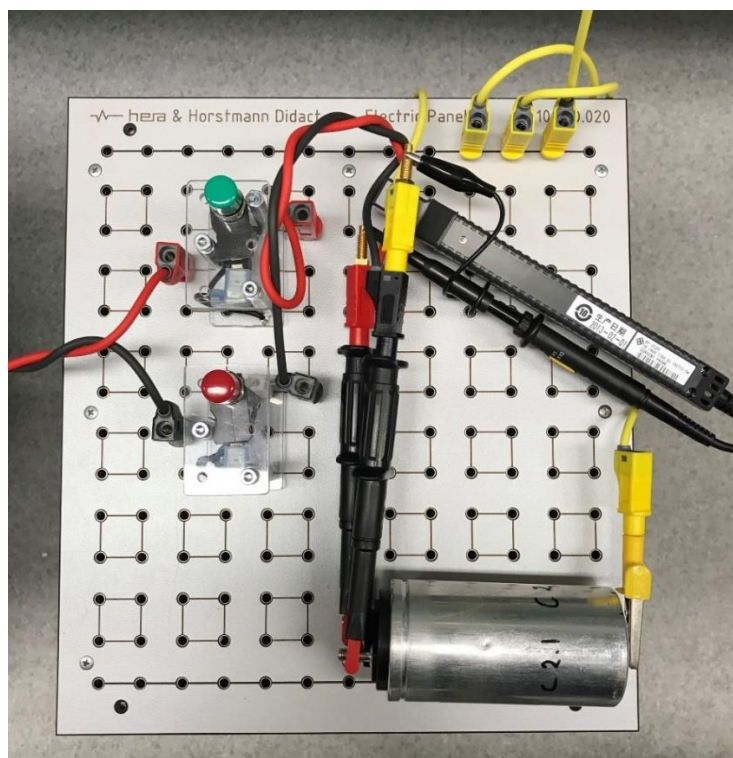
Joonis 4.2. Koostatud RLC-jadaahel

Ahelas laetakse kondensaator toiteplokkis VS1 võrgutoitelt täis ning seejärel lahutatakse seade võrgust. Seejärel on kaks surunupplülitit S1 ja S2, millega on laadimise ajal eraldatud laetav kondensaator ja mõõteahel. Mõõtmiseks kasutatakse volusondi VS1 mõõteulatusega 30 A ning diferentsiaal mõõtesondi MS1. Joonisel 4.3 on kujutatud mõõteahela põhimõtteskeemi.



Joonis 4.3. Jadatakistuse mõõteskeem

Joonisel 4.4 on kujutatud mõõtmiste jaoks maketeerimisplaadil tehtud mõõtestendi.



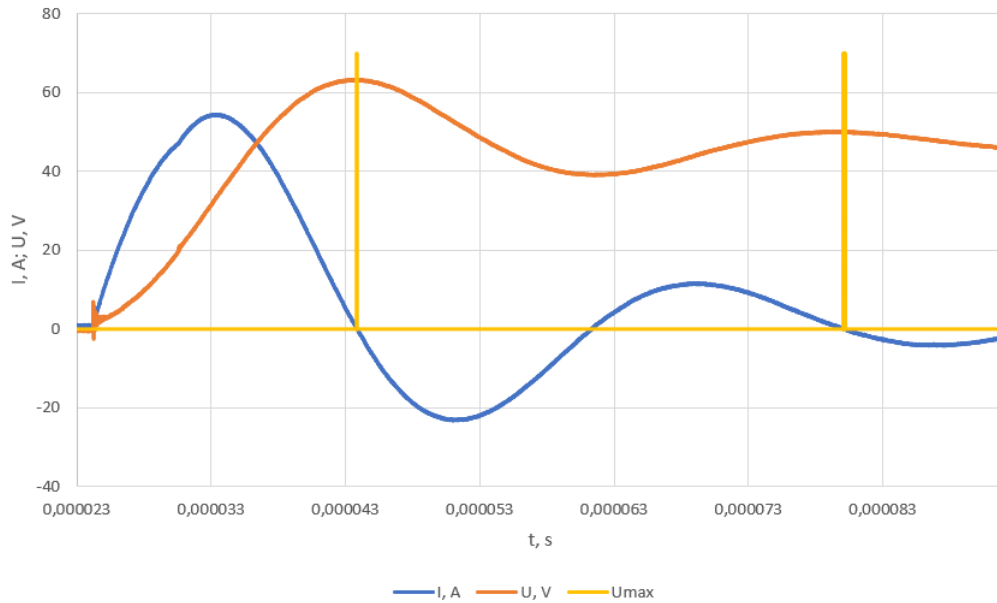
Joonis 4.4. Jadatakistuse mõõtestend

Joonisel 4.3 toodud skeemis olevate lülitite S1 ja S2 sulgemisel algab kondensaatoriga C1 seotud siirdeprotsess, mis on alguses järsu frondiga ning läheb seejärel üle väikese sumbumusega võnkumiseks. Tegemist on teist järku ahela siirdeprotsessiga, mille korral pinge kuju on avaldatav valemis 4.1 toodud kujul.

$$u_C(t) = U_{C,alg} + (U_{C,lõpp} - U_{C,alg}) \cdot \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\omega_0 t} \cdot \sin(\omega_d t + \varphi_0) \right] \quad (4.1)$$

- kus $U_{C,alg}$ – algpinge vaadeldavas amplituudväärtuses, V,
 $U_{C,lõpp}$ – lõpp-pinge vaadeldavas amplituudväärtuses, V,
 ξ – sumbuvustegur,
 ω_0 – omavõnke-nurksagedus, $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$,
 ω_d – nurksagedus, $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$,
 φ_0 – algfaasi väärtus, rad. [27]

Joonisel 4.5 on kujutatud pinge ning voolu võnkumist kondensaatori laadumisel, lisaks on välja toodud pinge maksimumväärtused igal perioodil.



Joonis 4.5. Pinge ning voolu võnkeprotsess kondensaatori laadumisel

Antud kõveratelt on võimalik määrata pinge alg- ja lõppväärtus, võnkeperiood ning võnkumise sumbumistegur. Tegemist on eksponentsiaalselt sumbuva protsessiga, sumbuva protsessi nurksagedus leitakse valemiga 4.2.

$$\omega_d = \omega_0 \cdot \sqrt{1 - \xi^2} \quad (4.2)$$

Teist järku RLC-jadaahelas määratakse omavõnke-nurksagedus valemiga 4.3.

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \quad (4.3)$$

Võnkeprotsessi võnkumise sumbumist saab kirjeldada võngete tipuväärtuste muutuse kaudu. Teist järku protsessi sumbuvat võnkumist iseloomustav kõver on eksponentfunktsiooni kujuline. Seda kõverat kirjeldab protsessi võrrandist osa, mis on toodud valemis 4.4.

$$u_M'(t) = \frac{1}{\sqrt{1 - \xi^2}} e^{-\xi \omega_0 t} \quad (4.4)$$

kus $u_M'(t)$ - ajast sõltuv suhteline võnkumise amplituud.

Suhtelise võnkumise amplituudi $u_M'(t)$ väärtus jääb vahemikku 0 kuni 100%. Sellise võnkumise suuruste uurimisel saab määrata parameetrid ξ ning ω_0 . [27, 28]

Määrates kaks tippu ning nende vahelise aja, seejuures eeldades eksponentsiaalset sumbumise tunnuskõverat, saame võtta eelduseks, et kõvera ajakonstant ei sõltu vaatlusaja algusest. Kui $U_{C,alg}$ kajastab protsessi vaatlusaja alghetkel olevat võnkeamplituudi, ning $U_{C,lõpp}$ võnke amplituudi ajavahemiku lõpus, siis nende võnkumiste vaheline aeg on samuti summutatud võnkumise perioodiks. Seetõttu avaldub valemis 4.5 nurksagedus läbi võnkeperioodi.

$$\omega_d = 2\pi f = \frac{2\pi}{\Delta t} \quad (4.5)$$

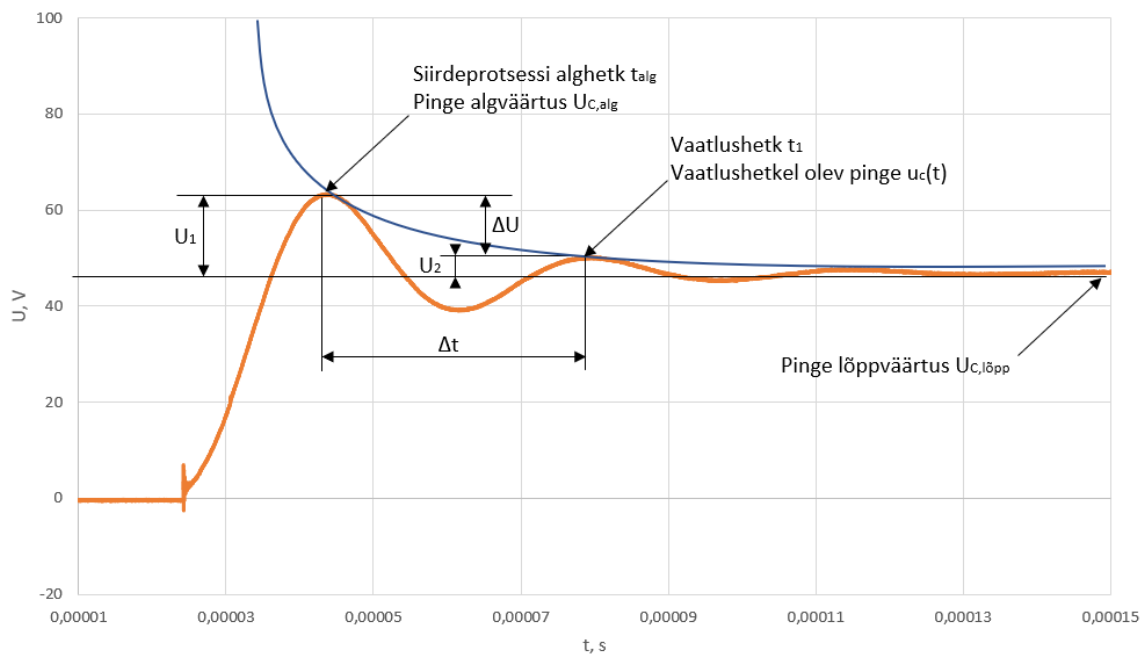
kus Δt - võnkeperiood.

Kui vaadelda sumbuvat protsessi läbi ajakonstandiga esituse, siis avaldub valemis 4.6 ajakonstant läbi $u_M'(t)$.

$$u_M'(t) = \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\omega_0 t} \equiv K \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \Rightarrow \tau = \frac{1}{\xi \cdot \omega_0} \Rightarrow \omega_0 = \frac{1}{\xi \cdot \tau} \quad (4.6)$$

kus K - ajast sõltumatu konstantne väärtus.

Valemit 3.1 kasutades saab leida sumbumise ajakonstandi τ teguri arväärtuse. [27, 28] Joonisel 4.6 on kujutatud siirdeprotsessi ning ajakonstandi määramiseks vajalike suuruste määramine.



Joonis 4.6. Ajakonstandi määramiseks vajalike parameetrite määramine

Teades τ arväärtust, saab valemite 4.2, 4.5 ning 4.6 abil võrrandisüsteemis 4.7 leida ξ ning ω_0 väärtused.

$$\begin{cases} \omega_d = \frac{2\pi}{\Delta t} = \omega_0 \cdot \sqrt{1-\xi^2} \\ \tau = \frac{1}{\xi \cdot \omega_0} \end{cases} \quad (4.7)$$

Järgnevalt avaldub sumbujustegur valemis 4.8.

$$\xi = \alpha \cdot \omega_0 \quad (4.8)$$

kus α – karakterne sumbumus.

Karakterne sumbumus on leitav valemi 4.9 abil.

$$\alpha = \frac{R}{2 \cdot L} \quad [27] \quad (4.9)$$

Valemite 4.3, 4.8 ning 4.9 põhjal saab koostada võrrandisüsteemi.

$$\begin{cases} \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \\ \xi = \frac{R}{2 \cdot L \cdot \omega_0} \end{cases} \quad (4.10)$$

Võrrandisüsteemi 4.10 esimesest võrrandist saab avaldada L, lahenduskäik on toodud võrrandis 4.11.

$$\sqrt{L \cdot C} = \frac{1}{\omega_0} \Rightarrow L \cdot C = \frac{1}{\omega_0^2} \Rightarrow L = \frac{1}{\omega_0^2 \cdot C} \quad (4.11)$$

Võrrandisüsteemi teisse võrrandisse avaldades R ning asendades L valemis 4.11 saadud avaldisega, on tulemuseks arvutusvalem 4.12, mida saab kasutada jadatakistuse leidmiseks. [27, 28]

$$R = 2 \cdot \xi \cdot L \cdot \omega_0 \Rightarrow R = \frac{2 \cdot \xi}{\omega_0 \cdot C} \quad (4.12)$$

Järgnevalt sai koostatud Excelis ning Mathcadis arvutusvalemid vajalike suuruste leidmiseks. Esmalt ekstreemumpunktide leidmiseks, mille abil on võimalik määrata ajahetked t_{alg} ja t_1 , samuti Δt . koos ajahetkedega on võimalik leida ka U_1 , U_2 ning ΔU . Järgnevalt saab Mathcadi kasutades leida sumbumusteguri väärtuse. Saadud tulemust kasutades ning peatükis 4.1 mõõdetud C väärtust kasutades on võimalik leida jadatakistuse väärtus.

Järgnevalt teostati mõõtmisi 400 V nimipingega kondensaatoritega. Tabelis 4.2 on toodud välja kolme kondensaatori mõõtmistulemused kolme katse korral. Lisaks on välja toodud kolme mõõtmise keskmine ning suurima ning väiksema tulemuse erinevus protsentides.

Tabel 4.2. Jadatakistuse mõõtmistulemused 400 V kondensaatoritel

Katse nr	R, mΩ			Keskmine	Erinevus, %
	1	2	3		
C21	265,1	280,4	276,8	274,1	5,79
C22	279,4	286,6	284,0	283,3	2,59
C23	277,6	282,4	277,8	279,3	1,73

Tabelist 4.2 on näha, et mõõtmistulemused jäävad kolme katse kõigus samasse suurusjärku. Kõige suurem erinevus on kondensaatori C21 mõõtmisel, mille puhul on erinevus 5,79 protsenti. Väikseim erinevus on kondensaatori C23 mõõtmisel, mille puhul jäi erinevus alla kahe protsenti.

Järgnevalt on tabelis 4.3 toodud välja kahe mõõtmistulemuse ning kondensaatori andmelehel toodud jadatakistuse arväärtused.

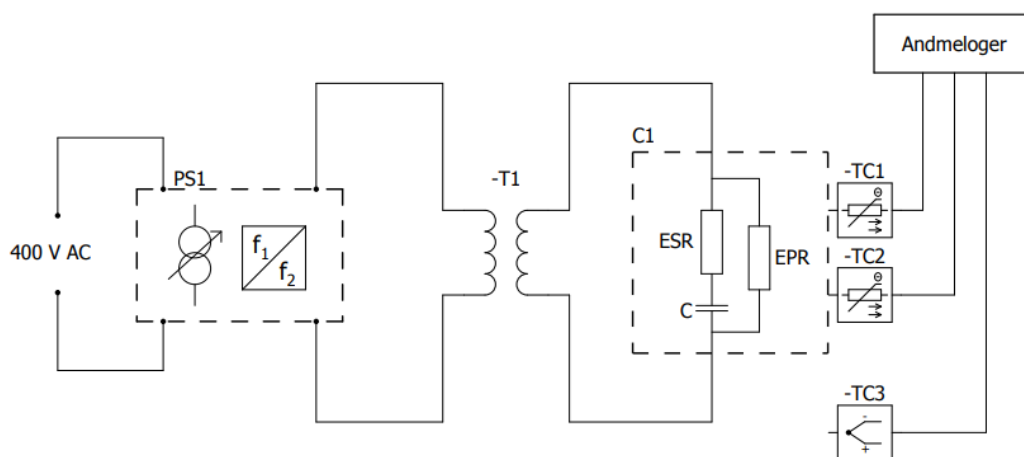
Tabel 4.3. Jadatakistuse arvvaartused

	R, mΩ
Tootjapoolne suurus	3
LCR-meeter	9,9
Täpsem mõõtmine	278,9

Tabelist on näha, et takistuse väärtused erinevad suuresti. Siin tuleb tuua välja asjaolu, et leitud R kajastab nii kondensaatori jadatakistuse kui ka mõõteahela takistust. On selge, et kondensaatori oodatav jadatakistus on väga väikese väärtusega, võrreldes mõõteahela kogutakistusega. Siiski, mõõteahela täiendamisega ja proovimisega, sarnaselt EPR leidmise protseduurile, oleks ESRi väärtus määratav. Vaadeldes samas mõõtetulemuste erinevust, ulatub mõõte-episoodide takistuste erinevus oluliselt üle oodatava ESR väärtuse (oodatav 3 mΩ, hälve üle 15 mΩ). Seega antud mõõtemetod ei garanteeri niivõrd väikest mõõtetulemuse hälvet, et oleks võimalik määrata usaldusväärselt väikese kondensaatori jadatakistuse väärtust.

5. KONDENSAATORITE KADUDEST TINGITUD KUUMENEMISE MÕÕTMINE

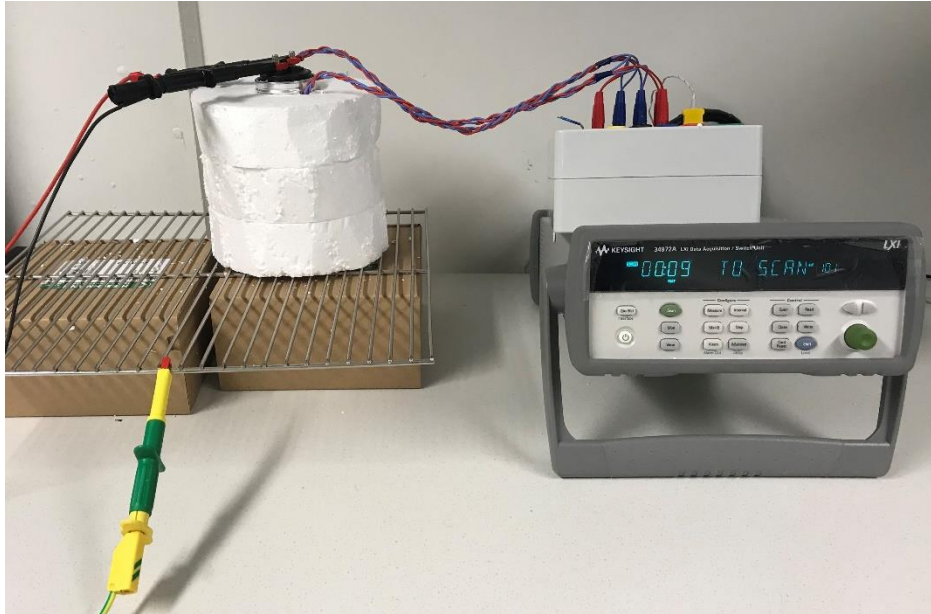
Joonisel 5.1 on kujutatud temperatuuri mõõtmiseks koostatud katseskeemi.



Joonis 5.1. Temperatuuri mõõtmise katseskeem

Toiteallikas PS1 on Chroma programmeeritav vahelduvvoolu toiteplokk 61505, millel saab muuta sageduse ning pingeparametreid ning seeläbi genereerida erinevaid pingekujusid. Kuna toiteploki kõrgeim väljundpinge on 300 V, siis kasutatakse pingetõstmiseks 230/400 V pingetrafit, nimivõimsusega 1000 VA. TC1 ning TC2 on Pt1000-tüüpi täppisandurid kondensaatori temperatuuri mõõtmiseks ning TC3 on Pt100 täppisandur ümbritseva keskkonna (õhu) temperatuuri mõõtmiseks. Temperatuuriandurid on ühendatud Keysighti andmeloogeriga 34972A.

Katse ülesse seadmisel ning esimeste katsete järel selgus, et kondensaatori kaod on sedavõrd väikesed, et kondensaatorile rakendatav nimipinge tasemel toitepinge ei too kaasa suurt väliskesta temperatuuri tõusu. Selleks, et vähendada ümbritseva keskkonna jahutustoimet ning vähendada soojuse hajumist, tehti kondensaatorite ümber polüstüreenist (penoplastist) rõngad. Isolatsioon oli rõngakujuline, et soojusisolatsioon oleks ühtlane ümber kondensaatori. Joonisel 5.2 on kujutatud mõõteseadet koos katseobjektiga.



Joonis 5.2. Temperatuuri mõõtmine

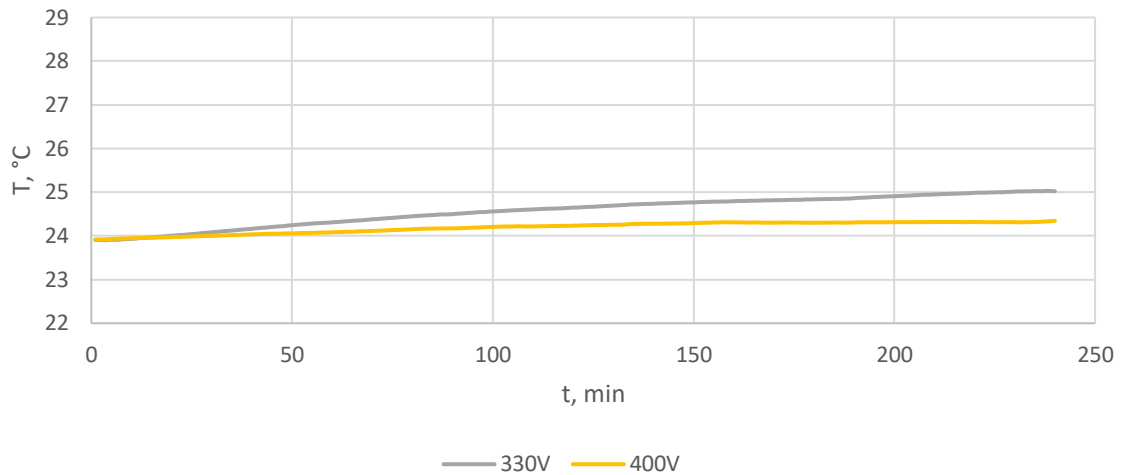
5.1 Kondensaatorite soojenemine 50 Hz ja 150 Hz juures siinuspingel

Tabelis 5.1 on toodud välja mõõtmistulemused 330 V ja 400 V nimipingega kondensaatoritel 50 Hz juures siinuselise pingekujuga. Mõõtmistel oli kondensaatori klemmipinge 400 V mõlema kondensaatori puhul.

Tabel 5.1. Mõõtmistulemused sagedusel 50 Hz

	U, V	
	330 V	400 V
t, min	$T, ^\circ\text{C}$	
0	23,9	23,9
30	24,1	24,0
60	24,3	24,1
90	24,5	24,2
120	24,6	24,2
150	24,8	24,3
180	24,8	24,3
210	24,9	24,3
240	25,0	24,3
$\Delta T, ^\circ\text{C}$	1,1	0,4

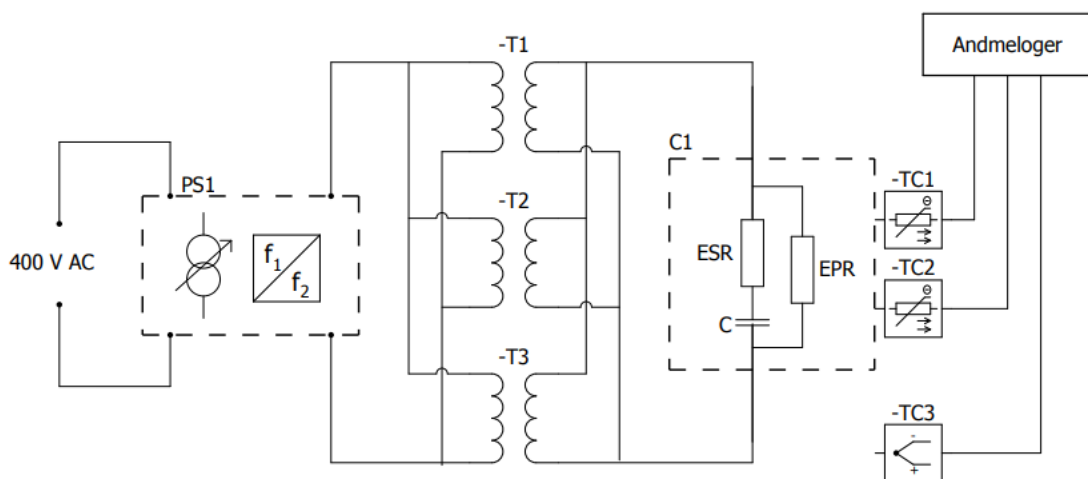
Joonisel 5.3 on kujutatud temperatuuri muutust 50 Hz juures 330 V ja 400 V nimipingega kondensaatoritel.



Joonis 5.3. Temperatuuri muut 50 Hz juures

Jooniselt 5.3 on näha, et temperatuur püsis suuresti samal tasemel 50 Hz juures 400 V nimipingega kondensaatoril. 330 V kondensaatori puhul on näha mõningast temperatuuritõusu, kuid antud muutus jääb 1 °C juurde. Peamiseks temperatuuritõusu põhjuseks võib siin pidada nimipingest 1,2 korda kõrgemat pinget (mõõtmised tehti 400 V pingel). Selleks, et näha suuremat muutust temperatuuris, viidi järgmised katsed läbi 150 Hz juures.

Katsete kõigus selgus, et kõrgemate sageduste rakendamisel elektrialelale suurenes trafo vool sedavõrd, et ületas trafo nimivoolu. Selleks, et vähendada voolu pingetrafos, ühendati kolm trafot omavahel rööbiti. Joonisel 5.4 on kujutatud täiendatud mõõteskeemi.



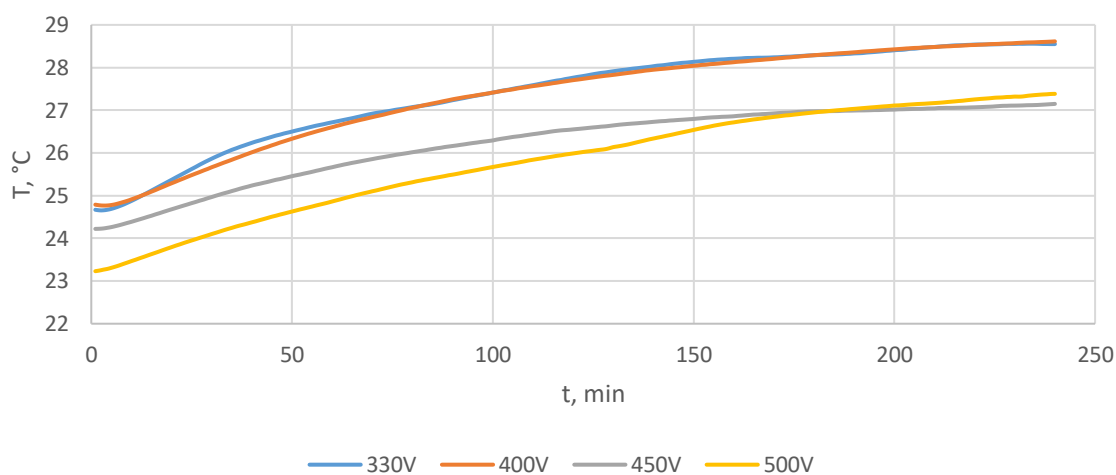
Joonis 5.4. Täiendatud mõõteskeem

Sagedusel 150 Hz tehtud mõõtmiste tulemused on toodud tabelis 5.2.

Tabel 5.2. Mõõtmistulemused 150 Hz siinuspingel 400V, erinevate nimipingetega kondensaatoritel

<i>t</i> , min	<i>U</i> , V			
	330 V	400 V	450 V	500 V
0	24,7	24,8	24,2	23,2
30	25,9	25,7	25,0	24,1
60	26,7	26,6	25,7	24,9
90	27,2	27,3	26,2	25,5
120	27,8	27,7	26,5	26,0
150	28,1	28,0	26,8	26,5
180	28,3	28,3	27,0	27,0
210	28,5	28,5	27,0	27,2
240	28,5	28,6	27,1	27,4
ΔT , °C	3,8	3,8	2,9	4,2

Joonisel 5.5 on kujutatud soojenemiskõverad sagedusel 150 Hz.



Joonis 5.5. Mõõtmistulemused 150 Hz juures

Tabelis 5.3 on toodud eri pingega kondensaatorite mõõtmistulemused.

Tabel 5.3. Mõõtmistulemused ning kondensaatorite kuumenemine

<i>U</i> , V	<i>D</i> , mm	<i>h</i> , mm	<i>A</i> , m ²	<i>T</i> ₀ , °C	<i>T</i> _k , °C	ΔT , °C
330	45	80	0,014	21,9	28,5	6,6
400	50	101	0,020	23,3	28,6	5,3
450	50	101	0,020	22,6	27,1	4,5
500	55	138	0,029	23,3	27,4	4,1

Tabelis 5.3 toodud tulemused näitavad soojuseraldust kondensaatori pinnalt, kuid ei arvesta asjaoluga, et tegelikkuses on kondensaatorid mõõtmiste ajal kaetud polüstüreenist rõngastega. Valemis 5.1 on toodud arvutusvalem soojuseralduse leidmiseks isolatsiooni pinnalt. [20]

$$Q = S \cdot k \cdot (T_k - T_0) \quad (5.1)$$

kus S – kujutegur, m,

k – isolatsiooni soojusülekandevõime, $\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$,

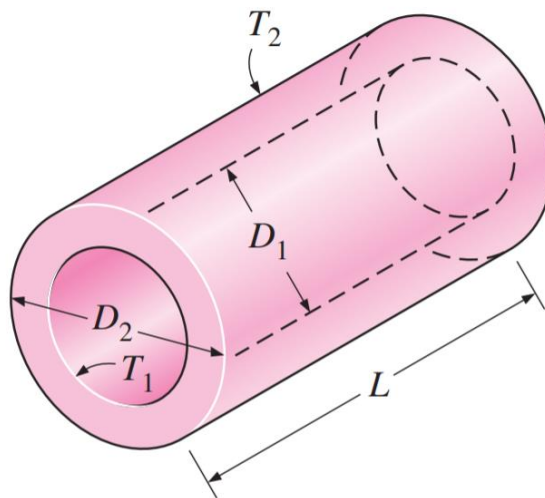
T_k – kondensaatori kesta kõrgeim temperatuur, $^\circ C$,

T_0 – ümbritseva keskkonna temperatuur, $^\circ C$.

Antud juhul on tegemist silindrilise keha, seega avaldub kujutegur S valemis 5.2 toodud kujul.

$$S = \frac{2 \cdot \pi \cdot L}{\ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right)} \quad (5.2)$$

Joonisel 5.6 on toodud kujuteguri määramiseks vajaminevate suuruste määramine mõõdetaval objektil. Isolatsiooni soojusülekandevõime polüstüreenil on $0,043 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$. [20, 29]



Joonis 5.6. Keha kujuteguri määramine [20]

Teades S ja k väärtusi, on võimalik leida soojuseralduse isolatsiooni pinnalt. Samuti on võimalik eraldunud soojuste abil leida ka takistuse väärtus. Ruutvoolu arvutuseks kasutatakse valemit 5.3.

$$I^2 = (U_m \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_m \cdot C)^2 \quad (5.3)$$

Eeldades, et kogu eralduv võim muundub soojuseks, on võimalik leida kondensaatori jadatakistus kasutades valemit 5.4.

$$ESR = \frac{Q}{I^2} \quad (5.4)$$

Tabelis 5.4 on toodud kondensaatorite soojuseraldused ning jadatakistuste väärtused.

Tabel 5.4. Mõõtmistulemused ning jadatakistuse väärtused

<i>U, V</i>	<i>S, m</i>	<i>Q, W</i>	<i>ESR, mΩ</i>
330	0,430	0,123	8,66
400	0,578	0,133	9,37
450	0,578	0,112	7,87
500	0,837	0,148	10,39

Tabelis 5.5 on toodud võrdlus varasemate jadatakistuste mõõtmistulemustega 400 V kondensaatoriga.

Tabel 5.5. Jadatakistused 400 V kondensaatoril eri mõõtmismeetodite korral

	<i>R, mΩ</i>
Tootjapoolne suurus	3
LCR-meeter	9,9
Täpsem mõõtmine	278,9
Läbi soojusarvutuse	9,4

Tabelist on näha, et LCR-meetri tulemustele on ligilähedaselt võrdne jadatakistuse arvutamine läbi soojuseralduse.

6. KÕRGEMATE HARMOONILISTE SAGEDUSTE MÕJU

KONDENSAATORI SOOJENEMISELE

IEC poolt välja antud tehnilise aruande IEC 61000-2-5 järgi on määratletud maksimaalsed lubatud harmooniliste tasemed elektrivarustussüsteemi seisukohast erinevates keskkondades. Nimetatud tehnilises aruandes IEC 61000-2-5 on välja toodud klasside spetsifikatsioonid.

- Klass 1 rakendub kaitstud toitevõrgule, kus ühilduvusnivood on madalamad kui avalikes toitevõrkudes. See võimaldab kasutada toitevõrgu häiringute suhtes tundlikke seadmeid.
- Klass 2 rakendub avalikele madalpingevõrkudele. Samuti saab seda rakendada kaubandus- ja kergetööstuskeskkondadele (kaubandusrajatised, väikese ja keskmise suurusega tehased).
- Klass 3 rakendub tööstuskeskkondadele, millel on kõrgemad ühilduvusnivood kui samadele häiringunähtustele klassis 2. Selle klassiga võib arvestada juhul, kui kehtib üks järgnevatest olukordadest:
 - põhilisi koormusi toidetakse läbi elektrimuundurite,
 - esinevad keevitusseadmed,
 - suurte mootorite tihe käivitus,
 - koormused muutuvad kiiresti [30].

Vastavalt keskkonna klassidele on nimetatud ka soovitatavad suurimad pingeharmoniku tasemed, mis on oodatavalt elektrivarustussüsteemi toitepinges. Need väärtused on esitatud ka allolevas tabelis 6.1.

Tabel 6.1. Harmoonikute tasemed ning voolud ja pinged erinevatel kasutusklassidel [30]

h	f, Hz	X _C , Ω	Klass 1			Klass 2			Klass 3		
			U _{hi} , %	U _{hi} , V	I _{hi} , A	U _{hi} , %	U _{hi} , V	I _{hi} , A	U _{hi} , %	U _{hi} , V	I _{hi} , A
1	50	318,3	100	400	1,26	100	400	1,26	100	400	1,26
3	150	106,1	3	12	0,11	5	20	0,19	6	24	0,23
5	250	63,7	3	12	0,19	6	24	0,38	8	32	0,50
7	350	45,5	3	12	0,26	5	20	0,44	7	28	0,62
9	450	35,4	1,5	6	0,17	1,5	6	0,17	2,5	10	0,28
11	550	28,9	3	12	0,42	3,5	14	0,48	5	20	0,69
13	650	24,5	3	12	0,49	3	12	0,490	4,5	18	0,76
Ruutsumma				401	1,46		402	1,57		404	1,83

Vastavalt harmooniku sagedusele on välja arvatud mahtuvustakistused 10 μF kondensaatori puhul. Samuti on leitud põhiharmooniku osakaal pingel efektiivväärtusest ning iga vooluharmooniku väärtus. Tabelis 6.1 on toodud välja mõõtmistulemused koos voolude ja pingete ruutsummadega erinevatel klassidel, piirjuhtumitel, seda eeldusel, et pingel põhiharmooniku väärtus on nimipingega võrdne. Moonutatud pingel efektiivväärtus on toodud valemis 6.1.

$$U_{RMS} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2} \quad (6.1)$$

Kadude hindamise lähekoht on voolu efektiivväärtuse hinnang, mis on siin selgem, kui pingel komponentide ja sageduse järgi summeerimine. Tulemus on siiski sama – pingeharmooniku sageduse alusel on leitud näivtakistus ning näivtakistuse ja pingeharmooniku väärtuse alusel vooluharmooniku väärtus. Omakorda vooluharmoonikute väärtuste ruutsumma on voolu tegeliku efektiivväärtuse aluseks on leitav valemiga 6.2.

$$I_{RMS} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2} \quad (6.2)$$

Osutub, et pingel efektiivväärtuse suurus muutub ainult suhteliselt väikeses ulatuses, 1% piires. Võrdluseks, kondensaatori vool, mis 50 Hz korral on väärtusega 1,26 A, kasvab

- Klassi 1 tingimustes tasemele 1,46 A, ehk 1,16 korda,
- Klassi 2 tingimustes tasemele 1,57 A, ehk 1,25 korda,
- Klassi 3 tingimustes tasemel 1,83 A, ehk 1,45 korda.

Voolu efektiivväärtuse kasvu tuleb arvesse võtta kadude perspektiivis, kus voolu efektiivväärtuse ruutväärtus määrab ka kadude suhtelise taseme. 1,45 kordne voolu kasv tähendaks 2,1 korda suuremat kadu.

Järgnevalt saab matemaatiliselt määrata, kui suure nimipingega kondensaator tuleb valida, et harmooniliste vooludega oleks voolude ruutsumma väiksem kui kondensaatori nimivool. Antud tulemused on toodud tabelis 6.2, kus U_C ja I_C on kondensaatori arvutuslikud parameetrid ning I kondensaatorit läbiv vool. Kondensaatori nimisagedusel ning pingest sõltuvana on vool leitav valemiga 6.3.

$$I_{Cnimi} = \frac{U_{nimi}}{X_C} = U_{nimi} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{nimi} \cdot C, \quad (6.3)$$

kus $f_{nimi} = 50 \text{ Hz}$.

Seega kondensaatori pingel vajaliku taseme võib ka määrata lähtudes kondensaatori tegelikust voolust, kasutades selleks valemit 6.4.

$$U_C = \frac{I_C}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad (6.4)$$

Teades kondensaatorit läbivat voolu I_C ning voolu kordsust võrreldes nimivooluga, on võimalik leida kondensaatori minimaalne pingetase, kasutades valemit 6.5.

$$\frac{U_C}{U_{nimi}} = \frac{I_C}{I_{Cnimi}} \Rightarrow U_C = \frac{I_C}{I_{Cnimi}} \cdot U_{nimi} \quad (6.5)$$

Valemi 6.5 alusel leidud minimaalsed kondensaatorite pingetasemed moonutatud pinge korral on toodud tabelis 6.2.

Tabel 6.2. Minimaalsed kondensaatori nimipinged, mis arvestavad võimalike moonutusolukordadega.

	Klass 1	Klass 2	Klass 3
U_C, V	467	500	585
I_{Cnimi}, A	1,464	1,568	1,835
I_C, A	1,462	1,566	1,833

Tabelis 6.2 saadud tulemusi võrreldes olemasolevate kondensaatoritega, tuleks klass 1 ja klass 2 korral kasutada 500 V nimipingega kondensaatoreid ning klass 3 korral näiteks 600 V kondensaatoreid [31].

6.1 Temperatuuri mõõtmine tööstuses esinevatel pingekujudel

Selleks, et uurida kondensaatori soojenemist reaalses elektripaigaldistes, võeti aluseks pingeanalüüsi tulemused varasematest praktilistest mõõtmistest erinevates tööstusettevõtetes. Saadaolevatest mõõtmistest võeti vaatluse alla suurema harmoonilismoonutuste tasemetega tulemused, et kuumenemine oleks paremini nähtav.

Et meile kasutada olevate kondensaatorite eelnevate mõõtmiste käigus selgus, et 50 Hz juures ei toimunud märgatavat kuumenemist, seepärast on ka antud mõõtmiste puhul katsepõhisageduseks 150 Hz ning kolmas, viies ning seitsmes harmoonik vastavalt sagedustel 450 Hz, 750 Hz ning 1050 Hz. Seitsmes harmoonik on maksimaalne, mida saab rakendada Chroma toiteploki, sest suurim lubatud sagedus on 1000 Hz, seega on juba seitsmes harmoonik üle nimiväärtuse.

Praktilised mõõtmised on sooritatud kolme faasilises elektrisüsteemis, kuid toiteploki väljund ning uuritavad kondensaatorid on ühefaasilised, võetakse kolme faasi keskmine ning leitakse pingeharmoniku väärtus, mida katsetel rakendada. Harmoonikute sisestamiseks ning pingekuju määratlemiseks kasutatakse Matlabi tarkvara, kus on kujundatud vastav programm antud protsesside teostamiseks. Temperatuuri mõõtmiste tulemused on tabelites välja toodud iga 30 min järel, tegelikkuses toimus mõõtmine iga minuti järel. Järgnevalt on tulemuste tabelis välja toodud

komponendid kuni 13. harmoonikuni, aga toiteploki poolt esinevate piirangute tõttu kasutatakse mõõtmistel 3., 5. ja 7. harmoonikut.

6.1.1 Puidutööstus

Tabelis 6.3 on toodud harmoonikute tasemed puidutööstuse näitel.

Tabel 6.3. Harmoonikute tasemed puidutööstuses

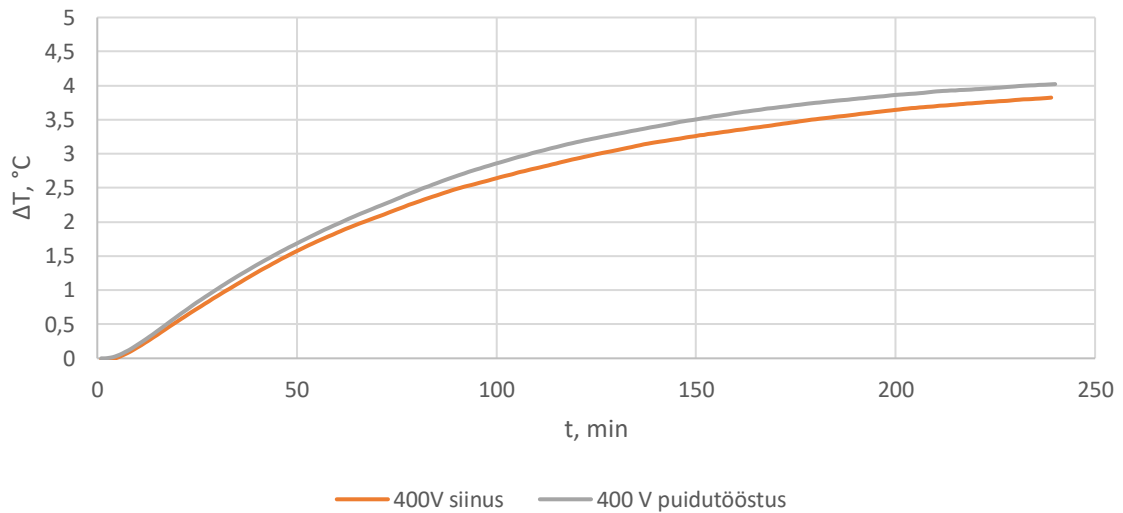
h	$U_{L1}, \%$	$U_{L2}, \%$	$U_{L3}, \%$	$U_{kesk}, \%$	U_{kesk}, V
3	0,56	0,67	0,42	0,55	1,27
5	7,29	7,31	7,34	7,31	16,82
7	3,60	3,63	3,58	3,60	8,29
9	0,26	0,41	0,2	0,29	0,67
11	4,40	4,34	4,05	4,26	9,81
13	3,39	3,48	3,79	3,55	8,17

Tabelis 6.4 on toodud mõõtmistulemused 400 V juures siinuspingel ning koos harmoonikutega puidutööstuses.

Tabel 6.4. Mõõtmistulemused puidutööstuse näitel

	U, V	
	400 V	400 V puit
t, min	$T, \text{°C}$	
0	24,8	22,6
30	25,7	23,7
60	26,6	24,6
90	27,3	25,3
120	27,7	25,8
150	28,0	26,1
180	28,3	26,4
210	28,5	26,6
240	28,6	26,7
$\Delta T, \text{°C}$	3,8	4,1

Joonisel 6.1 on kujutatud graafiliselt siinuspinge ja puidutööstuses esinevate harmoonikute mõjul soojenemise erinevust. Tulemused on taandatud, et alguspunkt oleks samas kohas, et oleks paremini eristatav soojenemise muut.



Joonis 6.1. Puidutööstuses esinevate harmoonikutega ning siinuspingel soojenemine

6.1.2 Metallitööstus

Tabelis 6.5 on toodud harmoonikute tasemed metallitööstuse näitel.

Tabel 6.5. Harmoonikute tasemed metallitööstuses

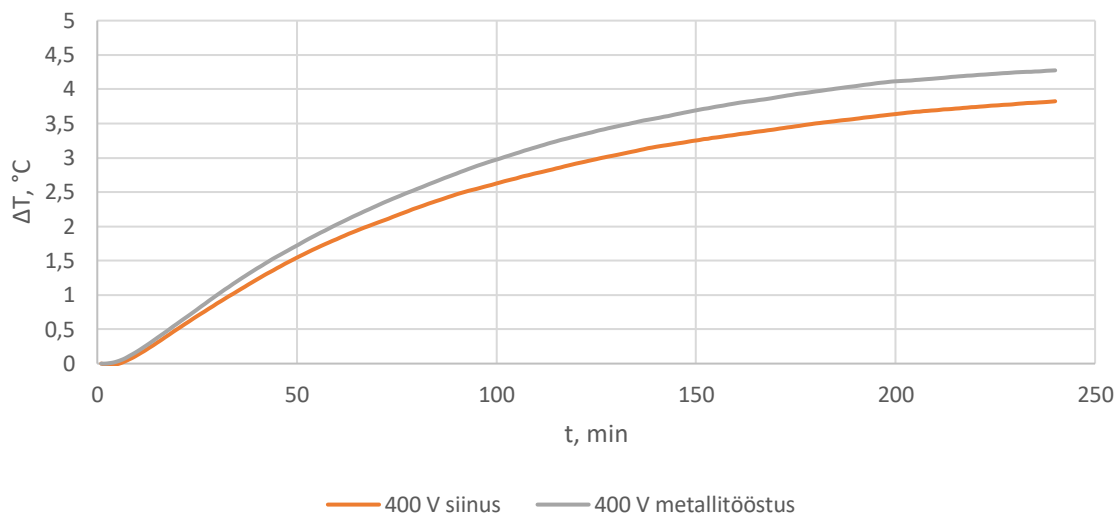
<i>h</i>	$U_{L1}, \%$	$U_{L2}, \%$	$U_{L3}, \%$	$U_{kesk}, \%$	U_{kesk}, V
3	3,43	3,34	3,65	3,47	7,99
5	2,22	1,87	1,87	1,99	4,57
7	1,83	0,69	1,27	1,26	2,91
9	0,50	0,43	0,44	0,46	1,06
11	0,25	0,28	0,43	0,32	0,74
13	0,15	0,11	0,28	0,18	0,41

Tabelis 6.6 on toodud mõõtmistulemused 400 V juures siinuspingel ning koos harmoonikutega metallitööstuses.

Tabel 6.6. Mõõtmistulemused metallitööstuse näitel

<i>t, min</i>	<i>U, V</i>	
	400 V	400 V metall
	<i>T, °C</i>	
0	24,8	23,6
30	25,7	24,6
60	26,6	25,6
90	27,3	26,4
120	27,7	26,9
150	28,0	27,3
180	28,3	27,5
210	28,5	27,7
240	28,6	27,8
$\Delta T, °C$	3,8	4,2

Joonisel 6.2 on kujutatud graafiliselt siinuspinge ja metallitööstuses esinevate harmoonikutega võimaliku soojenemise erinevust.



Joonis 6.2. Metallitööstuses esinevate harmoonikutega ning siinuspingel soojenemine

6.1.3 Töötlev tööstus

Tabelis 6.7 on toodud harmoonikute tasemed töötleva tööstuse näitel.

Joonis 6.7. Harmoonikute tasemed töötlevas tööstuses

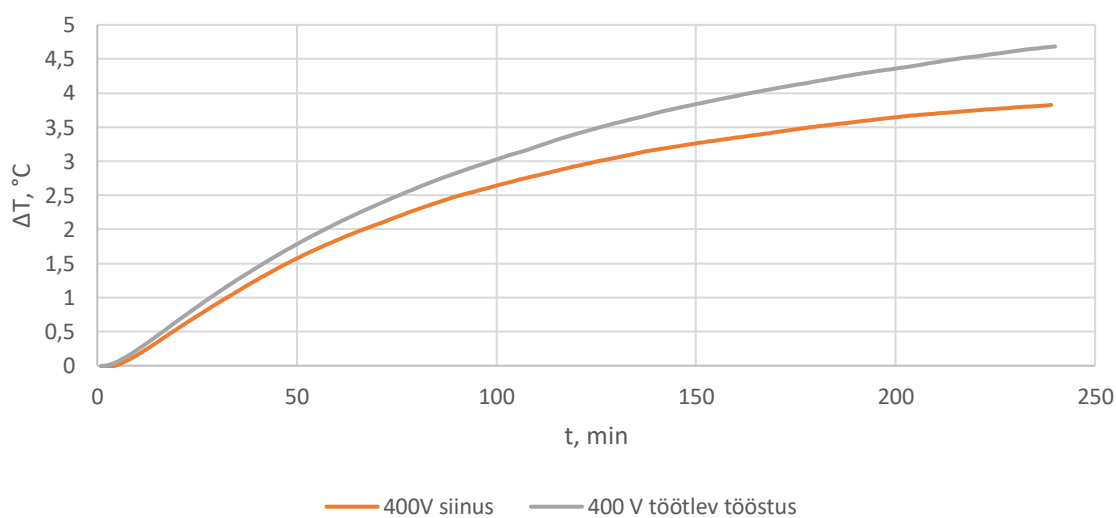
h	U _{L1} , %	U _{L2} , %	U _{L3} , %	U _{kesk} , %	U _{kesk} , V
3	0,32	0,18	0,47	0,32	0,74
5	9,65	9,91	9,73	9,76	22,45
7	4,27	3,89	4,16	4,11	9,44
9	0,34	0,28	0,21	0,28	0,64
11	3,68	3,92	3,50	3,70	8,51
13	4,04	3,99	4,23	4,09	9,40

Tabelis 6.8 on toodud mõõtmistulemused 400 V juures siinuspingel ning koos harmoonikutega töötlevas tööstuses.

Tabel 6.8. Mõõtmistulemused töötleva tööstuse näitel

	U, V	
	400 V	400 V töötlev
t, min	T, °C	
0	24,8	23,6
30	25,7	24,7
60	26,6	25,7
90	27,3	26,4
120	27,7	27,0
150	28,0	27,4
180	28,3	27,7
210	28,5	28,0
240	28,6	28,3
ΔT , °C	3,8	4,7

Joonisel 6.3 on kujutatud graafiliselt siinuspinge ja töötlevas tööstuses esinevate harmoonikutega mõjul soojenemise erinevust.



Joonis 6.3. Töötlevas tööstuses esinevate harmoonikutega ning siinuspingel soojenemine

6.2 Mõõtmistulemuste analüüs

Tabelis 6.9 on toodud kondensaatorile rakendatud harmooniliste pingete ning voolu arväärtused. Samuti on leitud pingete ja voolude ruutsummad kõigi kolme tööstuses esineva pingeprofiili kohta.

Tabel 6.9. Tööstuses esinevate pingete võrdlustabel

harmoonilise järk	Puidutööstus			Metallitööstus			Töötlev tööstus		
	$U_{hi}, \%$	U_{hi}, V	I_{hi}, A	$U_{hi}, \%$	U_{hi}, V	I_{hi}, A	$U_{hi}, \%$	U_{hi}, V	I_{hi}, A
1	100	400	1,26	100	400	1,26	100	400	1,26
3	0,55	2	0,02	3,5	14	0,13	0,32	1	0,01
5	7,3	29	0,46	2,0	8	0,13	9,8	39	0,62
7	3,6	14	0,32	1,3	5	0,11	4,1	16	0,36
Efektiivväärtus		401,33	1,37		400,36	1,27		402,25	1,45

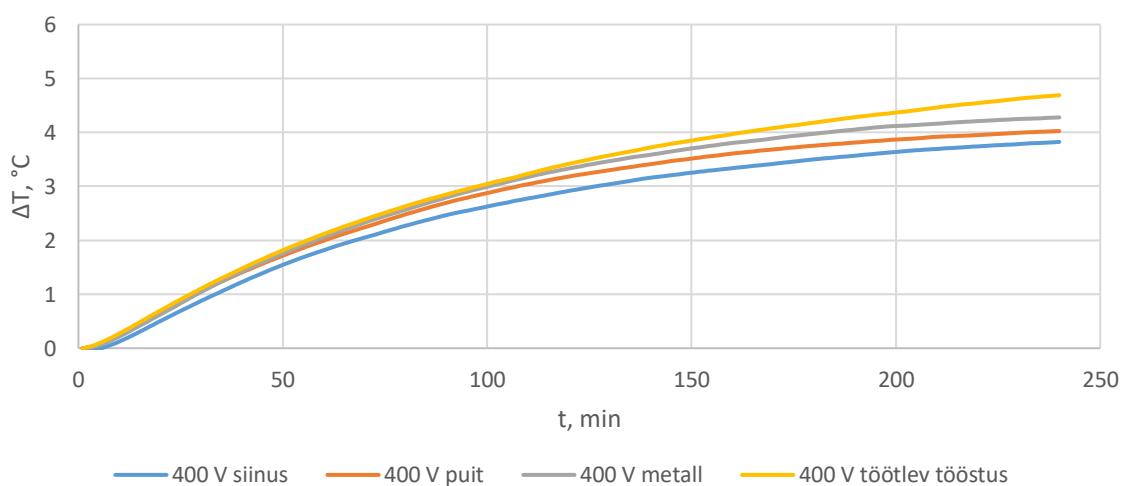
Kondensaatori kuumenemine, sealjuures temperatuuri muut on määratud valemiga 2.14. Samuti on kaovõimsus P_{kogu} väärtus määratud läbi voolu efektiivväärtuse valemis 2.4. Sellest lähtub, et kui kasvab voolu efektiivväärtus, kasvab ka kondensaatori temperatuuri vahe. Antud seos on toodud valemis 6.6 valemite 2.4 ja 2.14 põhjal.

$$\frac{\Delta T_{KP1}}{\Delta T_{KP2}} = \frac{P_{kogu1} \cdot R_{T-KP}}{P_{kogu2} \cdot R_{T-KP}} = \frac{I_{C1}^2 \cdot ESR}{I_{C2}^2 \cdot ESR} \quad (6.6)$$

Rakendades valemit 6.6 olukorras, kus esiuvad siinuseline ja moonutatud pingeolukord, siis on suhe temperatuuride ning ahelas oleva voolu vahel toodud valemis 6.7.

$$\frac{\Delta T_m}{\Delta T_{sin}} = \frac{P_{kogu-m}}{P_{kogu-sin}} = \frac{I_m^2}{I_{sin}^2} \quad (6.7)$$

Joonisel 6.4 on näha kolme eri tüüpi harmoonikutega tehtud mõõtmiste soojenemisgraafikuid, samuti on võrdluseks toodud puhtal siinuspingel tehtud mõõtmine.



Joonis 6.4. Tööstuses esinevate harmoonikutega pingel ning siinuspingel soojenemine

Jooniselt on näha, et kõikidel tööstuspingetel kuumeneb kondensaator rohkem kui puhtal siinuspingel, mis on oodatav tulemus. Kõige enam soojenes kondensaator töötlevas tööstuses esineva pinge korral, kus on võrreldes kahe teise moonutatud pingega võrreldes kõige enim 5. ja 7.

harmoonikut. Metallitööstuses esines kõige enam 3. pingeharmoonikut, mis soojenemiselt järgnes töötlevale tööstusele.

Graafikul on näha, et temperatuur ei ole katse lõpuks lõppväärtust saavutanud. Valemi 6.8 abil on võimalik välja arvutada lõplik temperatuur, eeldusel, et kuumenemine on eksponentsiaalse trendiga.

$$T_c = T_1 - \frac{(T_1 - T_2)^2}{T_1 - 2 \cdot T_2 + T_3} \quad (6.8)$$

kus T_1 , T_2 ja T_3 on kolm temperatuuri mõõtmistulemuste võrdsete ajavahemike järel [32]. Tabelis 6.11 on toodud temperatuuride ning voolude suhted tingimusel, et on leitud lõplik temperatuur, millise väärtuseni kondensaator kuumeneb.

Tabel 6.11. Mõõtmistulemused koos arvutuslike lõpptemperatuuridega

Tööstus	$\Delta T_{sin}, ^\circ C$	$\Delta T_m, ^\circ C$	$\frac{\Delta T_m}{\Delta T_{sin}}$	I_{sin}^2, A	I_m^2, A	$\frac{I_m^2}{I_{sin}^2}$
Puit	4,00	4,33	1,08	1,59	1,87	1,18
Metall	4,00	4,69	1,17	1,59	1,61	1,02
Töötlev	4,00	5,20	1,30	1,59	2,10	1,32

Temperatuuri kasvu oodatava tulemuse väärtus on kirjeldatud voolu efektiivväärtuse ruutude suhtega (tabeli 6.11 parempoolseim lahter). Kui töötleva tööstuse pingeprofiili korral on tulemus oodatavaga samal tasemel (1,30 / oodatav 1,32), siis puidutööstuse profiili korral on kuumenemine oodatust väikesem (1,08 / oodatav 1,18), metallitööstuse korral aga suurem (1,17 / oodatav 1,02).

Siin võib esile tuua, et mõõtmistulemustes on temperatuurivahed puidutööstuse ja metallitööstuse pingeprofiilide rakendamisel suhteliselt väikesed:

- Puidutööstuse pingeprofiiliga on kuumenemine 0,3 °C kõrgem võrreldes siinuspingega;
- Metallitööstuse pingeprofiiliga on kuumenemine 0,7 °C kõrgem võrreldes siinuspingega;
- Töötleva tööstuse pingeprofiiliga on kuumenemine 1,2 °C kõrgem võrreldes siinuspingega.

Väike temperatuuride erinevus võib olla täiendav hinnangu vea allikas. Nimelt on selliste temperatuuride vahe puhul oluline jälgida, et ka katsete vaheline stabiilsus oleks tagatud. Näiteks metallitööstuse profiiliga katsete läbiviimisel oli ühel juhul temperatuuri kasv 0,83 °C ja teisel juhul 0,69 °C. Teisalt võib märgata, et harmoonikute lisamisel pingekujule on temperatuuri kasv igal juhul tuntav. See annab märku, et pinge moonutumine on kindlasti kriteerium, mille korral tuleb arvestada kondensaatorile suurem varu. Seda saab tagada, rakendades kõrgema nimipingega kondensaatoreid, võrreldes pingega, mis efektiivväärtusena on mõõdetud (vt valem 6.5 ja tabel 6.2).

KOKKUVÕTE

Antud lõputöö eesmärgiks oli uurida kondensaatori parameetrite sõltuvust soojenemisest ning seeläbi leida vastavad kondensaatorite nimiparameetrid, mis sobiks kasutamiseks moonutatud võrgupinge korral. Selleks tutvuti esmalt reaktiivvõimsuse kompenseerimise põhimõttega ning vaadeldi eri tüüpi kondensaatoreid ning nende põhiparameetreid. Lisaks tutvustati, mis tüüpi kaod esinevad kondensaatoritel ning mis mõju avaldab kondensaatorile lubatust kõrgem pinget ja ümbritseva keskkonna temperatuur.

Järgnevalt koostati kondensaatori kaomehhanisme kirjeldavate parameetrite mõõtmiseks vajalik meetodika ning seejärel sooritati vajalikud mõõtmised. Kondensaatori isolatsiooni lekke- rööptakistuse mõõtmistulemused olid mitteusaldusväärsed, sest kondensaatori rööptakistuse lahend ei andnud positiivset väärtust. Seetõttu lisati mõõteahelasse 510 MΩ takistid ning seejärel korraldati mõõtmist. Antud muudatus ei toonud kaasa mõõtmistulemuste usaldusväärsuse paranemist, sest tulemus tuli ka antud juhul mittepositiivne. Järgnevalt vaadeldi vahemikku, kus pinget alanemine oli ligikaudu lineaarne, mitte eksponentsiaalse kujuga. Prooviti määrata kondensaatori pinget muutust ajas, mis läbi ilmnes, et pinget alanes minimaalselt ning sama suurusjärgu võrra igal juhul, sõltumata sellest, kas mõõtmist tehti iga tunni või pikemate ajaperioodide järel. Seetõttu isolatsioonitakistuste arväärtuste määramiseni antud lõputöö raames ei jõutud.

Järgnevalt määratleti kondensaatori jadatakistuse arväärtused. Esmalt mõõdeti LCR-meetriga ning saadi jadatakistuse arväärtused. Seejärel töötati välja mõõtemetodika täpsemaks mõõtmiseks ning teostati mõõtmist sellele tuginedes. Täpsem mõõtmist aga ei toonud oodatud tulemust, sest katseahela takistuse väärtuse hajumine oli kordi suurem kui tootja andmelehel toodud oodatav otsitav takistuse väärtus.

Peale jada- ja rööptakistuse mõõtmist uuriti kondensaatori temperatuuri kasvu. Algselt teostati mõõtmist 50 Hz nimisagedusel, kuna sellisel juhul kuumenemine oli minimaalne, teostati järgnevalt mõõtmist 150 Hz põhisagedusel. Mõõtmistulemuste põhjal arvutati välja eralduv soojusvõimsus ning seeläbi ka sellele vastav jadatakistuse väärtus, viimane osutus ligikaudu võrdseks tulemusega, mis saadi kasutades LCR-meetrit.

Lisaks kondensaatori mõõtmistel siinuspingel, teostati mõõtmist erinevatel tööstuspingetel, kus esinevad kõrgemad harmoonikud. Seeläbi vaadeldi eri harmoonikute osakaalu põhjal, kuidas erines kuumenemine. Samuti leiti arvutuslikult, millise nimipingega kondensaatoreid tuleks kasutada erinevate harmoonikute tasemetel korral.

Et määrata jäi kondensaatori jada- ja rööptakistus, ei saa ka nende tulemuste põhjal teha järeldusi eri pingeklassidega kondensaatorite käitumise osas. Seetõttu põhines eri nimipingega kondensaatorite võrdlus ainult nende kuumenemisel. Samuti esines kõrvalekaldeid püstitatud hüpoteesist kondensaatorite temperatuuride mõõtmisel. Kuigi lõputöö algelt püstitatud eesmärkide osas katseline kinnitus teooriale jäi saavutama, samas leiti erinevaid mõõtemetodeid, mida ei tasuks taoliste kondensaatorite mõõtmisel kasutada. Paremate meetodite ja praktikate rakendamine jäi lõpetamata, kuna katsete kestvus oli pikk, samuti oli spetsiifilisemate mõõteriistade saadavus piiratud.

Teoreetiliste aluste põhjal on antud töös välja töötatud raamistik, kuidas määrata pingetasemeid kondensaatoritele olukorras, kui võrgupinge on moonutatud. Samuti on antud konkreetne juhised erinevates keskkondades rakendatud reaktiivvõimsuse kompenseerimise kondensaatorite pingetasemete valikule, et vältida nende ülekoormust võrreldes projekteeritud koormuseid ja kuumenemist iseloomustavate suurustega.

SUMMARY

Main purpose of this thesis was to find dependencies between capacitor heating and its parallel and series resistances. After that, correct capacitors with suitable nominal voltage can be selected in case there is distorted supply voltage in power grid. For doing all this, at first, main methods of power factor correction were compared. Also, different types of capacitors were learned and introduced their differences. After that, losses on these capacitors and effects of overvoltage and overtemperature to capacitors were examined.

After that, method was constructed for measuring of equivalent parallel resistance. After that, measuring was carried out. Measuring results were unreliable, because value of equivalent parallel resistance came negative. Because of that, additional resistance was added to the measuring circuit and after that, new measuring was carried out. Unfortunately, this change did not affect output of measuring, value of parallel resistance was still negative. After these results, assumption was made that voltage decrease is more linear than exponential during some time periods, mainly because voltage decreased slowly in time. This type of approach did not give reliable results, so it was concluded that it is not possible to measure equivalent parallel resistance using this type of equipment and measuring method. Main reason for that is possibly that resistance is far too big for measuring. To prove this hypothesis, voltage drop was measured in time. Result showed that voltage decreased minimally and same amount, not depending from time between two measurements. Because of that, equivalent series resistance was not measured in this thesis.

In the next chapter, equivalent series resistance was measured. First it was measured with LCR-meter and to get more precise results, measuring method was made and measuring according to this was conducted. More precise method did not give better results, because results were approximately 100 times bigger than in capacitor datasheet.

Measuring of the capacitor temperature was also carried out. At first, 50 Hz sinusoidal voltage was used. Because there were minimal heat effect using this frequency, later was used 150 Hz as fundamental frequency. Using results of measuring, heat dissipation and equivalent series resistance was calculated. Calculated resistance value is approximately same as measured with LCR-meter. At first, sinusoidal voltage was used during measuring. Later, non-sinusoidal was used as well, levels of higher harmonics were chosen by taking account of real measuring of industrial voltages. After that, suitable capacitors for distorted voltage was calculated.

Unfortunately, equivalent parallel and series resistance measuring was not successful, because results varied much. Even though using LCR-meter and heat calculation, series resistances were approximately the same, it still differs three times from value given in capacitor datasheet. Because

of that, hypotheses stated from beginning cannot be checked with real measuring. As a result, there were found different measuring methods, which are not applicable for existing measuring devices. Regardless of imprecise measuring results, theoretical framework was conducted for planning voltage levels in the case of distorted supply voltage. Also, precise guidelines were given to choose nominal voltage of the capacitors in different use cases to avoid overheating and overload.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] F. Zheng ja W. Zhang, „Long Term Effect of Power Factor Correction on,” *2017 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, pp. 1-5, 2017.
- [2] T. Vinnal, Eesti ettevõtete elektritarbimise uurimine ja soovitude väljatöötamine tarbimise optimeerimiseks, Tallinn: TTÜ kirjastus, 2011.
- [3] P. K. L. Neumann, Elektrotehnika teoreetilised alused, Tallinn: Kirjastus "Valgus", 1967.
- [4] J. Järvik, Üldelektrotehnika, Tallinn: TTÜ kirjastus, 2014.
- [5] G. Sandoval, „Power Factor in Electrical Power Systems with Non-Linear Loads,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: http://www.apqpower.com/assets/files/PF_nonlinearloads.pdf. [Kasutatud 07. 10. 2019].
- [6] Y. Wang, W. Saad, A. I. Sarwat ja C. S. Hong, „Reactive Power Compensation Game Under,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, kd. 9, nr 5, pp. 4181-4193, 2018.
- [7] EPCOS AG, „Film Capacitors. General technical information,” TDK Group, 2018.
- [8] S. Daryl, „Types of Wound Film Capacitors,” Electro Technik Industries Company, Arizona.
- [9] P. Bettacchi, D. Montanari, D. Zanarini, D. Orioli, G. Rondelli ja A. Sanua, „Power film capacitors for industrial applications,” KEMET Electronics Corporation, Simpsonville, 2010.
- [10] Electronicon, „Key components for power factor correction in 50 Hz mains,” Electronicon Kondensatoren GmbH, Gera, 2018.
- [11] M. Islam, D. Sutanto ja K. M. Muttaqi, „Protecting PFC Capacitors from Overvoltage Caused by Harmonics and System Resonance Using High Temperature Superconducting Reactors,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, kd. 29, nr 2, pp. 1-5, 2019.
- [12] T. Vinnal, M. Jarkovoi ja L. Kütt, „Harmonic Currents and Voltages in LV Networks of Estonia : Measurement Results, Case Studies,” *2018 IEEE 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, pp. 1-7, 2018.
- [13] Vishay Roederstein, „General technical information. Film capacitors,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.vishay.com/docs/26033/gentechinfofilm.pdf>. [Kasutatud 07 11 2019].

- [14] International Electrotechnical Commission, „IEC 60831-1 Shunt power capacitors of the self-healing type for a.c. systems having a rated voltage up to and including 1 000 V - Part 1: General - Performance, testing and rating - Safety requirements - Guide for installation and operation,“ International Electrotechnical Commission, Genf, 2014.
- [15] International Electrotechnical commission, „IEC 60384-1 Fixed capacitors for use in electronic equipment - Part 1: Generic specification,“ International Electrotechnical commission, Genf, 2016.
- [16] R. W. Brown, „Equivalent series and parallel equivalent circuits for metallized film capacitors,“ *TENCON 2007 - 2007 IEEE Region 10 Conference*, pp. 1-4, 2 november 2007.
- [17] Illinois Capacitor, „Impedance, Dissipation Factor and ESR,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.illinoiscapacitor.com/pdf/Papers/impedance_dissipation_factor_ESR.pdf. [Kasutatud 05 12 2019].
- [18] KEMET, „Aluminum Can Power Film Capacitors C44P/C20A Series, 330 – 1,000 VAC, 700 – 2,300 VDC, for PFC and AC Filter,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: http://www.kemet.com/Lists/ProductCatalog/Attachments/368/KEM_F3050_C44P_RADIAL.pdf. [Kasutatud 05 12 2019].
- [19] Z. Cai, W. Liu, S. Feng ja G. Liu, „Calculation of the internal hottest temperature about running power capacitor,“ *2009 IEEE 9th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials*, pp. 126-129, 2009.
- [20] Y. A. Cengel, Heat transfer. A practical approach, Reno: Mcgraw-Hill, 2002.
- [21] Engineering ToolBox, „Aluminum - Radiation Heat Emissivity,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.engineeringtoolbox.com/radiation-heat-emissivity-aluminum-d_433.html. [Kasutatud 12 12 2019].
- [22] Chroma ATE Inc., „Programmable AC source 61505 User's manual,“ 01 2010. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://doc.xdevs.com/doc/Chroma/61505/E_61505UM_1001.pdf. [Kasutatud 15 12 2019].
- [23] KEMET, „C44A MKP series datasheet,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://content.kemet.com/datasheets/F3303_C44A.pdf. [Kasutatud 03 11 2019].
- [24] L. Kütt, *Kondensaator. Konspekt*, Tallinn, 2018.

- [25] L. Kütt, „Elektromagnetiline ühilduvus, mürad ja mõõtmise. Loengukonspekt ja ülesanded,“ 2019. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.ttu.ee/public/e/elektroenergeetika-ja-mehhatroonika-instituut/Oppetoo/EMU_loengukonspekt_20190715.pdf. [Kasutatud 12 12 2019].
- [26] Premier Farnell UK Limited, „U1733C - LCR Meter,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://ee.farnell.com/keysight-technologies/u1733c/meter-lcr-hand-held-100khz/dp/1903368>. [Kasutatud 12 12 2019].
- [27] Texas Instruments, „Control theory seminar series. Introduction to control systems,“ Texas Instruments, 2015.
- [28] M. Nahvi ja J. Edminister, Schaum's outline of electric circuits, fourth edition, New York: McGraw-Hill, 2003.
- [29] Engineering ToolBox, „Thermal Conductivity of selected Materials and Gases,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html. [Kasutatud 11 12 2019].
- [30] International Electrotechnical Commission, „IEC TR 61000-2-5 Environment - Description and classification of electromagnetic environments,“ International Electrotechnical Commission, Genf, 2017.
- [31] TME, „Standard polypropylene capacitors,“ TME, [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.tme.eu/it/en/katalog/standard-polypropylene-capacitors_100471/. [Kasutatud 14 12 2019].
- [32] „Extrapolating exponential decay functions and temperature measurements,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.giangrandi.ch/soft/expextrap/expextrap.shtml>. [Kasutatud 01 01 2020].