



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

EESTI ELEKTRISÜSTEEMI PÕHIVÕRGU KOORMUSKLASSIDE
SAGEDUSSÕLTUVUSTE UURIMINE

RESEARCHING FREQUENCY DEPENDENCE OF ESTONIAN ELECTRICAL SYSTEM
LOAD CLASSES

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Sander Sorts

Üliõpilaskood: 153679AAVM

Juhendaja: Dotsent Ülo Treufeldt
Dotsent Jako Kilter
Doktorant Madis Leinakse

Tallinn, 2017. a.

Autorideklaratsioon

Deklareerin, et käesolev lõputöö, mis on minu iseseisva töö tulemus, on esitatud Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika ja mehhantroonika instituudile haridusastme lõpudiplomi taotlemiseks elektroenergeetika erialal. Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

“.....” 201.....

Autor:
/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 201.....

Juhendaja:
/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees
/ nimi ja allkiri /

Lõputöö kokkuvõte

<i>Autor:</i> Sander Sorts	<i>Lõputöö liik:</i> Magistritöö
<i>Töö pealkiri:</i> Eesti elektrisüsteemi põhivõrgu koormusklasside sagedussõltuvuste uurimine	
<i>Kuupäev:</i> 25.05.2017	69 lk
<i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnikaülikool	
<i>Teaduskond:</i> Inseneriteaduskond	
<i>Instituut:</i> Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut	
<i>Töö juhendaja(d):</i> dotsent Ülo Treufeldt, dotsent Jako Kilter, doktorant Madis Leinakse	
<i>Töö konsultant (konsultandid):</i>	
<i>Sisu kirjeldus:</i> Energiasüsteemis peab tarbimise ja tootmise vahel olema tasakaal. Koormuse juhtimine on võimalik ainult teatud mahu, seetõttu toimub elektrienergia tootmine ja ülekanne koormuse poolt määratud sammu järgi. Samuti on tarbimine ja koormuse struktuur pidevas muutmises. Korrektsete koormuse modelleerimise tulemuste saavutamiseks on vajalik pidev mudelite andmete ja põhimõtete uuendamine. Selles lõputöös keskendutakse koormuse mudelitele vajalike andmete süstemaatilisele töötlemisele. Käesolevas lõputöös tutvustatakse koormuse olemust ning tema sõltuvust sagedusest, mille kirjeldamiseks kasutatakse koormuse staatilisi ja dünaamilise karakteristikuid. Täpsem ülevaade antakse koormusklassidest ning nende koosseisu kuuluvatest elektrilistest komponentidest ning nende osakaalust kogu tarbimisest. Arvutustes võetakse ka arvesse elektriliste komponentide viimaste aastate osakaalude muutumise trendi. Lõputöö uurimismetoodikaks kasutatakse varasemate kirjanduse allikate ning uuringute tulemusi, kasutust leiavad ka Elering AS aruanded ning Tallinna Tehnikaülikoolis kaitstud lõputööd. Lõputöö kuulub Tallinna Tehnikaülikooli ja Elering AS vahelise uuringu „Eesti elektrisüsteemi ülekandevõrgu koormuse staatilised ja dünaamilised karakteristikud“ koosseisu. Lõpptulemusena leitakse Eesti elektrisüsteemis defineeritud koormusklassidele sagedustundlikkustegurid – koormuse staatilise karakteristiku tunnusjoone tõusu koefitsient. Ühtlasi tuuakse välja kirjanduse põhjal saadud tulemuste nõrgad kohad ning suund kuidas tulevikus edasi liikuda.	

Märksõnad: Koormus, sagedustundlikkus, staatiline koormuse karakteristik, tüüpilised elektrikomponendid, koormusrühmad, koormusklassid, sagedustundlikkustegurid.

Summary of the Diploma Work

<i>Author:</i> Sander Sorts	<i>Type of the work:</i> Master Thesis
<i>Title:</i> Researching frequency dependence of Estonian electrical system load classes	
<i>Date:</i> 25.05.2017	69 pages
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>Faculty:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Tutor(s) of the work:</i> Associate Professor Ülo Treufeldt, Associate Professor Jako Kilter, PhD student Madis Leinakse	
<i>Consultant(s):</i>	
<i>Abstract:</i> <p>The production and consumption of electricity has to be in balance in our energy system. Power generation and energy transmission are controlled by the load value, as load management is possible only to a certain extent. Also, the load is in constant change. So it is important to update the model data and principles. This thesis focuses on the data that is needed for load modelling.</p> <p>Given thesis presents the nature of the load and its dependence on frequency which is described by the static and dynamic characteristics of load. A more detailed overview is given for load classes and their composition of electrical components and their overall proportion of the total electricity consumption. Thesis also shows changes in trend of electrical components composition in recent years.</p> <p>This paper investigates previous literature and research results and uses results that are obtained from Elering AS reports and other thesis. This thesis is part of a project named “Static and dynamic characteristics of loads of Estonian electrical transmission network” between Tallinn University of Technology and Elering AS to analyse the electric load of Estonia. Finally frequency sensitivity factors for Estonian energy system load classes are found.</p>	
<i>Keywords:</i> Electrical load, frequency sensitivity, static load characteristics, typical electrical components, load groups, load classes, frequency sensitivity factor.	

Sisukord

Lõputöö ülesanne.....	7
Eessõna	10
Sissejuhatus.....	11
1. Ülevaade koormuste staatilistest ja dünaamilistest karakteristikutest	13
1.1. Koormuskarakteristikute leidmise meetodid.....	17
1.2. Koormuse sagedussõltuvuse põhjused.....	23
2. Koormuskomponendid ja nende sageduskarakteristikud.....	27
2.1 Elektroonika	28
2.2 Aktiivtakistusega komponendid.....	32
2.3 Mootorid	33
2.4 Valgustus.....	40
3. Koormusklassid ja nende sageduskarakteristikud	43
3.1 Kodutarbijate koormusklass.....	44
3.2 Teenindus ja avalik koormusklass	49
3.3 Tööstuse koormusklass	53
3.4 Põllumajanduse koormusklass	56
3.5 Lõplikud koormusklasside sagedustundlikkustegurid	56
Lõputöö kokkuvõte	60
Lisad	67
L.1. Koormuse koosseisu küsitlus	68

Lõputöö ülesanne

Lõputöö teema:	Eesti elektrisüsteemi põhivõrgu koormusklasside sagedussõltuvuste uurimine
Üliõpilane:	Sander Sorts, 153769AAVM
Eriala:	Elektroenergeetika
Lõputöö liik:	Magistritöö
Lõputöö juhendaja:	Dotsent Ülo Treufeldt, dotsent Jako Kilter, doktorant Madis Leinakse
Lõputöö ülesande kehtivuseaeg:	15.06.2017
Lõputöö esitamise tähtaeg:	25.05.2017

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppetooli juhataja (allkiri)

Teema põhjendus:

Koormusklasside sagedussõltuvused pakuvad suurt huvi koormuste modelleerimisel elektrisüsteemi talitluse juhtimise valdkonnas. Teema on oluline seoses Eesti põhivõrgu juhtimissüsteemide täiustamisega ja elektrisüsteemi juhtimiskvaliteedi ning töökindluse tõstmiseks. Teema on aktuaalne kuna on üheks alateemaks elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudis tehtavast laiemast uurimistööst „Eesti elektrisüsteemi ülekandevõrgu koormuste staatilised ja dünaamilised karakteristikud“. Töö tulemuseks on aktiiv- ja reaktiivkoormuste sagedussõltuvuste mudelitele adekvaatsete parameetrite väärtuste leidmine.

Töö eesmärk:

Töö eesmärgiks on uurida koormusklasside sagedussõltuvusi ja leida arvutusprogrammides PSCAD ja PSS/E kasutatavatele mudelitele sagedussõltuvuste tegurid Eesti 110 kV elektrivõrgu iseloomulikele koormusklassidele.

Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Tarbijate iseloomulike koormuskomponentide selgitamine ja nende sagedussõltuvuste leidmine kirjanduse.

Koormusrühmade määratlemine ja koormuskomponentide sisalduse ja osakaalude leidmine eri koormusrühmade jaoks.

Koormusrühmade sisalduse ja osakaalude alusel koormusklassides agregeeritud koormuste sagedussõltuvuste leidmine aktiiv- ja reaktiivkoormustele talviseks ja suviseks perioodiks.

Lähteandmed:

Lähteandmeid saab leida kirjandusallikatest ning elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudis seni selles valdkonnas tehtud uurimistööde aruannetest ning asjakohastest lõputöödest.

Uurimismeetodid:

Põhilised uurimismeetodid on kirjandusallikate analüüsi alusel vajalike lähteandmete leidmine, tarbijakoosseisude uurimisel ka küsitluste kasutamine, lõpptulemusteni jõudmiseks ka tabelarvutused Excelis.

Graafiline osa:

Graafiline osa esineb tekstijoonistena. Koormuskomponentide ja koormusklasside koosseisude ja osakaalude andmete kujutamine tabelitena. Koormusklasside aktiiv- ja reaktiivkoormuste sagedussõltuvuste graafikud.

Töö struktuur:

Loetelu töö peatükkidest koos alapunktidega. Töös on kindlasti sisukord, lõputöö ülesanne, eessõna, sissejuhatus, tulemused, kokkuvõte, kasutatud kirjandus.

1. Sissejuhatus
 - 1.1 Ülevaade koormuste staatilistest ja dünaamilistest karakteristikutest
 - 1.2 Sagedussõltuvuste leidmise meetodid
 - 1.3 Koormuste sagedussõltuvuse põhjused
2. Koormuskomponendid ja nende sageduskarakteristikud
 - 2.1 Iseloomulike koormuskomponentide määratlemine
 - 2.2 Koormuskomponentide sagedussõltuvuste tegurid kirjanduse alusel
 - 2.3 Koormuskomponentide lõplikud sagedussõltuvuste tegurid
3. Koormusklassid ja nende sagedussõltuvused
 - 3.1 Koormusklasside määratlemine
 - 3.2 Koormuskomponentide osakaalud koormusklassides

3.3 Koormusklasside sagedussõltuvuste leidmine koormuskomponentide osakaalude alusel

3.4 Tulemuste võrdlemine kirjandusest leitud sagedussõltuvustega

Kokkuvõte

Kasutatud kirjandus

Kasutatud kirjanduse allikad:

Rosin, A., Drovtar, I., Link, S., Hõimoja, H., Mölder, H, Möller, T. Tarbimise juhtimine: suurtarbijate koormusgraafikute salvestamine ning analüüs tarbimise juhtimise rakendamise võimaluste tuvastamiseks. Eleringi toimetised nr 3/2014 (8). Elering, 2014, 57 lk.

Karin, E. Kodutarbijate tüükoormusseadmete pingekarakteristikute modelleerimine tarkvaraga PSCAD. Magistritöö. TTÜ elektroenergeetika instituut, 2017, 101 lk.

Treufeldt, Ü., Leinakse, M., Salumäe, U., Sarnet, T., Meldorf, M. Eesti elektrisüsteemi ülekandevõrgu koormuste staatilised ja dünaamilised karakteristikud, Projekti I etapi lõpparuanne, TTÜ elektroenergeetika instituut, 2015, 305 lk.

Treufeldt, Ü., Meldorf, M., Leinakse, M., Sarnet, T., Salumäe, U. Eesti elektrisüsteemi ülekandevõrgu koormuste staatilised ja dünaamilised karakteristikud, Projekti II etapi lõpparuanne, TTÜ elektroenergeetika instituut, 2016, 180 lk.

Kilter, J., Meldorf, M. Elektrisüsteemi stabiilsus. Tallinn: TTÜ kirjastus, 2011.

Lõputöö kosultandid:

Töö etapid ja ajakava:

1. Sissejuhatus	20.03
2. Koormuskomponendid ja nende sageduskarakteristikud	10.04
3. Koormusklassid ja nende sagedussõltuvused	24.04
4. Lõputöö vormistamine	15.05
5. Töö lõplik valmimine	24.05

Eessõna

Käesolev lõputöö on Tallinna Tehnikaülikooli ja Elering AS koostöös läbi viidava projekti „Eesti elektrisüsteemi ülekandevõrgu koormuste staatilised ja dünaamilised karakteristikud” koosseisu üks osadest. Lõputöö koostamisel olid suureks abiks juhendajad Ülo Treufeldt ja Madis Leinakse, kes pakkusid tuge terve kirjutamise aja. Täna soovin veel Jako Kilterit töö analüüsi kontrollil.

Lõpetaja: Sander Sorts

Kontakt: Akadeemia tee 60-31, Tallinn

E-mail: sander.sorts@gmail.com

Töökoht: Elering AS, liitumiste tehnik

Sissejuhatus

Elektrisüsteem on üks suur talituslik kogum, mis koosneb elektrit tarbivatest ja tootvatest üksustest ning nende vahelisest elektrivõrgust. See kogum on alati ajas muutuv, seda oma parameetrite ja käitumises. Energeetika ühe kõige tähtsama nõude kohaselt on energiasüsteemi stabiilseks olekuks vaja tasakaalu elektri tootmise ja tarbimise vahel. Kuna tarbimist on suurtes süsteemides raske mõjutada, siis seda tähtsamaks muutub energiasüsteemi koormus. Seetõttu on vajalik aru saada koormuse käitumisest ning selle mõjust ülejäänud energeetilisele kogumile. Koormuse talitluse saab jagada kaheks: püsi- ja siirdetalitluseks. Siirdetalitlust iseloomustavad parameetrite kiire muutumine suurtes piirides tavaliselt avariiolukordades. Püsitalitlust iseloomustab parameetrite aeglane ja väikestes piirides muutumine, kus pikema aja jooksul võib parameetrid lugeda konstantseks.

Eesti elektrivõrk kuulub IPS/UPS sünkroonlasse, mille installeeritud võimsuseks on ligikaudu 300 GW. Eesti tipukoormus jääb üldjuhul alla 2000 MW ehk moodustab sünkroonlast väga väikese osa. Seega ei avalda Eesti tarbimise ja tootmise muutused märgatavat mõju süsteemi sagedusele. Probleemid võivad tekkida Eesti eraldumisel IPS/UPS sünkroonlast. Seega on juba täna vajalik täpsem süsteemi parameetri sageduse tundmine, mille kõrvalekalded toovad kaasa koormuse muutusi. Selle seaduspärasuse mõistmiseks kasutatakse koormuse mudeleid. Seetõttu on korrektse koormuse mudeli valik elektrisüsteemi osas äärmiselt tähtis. Liiga pessimistlik mudel viib liigse kapitali kulutamisele ning liiga optimistlik mudel võib osutada ohtlikuks süsteemi jätkusuutlikuse koha pealt. Maailmas enim kasutatust leidev koormusmudeli liik on konstantse võimsuse tüüpi, kus aktiiv- ja reaktiivenergia osakaalud jäetakse samaks. Tänapäeval on see vaade hakanud tasapisi muutuma, kus koormuse mudeldamisel hakatakse arvesse võtma ka aktiiv- ja reaktiivvõimsuse pinge- ja sagedussõltuvusi. Selle kirjeldamiseks saab kasutada pinge ja sageduse staatilisi- ja dünaamilisi karakteristikuid.

Töös keskendutakse sageduse staatilisi karakteristikute uurimisele. Nende leidmiseks on hetkel kasutusel kaks eri tüüpi meetodikat: mõõtmistel põhinev või varasematel uuringutel ja allikate infol põhinev tuletuskäik. Mõõtmiste puhul saadavad tulemused on täpsemad, kuid vajalike tingimuste saavutamine ehk piisavalt suurte häiringute loomine süsteemis tähendab selle meetodi küllaltki väikest õnnestumise võimalust ning suuri kulusid. Infoallikate põhjal väärtuste tuletamine on võimalik teostada ükskõik mis elektrisüsteemile ning seda meetodikat kasutatakse ka selle töö koosseisus. Selle meetodika sammud koosnevad koormuse grupeerimisest ning osakaalude leidmisest. Alt ülesse meetodil liigutakse üksiku komponendi

osakaalust kogu koormusest kuni sõlmekoormuseni välja. Üksikud komponendid jagatakse tarbijarühmade vahel ära, millel on teatud sarnasused tarbimisharjumuste ja funktsioonide osas. Kõige raskemaks aspektiks selles meetodis on osakaalude tuvastamine koormusklassides kuna koormuklassi kompositsioon on mõjutatud nii ajast kui ka ruumist.

Selle töö eesmärgiks oli uurida ja leida defineeritud koormusklassidele sagedustundlikkustegurid. Leitud tegureid on võimalik kasutada koormuse modelleerimise programmides. Lõputöö esimene osa keskendub koormuse sagedussõltuvuste põhjustele ning selle uurimismeetoditele. Kirjeldatakse erinevate elektriliste komponentide sageduse sõltuvust ning nende grupeerimise võimalusi. Tuuakse välja koormuskarakteristikute teoreetilised alused ning nende leidmise meetodika.

Teises peatükis käsitletakse üksikute komponentide sageduskarakteristikute leidmist eelnevate teadustööde ja artiklite põhjal. Kaheks põhiliseks tulemiks on iga komponendi sagedustundlikkustegur ning seejärel tema osakaalu paika panek. Seejärel grupeeritakse üksikud seadmed rühmadesse: elektroonika, aktiivtakistusega, mootorid ning valgustus. Grupeerimine on vajalik loogilise süsteemi loomiseks ning teatud määral lihtsustuste sisse toomiseks.

Kolmandas peatükis koostatakse teise peatüki andmete ning kirjandusest leitud osakaalude abil koormusklasside sagedustundlikkustegurid. Vastavalt alginfole ning leitud teguritele on võimalik kirjanduse allikate abil neid võrrelda ja analüüsida. Lõpuks antakse kriitiline hinnang leitud tulemustele ning tuuakse välja selle meetodika nõrgad kohad.

1. Ülevaade koormuste staatilistest ja dünaamilistest karakteristikutest

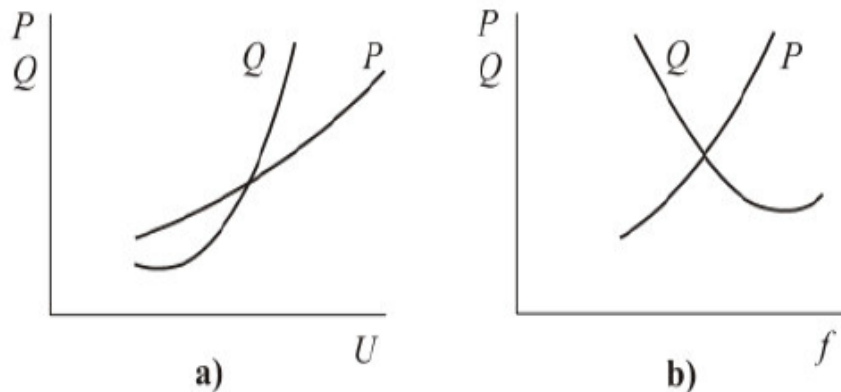
Koormus võib definitsiooni kohaselt olla üks element või elementide kooslus, mis on elektrivõrguga ühendatud. Elektrivõrgu talitus on seotud koormuse muutumisega. Elektrisüsteemi talitus tähendab elektrisüsteemi seisundi ajas muutumist, kus toimub pidev energia genereerimise ja tarbimise protsess. Elektrisüsteemis peab iga ajahetk valitsema tasakaal tarbitava ja genereeritava võimsuse vahel. Tarbimise mõjutamine süsteemi koha pealt on väga keeruline, seetõttu toimub nii elektrienergia ülekanne kui ka tootmine elektrisüsteemi koormust jälgides. Koormuse paremaks mõistmiseks on vajalik teadmine, mis seda mõjutab. Koormuse muutumist ajas põhjustavad temperatuuri muutused, inimeste tarbimisharjumused ning ka tehnoloogia areng. Samuti sõltub koormus süsteemi parameetritest pingest ja sagedusest ning seda suhet iseloomustavad koormuse staatilised ja dünaamilised graafikud. Eraldi tuleb käsitleda aktiiv- ja reaktiivkoormusi kuna ka nende sõltuvus pingest ja sageduse muutustele on erinev. Eestis elektrivõrgu talitluse koha pealt vaadatakse koormusi sõlmekoormustena. Hetkel on Eesti elektrivõrgus selliseid sõlmesid kuskil 195. Sinna sõlme on ühendatud kõigi selles piirkonnas individuaalsete seadmete summaarne aktiiv- ja reaktiivkoormus ehk tarbijate summaarne agregeeritud koormus, millele lisanduvad veel võimsuskao trafodes ning liinides. Koormussõlmedeks on põhivõrgu 110 kV või kõrgema pingega alajaamad, kuhu on agregeeritud nende poolt toidetava jaotusvõrgu summaarne koormus. [1] [2]

Dünaamilisi karakteristikuid kasutatakse süsteemi siirdetalitluse puhul, kus süsteemi parameetrite muutus on piisavalt suur, näiteks lühise tagajärjel. Dünaamilist karakteristikut kirjeldatakse tavaliselt diferentsiaalvõrranditega ning kasutatakse näiteks pingestabiilsus ja süsteemide vahelise võnkumiste uuringute juures. Eriti mõjutavad süsteemi dünaamilisi karakteristikuid asünkroonmootorid nende suure osakaalu ja keeruka iseloomuga pingestabiilsuse ja sagedustundliku dünaamika tõttu. Asünkroonmootorite dünaamiliste mudelite puudumist loetakse ka üheks suuremaks põhjuseks, miks reaalsed ja simulatsiooni tulemused selles valdkonnas tihti palju erinevad. Sellest töös me dünaamilisi karakteristikuid lähemalt ei vaata ega teemasse süvitsi ei lähe. [3]

Staatilisi karakteristikuid kasutatakse süsteemi normaaltalitluse puhul, kus süsteemi parameetrite muutus on piisavalt väike. Staatilise karakteristikuga kirjeldatakse koormuse

hetkelist muutumist pärast pinget või sageduse muutumist, seega ei ole võimalik sellist tüüpi karakteristikuga kirjeldada koormuse muutumist siirdeprotsesside käigus. Staatilist karakteristikut kasutatakse ka koormuse modelleerimisel, mille pinget muutusele reageering on liiga kiire mõõteseadmetele registreerimiseks või kui siirdeprotsessi kirjeldamine ei ole nii tähtis kui pinget muutumisele järgnev püsitalitus. [4]

Matemaatiliselt saab staatilist koormuse karakteristikut kirjeldada funktsioonina elektrisüsteemi pingest ja sagedusest. Fikseeritud pinget korral saadakse seosed $P(f)$ ja $Q(f)$, mida nimetatakse koormuse staatiliseks karakteristikuks sageduse järgi. Koormuste staatiliste karakteristikute tüüpilised kõverad on joonisel 1.1. Joonisel on näha, et sageduse kasvades reaktiivvõimsus langeb. [2]



Joonis 1.1 Koormuse staatilised karakteristikud: a) pinget järgi; b) sageduse järgi [5]

Kui vaadelda olukorda, kus pinget ja sagedus ei erine oluliselt nimiväärtustest, saab arvutustesse sisse viia mõningad lihtsustused ja staatilised karakteristikud antud piirkonnas lineariseerida. Koormuse staatilise karakteristikute puutuja tõusu nimetatakse vastavalt aktiiv ja reaktiivkoormuse pinget- ja sagedustundlikkuseks. Koormuse sagedustundlikkuse tegurid iseloomustavad aktiiv- ja reaktiivenergia muutumist sageduse muutumisel. Sageduskarakteristikute suhtühikute leidmiseks kasutatakse valemeid: [6]

$$k_{Pf} = \frac{\frac{\Delta P}{P_0}}{\frac{\Delta f}{f_0}} \quad (1.1)$$

$$k_{Qf} = \frac{\frac{\Delta Q}{Q_0}}{\frac{\Delta f}{f_0}} \quad (1.2)$$

kus P_0, Q_0, U_0, f_0 – suurused nimitingimuste juures;

$\Delta P, \Delta Q, \Delta U_0, \Delta f_0$ – suuruste erinevus nimiväärtusest. [2]

Selles töös on sagedustundlikkuse tegurid leitud kirjanduse allikate põhjal. Teadustööde mahu põhjal tuleb ka välja, et sagedustundlikkuse uurimine võrreldes pingetundlikkuse uurimisega on teisejärguline. Siit edasi minnes tuleb lõpuks jõuda sõlmekoormuse sagedustundlikkuse teguriteni. Kuna iga elektritarviti sõltub sagedusest erinevalt, siis oleks vaja leida kõikide seadmete osakaalud summaarsest koormusest ning need siduda seadme sagedusteguriga. Reaalselt ei ole võimalik sellist uuringut teha, seetõttu lähenetakse olukorrale grupeerimise teel. Sõlmele järgneb suuruselt koormusklass, mis sisaldab mingeid tüüpilisi komponente ehk tarbimisseadmeid. Iga klassi sageduskarakteristikud kujunevad vastavalt erinevatele koormuskomponentide sisaldusele ning nende osakaalule. Sama tuletamis loogikat kasutatakse ka koormusrühmade arvutustes, kus vajalikuks infoks on erinevate seadmete osakaalud kogu koormusest. Tulemuste täpsust mõjutavad andmete puudus, erinevate piirkondade seadmete kasutuvus ning ka seadmete osakaalu muutmine ajas. Selles töös uuritakse nelja erinevat koormusklassi: kodutarbijad, avalik, tööstus ja põllumajandus. Samuti on töö lihtsustamiseks grupeeritud elektrilised komponendid nelja erinevasse seadmete gruppi: elektroonika, mootorid, aktiivtakistusega ning valgustus.

Koormusklassi sagedusteguri leidmine käib valemiga: [7]

$$P = P_n \left(\frac{U}{U_n} \right)^{K_{pu}} (1 + K_{pf} \Delta f) \quad (1.3)$$

$$Q = Q_n \left(\frac{U}{U_n} \right)^{K_{qu}} (1 + K_{qf} \Delta f) \quad (1.4)$$

kus P_n ja Q_n – vastavalt koormuse nimiaktiiv- ja reaktiivvõimsus;

U/U_n – nimipinge ja tegeliku pinge suhe;

$\Delta f = f - f_n / f_n$ – sageduse suhteline erinevus nimisagedusest.

Mudelite koostamisel kasutame ka kahte lihtsustust: [7]

1. jäetakse arvestamata pinge muutustega ning loetakse pinge konstantseks nimipingega:

$$U = U_n;$$

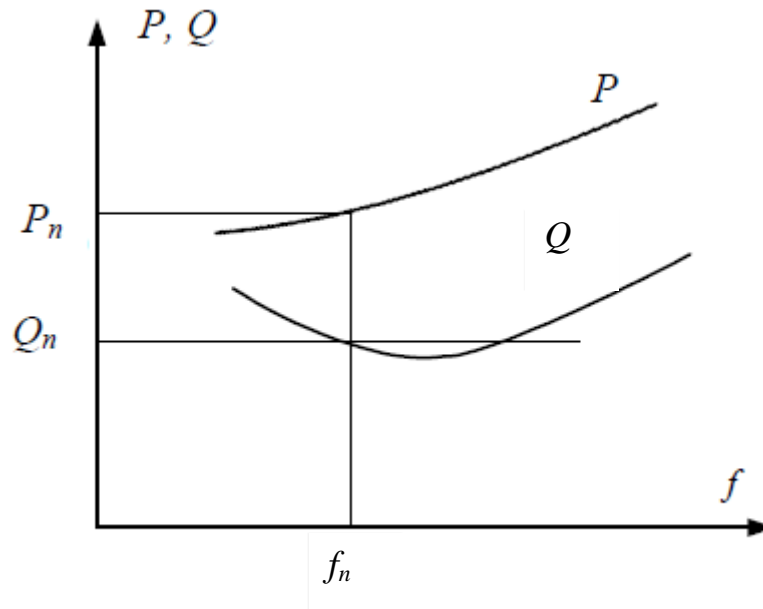
2. aktiiv- ja reaktiivkoormuste loetakse lineaarseteks.

Esimese lihtsustuse tulemusel saavad mudelid lineaarse kuju: [7]

$$P = P_n (1 + K_{pf} \Delta f) \quad (1.5)$$

$$Q = Q_n(1 + K_{qf}\Delta f) \quad (1.6)$$

Teise lihtsustuse põhjuseks on sageduse suhteline stabiilsus ning sageduse kõrvalekallete väikene ulatus. Selle tõttu on võimalik sageduskarakteristikud (vt joon. 1.2) nimisageduse juures lineariseerida. [7]



Joonis 1.2 Agregeeritud koormuse tüüpilised sageduskarakteristikud [7]

Järgmiseks on vajalikud sõlme agregeeritud koormusklasside osakaalud, siis nende alusel leitakse kogu agregeeritud aktiiv- ja reaktiivkoormuse sagedussõltuvuse mudelid. Andmete puudumisel on võimalik ka reaktiivkoormuste osakaalud võrdsustada aktiivkoormuse osakaaludega, kuid see tähendab tulemuste suuremat ebatäpsust. Koormusklasside osakaalud tähistatakse vastavalt tüüpgruppide numbritele c_1, c_2, \dots, c_4 , siis avaldub agregeeritud aktiivkoormus valemiga: [7]

$$P_{\Sigma} = P_{\Sigma n}(1 + K_{pf}\Delta f) = \sum_{i=1}^4 c_i P_{\Sigma n} (1 + K_{pfi}\Delta f) = P_{\Sigma n}(1 + \Delta f \sum_{i=1}^4 c_i K_{pfi}) \quad (1.7)$$

$$Q_{\Sigma} = Q_{\Sigma n}(1 + K_{qf}\Delta f) = \sum_{i=1}^4 c_i Q_{\Sigma n} (1 + K_{qfi}\Delta f) = Q_{\Sigma n}(1 + \Delta f \sum_{i=1}^4 c_i K_{qfi}) \quad (1.8)$$

Summaarse agregeeritud aktiiv- ja reaktiivkoormuse sagedustundlikkuse tegurid avalduvad valemitega: [7]

$$K_{pf} = \sum_{i=1}^4 c_i K_{pfi}; K_{qf} = \sum_{i=1}^4 c_i K_{qfi} \quad (1.9)$$

Kui koormusklasside osakaalud on antud protsentides, siis võtavad valemid kuju: [7]

$$K_{pf} = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^4 c_i K_{pfi}; K_{qf} = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^4 c_i K_{qfi} \quad (1.10)$$

Arvestada tuleks veel tulemuste täpsusega, mudeli täiendamiseks tuleks kirjandusallikate väärtusi täiendada reaalsete mõõtetulemustega Eesti elektrisüsteemi põhivõrgus. Reaalsete tulemuste saamisel seisab ees mitu probleemi, näiteks on elektrisüsteemi normaaloludes sageduse muutused väikesed ning tulemuste saamiseks tuleks mõõta kaua aega. Sama probleem tuuakse välja ka mitmes kirjanduse allikas. Näiteks allikas [8] tuuakse välja, et koormuse sagedussõltuvuse mõõtmiste tulemusi on palju raskem saada, kui pingesõltuvuse mõõtmiste väärtusi. Mõõtmise tegemiseks on vaja luua süsteemiga eraldatud osa ehk saartalitlus, kus oleks võimalik sagedust vajalikus vahemikus muuta. Õigete tulemuste saamiseks tuleb veel eristada koormuse muutus pinge ja sageduse pärast, paljudes uuringutes seda ei tehta ning seetõttu on tulemused mitte korrektsed. Kui üldse info puudub sagedussõltuvuse juures, siis tuleks sagedustundlikkust koormusmudelil mitte arvestada ning vastavad sagedustundlikkustegurid tuleks seada nulliks. Arvestades, et valdav osa PSCAD tarkvara simulatsioone teostatakse konstantse sageduse tingimustes ning valdavalt kasutatakse suurema osa elektrivõrgu modelleerimiseks elektrivõrgu ekvivalente ei ole simulatsioonides võimalik koormusmudelitega teostada sageduse muutusi, mistõttu sagedustundlikkuse mitte arvestamine ei põhjusta olulist viga valdavas osas simulatsioonides. Samuti kasutab Elering AS püsitalitluse arvutustes konstantse võimsusega koormusi, kus aktiiv- ja reaktiivenergia väärtused jäävad paika. [2]

1.1. Koormuskarakteristikute leidmise meetodid

Üheks suuremaks ebatäpsuse põhjustajaks elektrisüsteemi modelleerimisel peetakse koormuse modelleerimist. Ebatäpsed koormuse mudelid võivad luua ebatäpseid tulemusi ja vähendada simulatsioonide ja analüüside usaldusväärsust. Liiga optimistlikud mudelid võivad viia elektrisüsteemi vigasele ülesehitamisele, mis muudab elektrivõrgu ebastabiilseks. Liiga pessimistlikud mudelid võivad viia elektrisüsteemi üledimensioneerimiseni, kus võrguettevõtja kapital seisab n-ö rauas kinni. Reaalsuses eelistatakse rohkem pessimistlikke mudeleid kuna need on ohutumad elektrisüsteemi toimimisele. Peamised tegurid, mis koormuste modelleerimise keeruliseks teevad [4]:

- 1) Koormuste muutumine on juhuslik ja sama koormuse kohta võib registreerida väga erinevad andmeid olenevalt kellaajast, päevast ja ka hooajast.

- 2) Ebalineaarne ja pausidega talitus, mida kutsub esile paljude seadmete võrgust välja lülitumine teatud dünaamiliste protsesside tulemusena või ebastandardsete pingete tõttu.
- 3) Täpsete ja korrektsete tarbimisandmete puudus.
- 4) Raskused erinevate koormusseadmete osakaalu välja selgitamisel ja hindamisel.

Kõrgepingevõrkudes on enamasti sõlmekoormuse näol tegemist seguga erinevat tüüpi koormusseadmetest ja tarbijaklassidest. Seetõttu kasutatakse koormuse kirjeldamisel üldjuhul ainult lihtsamaid mudeleid (nagu eksponentsiaalne koormusmudel). Madalpingevõrkudes on enamasti vaja kasutada keerulisemaid koormusmudeleid, sest nõnda on võimalik saada täpsemat informatsiooni koormuse käitumise kohta rikke olukordades. [4] [9]

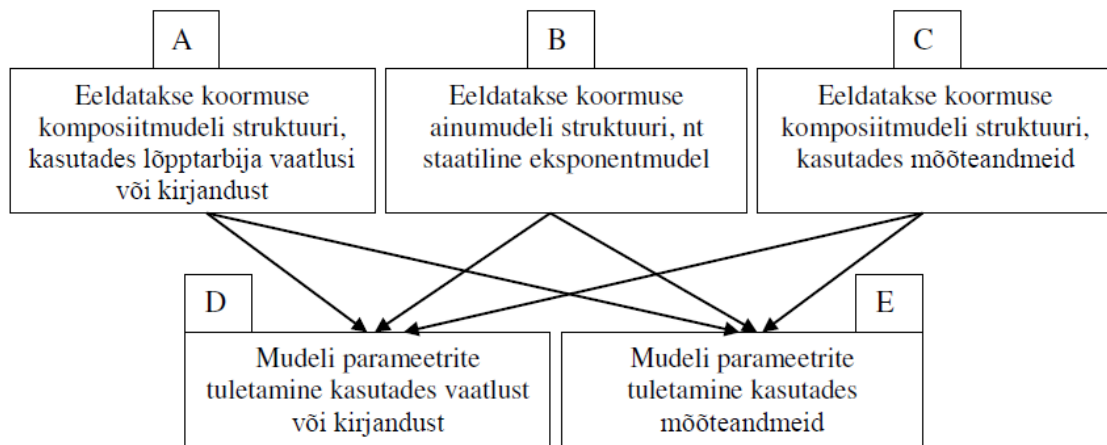
Ülioluline informatsioon koormuse modelleerimisel on koormuse struktuuri iseloomustus, mis on kogutud erinevate ajaperioodide nagu näiteks kuude ja aastaegade kohta. Info kogutakse mõõtmiste, tarbijauuringute või kirjandusallikate kaudu. Pärast andmete analüüsimist tuleb valida kõige sobivam koormusmudel, mis võib koosneda erinevatest mudelitest ja lõpuks on vaja tuletada mudeli parameetrid. Joonisel 1.3 on näidatud üldist koormusmudeli kujundamise protsessi, mis koosneb koormusmudeli struktuuri valikust ning mudeli parameetrite tuletamisest. Komposiitmudel koosneb staatilistest ja dünaamilistest mudelitest. Reaalses elus kasutatakse ligikaudu 50% juhtudest mõõteandmeid ning 40% ulatuses koormuskoosseisude uuringuid või kirjandust. Samuti suuremat kasutust leiavad ühekomponendilised mudelid, seetõttu leiavad enim kasutust BE ja BD lähenemisviisid.

Vastavalt joonisele 1.3 on võimalik välja tuua kuus erinevat modelleerimisprotseduuri: [2]

- CE protseduuri kasutatakse liitmudeli korral, kus on rohkem kui kaks komponenti. Näiteks eksponentmudel ja komposiitmudel või ZIP mudel ja komposiitmudel. Kui koormusmudeli struktuur on kindlaks määratud mingil ajalõigul mõõdetud andmete alusel, tuleb mudelite parameetrid tuletada pikaajalisel mõõtmisel saadud andmete aegridade põhjal.
- CD protseduuri kasutatakse samuti mitmest komponendist koosneva mudeli korral. Kui koormusmudeli struktuur on kindlaks määratud mingil ajalõigul mõõdetud andmete alusel, tuleb mudelite parameetrid tuletada kirjanduse allikate põhjal või lõpptarbija vaatlusest saadud teadmiste põhjal.
- AE protseduur on nagu kaks eelnevat, kus seda kohaldatakse mitmest komponendist koosnevale koormuse mudelile. Kui mudeli struktuur on kindlaks määratud

lõpptarbijate vaatluse või kirjanduse alusel, siis mudeli parameetrid tuletatakse pikaajaliste mõõtmistulemuste järgi.

- AD lähenemisviis on teistsugune, seda kasutatakse mitmest komponendist koosnevale koormuse mudelile. Kui mudeli struktuur on selgunud kirjanduse või lõpptarbijate vaatluse alusel, siis mudeli parameetrid tuletatakse samuti kirjanduse või lõpptarbija vaatluse alusel.
- BE protseduuril rakendatakse ainult üht mudeli komponenti, näiteks ainult ZIP mudelit. Mudeli ülesehitust ei pea sel juhul eraldi määrama kuna tegu on vaid ühe komponendiga. Mudeli parameetrid tuletatakse kestevmõõtmiste admete põhjal.
- BD lähenemine on ühe komponendiga mudeli loomiseks ning seda kasutatakse ka selles uurimustöös. Mudeli ülesehitus on eelnevalt määratud, mudeli parameetrid tuletatakse kirjanduse või lõpptarbija vaatluse alusel.



Joonis 1.3 Koormuskarakteristikute mudelite koostamise üldskeem [2]

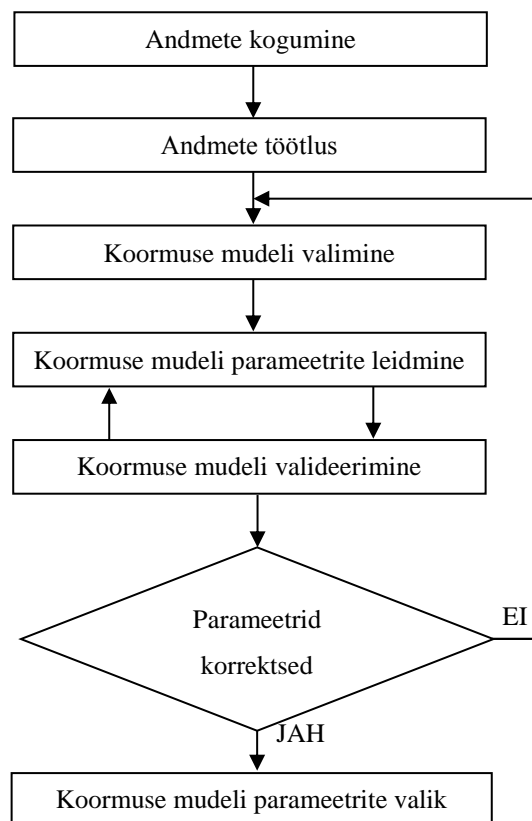
Mõõteandmete kasutuse puudus seisneb süsteemi küllaltki stabiilsest seisust, kus pinge ja sageduse suured kõrvalekalded on harva esinevad juhtumid. Vajalike andmete ja info kogumiseks tahtlikult tekitatud häiringuid saab kutsuda esile ainult väga piiratud ajas ja ruumis, mis raskendab korrektse mudeli valikut veelgi. Korrektse mudeli valimisel on põhilisteks probleemideks: [2]

- 1) Sobiva mudeli identifitseerimine, mis esindaks antud koormuse staatilisi ja dünaamilisi omadusi.
- 2) Staatiliste ja dünaamiliste komponentide parameetrite määramine

Peamiselt on kasutusel kaks meetodit, milleks on komponendipõhine ja mõõtmistel põhinev meetod. [9] Esmalt võtame vaatluse alla mõõtmisel põhineva meetodi. Tegemist on "ülevalt

alla" meetodiga, kus modelleerimiseks kasutatakse mõõteandmeid alajaamades ja fiidritel toimunud häiringute kohta. Staatilised ja dünaamilised protsessid on võrgus salvestatud ja nende põhjal koostatakse koormusmudel. Usaldusväärse mudeli koostamiseks on siiski esmalt vaja koostada hüpoteetiline koormusmudeli struktuur. Kui süsteemis toimub rike, tuvastatakse see mõõteseadmete poolt ja salvestatakse, kuid mõõteandmeid kogutakse ka tavatalitluse kohta. [4] [9]

Mudeli parameetrid estimeeritakse sobitades mõõdetud andmed eeldatavasse mudelisse kasutades parameetri tuvastus ja sobituskõvera meetodeid. Mudeli koostamine hõlmab sobiva matemaatilise mudeli ja koormusmudeli parameetrite identifitseerimist, et luua koormuse dünaamilisele talitlusele sarnane mudel. Andmed selle jaoks saadakse, kui uuritakse aktiiv ja reaktiivvõimsuse muutumiste suhet pingele või sageduse muutustesse. Meetodi loogikaahel koosneb andmete kogumisest, nende töötlemisest ja vajalike muudatuste tegemisest lõppmudelis kuni tulemused on adekvaatsed ning on toodud joonisel 1.4. [4] [9]



Joonis 1.4 Mõõtmisel põhineva meetodi struktuur [4]

Mõõtmisel põhineva meetodi eelised ja puudused: [4]

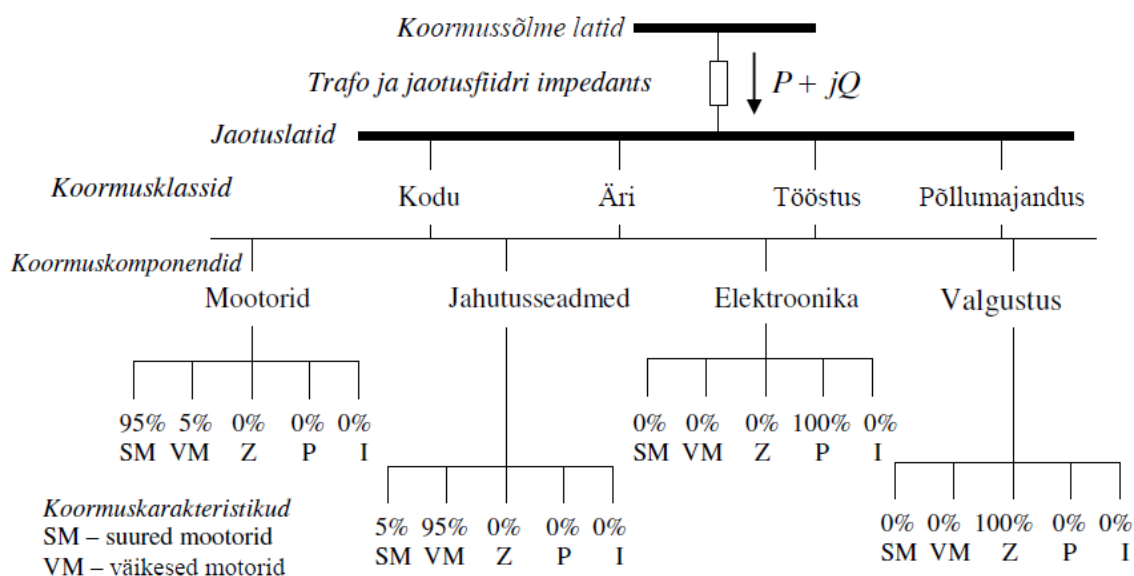
Eelised:

- 1) Lihtsam kui komponendipõhine meetod kuna kasutab otseseid mõõtmisandmeid, seega on täpsem mudeldamis viis;
- 2) On võimalik jäädvustada ka ajutisi muutusi koormuses kui mõõtmisperiood on piisavalt pikk;
- 3) Saab kasutada iga koormuse korral.

Puudused:

- 1) Vajab täpse mudeli saamiseks mõõtmisi piisavalt suure süsteemi muutuse korral (pinge korral peab muutus olema vähemalt 20% nominaal väärtusest). Kuna suuri süsteemi häiringuid ei saa ise tekitada, peavad mõõtmisseadmed küllatki kaua mõõtma, et saada vajalikke tulemusi;
- 2) Ei suuda arvesse võtta koormuse koosseisu muutusi, kui ei toimu pidev mõõtmine.

Komponendi põhine meetod seisneb alt üles modelleerimises, kus algandmetena kasutatakse andmeid, mis kirjeldavad tarbijarühmasid, mis on mingisse sõlme ühendatud; teadaolevat komponentide struktuuri iga tarbijarühma kohta ja tüüpkarakteristikud iga tarbijarühma või koormusseadme kohta. Selles uurimustöös kasutan ka komponendipõhist meetodit. [9]



Joonis 1.5 *Komponendipõhise meetodi struktuur [2]*

Kõigepealt tuleb identifitseerida tarbijarühmad. Seejärel eristada tüüpkoormusseadmed komponentide põhised nendes tarbijarühmades ja lõpuks määrata komponentide protsentuaalsed osakaalud üldkoormuskarakteristikus. Kõige keerulisem on koormusseadmete osakaalude määramine, mis üldiselt on küllatki ajamahukas protsess. Seetõttu kasutatakse

lihtsamat lähenemist, mis vajab alginformatsiooniks iga tarbijarühma tüüpkoormus struktuuri (kui palju iga seadme grupp kogu koormusest tarbib) ja tarbijarühmade kooslust igas sõlmes. Joonisel 1.5 on kujutatud komponendipõhise modelleerimise struktuurinäidis. [4] [9]

Enim rakendust leidnud lähenemine on kasutada mudeleid, mis on jagatud viide üldisesse koormus kategooriasse, mis põhinevad ainult elektrilistel karakteristikutel, mitte kasutuseesmärgil. Iga komponent omab mingit teatud kindlat staatilist ja dünaamilist karakteristikut. Karakteristikud hõlmavad staatilisi mudeleid (konstante takistus ehk Z , konstantne vool ehk I ja konstantne võimsus ehk P) ja dünaamilisi (kahte tüüpi elektrimootor) mudeleid. Näiteks aktiivtakistusega koormuskomponendid (elektriküte, hõõgniit lambid jms.) modelleeritakse kui konstantse takistusega koormused, inverteriga koormused modelleeritakse kui konstantse võimsusega koormused senikaua kui pingelang koormusel ei ole märkimisväärne. Korrekse koondkoormusmudeli saamiseks tuleb keskpinge trafod ja reaktiivvõimsuse kompenseerimisseadmed samuti lisada mudelisse. [9]

Komponendipõhise meetodi eelised ja puudused: [1] [9]

Eelised:

- 1) Võimaldab luua paremaid seoseid kasutatud mudelite karakteristikute ja seadmete füüsikaliste karakteristikute vahel
- 2) Modelleerimiseks saab kasutada erinevate alajaamade tarbimisandmeid;
- 3) Võimalik lihtsalt rakendada komposiitmudelitele;
- 4) Ei nõua mõõtmiste tegemist, kui koormuse struktuur ja koosseis on teada;
- 5) Võimalik rakendada erinevatele süsteemidele;
- 6) Pakub paindlikust tarbimise juhtimiseks ja võimaluse identifitseerida komponendid, mida on võimalik juhtida;
- 7) Lihtsustab uuringuid süsteemi tundlikkuse hindamisel koormuse struktuuri muutlikkuse suhtes.

Puudused:

- 1) Komponendipõhised mudelid eeldavad, et koormuste karakteristikud ja struktuur ei muutu aja jooksul. Kuigi tuleks märkida, et sarnased puudujäägid on ka mõõtmistel põhineval mudelil, kus ühte tüüpi mudel on sobiv ainult kindlale ajale ja kohale, kus vastavad mõõtmised olid tehtud.

- 2) Kui ühe alajaama kohta tehtud mudel on koostatud, ei ole antud mudelit mõistlik kasutada mõne teise alajaama mudeli kirjeldamiseks. Ehk mudel ei ole ülekantav.
- 3) Üldiselt on igasuguste tarbimisandmete kogumised suuremahulised, et tagada piisav andmete kvaliteet ja kvantiteet.
- 4) Mõne uue koormustüübi lisandumine, mis ei ole varasemalt defineeritud, tekitab mudelis vea.
- 5) Isegi kui koormuste osakaalud on õiged, võivad nende parameetrid siiski oluliselt erineda. Näiteks väiksemate elektrimootorite inertskonstant.
- 6) Põhivõrgu ettevõtetel on seda meetodit raske rakendada, sest üldjuhul täpsed andmed koormuse ülesehituse kohta neil puuduvad.

1.2. Koormuse sagedussõltuvuse põhjused

Eelnevates peatükkides sai juba räägitud, et aktiiv- ja reaktiivkoormuse sagedustundlikkus on erinev, seetõttu eristatakse ka kahte tüüpi sagedustundlikusetegureid k_{pf} ja k_{qf} . Sagedusest sõltuvuse põhjus tuleneb reaktiivtakistusest. Puhtalt aktiivtakistust omavad komponendid loetakse sagedusest sõltumatuks. Ainult väga suuritel sageduse muutuste korral võivad muutuda sellise koormuse võimsus. Reaktiivtakistus esineb enamustel elektriseadmetel ning eristatakse kahte tüüpi, kas induktiivset või mahtuvuslikku. Induktiivse reaktiivkoormuse Q_L avaldub valemiga: [7]

$$Q_L(f) = \sqrt{3}U_n I_L = \frac{U_n^2}{2\pi f L} \quad (1.11)$$

kus U_n – nimipinge;

I_L ja X_L – induktiivvool ja induktiivtakistus;

L – induktiivsus.

Seega on lineaarsete induktiivtakistuse korral reaktiivkoormus pöördvõrdeline sagedusega.

Mahtuvuse korral avaldub mahtuvuslik koormus valemiga: [7]

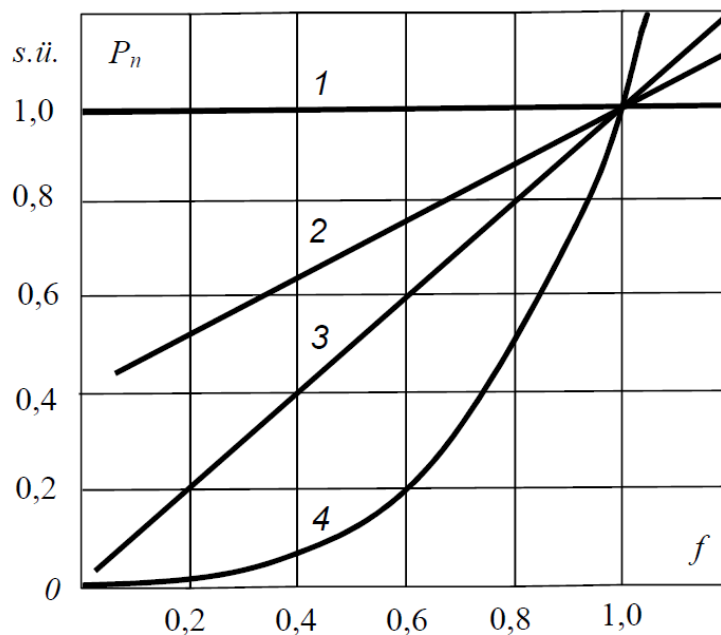
$$Q_C(f) = \sqrt{3}U_n I_C = 2\pi f C U_n^2 \quad (1.12)$$

Seega on mahtuvuslik reaktiivkoormus võrdeline sagedusega. Suuremal osal reaalses seadmetes esineb kõrvuti aktiivtakistusega ka reaktiivtakistus, siis selliste seadmete sagedusest sõltub näivvõimsus järgnevalt: [7]

$$\underline{S}(f) = P(f) + jQ(f) = \frac{U_n^2}{R - j(2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC})} \quad (1.13)$$

Aktiivvõimsuse sõltuvust sagedusest põhjustab sagedusest sõltuv reaktiivvõimsus, mis omakorda tekitab aktiivtakistustel sagedusest sõltuvaid aktiivvõimsuskadusid. Võrgukaod võivad sageduse muutumisest suureneka kui ka väheneda. Sageduse sõltuvuse tulemuste leidmine muutub keerulisemaks, kui arvestada ka mittelineaarsete induktiivsustega. Tüüpilisteks mittelineaarseteks induktiivsust sisaldavateks seadmeteks võib lugeda trafosid, mittelineaarset elektroonikat, asünkroonmootoreid ning sünkroonmasinaid. Selliste seadmete sagedustundlikkus on oluliselt mittelineaarne ja sõltub konkreetse seadme omadustest. Näitena võib siin välja tuua, et elektroonika puhul muutub tarbitav aktiivvõimsus ligikaudu 0,5...0,8% sageduse muutumisel 1% võrra. Joonisel 1.6 on toodud välja erinevate seadmete sageduskarakteristikud: [7]

- kus
- 1 – hõõglambid;
 - 2 – luminofoorlambid;
 - 3 – kolbpumbad, kompressorid, kuulveskid, metallitööpingid;
 - 4 – tsentrifugaalpumbad ja ventilaatorid.



Joonis 1.6 Erinevate komponentide aktiivkoormuse sõltuvus sagedusest [7]

Väga suure osa elektritarbimisest moodustavad elektrimootorid. Kõigi mootorite juures on asünkroonmootorite osakaal kuskil 90% juures. [10] Suurem osakaal mootoritel on tööstuses ja põllumajanduses, kus kodutarbijate juures võib leida pisemaid elektrimootoreid. Asünkroonmootorid ongi peamised agregeeritud aktiivkoormuse sagedusest sõltuvuse

põhjustajad. Samuti reageerivad mootorid pingele ja sageduse muutustele väga kiiresti, seetõttu on nad süsteemi stabiilsuse koha pealt väga tähtsal kohal. Mootorite sagedussõltuvuse suurus sõltub mootori momendi-kiiruskarakteristiku tõusust, mis omakorda on seotud mootori poolt käitatavate seadmetega. Asünkroonmootori koormuse valem avaldub kujul: [2]

$$P_M = \tau_M \omega_M \quad (1.14)$$

kus τ_M – mootori pöördemoment;
 ω_M – mootori nurkkiirus.

Kuna mootori pöördemoment on sõltuvuses pöörlemiskiirusest ja mehaanilise koormuse iseloomust, siis on ka pöördemoment funktsioon mootori pöörlemiskiirusest $\tau_M = \tau_M(\omega_M)$. [2] Koormuse suurenemisega suureneb ka mootori libistus s , mis näitab mootori pöörlemiskiiruse erinevust sünkroonkiirusest n_s ja avaldub valemiga: [10]

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} \quad (1.15)$$

Kuna mootori sünkroonkiirus n_s avaldub valemiga:

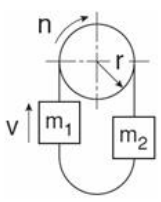
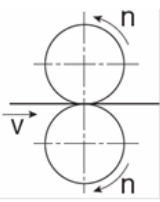
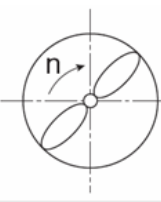

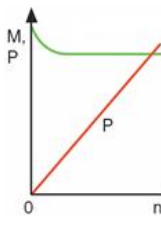
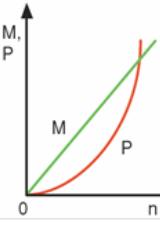
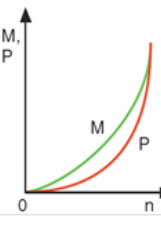
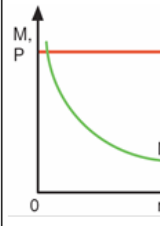
$$n_s = \frac{120 * f}{p} \quad (1.16)$$

Seetõttu on mootori koormus sõltuvuses sagedusest. Sageduse tõustes suureneb ka mootori aktiivvõimsuse tarbimine ning sageduse langedes on vastupidine efekt. Mootori puhul on ka see sõltuvus suuresti mootori momendi tunnusjoonest. [11] Momendi tunnusjooned võib jagada nelja kategooriasse: [12]

- 1 – konstantse koormusega;
- 2 – pöörlemiskiirusega võrdeliselt kasvava koormusega;
- 3 – pöörlemiskiirusega ruutsõltuvalt kasvava koormusega;
- 4 – konstantse võimsusega töövahemikus.

Nimetatud koormuste momendi M ja võimsuse P sõltuvused pöörlemiskiirusest n , mehaanilised tunnusjooned ning koormuste näited on toodud joonisel 1.7. Konstantse koormuse puhul ei sõltu koormusmoment pöörlemiskiirusest ($M = \text{const}$). Sellise koormuse näitena võib välja tuua töstemehhanismid, konveierid ja robotid, mis nõuavad kõrget käivitusmomenti (moment paigalt nihutamiseks). Seepärast peab ka mootor ja mootorit juhtiv sagedusmuundur olema võimelised taluma lühiajalisi ülekoormuseid. Juhul kui suure koormusmomendiga seadmed töötavad püsivalt madalatel kiirustel, siis tekib oht mootori ülekuumenemisel ning jahutamiseks tuleb kasutada välist jahutust. Ülekuumenemist aitab vältida ka mootorisse sisseehitatud temperatuuriandur termistor. Lineaarselt kasvava koormusmomendiga koormusteks võivad olla

valtsid, veskid ja paber-pressid. Võimsus kasvab ruutvõrdeliselt pöörlemiskiirusega, seetõttu kahekordsel nimikiirusel tarbitakse neli korda suuremat võimsust. Ruutvõrdeliselt kasvava koormusmomendiga on ventilaatorid, pumbad ja tsentrifuugid st. seadmed, kus määravaks on vedeliku või õhu takistus. Enamustel juhtudel on neil seadmetel tagatud hea jahutus kuna nad töötavad kiiretel pööretel. Võimsus muutub aga pöörlemiskiirusega kuupvõrdeliselt. Kui langetada ventilaatori pöörlemiskiirust 100 protsendilt 90 protsendile, siis väheneb tarbitav võimsus $0,9^3 \cdot P_n$, ehk ligikaudu 70 % peale. Konstantse võimsusega on puurid, freesid ja ka mähkimismasinad. Nad töötavad konstantsel kiirusel ning nende moment on väike, kuna neid tavaliselt koormatakse hetkel, mil masin on saavutanud oma nimikiiruse. Moment on pöördvõrdeline pöörlemiskiirusega. Tavaliselt esinevad praktikas segakarakteristikud ning kõrvalekalded ideaalsetest tunnus-joontest. [12] Samuti võib probleeme tekitada ka vastavale seadmele õige momendi määramine kuna samal seadmel võivad olla erinevad momendi tunnusjooned. See sõltub juba seadme täpsest ehituse tüübist, kus pumbal võib selleks olla kuni 19 erinevat ehituse tüüpi. [13]

tõstuk (<i>hoist</i>), konveier (<i>conveyor</i>), robot (<i>robot</i>).	valts (<i>rolling mill</i>), veski (<i>mill</i>), triikimisrull (<i>calander</i>).	pump (<i>pump</i>), ventilaator (<i>fan</i>), tsentrifuug (<i>centrifuge</i>).	puur (<i>borer</i>), kerija (<i>winder</i>), press (<i>press</i>).
$M = \text{const}$	$M \sim n$	$M \sim n^2$	$M \sim n^{-1}$
$P \sim n$	$P \sim n^2$	$P \sim n^3$	$P = \text{const}$
			
			

Joonis 1.7 Koormuse sõltuvus pöörlemiskiirusest [12]

2. Koormuskomponendid ja nende sageduskarakteristikud

Üksikute koormuskomponentide sagedussõltuvus on erinev, kuid süsteemi loomiseks on nende grupeerimine vajalik. Funktsioonide ja sagedustundlikkuse sarnasusest võib teatud elektrilistest komponentidest rühmad moodustada. Tüüpilised tarbimisseadmete rühmad koos näidetega: [2]

- valgustusseadmed: hõõglambid, lahenduslambid (luminofoor- ja kompaktluminofoorlambid, kõrgrõhu naatriumlambid, elavhõbelambid), leedlambid;
- kütteseadmed: boilerid, ahjud, kuivatid, küttekehad, soojuskardinad;
- kodumasinad: külmikud, pesumasinad, nõudepesumasinad, tolmuimejad, soojuspumbad, konditsioneerid, ventilaatorid jms ühefaasiliste mootoritega seadmed;
- kontori- ja kodutehnika: TV-d, IT-seadmed, muud elektroonikaseadmed, konditsioneerid, mikrolaineahjud;
- transportseadmed: elektertransport, elektriautode ja muude akude laadurid;
- jõuelektronika: alalisvoolutoide, juhitud mootorid;
- mootorid: kolmefaasilised asünkroonmootorid, ühefaasilised asünkroonmootorid, sünkroonmootorid;
- tööstusseadmed, elektrijaama omatarbeseadmed: tööstusmasinad, aparaadid, pumbad, kompressorid, ventilaatorid, soojapuhurid, kolmefaasilised õhukonditsioneerid, kaarahjud jms.

Osakaalude määramine on küllaltki keeruline tegevus kuna erinevates kirjanduse allikates ei liigitata elektrilisi komponente koormusrühmadesse üheselt. Teatud teadustöodes määratakse valgustuse komponendid elektroonika rühma alla ning osades uuringutes puudub valgustuse koormusrühm täielikult. Suurt rolli ülesande raskuses mängib ka info puudus. Teadustööd on suuremas osas keskendunud pingesõltuvuste uurimisele. Isegi artiklites, kus on komponentide sagedustundlikkuse tegurid välja toodud, on tihti põhiteemaks ikkagi pinge uurimine. Info leidmine erineb suuresti ka otsitavast komponendi rühmast või koormusklassist. Kodutarbijate klass on kindlasti kõige rohkem uuritud koormusklass ning selle tõttu leiab ka seal leiduvate elektritarvitite kohta rohkem infot. Teatud mõõndustega leiab informatsiooni ka avaliku sektori kohta, kuid tööstuse ja põllumajanduse koha pealt on tulemused puudulikud või puuduvad täielikult. Suurt tähtsust tuleks ka osutada mudelite uuendamisele, kus hetkel kasutuses olevate mudelite andmed võivad pärineda eelmistest kümnenditest ning sellest ajast on koormuse

koosseis märgatavalt muutunud. Järelikult on vajalik võimalikult uute andmete kasutamine, kui need on leitavad. [14] Eelpool kirjeldatud tingimuste tõttu tuleb allpool toodud tulemustele peale vaadata kriitilise pilguga.

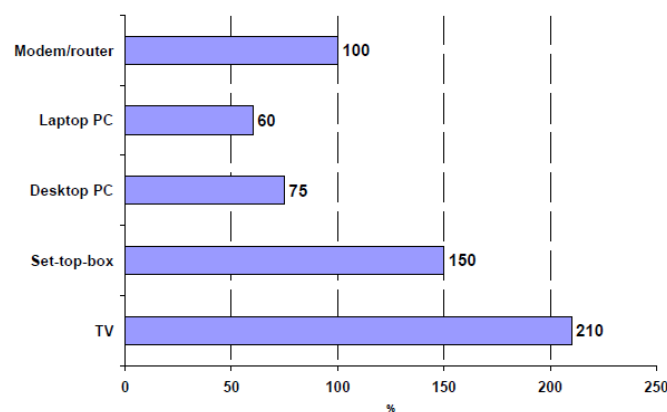
Sagedustundlikustegurite leidmiseks kasutan arvutusvalemina korrutist nii koormusrühmades ja –klassides. Korrutise esimene tegur on komponendi protsent osakaal kogu koormusest ning teine tegur on selle komponendi enda sagedustundlikkuskoeffitsient, mis on leitud kirjanduse allikate põhjal. Aktiiv- ja reaktiivvõimsuse osas on valemi loogika samasugune, erinevad ainult elektritarvitite endi sageduskarakteristikute tegurid.

$$K_{pf} = \text{osakaal}\% * k_{pf} \quad (2.1)$$

$$K_{qf} = \text{osakaal}\% * k_{qf} \quad (2.2)$$

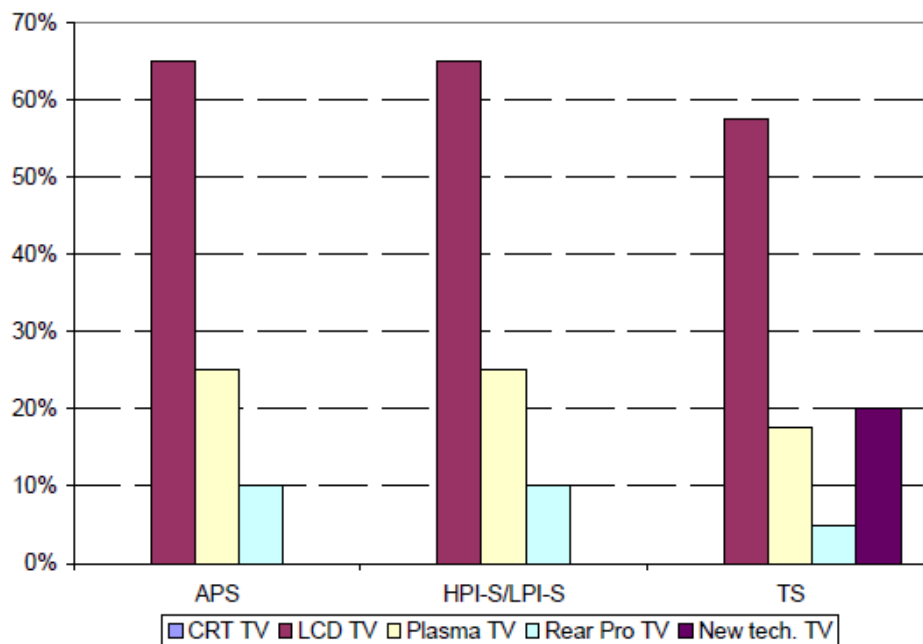
2.1 Elektroonika

Elektroonika osakaal on maailmas viimastel aastakümnetel suurenenud uue tehnoloogia kasutusele võtmisel ning ka nende seadmete odavnemise tõttu. Kõige suurem osakaal on elektroonikal kindlasti kodutarbijate koormusklassis, kus elektroonika alla kuuluvate seadmete kasutus on kõige tihedam. Näiteks Suurbritannias oli elektroonika osakaal kodutarbimises aastal 2009 kogutarbimisest umbes 25% ning aastaks 2020 ennustatakse elektroonika osakaalu kasvu ligikaudu 8% ehk 33% kogutarbimisest. [3] Seda näitab ka joonis 2.1, kus on toodud välja Euroopa 2030. aasta seadmete omamise tegur. Seadmete omamise tegur näitab leibkondade seadmetega varustust protsentides. Sama uuring näitab ka, et umbes aastast 2005 on elektroonika seadmete osakaal majapidamises jäänud enam-vähem samaks.



Joonis 2.1 Elektroonika seadmete omamise tegur aastal 2030 Euroopas [15]

Teiseks tähtsaks aspektiks on elektroonika koosseisu muutus, kus vananevad seadmed vahetatakse uuema tehnoloogia vastu. Üldjuhul erinevad ka uuema ja vanema tehnoloogia koormuse sagedussõltuvus, seega on tulemuste täpsustamiseks vajalik uue ja vana seadmete osakaal. Televisioon on üks suurema osakaaluga komponente elektroonikas ning jooniselt 2.2 võib välja lugeda, et aastal 2030 müüakse ainult uuema tehnoloogiaga televiisoreid ning vanema CRT tehnoloogiaga ehk kineskooptelevisiori müük puudub täielikult. Aastal 2006 moodustasid CRT tehnoloogial põhinevad televiisorid Eestis veel kuskil 50% kogu televiisorite müügist. Samas suunas liigub ka teiste ekraanide müük nagu näiteks arvuti ekraanid, kus suurem osakaal langeb LCD ekraanide peale.

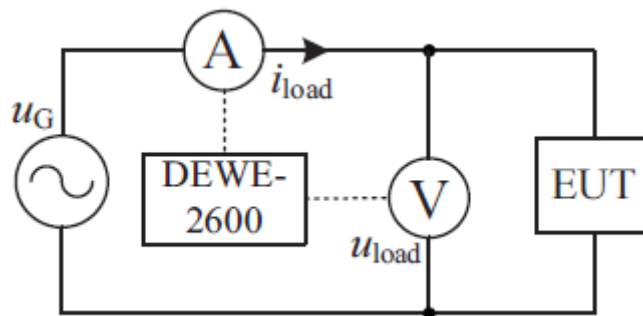


Joonis 2.2 Erinevate TV tehnoloogiate oskaal müügis aastal 2030 [15]

Elektroonika puhul tuleb veel lisada, et seadmed töötavad alalisvoolul. Läbi alaldi saadakse alalisvool ning läbi mille on ka seadmed enamasti võrku ühendatud. Jõuelektronika komponentide mudelites kasutatakse peamiselt kahte tüüpi: täieliku elektri ahela mudelid ja ekvivalentse elektri ahela mudelid. Täielikud mudelid sisaldavad kõiki elektroonilisi ning elektrilisi elemente täielikul aseskeemil. Sellise mudeliga arvutamine on ajamahukas ning ka keerukas. Ekvivalentse ahela mudeli ülesehitus on lihtsam ning see koosneb tavalisest diodsildalaldist, mille sisendis on impedants (R ja L), mahtuvus ning ekvivalentne takistus. Jõuelektronikaseadmete koormuse karakteristikuid võib üldiselt modelleerida eksponent ja polünoommudelitega. [2]

Tabelis 2.2 on välja toodud kirjanduse allikates leitud elektroonika sagedustundlikkustegurid.

Tulemustest joonistub kindlalt välja kaks erinevat väärtuste rühma, kus allika [16] reaktiivkoormuse sagedustundlikkustegurid erinevad teiste artiklite tulemustes kuni kümme korda. Selle erinevuse põhjuseks võib olla artiklite vanus, kus allikas [16] on väljastatud 2016. aastal ning ülejäänud jäävad eelmistesse kümnenditesse. Seetõttu võib oletada, et 2016. aastal viidi katsed läbi uuema tehnoloogiaga ning need sagedustundlikkustegurid domineerivad ka praeguses ajas elektroonika valdkonnas. Allika [16] viidi läbi laborikatsed kasutades joonisel 2.3 olevat skeemi. Toitena kasutati elektroonset võimendit Elgar SW5250A, millega viiakse elektrienergia katsetava seadmeni EUT (*Equipment Under Test*). Iga mõõtettsükliga muudetakse pinget või sageduse väärtust. Pinget ja voolu mõõdetakse andmesalvestiga DEWE-2600. Iga mõõteprotsessi alguses muudetakse pinget väärtus 230 V peale ning sagedus 50 Hz peale, et oleks samad katsetingimused. Seejärel muudetakse pinget ja sagedust sammudega, mis on toodud tabelis 2.1. Mõõdetud pinget ja voolust arvutati välja aktiiv- ja reaktiivvõimsus. Samuti uuriti staatilise eksponent ja polünoom karakteristikute tegureid reaalsete tulemustega ning üldjuhul oli eksponent mudel täpsem.



Joonis 2.3 Laboris läbi viidud mõõtmiste struktuurskeem [16]

Tabel 2.1 Pinget ja sageduse muutmise sammud labori katsetes [16]

ΔU	-23	-15	-10	-5	+5	+10	+15	+23
Δf	-2,5	-1,5	1,0	-0,5	+0,5	+1,0	+1,5	+2,0

Kahjuks teistes artiklites tuleb välja, et koormuse sagedustundlikkus ei ole põhiteemaks. Allikas [17] käsitletakse rohkem, kuidas Tai elektrisüsteemi koormuse mudeli täpsus mõjutab sageduse stabiilsuse analüüsi. Artikkel avalikustati 2001. aastal, seega tuleb arvesse võtta vanema tehnoloogia osakaalu. Info on ka puudulik täpsete uuritavate komponentide parameetrite kohta kuna keskendutakse rohkem süsteemile kui üksikule elemendile. Selle artikli tulemused on ka reaalsete väärtustega võrreldavad kuna lähtepunktiks võetakse Tai elektrisüsteemis juhtunud sageduse lohk 0,8 Hz juures. Kokkuvõtvalt väidetakse, et sageduse muutusi on parem kirjeldada komposiit või eksponent mudeliga.

Allikas [18] tuleb jällegi arvestada avalikustamise aastaga 1982. Tuuakse veel välja, et isegi täpselt samade mootorite koormuse karakteristikud võivad üksteisest erineda vananemis faktori tõttu. Olemasolevast infost on võimalik leida erinevaid pingete kohta tehtud uuringuid, kuid sageduse osas on tulemused limiteeritud. Tulemused on saadud isoleeritud süsteemi genereerimise 3-27% vähendamisel, kus süsteemi algne võimsus oli 2000 MW. Sagedustundlikkustegurid on üldjuhul väikesed ning negatiivsed. Probleemseks on ka pinge muutus koos sageduse muutusega, see aga raskendab korrektsete sagedusekarakteristikute saamist. Suuremad raskused on tööstuse koormuse modelleerimisel kuna selles koormusklassi koosseisu kuulub väga suur hulk erineva suuruse ja tehnoloogiaga firmasid.

Allikas [19] kirjeldatakse rohkem süsteemi koormuse mudeleid ning nende ühildamist Bakhtari elektrisüsteemiga. Selles artiklis kasutatakse komponentide põhise meetodit, mis ühtib ka käesoleva uurimusega. Komponentide sagedustundlikkustegurid leiti osaliselt laboratoorsete katsetuste käigust ning osaliselt kirjandusest kuna 29 erineva tarviti testimine on väga ajamahukas töö. Eraldi mitte välja toodud artiklid on võetud aruandest [4], kus teatud kahele originaal allikale puudus ligipääs. Peaaegu kõigis artiklites jookseb läbi ühine joon, kus põhiteemaks ei ole koormuse sõltuvus sageduse muutustele. Samuti on paljude artiklite info vananenud, seega tuleks selgesti eristada uue ja vana tehnoloogia tegureid.

Elektroonika rühmas tuleb ka arvestada veamääraga, mis tuleb sisse kuna sama tüüpi seadmetel võivad olla erinevad parameetrid, mis tähendab ka sageduse koefitsientides kõrvalekaldeid. Allikas [20] antakse kodutarbijate elektroonika seadmetele osakaalud, mille maksimaalseks võimsuseks on üldjuhul 75 W. Elektritarvitite osatähtsus allika [20] kohaselt: heliseadmed 6%, televiisorid 23,1%, arvuti 55% ja muu elektroonika 15,9%. Tulemustest selgub, et arvuti osatähtsus on üle poole ja arvatavasti jätkab kasvutrendi, seega on arvuti seadmele vajalik leida õiged sagedustegurid. Antud töös puudub iga elektritarviti sagedustundlikkustegur, seega tuleb elektroonika rühmas leida keskmine sagedustundlikkuskoeffitsient. Selleks kasutan ma allika [15] teavet ning loogilist tuletamist. Tabelis 2.2 joonistub selgesti välja vana ja uue tehnoloogia erinevus tegurite suhtes, seetõttu tuleb seda ka keskmise arvutamisel arvesse võtta. Keskmise leidmisel võtan arvesse 60% vanema artiklite tulemusi ning 40% uuema artiklite väärtusi. Arvutusvalemite struktuur on välja toodud peatükis kaks. Allpool on toodud arvutuskäik, millega elektroonika rühma keskmised sagedustundlikkustegurid leiti:

$$K_{pf} = 0,6 * \left(\frac{0 + 0 + 0 + 0}{4} \right) + 0,4 * \left(\frac{0 + 0 + 0 + 0}{4} \right) = 0 \quad (2.3)$$

$$K_{qf} = 0,6 * \left(\frac{-4,6 - 4,86 - 4,6 - 4,5}{4} \right) + 0,4 * \left(\frac{0,49 + 0,94 - 0,24 - 0,15}{4} \right) \quad (2.4)$$

$$= -2,68$$

Tabel 2.2 Elektroonika rühma sagedustundlikustegurid

Tüüp	k _{pf}	k _{qf}	Allikas
Televiisor	0	-4,6	[19] [18]
Televiisor	0	-4,86	[17]
Sülearvuti 1	0	0,49	[16]
Sülearvuti 2	0	0,94	[16]
Arvuti ekraan 1	0	-0,24	[16]
Arvuti ekraan 2	0	-0,15	[16]
Televiisor, arvuti	0	-4,6	[21]
Televiisor	0	-4,5	[22] [8]

2.2 Aktiivtakistusega komponendid

Aktiivtakistuse rühma alla on koondatud elektrilised komponendid, mille koormus ei sõltu sageduse muutustest ehk modelleeritakse konstantse takistusega mudelites. Vaid väga suured sageduse hälbed võivad põhjustada mõningal määral selliste koormuste võimsuse muutumist, näiteks kõrgetel sagedustel esineva pinnaefekti tõttu. Neil seadmetel puudub reaktiivtakistuse osa ega ei vaja töötamiseks reaktiivenergiat, seega on nende elementide sagedustundlikustegurid ka nullid. Üldistades võib aktiivtakistuse rühma lisada kütte- ja köögiseadmed ning seda kinnitavad ka mitmed allikad, mis on toodud tabelis 2.3. Selgesti tuleb ka välja, et siin ei sõltu komponentide karakteristikud katsete tegemise ajast, sest erinevate artiklite tulemused on samad. Suuremat mõju avaldavad siin rühmas kindlasti kütteseadmed kuna köögiseadmete elektri tarbimine on tunduvalt väiksem. Kindlasti on suurem osakaal aktiivtakistusega rühmal kodutarbijate ja avaliku koormuse klassi juures kuna tööstuses on nimetatud seadmete osakaal tunduvalt väiksem. Aktiivtakistuse rühma keskmise teguri leidmise arvutuskäiku eraldi välja ei too kuna kõik väärtused on nullid seega on seda ka keskmine tulemus.

Tabel 2.3 Aktiivtakistuse rühma sagedustundlikustegurid

Tüüp	k _{pf}	k _{qf}	Allikas
Vee keetja	0	0	[19] [16] [17]
Radiaator	0	0	[19] [16]
Fritüür	0	0	[22] [8]
Pliit	0	0	[19] [17] [21]

2.3 Mootorid

Mootori koormuse täpsest sageduse sõltuvusest käsitleb peatükk 1.2. Lühidalt mootori pöördemoment on sõltuvuses pöörlemiskiirusest ja mehaanilise koormuse iseloomust, siis on ka pöördemoment funktsioon mootori pöörlemiskiirusest ning mootori pöörlemiskiirus ja sagedus on omavahel seotud. Suurt mõju avaldab ka mootori mehaanilise koormuse tüüp, mille tõttu on momendi ja võimsuse tunnusjooned väga erinevad, ülevaatlilik kirjeldus on toodud joonisel 1.6. Mootorite osatähtsus koormuses on väga suur kuna nende osakaal on märkimisväärne ning nende mõju koormusele on üldjuhul suurem kui teistel elektrilistel komponentidel. Asünkroonmootorite osakaal kogu koormusest on umbes 60% [23]. Suurem mõju koormusele tuleb ka välja sagedustundlikkustegurite tabelist, kus keskmiselt on mootorite tegurid suuremad teistest elementidest. Arvesse tuleb ka võtta, kas mootor on ühendatud otse võrku või läbi sagedusmuunduri. Läbi sagedusmuunduri ühendatud mootori koormuse käitumine sageduse muutustele liigitakse üldjuhul elektroonika rühma alla, kuid põhimõtteliselt on tegemist sagedusest sõltumatu komponendiga. Näiteks 2002. aastal oli kodumajapidamises kasutusel olevate sagedusmuunduriga ühendatud ühefaasiliste mootorite osakaal Jaapanis 37% [24]. Allika [25] kohaselt on sagedusmuunduriga ühendatud mootorite osakaal väiksema võimsuse juures kuskil 5% ning suurema võimsuse juures kuskil 20% ning see protsent on kindlasti tõusu teel.

Vaadates tabelis 2.4 esitatud andmeid, siis võib öelda, et suuri erinevusi samadel komponentidel tulemustes ei esine. Elektroonika peatükis sai juba kirjeldatud nende samade allikate probleeme, kus nende põhiteemaks ei ole sagedustundlikkustegurite leidmine. Samas ei põhjusta allikate erinev avalikustamise aasta tulemustes suurt erinevust nagu seda oli elektroonika rühma koosseisus näha. Kuna üldjuhul on mootorite ehituspõhimõtted jäänud viimastel aastakümnetel samaks. Raskused tekivad hoopis õigete osakaalude leidmisel erinevatele koormusklassidele. Igal koormusklassil on kasutusel kindlat tüüpi mootori tüübid, kus näiteks kodutarbijate juures ei ole suur tõenäosus leida võimsaid asünkroonmootoreid. Seetõttu on selles töös leitud igale koormusklassile eraldi mootori rühma sagedustundlikkustegur.

Tabel 2.4 Mootori rühma sagedustundlikkustegurid

Mootori tüüp	k_{pf}	k_{qt}	Allikas
Soojuspump	0,9	-1,3	[19]
Õhukonditsioneer	0,9	-2,7	[19] [22] [26]
Õhukonditsioneer	0,9	-2,67	[21]
Õhukonditsioneer	0,56	-2,68	[17]

Ventilatsioonisojuspump	0,9	-2,7	[19]
Ventilaator	-1,26	-2,12	[16]
Külmkapp	0,5	-1,4	[19]
Külmkapp, sügavkülm	0,48	-1,3	[17]
Külmkapp	0,53	-1,5	[22] [26]
Tolmuimeja	0	0,43	[16]
Nõudepesumasin	0	-1,4	[19] [22]
Pesukuivati	0	-2,6	[19] [21] [22]
Pesukuivati	0,23	-2,9	[17]
Pesumasin	2,9	1,8	[19] [22] [26]
Pesumasin	2,64	1,6	[17]
Väiksemad pumbad	2,9	1,8	[19]
Väiksemad pumbad	2,74	1,83	[17]
Väike asünkroonmootor	2,9	1,8	[19]
Väike asünkroonmootor	2,56	1,76	[17]
Sagedusmuunduriga asünkroonmootor	0	0	[16]
Tööstusmootor	2,5	1,2	[8]
Tühijooksul asünkroonmootor	-3,48	-2,1	[16]
Suur asünkroonmootor	1,9	1,2	[19]
Suur asünkroonmootor	1,9	1,21	[17]
Põllumajanduslikud pumbad	5,6	4,2	[27]
Veepumba mootor	5,7	4,33	[17]
Põllumajanduslikud pumbad	5	4	[22] [8]

Kodutarbijad

Kodutarbijate koormusklassi mootori rühma sagedustundlikkusteguri leian allika [9] andmete alusel, kus oli uuritud kodus kasutatavate elektritarvitite osakaalu kogutarbimisest. Seal uurimustöös on toodud välja kodumajapidamiseseadmete keskmised tarbimisnäitajad, mis on leitavad tabelis 2.5. Seejärel on võimalik leida seadmete ligikaudsed osakaalud kogu koormusest, kui tarbimine ühe kodumajapidamise kohta päevas läbi korrutada omanike arvuga. Kui kasutada tabelis 2.5 toodud andmeid ning Eesti kodumasinat kasutusstatistikat, on võimalik leida ligikaudne päevane tarbimine iga seadme kohta eraldi. Tabel 2.5 ei ole ülekantud täielikult uurimustööst vaid ainult selles uurimuses vajalikud andmed. [9]

Tabel 2.5 Kodumajapidamiseseadmete keskmised tarbimisnäitajad [28] [29]

Elektriseade	Aastane keskmine tarbimine leibkonna kohta [kWh/päevas]	Osatähtsus [%]
--------------	---	----------------

Külmkapp	0,82	99
Külmik	1,9	16
Pesumasin	0,8	89
Kuivati	0,78	1,6
Nõudepesumasin	1,72	15
Tolmuimeja	0,15	93

Seejärel arvutati allikas [9] välja Eesti keskmine kodumajapidamise keskmine päevane tarbimine, mille tulemused on toodud tabelis 2.6. Arvutuskäik näeb välja, seadme päevane keskmine tarbimine (kWh/päev) * Osatähtsus leibkonniti/100 = Eesti keskmise kodumajapidamise keskmine päevane tarbimine (kWh/päev). Eraldi on veel võetud suvised ja talvised tulemused kuna seadmete osakaal ja tarbimisharjumused muutuvad sõltuvalt ajast ning temperatuurist. Lisaks arvestati, et 97% leibkondadest on vähemalt üks televiisor ning 17% on neid vähemalt kaks [29]. Kuigi televiisorid ei pruugi kõik korraga töötada, kuid mõnel perel on ka rohkem kui kaks televiisorit, siis võib arvestada, et 17% töötab keskmiselt kaks televiisorit ja nõnda peaks kokkuvõttes arvestusse minema ka need kellel on rohkem kui kaks televiisorit.

Tabel 2.6 Keskmise kodumajapidamise keskmine päeva tarbimine suvel [9]

Seade	Seadme päevane keskmine tarbimine suvel [kWh]	Eesti keskmise kodumajapidamise keskmine päevane tarbimine seadmete lõikes suvel [kWh]	Osakaal kogutarbimisest suvel [%]
Külmkapp	0,82	0,81	8,65
Sügavkülmik	1,90	0,30	3,24
Pesumasin	0,80	0,71	7,59
Kuivati	0,78	0,01	0,13
Nõudepesumasin	1,72	0,26	2,75
Tolmuimeja	0,15	0,14	1,49
Õhukonditsioneer	2,97	0,09	0,92
Õhupuhasti/ventilaator	0,60	0,36	3,84

Tabel 2.7 Keskmise kodumajapidamise keskmine päeva tarbimine talvel [9]

Seade	Seadme päevane keskmine tarbimine talvel [kWh]	Eesti keskmise kodumajapidamise keskmine päevane tarbimine seadmete lõikes talvel [kWh]	Osakaal kogutarbimisest talvel [%]
Külmkapp	0,82	0,81	4,80
Sügavkülmik	1,90	0,30	1,78
Pesumasin	0,80	0,71	4,20
Kuivati	0,78	0,01	0,06
Nõudepesumasin	1,72	0,26	1,54

Tolmuimeja	0,15	0,14	0,83
Õhupuhasti/ ventilaator	0,60	0,36	2,13
Soojuspump	26,4	0,92	5,11

Tabelitest 2.6 ja 2.7 on omakorda võimalik leida selles uurimustöös kasutatavate seadmete osakaalud ning nende järgi saab leida kodutarbijate koormusklassi juures mootorite rühma sagedustundlikkustegurid. Siin eristame ka kahte tüüpiliste kodumajapidamiste mootorite rühma: külm koormus ja märg koormus. Märja koormuse alla kuuluvad pesumasin, kuivati ja nõudepesumasin. Seda tüüpi komponentidel on üldjuhul konstantne mehaaniline koormus. Külma koormuse alla kuuluvad soojuspump, õhukonditsioneer, külmkapp, sügavkülmik, tolmuimeja. Üldjuhul on sellistel komponentidel ühefaasiline mootor, mis töötab ruutsõltuvusliku pöördemomendiga. Seetõttu on vajalik leida mõlema koormuse puhul üksikute seadmete osakaal. Tabelist 2.6 saab näiteks kogu suve märja koormuse tarbimise kokku liita, milleks tuleb 0,98 kWh. Seejärel tuleb leida iga üksiku seadme osakaal sellest, kus näiteks pesumasina protsent leitakse valemiga, kus pesumasina tarbimine suvel 0,71 kWh on võetud tabelis 2.6:

$$Pesumasin_{suvi} = \frac{0,71 * 100}{0,98} = 72,4\% \quad (2.5)$$

Järelikult on pesumasina koormus kogu märjast koormusest ligikaudu 72%. Samamoodi leitakse ka ülejäänud üksikutele komponentidele protsent osakaalud mootori rühma sees nii suvel kui ka talvel. Osakaalud korrutatakse läbi kirjanduse allikatest leitud üksikute komponentide aktiiv- ja reaktiivtundlikkusteguritega, mis on välja toodud tabelis 2.4. Märja koormuse suve sageduskarakteristikud leitakse valemiga, kus esimene korrutise tegur on seadme osakaal ning murru joone üleval allikatest leitud komponentide sagedustundlikkustegurid:

$$K_{pf} = 0,72 * \left(\frac{2,9 + 2,64}{2}\right) + 0,013 * \left(\frac{0 + 0,23}{2}\right) + 0,27 * 0 = 1,99 \quad (2.6)$$

$$K_{qf} = 0,72 * \left(\frac{1,8 + 1,6}{2}\right) + 0,013 * \left(\frac{-2,6 - 2,9}{2}\right) + 0,27 * (-1,4) = 0,81 \quad (2.7)$$

Arvutuste tulemusena leitakse märja ning külma koormuse sageduskarakteristikud. Kodutarbijate koormusklassi teguri leidmiseks on vajalik leida keskmistatud tulemused, mis on leitud tabelis 2.8.

Tabel 2.8 Külma ja märja koormuse sagedustundlikkustegurid

Märg koormus	k_{pf}	k_{qf}
suvel	1,995895	0,81025
talvel	1,995585	0,817675
Keskmissed	1,99574	0,813963
Külm koormus	k_{pf}	k_{qf}
suvel	0,49296	-1,28136
talvel	0,79215	-1,95939
Keskmissed	0,642555	-1,62037

Järgmisena tuleb leida külma ja märja koormuse keskmistatud tulemuste osakaal. Selleks kasutan allikas [9] välja toodud väärtusi, mis on välja toodud peatükis 3.1 tabelis 3.2. Tabelist vaadatud väärtuste põhjal on võimalik panna paika, et kodutarbijate koormusklassi mootorite osakaal on ligikaudu 32% märg ja 68% külm koormus. Seega lõplik kodutarbija mootori rühma sagedustundlikkustegurid on:

$$K_{pf} = 0,32 * 1,99 + 0,68 * 0,64 = 1,07 \quad (2.8)$$

$$K_{qf} = 0,32 * 0,82 + 0,68 * (-1,62) = -0,84 \quad (2.9)$$

Sama arvutuskäiku ja loogikat kasutades on võimalik leida allika [20] andmete põhjal kodutarbijate koormusklassile mootori rühma sagedustundlikkuskoeffitsiendid. Antud väärtused põhinevad Rootsis tehtud mõõtmistel, kus vaatluse all olid 400 majapidamist. Vastavad osakaalud on: külm koormus 46,9%, nõudepesumasin 12,3%, pesumasin ja kuivati 14% ning ülejäänud 26,76% aktiivtakistusega komponendid. Vastavad osakaalud summeerin antud töös defineeritud rühmadesse: külm koormus 47%, märg koormus 26% ning aktiivtakistusega 27%. Järgmisena korrutan osatähtsused sagedustundlikkuse koeffitsientidega läbi, mis on leitud tabelist 2.8. Eraldi leian märja koormuse rühma koeffitsiendi, kus osakaaludeks on 45% nõudepesumasin ning 55% pesumasin ja kuivati, kirjeldatud osakaalud korrutan läbi vastava komponentide väärtustega tabelis 2.4. Järgmisena leian kogu kodutarbijate koormusklassi mootorite koormusrühma sagedustegurid:

$$K_{pf} = 0,47 * 0,64 + 0,26 * 0,79 + 0,27 * 0 = 0,5 \quad (2.10)$$

$$K_{qf} = 0,47 * (-1,62) + 0,26 * (-0,91) + 0,27 * 0 = -1 \quad (2.11)$$

Materjalide [9] ja [20] tulemustes on näha selget erinevust, eriti just aktiivkoormuse teguri osas. Seda kõrvalekallet põhjustab allika [20] aktiivtakistuse osakaal, kus koeffitsiendi väärtus on null. Antud väärtusi kasutan ka erinevate kodutarbijate koormusklassi arvutuste juures kuna

allikas [9] on sisse toodud ka suve- ja talveperioodi tingimus, kuid ülejäänud materjalides see puudub. Seega on korrektsem kasutada allika [20] tulemusi, va arvutuste juures, kus tuuakse sisse suve- ja talveperioodide andmed.

Avalik

Avaliku sektoris on kasutusel mootorite tüüpidest üldjuhul õhukonditsioneer, külmseadmed, pumbad ja ventilaatorid. Vee ja pinna kütmisega seotud seadmed paigutatakse aktiivtakistuse rühma alla. Allikas [30] on välja toodud avaliku sektori eri tüüpi mootorite jagunemine. Selle põhjal on võimalik kasutada sama arvutamislõogikat nagu eelmises peatükis kirjeldatud, kus seadmete osakaalud korrutatakse läbi elektritarviti sagedustundlikkusteguriga. Kuna tabeli 2.4 andmete põhjal ei ole võimalik eristada ventilatsiooni, õhukonditsioneerid ning õhuliigutajat, siis liidetakse need protsendi kokku ja saadakse kogu summaks 61%. Avaliku sektori sagedustundlikkustegurid leitakse valemiga, kus korrutise esimene liige on seadme osakaal ning teine liige tabelist 2.4 võetud tegur. Tabelist 2.4 võetakse õhu liigutamise seotud seadmete, pumba ja külmutusseadme sageduskarakteristiku tegurid.

$$K_{pf} = 0,61 * \frac{0,9 + 0,9 + 0,9 + 1,3 + 0,9}{5} + 0,23 * \frac{0,5 + 0,48 + 0,53}{3} + 0,16 \quad (2.12)$$

$$* \frac{2,9 + 2,74}{2} = 1,68$$

$$K_{qf} = 0,61 * \frac{-1,3 - 2,7 - 2,67 - 1,57 - 2,7}{5} + 0,23 * \frac{-1,4 - 1,3 - 1,5}{3} + 0,16 \quad (2.13)$$

$$* \frac{1,8 + 1,6}{2} = -1,35$$

Tabel 2.9 Avaliku sektori eri tüüpi mootorite osakaal [30]

Mootori tüüp	Osakaal [%]
Ventilatsioon	34
Külmseadmed	23
Pumbad	16
Õhukonditsioneer	8
Õhuliigutajad	19

Tööstus

Tööstuses on mootorite osakaal kogu koormusest kõige suurem. Samuti on siin tegemist suurema hulga protsessidega, mistõttu on täpset osakaalu raske määrata. [20] Kuna algallikas [15] ei anna täpseid osakaale, siis lähtuvalt tabeli 2.10 ja saadaval olevatest seadmete andmetest tabelis 2.4 muudan mootorite rühma osakaale. Asünkroonmootori osakaalu võtan 68%, millest 15% on läbi sagedusmuunduri ühendatud. Seejärel ventilatsioonile kuulub 12%, 10% kuulub

pumpadele ning ülejäänud 10% külmsadmetele. Tööstuse mootori rühma sagedustundlikkustegurid leitakse valemiga:

$$K_{pf} = 0,53 * \frac{2,9 + 2,9 + 1,9 + 1,9}{4} + 0,15 * 0 + 0,12 * \frac{0,9 + 0,9 + 0,9 + 1,3 + 0,9}{5} + 0,1 * \frac{2,9 + 2,64}{2} + 0,1 * \frac{0,5 + 0,48 + 0,53}{3} = 1,68 \quad (2.14)$$

$$K_{qf} = 0,53 * \frac{1,8 + 1,76 + 1,2 + 1,21}{4} + 0,15 * 0 + 0,12 * \frac{-1,3 - 2,7 - 2,67 - 1,57 - 2,7}{5} + 0,1 * \frac{1,8 + 1,83}{2} + 0,1 * \frac{-1,4 - 1,3 - 1,5}{3} = 0,57 \quad (2.15)$$

Tabel 2.10 Tööstuse sektori eri tüüpi mootorite osakaal [15]

Mootori tüüp	Osakaal [%]
Külmsadmed	38
Ventilatsioon	12
Suruõhuga seadmed	10
Pumbad	10
Teised mootorid	31

Põllumajandus

Põllumajandus sektori alla kuuluvad farmid, metsandus ja kalandus. Kalanduse ja metsanduse primaarenergiaks võib täielikult lugeda nafta, seega järele jääb taime- ning loomakasvatus. Põllumajanduse kohta leidub infot väga vähe, seega puudub täpne eri tüüpi mootorite osakaalude teave. Kogu mootori rühma osakaal allika [31] järgi on ligikaudu 25%. Seetõttu on võetud põllumajanduse mootori rühma sagedustundlikkusteguri aluseks tööstuse mootori oma ning sinna hulka lisatud põllumajanduspumpasid, mis on leitavad tabelis 2.4. Tabeli 2.4 väärtuste põhjal on näha, et põllumajanduspumpade tegurid on üldjuhul kõrged, kuid nende osakaaluks võtan 10%, seega ei mõjuta nad lõpptulemust oluliselt. Põllumajandus mootori rühma sagedustundlikkustegurid leitakse valemiga, kus esimeseks teguri grupiks on tööstuse mootori osakaal ja tema sagedustundlikkustegur ning teiseks grupiks põllumajanduspumba osakaal ning tema keskmistatud sagedustundlikkustegur.

$$K_{pf} = 0,9 * 1,68 + 0,1 * 5,43 = 2 \quad (2.16)$$

$$K_{qf} = 0,9 * 0,57 + 0,1 * 4,18 = 0,93 \quad (2.17)$$

2.4 Valgustus

Rahvusvahelise Energiaagentuuri 2005. aasta uuringu järgi kasutati 19% kogu elektrienergiast valgustuseks. Neli põhilist valgustuse sektorit on välivalgustus 8%, kommertsvalgustus 43% (30% kogu avaliku sektori koormusest), kodutarbijate valgustus 31% (18% kogu kodutarbijate sektori koormusest) ning tööstuse valgustus (9% kogu tööstuse sektori koormusest). Uuringu tulemustest selgub, et valgustuse osakaal varieerub kogutarbimises aasta lõikes kuskil 9% ja 20% vahel. [3] Valgustuse võib jagada peamiselt kaheks: traditsioonilised hõõglambid ja lahenduslambid. Lahenduslampide alla kuuluvad halogeen, luminofoor, metallhalogeenid ning elavhõbe tüüpi valgustid. Traditsioonilise hõõglambi kasutus väheneb iga aastaga ning selle asemele tulevad efektiivsemad ja säästlikumad valgusallikad. Hõõglamp ei vaja põlemiseks reaktiivenergiat ja tema koormus on sagedusest praktiliselt sõltumatu. Küll aga sõltub hõõglamp pingest, sest sellega on seotud hõõgniidi temperatuur. Lahenduslambid on tüüpiliselt töös tööstuses ja kaubanduses. Lahenduslambid on tugevalt seotud pingega, kus pinge alla 65...80% langemist lambid kustuvad. [2] Sageduse seisukoha pealt on sõltuvus väiksem ning seda näitavad ka küllaltki väikesed sagedustundlikkustegurid. Allikas [16] tehti seitsme erineva säästulambiga katseid ning kõikide nende tegurid tulid nullid.

Tabel 2.11 Eri tüüpi valgustuse sagedustundlikkustegurid

Tüüp	k_{pf}	k_{qf}	Allikas
Luminofoorlamp	1	-2,8	[19] [22] [26]
Luminofoorlamp	1,02	-2,25	[17]
Luminofoorlamp	1	-2,66	[21]
LED lambid	0	0,13	[16]
Hõõglamp	0	0	[19] [16] [17] [21]
Halogeenlamp	0	0	[16]
Hõõglamp	0	0	[19] [16] [17] [21]

Kodutarbijad

Kodutarbijate juures on levinud kolme tüüpi valgustid: hõõglambid, luminofoorlambid ning halogeenlambid. Viimasel aastakümnetel on toimunud suur valgustite osakaalude ümberjaotamine hõõglambi tähtsuse vähenemise tõttu. Kuna muutused on toimunud ka lähiaastatel ning selle kohane täpne info puudub, siis osakaalude määramisel kasutatakse Suurbritannia tehtud uuringu tulemusi. Joonise 2.4 pealt on näha, et näiteks 2004. aasta tulemused erinevad oluliselt 2014. aasta tulemustest, kus hõõglambi osakaal asendatakse

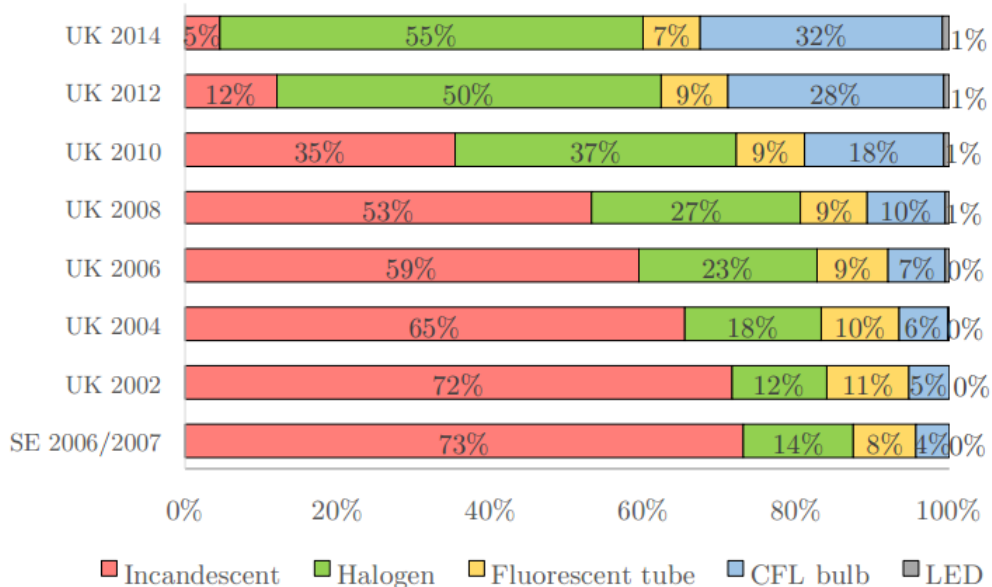
halogeen- ja luminofoorlampidega. Arvestada tuleks ka, et alates 2014. aastast on kõigi eelduste kohaselt sama trend jätkunud ning hõõglambi osakaal veelgi vähenenud. Samuti tuleb jooniselt välja ka Rootsi ja Suurbritannia valgustuse koormuse erinevus, kus Rootsi osakaalud on n-ö paar aastat Suurbritannia omadest maas. Sageduskarakteristikute leidmise koha pealt ei mängi olulist rolli hõõglambi ja halogeenlampide omavaheline osakaalude muutus kuna mõlemad loetakse sagedusest sõltumatuks. Valgustuse sagedustundlikkustegurid kodutarbija jaoks leidsin valemitega, kus valgustite osakaalud korrutatakse läbi sagedustundlikkusteguritega, mis on võetud tabelist 2.11:

$$K_{pf} = 0,4 * \frac{1 + 1,02 + 1}{3} + 0,5 * 0 + 0,1 * 0 = 0,4 \quad (2.18)$$

$$K_{qf} = 0,4 * \frac{-2,8 - 2,25 - 2,66}{3} + 0,5 * 0 + 0,1 * 0 = -1 \quad (2.19)$$

Tabel 2.12 Eri tüüpi valgustite osakaal kodutarbijate koormusklassis

Valgusti tüüp	Osakaal [%]
Luminofoorlamp	40
Halogeenlamp	50
Hõõglamp	10



Joonis 2.4 Eri tüüpi valgustite osakaalud Suurbritannias ja Rootsis [20]

Avalik

Jooniselt 3.3 selgub, et Euroopa avaliku sektori kogu koormusest moodustab valgustus kuskil 25%. Hoonetes kasutatavatest valgustitest võib lugeda isegi 100% luminofoor tüübiks [30].

Avaliku sektori sagedustundlikkustegurid leitakse valemiga, kus valgusti osakaal korrutatakse läbi keskmistatud valgusti sagedustundlikkusteguriga, mis on võetud tabelist 2.11:

$$K_{pf} = 1 * \frac{1 + 1,02 + 1}{3} = 1 \quad (2.20)$$

$$K_{qf} = 1 * \frac{-2,8 - 2,25 - 2,66}{3} = -2,57 \quad (2.21)$$

Tööstus ja põllumajandus

Tööstuses on suurem osakaal energiatõhusatel lampidel nagu luminofoorlambid [15]. Allikas [20] oli luminofoorlambi osakaaluks võetud 62%, seda kasutan ka selles uurimustöös. Ülejäänud jagunemine toimub nii, et 20% halogeenlampi ja 20% hõõglampi. Kuna põllumajanduse kohta puudub info, siis võtan samad osakaalud ja sagedustundlikkustegurid mis tööstuses kuna nende koormusklasside sarnasus on kõige suurem. Sagedustundlikkustegurid leian valemiga, kus valgusti osakaal korrutatakse läbi keskmistatud valgusti sagedustundlikkusteguriga, mis on võetud tabelist 2.11:

$$K_{pf} = 0,6 * \frac{1 + 1,02 + 1}{3} + 0,2 * 0 + 0,2 * 0 = 0,6 \quad (2.22)$$

$$K_{qf} = 0,6 * \frac{-2,8 - 2,25 - 2,66}{3} + 0,2 * 0 + 0,2 * 0 = -1,5 \quad (2.23)$$

3. Koormusklassid ja nende sageduskarakteristikud

Koormuse käitumise paremaks mõistmiseks on vajalik modelleerimisel kasutatavate mudelite uuendamine ja täiustamine. Parema täpsuse saavutamiseks mudeli koostamisel on vajalik võimalikult suurel hulgal korrektse info olemasolu. Seetõttu oleks vajalik tugineda ka mõõtmiste põhilistele koormuse uurimise meetoditele kuna sealt laekuvad andmed on kindlasti täpsemad kui komponendi põhisel saadud väärtused. Koormusklassiks nimetatakse erinevate koormuste kogumit, millel on üldjuhul sarnane struktuur ning mida kasutatakse sarnasteks ülesanneteks. Sellest tingituna on ka koormusklassidel samasugused koormuskarakteristikud ning aktiiv- ja reaktiivenergia tarbimise suurused. Täpsemate tulemuste saamiseks on võimalik jagada koormusklassid väiksemateks kategooriateks. Elektrisüsteemi arvutustes iseloomustavad koormusklassid sõlme ühendatud sarnase ehitusega koormusi, mis võetakse teatud eelduste kohaselt kokku. Lõppkokkuvõttes saadakse sellest agregeeritud sõlmekoormus, mille lahendus meetodiks kasutatakse tihti eksponentsiaalset või polünoomset avaldist, millega üritatakse vähendada arvutustele kulunud aega ning ka arvutuste raskusastet. Mudel, mis iseloomustab koormuse koosseisu koormusklassis on alati agregeeritud koormusemudel. [4]

Enamus kirjanduse allikates on süsteemi koormus jaotatud kolme suuremasse klassi: kodutarbijad, avalik ja tööstus. Kodutarbijate klassi iseloomustavad tavaliselt maja kompleks, mille ainukeseks eesmärgiks on elamistingimuste rahuldamine elaniku jaoks. Avalik sektor koosneb avaliku ja erasektori äridest ning asutustest, mille põhieesmärkideks on teenuste pakkumine inimestele. Avalik sektor ei ole seotud tootmisprotsessidega, mis kuuluvad juba tööstuse alla. Tööstuse koormus on defineeritud kui seadmed, mis on vajalikud ükskõik milliseks tootmisprotsessi lõpule viimiseks. [4] Selles uurimustöös on eraldi veel võetud põllumajanduse koormusklass, mille tavalisteks tegevusaladeks võib lugeda loomade- ning taimekasvatuse. Koormusklasse omavahel võrreldes on selgesti näha, et kõige rohkem sarnanevad omavahel tööstus ja põllumajandus ning kodutarbijad ja avalik sektor.

Üldjuhul on keeruline määrata korrektseid koormuse mudeleid tööstusele kuna selles koormusklassis on väga palju erinevaid protsesse ning nende võrdlemine kujuneb üldjuhul võimatuks. Raskusi tekitab ka põllumajandus, kuid rohkem info puudumise tõttu. Avaliku ja kodutarbijate koormusklassidele on lihtsam korrektsed koormusemudelid määrata kuna koormusklassi enda sees on väiksem komponentide ja protsesside arv. Võimalikult väikese veamääraga tulemuste saavutamiseks tuleks koormusklass omakorda jagada väiksemateks osadeks. Samamoodi tuleks ka väiksemate sektori osadele määrata komponentide erinev

osakaal ning nende aktiiv- ja reaktiivenergia võimsused kuna need suurused on muutlikud ka sama koormusklassi sees. Arvestada tuleks ka päeva siseste ning aastaegade erinevate väärtustega. [4]

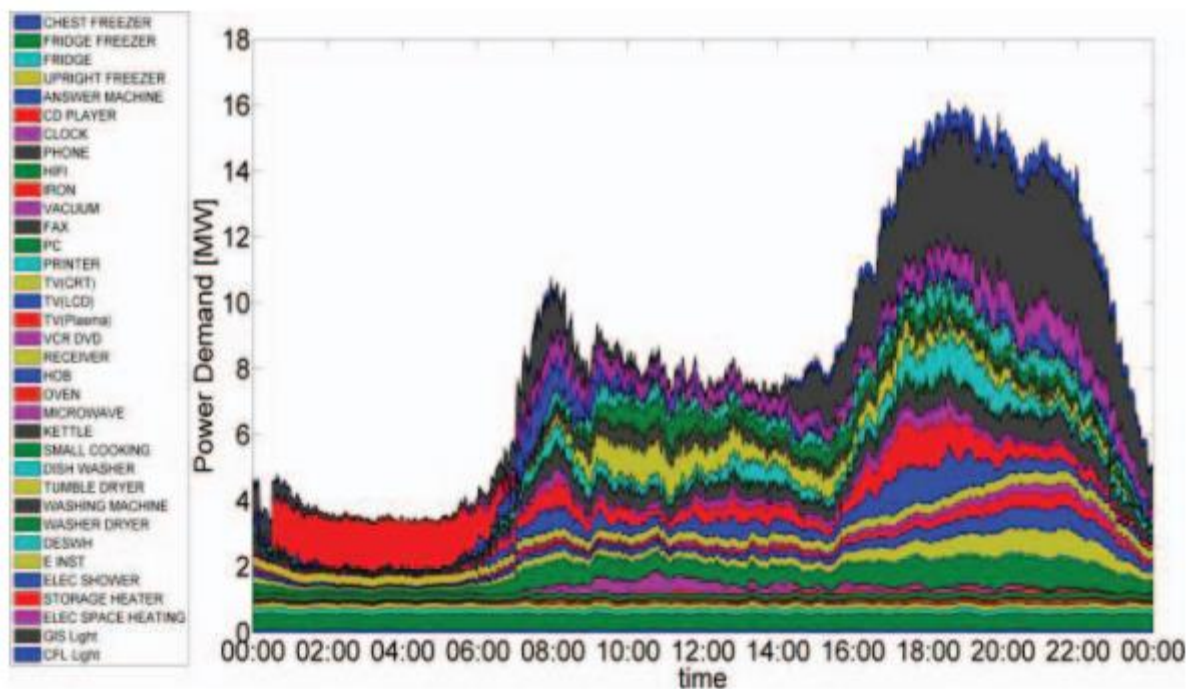
3.1 Kodutarbijate koormusklass

Kodutarbijate koormusklassi juures tuleks arvestada majapidamiste erinevate tarbimisharjumustega – erinevad elektriseadmed ning küttesüsteemid. Seetõttu eeldab koormuskarakteristikute avaldamine teatud seaduspärasuse märkamist ja selle põhjal struktuuri ehitamist. Otseselt Eesti kodumajapidamiste kohta on vähe andmeid, seega toetutakse siin töös rohkem välismaa allikatele ning eelnevalt kaitstud Tallinna Tehnikaülikooli uurimustöödele. [9]

Eesti maksimaalne koormus aastatel 2011...2015 jääb vahemikku 1400...1500 MW ja minimaalne koormus on vahemikus 440...490 MW. Tipukoormused on enamasti jaanuaris või veebruaris ning baaskoormuseks võib lugeda juuni, juuli ja augusti kuu koormusi. Eesti kodumajapidamiste osakaal kogu elektritarbimisest ajavahemikul 2011...2015 moodustas kuskil 19...22%. Peale koormuse muutumist tunni lõikes tuleks arvestada ka erinevate aastaegade, kus Eestis on võimalik välja tuua kaks kindlate tingimustega perioodi: talve ja suve vahemik. Suve ja talve peamine tarbimise vahe tuleb peamiselt valgustuse ja küttesüsteemide arvelt ning suvel kulub ka rohkem elektrit jahutamise peale. Elektriküttega majapidamistes moodustab elektriga kütmine kogutarbimisest umbes poole, seega talvel võib keskmine kütteseadmete võimsus olla ligi 200 MW ja suvel, kuna osasid seadmeid ei kasutata, võib nende seadmete võimsus langeda 50 MW juurde. Muus osas võimsus graafikus suuri kõikumisi ei toimu ning tunnusjoon on suhteliselt stabiilne. [9]

Joonisel 3.1 on välja toodud Suurbritannia ühe sõlme koormus, mis on modelleeritud tarkvaraga CREST. Kodumajapidamiste arv antud sõlmes on 7968, ülejäänud hooneid on 357 ning maksimaalne koormus 16,18 MW ja võimsustegur 0,97. Modelleerimisel tulemuste saamiseks võeti ka ülejäänud hoone kodumajapidamiste hulka. Jooniselt 3.1 on näha iga seadme osakaal ööpäevases tarbimises ning tema muutused tunni lõikes. Koormuse tipud on näha kella 7.00...9.00 vahel, kui inimesed valmistuvad tööle ja kooli minekuks. Järgmine koormuse tipp on näha alates kella 17.00, sellel hetkel tulevad inimesed töölt ja koolist tagasi koju. Väiksemaid piike põhjustavad kindlad seadmed, millel on suurem tarbimisvõimsus nagu näiteks triikraud. Koguaeg on ka näha, et teatav baaskoormus on püsiv sõltuvalt kellaajast kuna paljud seadmed

jäetakse kodus lahkudes ooterežiimile. Vastavalt ootustele suureneb öhtustel aegadel valgustite ning televiisori osakaal. [9]



Joonis 3.1 Kodumajapidamiste koormusgraafik iga seadme löikes [32]

Kodutarbijate koormusklassi sagedustundlikkustegurite leidmiseks on vajalik tüüpkoormusseadmete rühmade osakaalude paika panek. Kuna erinevatel allikatel puudub ühtne ja läbiv väärtuste kogum, siis toon välja kõik leitud tulemused. Algselt alustan allika [9] tulemustest, mis on Tallinna Tehnikaülikoolis kaitstud magistritöö, mille põhiteema oligi kodutarbijate koormuse uurimine pinge seisukohast. Tabelis 3.1 on välja toodud erinevate koormusgruppide osakaalud kodutarbijate jaoks. Osakaalud on leitud üksikute komponentide tarbimisvõimsuse ja osatähtsust arvestades leitakse kõikidele seadmetele osakaal kogu tarbimisest. Pärast lisatakse üksikud seadmed õigetes koormusrühmadesse. Märja ja külma koormuse alla kuuluvad mootorid, ICT tähendab elektroonikat ning lineaarne koormus on selle töö mõistes aktiivtakistusega koormuse rühm.

Tabel 3.1 Koormusgruppide osakaalud [9]

Koormusetüüp	Talv [%]			Suvi [%]		
	Hommik	Õhtu	Päeva keskmine	Hommik	Õhtu	Päeva keskmine
Märg koormus	6,1	6,85	5,8	14,06	8,43	10,57
Külm koormus	15,77	12,75	14,89	20,12	15,51	18,52
ICT	11,45	15,56	12,39	21,28	23,98	21,8
Lineaarne koormus	47,95	42,38	46,83	37,9	43,05	39,97

Valgustus	18,72	22,46	20,09	6,64	9,03	9,15
-----------	-------	-------	-------	------	------	------

Sagedustundlikkustegurid leitakse analoogselt eelnevates peatükkides kirjeldatule, kus vastavad osakaalud korrutatakse läbi arvatud koormusgruppide teguritega. Kui iga koormusgrupi jaoks on tegurid leitud, siis need summeeritakse kokku ning saadakse koormusklassi sagedustundlikkustegurid. Tabelis 3.2 on arvatud sagedustundlikkustegurid, kus näitena toon välja talvise hommiku märja koormuse arvutusloogika. Korrutise esimene tegur on märja koormuse talve hommiku osakaal ning teine tegur tabelis 2.7 võetud märja koormuse talvised sagedustundlikkustegurid. Samat loogikat kasutades saadakse iga koormusgrupi juurde tegur, mille summeerimisel saadakse koormusklassi sagedustundlikkustegur.

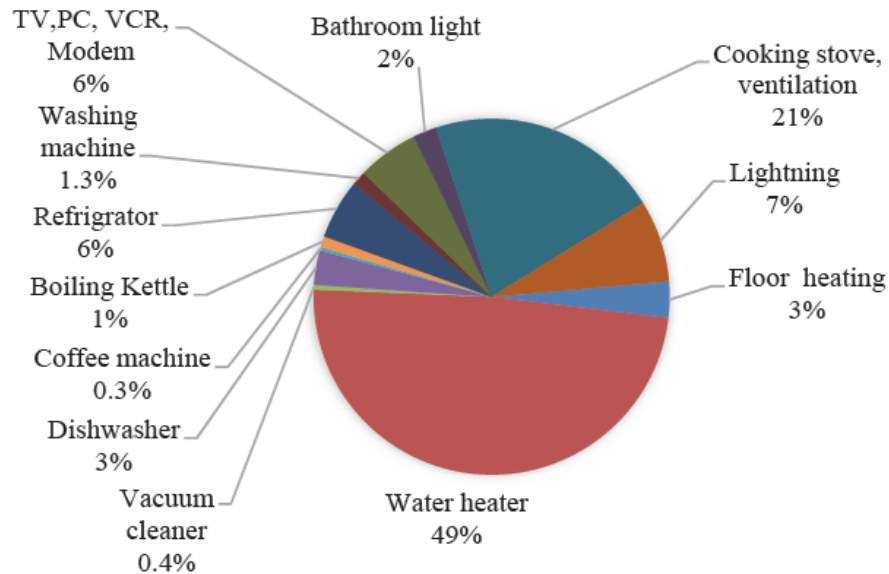
$$K_{pf} = \frac{6,1}{100} * 1,99 = 0,12 \quad (3.1)$$

$$K_{qf} = \frac{6,1}{100} * 0,81 = 0,05 \quad (3.2)$$

Tabel 3.2 Kodutarbijate talve ja suve sagedustundlikkustegurid

Koormusetüüp	Talv [%]					
	Hommi k k _{pf}	Hommik k _{qf}	Õhtu k _{pf}	Õhtu k _{qf}	Päeva keskmin e k _{pf}	Päeva keskmin e k _{qf}
Märg koormus	0,12	0,05	0,14	0,06	0,12	0,05
Külm koormus	0,12	-0,31	0,10	-0,25	0,12	-0,29
Elektroonika	0,00	-0,31	0,00	-0,42	0,00	-0,33
Valgustus	0,08	-0,19	0,09	-0,23	0,08	-0,21
Aktiivtakistusega	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Summa	0,32	-0,76	0,33	-0,84	0,31	-0,78
Koormusetüüp	Suvi [%]					
	Hommi k k _{pf}	Hommik k _{qf}	Õhtu k _{pf}	Õhtu k _{qf}	Päeva keskmin e k _{pf}	Päeva keskmin e k _{qf}
Märg koormus	0,28	0,11	0,17	0,07	0,21	0,09
Külm koormus	0,10	-0,26	0,08	-0,20	0,09	-0,24
Elektroonika	0,00	-0,57	0,00	-0,64	0,00	-0,58
Valgustus	0,03	-0,07	0,04	-0,09	0,04	-0,09
Aktiivtakistusega	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Summa	0,41	-0,78	0,28	-0,87	0,34	-0,83

Järgmisena kasutan andmeid allika [33] poolt, mis on samuti Tallinna Tehnikaülikoolis kaitstud doktoritööd. Selles uurimustöös teostati mõõtmised tavalises majapidamises nelja nädala jooksul 02.2012 – 03.2012. Tulemused on toodud joonisel 3.2.



Joonis 3.2 Majapidamise koormuse jaotus mõõtmiste alusel [33]

Järgmiseks on vaja jooniselt leitud komponendid jaotada selles uurimustöös defineeritud tüüp koormusgruppidesse. Vastavad osakaalud on välja toodud tabelis 3.3. Koormusgruppide koosseisud: märg koormus – pesumasin, nõudepesumasin, külm koormus – külmkapp, tolmuimeja, elektroonika – TV, valgustus – vannitoea ja tavaline valgustus, aktiivtakistusega – veekeetja, kohvimasin, boiler, pörandaküte, pliit. Kõige suurem osakaal langes aktiivtakistusele, seega on ka sagedustundlikkustegurid väiksemad võrreldes teiste allikatega.

Tabel 3.3 Koormuse osakaalud ning sagedustundlikkustegurid

Koormusetüüp	%	Koormusetüüp	k_{pf}	k_{qf}
Märg koormus	4,3	Märg koormus	0,03	-0,04
Külm koormus	6,4	Külm koormus	0,17	0,11
Elektroonika	6	Elektroonika	0,00	-0,17
Valgustus	9	Valgustus	0,04	-0,09
Aktiivtakistusega	74,3	Aktiivtakistusega	0,00	0,00
		Summa	0,21	-0,16

Järgmisena toon välja erinevatest artiklitest ja uurimustest toodud kodutarbijate rühmade osakaalud. Probleemid erinevatest allikatest saadud andmetega on väike analüüsi osa artiklis endas, seega puudub oluline info uuringu meetoodika ja tingimuste kohta. Allika [22] põhiteemaks on pinge stabiilsuse uurimine ning on välja toodud, et osakaalude määramine on väga keeruline tegevus koormuse pideva ajas muutumise tõttu. Seetõttu on osakaalud võetud selles allikas n-ö tunnetuslikult, mitte teatud uurimuste tulemusena. Samuti materjal [34] on ühe India õppejõu loengu materjal, kus osakaalud on õppejõud ise määranud. Puudub täpne

info, mis metoodika nende tulemuste leidmisel kasutatud on. Allikas [4] leitud algartiklile puudub ligipääs, seega ei ole võimalik täpsemalt selle sisu siin kirjeldada. Materjali [35] on WECC mudel, mis koosneb neljast mootorist (A, B, C ja D), staatilisest ja elektroonilisest koormusest. Komponent A kujutab kolmefaasilist mootorit, mis töötab konstantse koormusmomendiga. Komponent B kujutab ruutvõrdelise koormusmomendiga mootoreid. Komponent C esindab madala inertsiga komponente. Komponent D esindab ühefaasilist mootorit. Sagedusmuunduriga ühendatud tarvitid lisatakse elektroonika rühma alla. Selles uurimuses võtan mootori komponendid ühe grupi alla kuna erinevate mootori tüüpide jaotamine on juba tehtud peatükis 2.3. [9]

Allikas [20] andmed pärinevad Rootsi majapidamiste uuringul, kus vaadati neljasaja kodu elektritarbimist aastal 2008. Tüüpilised komponendid on erinevad elektroonika seadmed võimsusega kuni 0,75 kW, hõõglambid ja elektriküte. Rootsis ja Euroopa Liidus on hõõglambid asendatud teiste valgusallikatega. Uuringus on jaotatud korterid ning elamud eraldi, kuid selle uurimustöö käigus jätame nende osakaalu samaks. Tabelis 3.4 on ka näha koormusrühma nimega teised, sinna alla kuulub koormus, mida ei suudetud kuskile muu rühma alla lisada. Magistritöös jagan teised koormusrühma tuntud rühmade vahel laiali. Seejärel korrutan osakaalud koormusrühmade sageduskarakteristiku koefitsientidega läbi, mille tulemused on leitavad tabelis 3.5.

Tabel 3.4 Kodutarbijate koormuse koosseis

Allikas	Mootorid [%]	Elektroonika [%]	Aktiivtakistusega [%]	Valgustus [%]	Teised [%]
[35]	47	13	40		
[34]	64,4		4,1	3,7	27,8
[4]	37		25	21	18
[22]	75		25		
[20]	22	14	38	13	13

Tabel 3.5 Kodutarbijate sagedustundlikkustegurid

Koormusetüüp	k _{pf} [35]	k _{qf} [35]	k _{pf} [34]	k _{qf} [34]	k _{pf} [20]	k _{qf} [20]
Mootorid	0,24	-0,47	0,36	-0,71	0,13	-0,25
Elektroonika	0,00	-0,35	0,00	-0,19	0,00	-0,46
Valgustus	0,00	0,00	0,04	-0,11	0,17	-0,42
Aktiivtakistusega	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Summa	0,24	-0,82	0,41	-1,01	0,29	-1,14
Koormusetüüp	k _{pf} [4]	k _{qf} [4]	k _{pf} [22]	k _{qf} [22]		
Mootorid	0,21	-0,42	0,38	-0,75		
Elektroonika	0,00	-0,12	0,00	0,00		
Valgustus	0,10	-0,26	0,00	0,00		
Aktiivtakistusega	0,00	0,00	0,00	0,00		
Summa	0,31	-0,80	0,38	-0,75		

Tabelis 3.6 on välja toodud erinevate allikate kodutarbijate koormusklassi sagedustundlikkustegurid. Artikli [18] on tehtud mõõtmised elamurajoonis, kus võimsuseks on märgitud 14 MVA. Mõõtmiste ajaks on märgitud aasta 1982, seega tuleks neile tulemustele kriitilise pilguga peale vaadata kuna koormuse koosseis on märgatavalt muutunud. Allikas [4] on antud tulemuste tabel, kuid puudub uurimise metoodika. Artikli [4] tulemustes on näha, et suve aktiiv koefitsient on väiksem ning reaktiiv koefitsient suurem talve omast. Põhjuseks võib tuua suve suurema konditsioneeride osatähtsuse, kus talvel on selle asemel küte. Artiklis [27] on Põhja-Ameerikas läbi viidud uuringu tulemused. Originaal materjalis kujutati erinevate piirkondade väärtusi nagu lõuna või põhja, kuid selles magistritöös võtsin ma tegurite keskmise. Artikli [27] elektriküttega sagedus koefitsiendid on suuremad elektrikütteta piirkondade omadest. Tänapäeval peaksid tulemused olema teistpidi kaldus, suurem elektrikütte osakaal langetab sagedustundlikkusteguri väärtusi kuna on sagedussõltumatu. Puudub info, mida elektrikütte all silmas peetakse seega ei ole võimalik täpset põhjust välja tuua. Kõigi allikate talve sageduskarakteristikute tegurid on üldjuhul suuremad kuna talve perioodil on võrku ühendatud rohkem sagedusest sõltuvaid komponente.

Tabel 3.6 Kodutarbijate sagedustegurid sõltuvalt aastajast ning kütte meetodist

Allikas	k_{pf}	k_{qf}
Talv		
[18]	0,5	-2,5
[4]	1,0	-1,5
[27] (elektriküttega majapidamised)	0,97	-1,67
[27] (elektri kütteta majapidamised)	0,8	-1,62
Suvi		
[27] (elektriküttega majapidamised)	0,8	-2,22
[27] (elektri kütteta majapidamised)	0,75	-2,15
[4]	0,8	-2,2

3.2 Teenindus ja avalik koormusklass

Teenindus ja avaliku koormusklassi koosseis on üldjuhul mitmekesisem kui kodutarbijate koormusklass kuna hoonetel on rohkem lõppfunktsioone. Seetõttu on võimalik avaliku sektorit ka rohkem lahku lüüa ning luua rohkem alam koormusklassi. Teatud uuringutes lüüakse äri ja avalik sektor lahku, kuid andmete puuduse tõttu käsitletakse siin töös neid ühisena. Suurbritannia uuringu kohaselt on teeninduse koormusklassi koosseis: sport ja vabaaeg 5,8%, jaekaubandus 36,03%, kommunikatsioon ja transport 5,63%, hotellindus 12,63%, tervishoid 2,75%, haridus 5,77%, kontorid 13,41%, laod 12,9% ning teised 5,08%. [4] Äri- ja avaliku teeninduse sektor moodustas 2012. aastal Statistikaameti andmetel 36,8% (2572 GWh) kogu

Eesti elektritarbimisest. Eesti sisene tertsiaarse sektori koormuse jaotus on: kaubanduskeskused 26%, 24/7 hooned 32%, tavakontorid 34% ning muud 8%. Büroohooned jaotatakse oma olemuselt kahte gruppi: tavakontorid (8/5), kus käiakse tööl 8 tundi päevas ja 5 päeva nädalas ning 24/7 hooned, kus töö käib vahetustega ööpäevaringselt ja tarbimine on suhteliselt ühtlase iseloomuga. Büroohoonete osakaal moodustab kogu teenindussektorist ligikaudu 66%. [36]

Allikas [36] viidi läbi nende hoonete koormuse analüüs mõõtmiste teel. Analüüsitud büroohoonete elektrienergia tarbimine jäi aastaringselt samasse suurusjärku, umbes 250 kW/h ja 350 kW/h vahel. Eristatakse ka suve ja talve tarbimise vahet, kus suureks mõjutajaks on elektriküte suurem kasutus talveperioodil. Samuti on tarbimine natukene suurem tööpäevadel, kuid see vahe nädalavahetusega on ainult 0,6 MWh, seega selles töös ei eristata tööpäevade ja nädalavahetuse tarbimise vahet. 24/7 tüüpi hoonetes on 100% elektriküte, millest 94% moodustub elektriradiaatorite tarbimine. 8/5 hoonel on kaugüküte. Tabelis 3.7 on välja toodud avaliku sektori alamgruppide osakaalud, mis on leitud mõõtmiste teel oktoobrist kuni märtsini. 8/5 hoonetel moodustab valgustus ligikaudu poole kogu koormusest. Sise- ja välisvalgustuse energiatarve jaguneb võrdselt, mõlemal umbes 45%, ülejäänud moodustab avariivalgustus. Sisevalgustuse kõige suurem osakaal langeb kabinetide lampidele. Ventilatsiooni juhitakse sõltuvalt kellaajast, kus kell 4...5 lülitakse süsteem sisse ning kell 17...18 lülitakse see välja. Elektriküttest moodustavad 90% elektriradiaatorid ning nende tarbimine on terve päeva vältel stabiilne. 24/7 hoonel moodustab umbes 50% kogu tarbimisest serverid ning muud sideseadmed. Kaubanduskeskust köetakse maagaasikatlamajast, mis toimub põhiliselt läbi ventilatsiooni. Ventilatsiooniseadmed lülitavad ennast sisse öösel kella 2...3 vahel ja välja öhtul kella 20...21 vahel. Elektriküttele ja gaasiküttega seotud abiseadmetele kulub ainult 2% kogutarbimisest. Muude tarbijate alla kuuluvad köögiseadmed, nõrkvooluseadmed, pumbad, elektrilised ukSED, pistikupesadesse ühendatud komponendid jne. Valgustuse osakaal kokku on 45%, kus sisevalgustus lülitatakse sisse kella 6...9 vahel ning välja lülitatakse 20...22 vahel. [36]

Tabel 3.7 Koormuse jaotus avaliku sektori alamgruppides [36]

24/7 hooned	[%]	Kaubanduskeskused	[%]	8/5 hooned	[%]
Elektriküte	13,8	Muud tarbijad	16	Elektriküte	27
Valgustus	4,3	Sise-valgustus	35	Valgustus	43
Bürooseadmed	1	Välisvalgustus	10	Bürooseadmed	6
Köögiseadmed	0,4	Külmakompressorid	29	Köögiseadmed	2
Ventilatsioon	32,2	Ventilatsioon	8	Ventilatsioon	22
III korrus (küte,	2,8	Elektriküte	2		

valgustus, projektorid, arvutid)			
Serverid, UPS, sideseadmed	45,5		

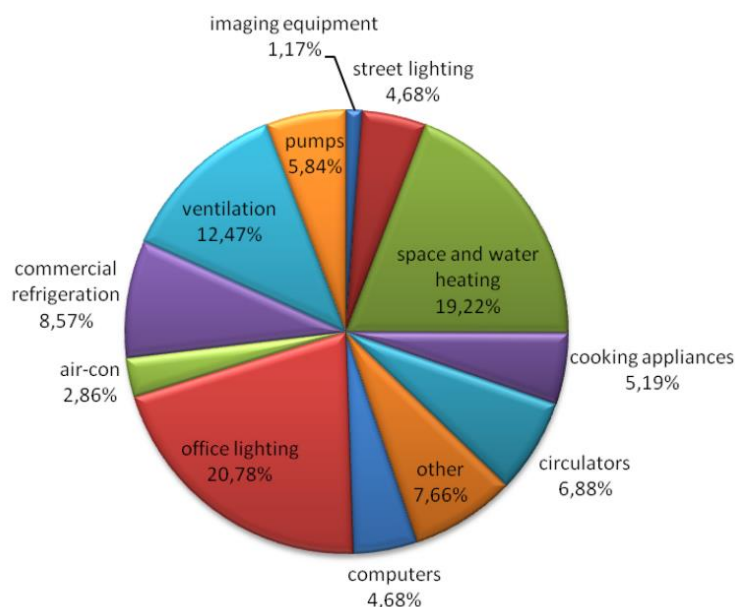
Järgmisena tuleb mõõtmiste käigus leitud tarbimise komponentide osakaalud jagada selles uurimuses käsitletud rühmadesse: mootorid, aktiivtakistusega, elektroonika ning valgustus. Gruppidesse jaotamise järgselt korrutan osakaalud läbi eelnevates peatükkides leitud rühma sagedustundlikkusteguritega. Toon välja rühmadesse jaotamise meetodid, kus aktiivtakistuse rühma moodustasid: elektriküte ning köögiseadmed; elektroonika rühma: serverid ja sideseadmed; valgustuse alla kuulusid kõik valgustusega seotud komponendid; külmakompressorid liigitasin mootorite külma koormuse alla; ventilatsiooni juurde sai otse võetud ventilatsiooni sagedustundlikkustegurid; muud ja ülejäänud osakaalud jagati võrdselt teiste rühmade vahel ära. Samuti uurisin ka suve ja talve tarbimise erinevust ning kuidas see mõjutab sagedustundlikkustegureid. Kõige suurem vahe kujuneb elektrikütte ja ventilatsiooni tõttu. 8/5 hoonete grupil suvel tõstsin ventilatsiooni osakaalu ligikaudu 80% ning samas langetasin elektrikütte osakaalu umbes 60%. Sama loogikat kasutasin ka 24/7 hoonete juures, kaubanduskeskuste grupis muutsin vastavalt külma koormuse ja ventilatsiooni osakaalusid. Ülejäänud komponentide osatähtsus jäi samaks või muutus mõne protsendi võrra. Tabelis 3.8 on välja arvatud Eleringi aruande andmete põhjal avaliku sektori sagedustundlikkustegurid. Tulemuste põhjal võib järeldada, et üksikute komponentide osakaalude muutmine ei tähenda koheselt suurt muutust kogu klassi tegurite väärtustes. Põhjuseks on küllaltki väikesed koormusgruppide sagedustundlikkustegurid, millega osakaalud läbi korrutatakse. Suve koefitsiendid on natukene suuremad kuna vähendati sagedusest sõltumatute komponentide osakaalu ning need asendati sagedusest sõltuvatega.

Tabel 3.8 Avaliku sektori sagedustundlikkustegurid sõltuvalt aastaajast

Aeg	k_{pf}	k_{qt}
Aasta keskmised	0,60	-1,99
Suvi	0,68	-2,21
Talv	0,51	-1,88

Joonisel 3.3 on toodud koormuse jaotus avalikus sektoris komponendi põhiselt, mida kasutati allikas [20] tertsiaarsektori kirjeldamisel. Mootorite osakaal kogutarbimisest on ligikaudu 37%, mille moodustavad ventilatsioon, külmutusseadmed, köögiseadmed ning pumbad. Teatud mootoreid võib leida ka ruumi ja vee soojendamise rühma all, kuid selles töös liigitatakse see

aktiivtakistusega rühma alla. Mootorite võimsus jääb üldjuhul 5...15 kW juurde. Allika [20] lõplikud osakaalud on leitavad tabelis 3.8.



Joonis 3.3 Avaliku sektori koormuse jaotus komponentide kaud [30]

Tabelites 3.9 ja 3.10 on toodud koormuse koosseis ja arvatud sagedustundlikkustegurid erinevate allikate põhjal. Mootorite osakaal jääb samasse suurusjärku ning ka valgustuse osatähtsuse numbrid sarnanevad. Ülejäänud rühmade tulemuste lahknemist põhjustab ka erinev liigitus meetodika, kus teatud artiklite koormusrühmade jaotus on tehtud teistmoodi. Samuti jagasin rühma teised selles töös defineeritud koormusgruppide vahel laiali. Allika [20] andmed on saadud Euroopa uuringust, kus põhiteemaks oli energia säästmise võimalused. Teiste algallikate täpsem sisukirjeldus on välja toodud peatükis 3.1.

Tabel 3.9 Teeninduse ja avaliku koormuse koosseis

Allikas	Mootorid [%]	Elektroonika [%]	Aktiivtakistusega [%]	Valgustus [%]	Teised [%]
[34]	46,7		4,5	41,5	7,3
[35]	43	14	43		
[4]	41			34	25
[22]	51		14	35	
[20]	36,6	25,5	24,7	25,5	7,7

Tabel 3.10 Avaliku sektori sagedustundlikkustegurid

Koormusetüüp	k_{pf} [34]	k_{qf} [34]	k_{pf} [35]	k_{qf} [35]	k_{pf} [20]	k_{qf} [20]
Mootorid	0,57	-0,66	0,50	-0,58	0,45	-0,52
Elektroonika	0,00	-0,05	0,00	-0,38	0,00	-0,21
Valgustus	0,44	-1,11	0,00	0,00	0,27	-0,69
Aktiivtakistusega	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Summa	1,00	-1,82	0,50	-0,96	0,72	-1,43
Koormusetüüp	k_{pf} [4]	k_{qf} [4]	k_{pf} [22]	k_{qf} [22]		
Mootorid	0,55	-0,64	0,59	-0,69		
Elektroonika	0,00	-0,17	0,00	0,00		
Valgustus	0,41	-1,03	0,35	-0,90		
Aktiivtakistusega	0,00	0,00	0,00	0,00		
Summa	0,96	-1,84	0,95	-1,59		

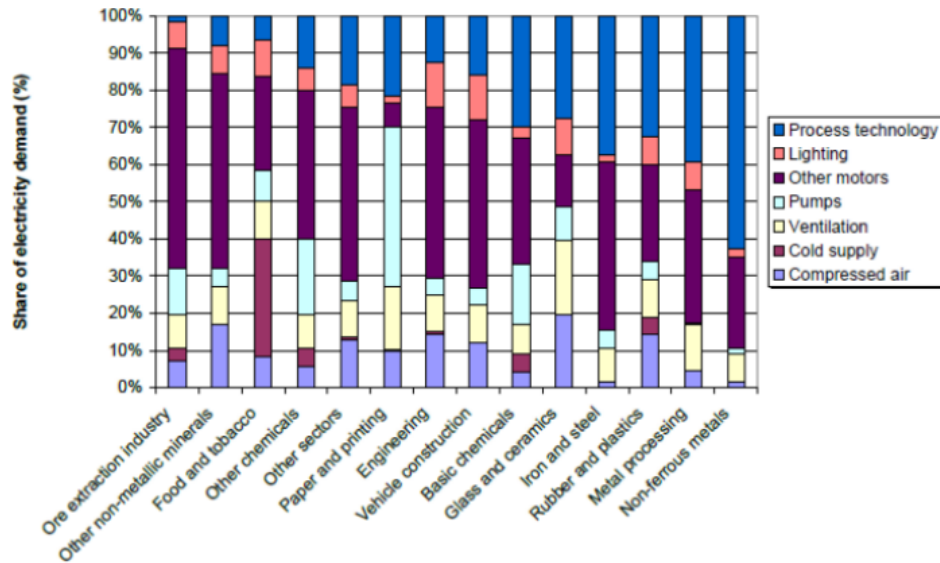
Tabelis 3.11 on välja toodud erinevate allikate avaliku koormusklassi sagedustundlikkustegurid. Artikli [18] mõõtmiste ajaks on märgitud aasta 1982, seega tuleks sellele tulemusele kriitilise pilguga peale vaadata kuna koormuse koosseis on märgatavalt muutunud. Täpseks kirjelduseks on märgitud kesklinna ettevõtte võimsusega 28 MVA, mis võib tähendada, et on rohkem keskendunud ühele avaliku sektori alamgruppile. Artiklis [27] on Põhja-Ameerikas läbi viidud uuringu tulemused. Tulemustes on ka näha eelnevalt käsitletud loogika, kus elektriküttega piirkondadel on väiksemad sagedustundlikkustegurid kuna elektriküte on sagedussõltumatu. Samuti on suve väärtused väiksemad talve omadest kuna kogu koormus on väiksem ja võrku on ühendatud seeläbi vähem sagedusest sõltuvaid komponente.

Tabel 3.11 Teeninduse ja avaliku koormusklassi sagedustegurid sõltuvalt aastaajast ning kütte meetodist

Allikas	k _{pf}	k _{qf}
[18]	-0,2	-1,3
Talv		
[27] Elektri küttega	1,5	-1,1
[27] Elektri kütteta	1,7	-0,9
Suvi		
[27] Elektri küttega	1,2	-1,6
[27] Elektri kütteta	1,3	-1,9

3.3 Tööstuse koormusklass

Tööstusel on palju suurem lõpptarbimise operatsioonide hulk kui kodutarbijatel või avalikul sektoril. Võrreldes teiste koormusklassidega on tööstusel tavaliselt väga spetsiifiline funktsioon, mille täitmiseks kasutatakse suures hulgal erinevaid masinaid, seetõttu pole ka koormuse käitumine tihti prognoositav. Kõige suurem osakaal kogutarbimisest langeb asünkroonmootoritele, mida kasutatakse masinate jõuallikana, mis valmistavad erinevaid tooteid. [20] Jooniselt 3.4 võib näha erinevate tehnoloogiliste protsesside elektritarbimise osatähtsust. Sellest saab järeldada, et tööstuse koormuse liigitus on väga raske tänu väga suurele eri protseduuride liikidele.



Joonis 3.4 Eri tüüpi tööstuste elektritarbimise osakaalud [37]

Doktoritöös [38] uuriti puidutööstuse ettevõtet, kus tootmisliin oli suuresti automaatselt töötav üksus. Tootmisüksuse ülesandeks on puidu töötlemine, mis teeb selle väga energiamahukaks ettevõtmiseks. Asünkroonmootorite osatähtsus kogu koormusest on 95%. Valdav osa suurematest mootoritest on ühendatud läbi pehmekäiviti ja üks peamisi mootoreid on ühendatud läbi sagedusmuunduri. Ülejäänud ühendatud elektrimootoritest on 15% sagedusmuunduriga. Kogu jaama võimsus on 11 MW, kus 5% moodustavad valgustus, elektriküte, kontoriseadmed jpt. Tabelis 3.12 on välja toodud täpsed koormuse jaotamise osakaalud ning nende jagamine selles töös käsitletud koormusrühmadesse, millest lõpuks arvutatakse sagedus karakteristiku koefitsiendi väärtused. Tööstuse mootori komponendis on arvestatud 15% sagedusmuunduri osakaaluga, mis selles töös käsitletakse sagedusest sõltumatuks osaks.

Tabel 3.12 Koormuse jaotus ja vastavad sagedustundlikkustegurid [38]

Koormusetüüp	[%]	Koormusetüüp	[%]	Koormusetüüp	k_{pf}	k_{qf}
Electrical drives (induction motors)*	80	Tööstuse mootor	80	Tööstuse mootor	1,34	0,46
Electrical drives (as electronic load)	15	Ventilatsioon	1,5	Ventilatsioon	0,01	-0,03
Cooling (air conditioners)	1,55	Elektronika	17,5	Elektronika	0,00	-0,47
Electrical heating	1	Valgustus	0	Valgustus	0,00	0,00
Lighting (electronic load)	2	Aktiivtakistusega	1	Aktiivtakistusega	0,00	0,00
Office equipment + miscellaneous (electronic load)***	0,5			Summa	1,36	-0,04

Tabelis 3.13 on toodud koormuse koosseis ja arvutatud sagedustundlikkustegurid erinevate allikate põhjal. Mootorite rühma osakaal on tunduvalt suurem võrreldes teiste koormusklassidega. Allikas [20] on uuritud ühe piiritustehase koosseisu, mis kuulub joonise 3.4 toidu ja tubaka liigituse alla. Kõigis materjalides leitud koormuse rühma teised jagasin tuntud komponentide gruppide vahel võrdselt ära. Teiste allikate osakaalude leidmise meetodika ning tingimused on välja toodud peatükis 3.1. Tabelis 3.14 on erinevate allikate järgi arvutatud sagedustundlikkustegurid.

Tabel 3.13 Tööstuse koormuse osakaalude jaotus

Allikas	Mootorid [%]	Elektroonika [%]	Aktiivtakistusega [%]	Valgustus [%]	Teised [%]
[4]	69		11	8	12
[34]	80		5	10	5
[35]	78	15	7		
[22]	76		5	19	
[20]	84			10	6

Tabel 3.14 Erinevate allikate tööstuse koormusklassi sagedustundlikkustegurid

Koormusetüüp	k_{pf} [35]	k_{qf} [35]	k_{pf} [34]	k_{qf} [34]	k_{pf} [20]	k_{qf} [20]
Tööstuse	1,31	0,45	1,36	0,47	1,43	0,49
Elektroonika	0,00	-0,40	0,00	-0,03	0,00	-0,04
Valgustus	0,00	0,00	0,07	-0,17	0,07	-0,17
Aktiivtakistuse	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Summa	1,31	0,05	1,43	0,26	1,50	0,28
Koormusetüüp	k_{pf} [4]	k_{qf} [4]	k_{pf} [22]	k_{qf} [22]		
Tööstuse	1,21	0,41	1,27	0,44		
Elektroonika	0,00	-0,08	0,00	0,00		
Valgustus	0,07	-0,17	0,11	-0,29		
Aktiivtakistuse	0,00	0,00	0,00	0,00		
Summa	1,27	0,17	1,39	0,15		

Tabelis 3.15 on välja toodud erinevate allikate tööstuse koormusklassi sagedustundlikkustegurid. Artikli [18] mõõtmiste ajaks on märgitud aasta 1972, seega tuleks sellele tulemusele kriitilise pilguga peale vaadata kuna koormuse koosseis on märgatavalt muutunud. Täpseks kirjelduseks on märgitud alumiiniumi tehas võimsusega 132 MVA. Eestis selline tööstusüksus puudub, seega ei ole mõistlik seda tulemust arvestada. Artiklis [27] võib välja lugeda, et metalliga tegelevatel ettevõtetel on üldjuhul suuremad sageduskarakteristiku koefitsiendid.

Tabel 3.15 Tööstuse koormusklassi sageduskarakteristikute koefitsiendid

Allikas	k_{pf}	k_{qf}
[27] [22]	2,6	1,6
[27] Alumiiniumi tööstus	-0,3	0,6

[27] Terasetehas	1,5	0,6
[18] Alumiiniumi tööstus	0,4	0,7
[39]	0,33	6,47

3.4 Põllumajanduse koormusklass

Põllumajanduse koormusklassi kohta leidub väga vähe infot. Ainukese allikana saame kasutada [31] kujutatud osakaalusid. Samuti toon võrdluse momendiks ka kirjanduste allikate põhjal leitud tööstuse koormusklassi osakaalude keskmised näitajad kuna põllumajanduse koormusklass sarnaneb tööstuse omale kõige rohkem. Sellist lähenemist on kasutatud ka allikas [7]. Suurt sageduskarakteristikute koefitsientide erinevust põhjustab mootori rühma osakaal, mis allikal [31] on tunduvalt väiksem tööstuse keskmiste omadest.

Tabel 3.16 Põllumajanduse koormusklassi osakaalud

Allikas	Mootorid [%]	Elektroonika [%]	Aktiivtakistusega [%]	Valgustus [%]
[31]	25	25	50	
Tööstuse keskmine	77,45	7,35	8,25	6,65

Tabel 3.17 Põllumajanduse koormusklassi sagedustundlikkustegurid

Allikas	k_{pf}	k_{qf}
[31]	0,51	-0,44
Tööstuse keskmised	1,64	0,4

3.5 Lõplikud koormusklasside sagedustundlikkustegurid

Siin peatükis koondame kokku ja toome välja kõikide koormusklasside sagedustundlikkustegurid. Kodutarbijate ja avaliku koormusklassi puhul on ka eristatud suve- ja talveperioode, teiste sektorite kohta selline info puudus. Talveperioodi koefitsiendid on mõlema kategooria jaoks väiksemad kui suve tegurid, üldjuhul on see muutus tingitud elektriküte suurema osakaaluga külmadel ilmadel. Elektriküte liigitatakse selle töö käigus ning ka paljudes teistes allikates aktiivtakistuseks ehk loetakse sagedusest sõltumatuks. Soojematel ilmadel asendub elektriküte näiteks õhukonditsioneeriga, mis kuulub mootorite rühma alla ning on sagedusest sõltuv koormus. Avaliku sektori puhul tuleb suve ja talve väärtustesse suhtuda äärmise kriitilisusega kuna puudub täpne algallikas, kus on toodud tertsaarsektori ajaline osakaalude muutus. Selles uuringus leiti osakaalude erinevus rohkem põhimõttel, et näidata kuidas üksikute komponentide muutus mõjutab kogu klassi tulemusi. Seega muudeti üksikute seadmete osakaalu ligikaudu 50%, kuid kogu klassi sagedustundlikkus koefitsiendi muutus oli umbes 20%. Kui võrrelda kirjanduses antud tulemusi arvutatud väärtustega, siis esineb kõikides koormusklassides sama muutus. Kirjanduse tegurid on tavaliselt suuremad arvutatud

koefitsientidest. Seda trendi võib põhjendada mitme väitega, näiteks toimub koormuse sagedustegurite omavaheline kompenseerimine kuna tegu on erimärgiliste arvudega. Teiseks põhjuseks võib pidada, et allikates on leitud koormusklasside tegurid mõned aastakümned tagasi, kus koormuse koosseis oli märgatavalt teistsugune praegusega. Seda näitab ka peatükis 2.1 elektroonika uuringud, kus ühe materjali samade komponentide sageduskarakteristiku koefitsiendid erinesid teiste artikli omadest peaaegu kümme korda. Väiksemate tulemuste üheks põhjuseks võib olla uuringu toimumise aasta kuna selles artiklis toimusid laborikatsed aastal 2016, kus teistel jäid need jällegi mõne aastakümne taha. Samuti ei ole enamustel kirjanduse allikatel juures täpset tegurite saamise metoodikat, seetõttu on raske hinnata nende õigsust. Kui vaadata arvutatud tegureid, siis ühe klassi tulemused on küllaltki sarnased. Arvude ühtekalduvusele aitab kaasa ka elektriliste komponentide endi väikesed sagedustundlikkustegurid, mis viivad osakaaluga korrutamisel tulemi madalaks. Arvestada tuleb ka allikate [36] ning [33] puhul, et nendes uuringutes olid objektideks üksikud hooned. Seetõttu ei ole korrektne neid tulemusi üksikult tervet koormuklassi esindama panna.

Tööstuse ja põllumajanduse koormusklasside uurimisel on raskendavaks tingimuseks info puudus. Info puudust põhjustab mõlema sektori väga lai protsesside olemasolu, kus näiteks samas sõlmes asuvatel tööstusettevõtetel võib olla täielikult erinev koormuse jagunemine. Samuti ei liigitata põllumajandust eraldi koormusklassiks paljudes materjalides, seetõttu puudub uurimise motiiv. Ka Eestis sõlmekoormustes on põllumajanduse osakaal suhteliselt väike, mistõttu võib ühe lahendusena välja pakkuda põllumajanduse tulemuste tööstuse samastamisega. Täpsemate osakaalude saamiseks saatsin 12. põllumajandusettevõttele välja ka küsitluse, mis on välja toodud lisa ühes. Küsitluse vastuse tulemusi võib pidada negatiivseks, kus kahest ettevõttest helistati ning ühtegi täidetud küsimustiku tagasi ei saadetud. Ühe ettevõtte esindaja vihjas halvale ajastusele, kus hetkel toimub külviaeg ning ajapuuduse tõttu ei saanud vastata. Teise ettevõtte esindajal ei olnud täpset infot osakaalude suhtes. Kuigi selle küsitluse tulemusena ei saadud ühtegi korrektset vastust, siis tuleks sellega kindlasti edasi tegutseda ning seda igas koormuklassis. Tähtis on kõrvutada Eesti tulemused kirjanduse omadele kuna ka riikide vahel on märgatav koormuse koosseisu erinevus, sõltuvalt riigi majandusest ning asukohast. Näiteks kui vaadata joonist 2.4, siis see annab selge ülevaate Rootsi ja Suurbritannia valgustuse osakaalude erinevusest sõltuvalt ajast. Samamoodi võivad osakaalud teistsugused olla ka ülejäänud koormusrühmadel, kui võrrelda Eestit ja kirjanduse allikate väärtusi. Üldjuhul on põllumajandus ning tööstuse sagedustundlikkustegurid suuremad kodu- ja avaliku sektorite omadest. Väärtuste erinevust põhjustab kõrgem mootorite kasutus tööstuses ja põllumajanduses

ning mootoritel on küllaltki suured sageduskarakteristiku koefitsiendid. Tööstuse tegurid erinevate allikate põhjal on kogu klassi ulatuses samas suurusjärgus. Põllumajanduses erinevad tulemused märgatavalt, seega kogu klassi väärtuseks on võimalik võtta nende keskmine. Allikate [38] ja [20] uuringu objektiks on üksik tehas, seega ei sobi võtta kogu klassi sagedustundlikkustegureid esindama. Küll aga, on kõikide koormusklasside jaoks leitud piisavalt allikaid peale põllumajanduse, et keskmistatud tulemused peaksid sobima ka Eesti põhivõrgu sõlmekoormustele.

Tabel 3.18 Kodutarbijate ja avaliku sektori sagedustundlikkustegurid

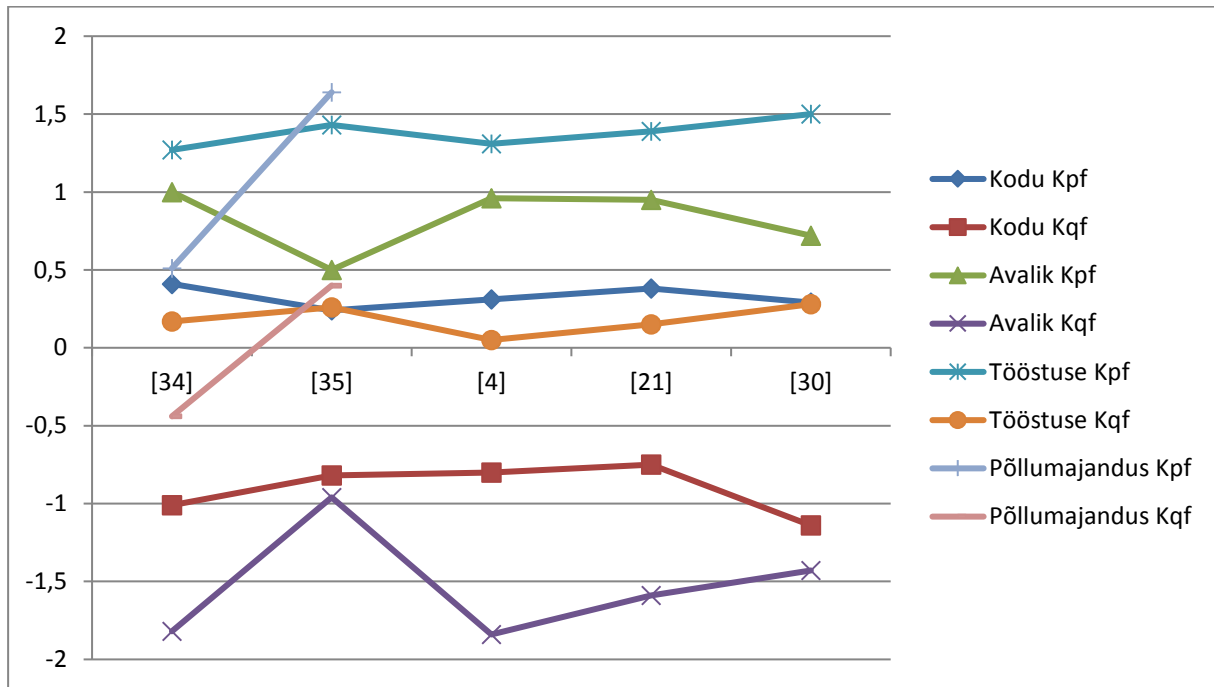
KODUTARBIJAD			AVALIK		
[9]	k_{pf}	k_{qf}	[36]	k_{pf}	k_{qf}
Suvi			Kogu aasta keskmised		
	0,34	-0,83		0,60	-1,99
Talv			Suvi		
	0,31	-0,78		0,68	-2,21
[33]	k_{pf}	k_{qf}	Talv		
	0,21	-0,16		0,51	-1,88
Kirjanduse allikad	k_{pf}	k_{qf}	Kirjanduse allikad	k_{pf}	k_{qf}
[34]	0,41	-1,01	[34]	1,00	-1,82
[35]	0,24	-0,82	[35]	0,50	-0,96
[4]	0,31	-0,80	[4]	0,96	-1,84
[22]	0,38	-0,75	[22]	0,95	-1,59
[20]	0,29	-1,14	[20]	0,72	-1,43
Allikate keskmine	0,33	-0,90	Allikate keskmine	0,85	-1,55

Tabel 3.19 Tööstuse ja põllumajanduse sagedustundlikkustegurid

TÖÖSTUS			PÕLLUMAJANDUS		
[38]	k_{pf}	k_{qf}	[31]	k_{pf}	k_{qf}
	1,36	-0,04		0,51	-0,44
Kirjanduse allikad	k_{pf}	k_{qf}	Tööstuse põhjal	k_{pf}	k_{qf}
[4]	1,27	0,17		1,64	0,40
[34]	1,43	0,26	Keskmine	1,08	-0,02
[35]	1,31	0,05			
[22]	1,39	0,15			
[20]	1,50	0,28			
Allikate keskmine	1,38	0,18			

Joonisel 3.5 kujutatakse ühiselt kõigi koormusklasside aktiiv- ja reaktiivkoormuse sagedustundlikkustegureid, kus x-telg tähistab kirjanduse allika numbrit ja yz-telg koefitsiendi arvulist väärtust. Üldjuhul on graafikute tunnusjooned suhteliselt siledad ja suuri kõikumisi pole. Erandiks on põllumajandus, kus juba eelnevalt käsitletud teema puhul andmete puuduse

tõttu on võetud üheks uurimise objektiks tööstuse keskmised väärtused. Seega on graafik loodud kahe punkti alusel, kus nende kahe tulemuse saamise meetoodika erineb üksteisest. Ka avaliku sektori allika [35] tunnuspunkt on ülejäänud graafiku väärtustest erinev kuna ülejäänud materjalidega võrreldes oli tema aktiivtakistuse rühma osakaal ligikaudu 50% suurem. Nagu arvata oli, siis tööstuse aktiivkomponent on mootorite kõrge osakaalu tõttu kõige suurem. Reaktiivkomponent on jällegi kõige väiksem kuna tööstuse koormusklassi mootori ja elektroonika koormusrühmad kompenseerivad üksteist.



Joonis 3.5 Kõigi koormusklasside aktiiv- ja reaktiivkoormuse sagedustundlikkustegurid

Lõputöö kokkuvõte

Käesoleva lõputöö teema on seotud Tallinna Tehnikaülikooli ja Elering AS vahelise projektiga „Eesti elektrisüsteemi ülekandevõrgu koormuste staatilised ja dünaamilised karakteristikud”, milles uuritakse Eesti põhivõrgu koormust. Selle lõputöö eesmärgiks oli luua Eestis defineeritud koormusklassidele sagedustundlikkustegurid, mida oleks võimalik ära kasutada süsteemi arvutustel ning mille põhjal tekiks ka täpsem arusaam koormuse ja sageduse sõltuvuse kohta pealt. Koormuse modelleerimine on muutunud süsteemi jätkusuutlikust arvestades järjest aktuaalsemaks kuna hetkel kasutuses olevad mudelid on vananenud ning koormuse koosseis on viimastel aastakümnetel tunduvalt muutunud. Hetkel Elering AS süsteemiarvutustes ei arvesta koormuse aktiiv- ja reaktiivenergia osakaaludega, kuid maailmas on selge trend keerukamate mudelite suunas. Samuti on Eesti Vabariik võtnud endale kindla eesmärgi järgnevate aastate jooksul IPS/UPS sünkroonalast lahti ühendada. Selle tagajärjel ei pruugi ka enam elektrisüsteemi sagedus jääda nii stabiilseks kui ta täna on, seetõttu tuleb leida Eesti elektrisüsteemi koormuse ja sageduse vahelised suhted.

Töö alustuseks tutvustati lugejale koormuse staatilisi ja dünaamilisi karakteristikuid – nende olemust ning erinevust. Käesolevas töös käsitleti koormuse staatilise karakteristikuid sageduse järgi. Väljundis leiti aktiiv- ja reaktiivenergia sagedustundlikkuse tegurid, mis iseloomustavad mõlema energialiigi muutumist sageduse muutumisel. Igal elektritarvitil on olemas sagedusest sõltuv suhtühik, mis võib teatud komponentidel olla null ehk ei ole sagedusest sõltuv. Seetõttu on tähtis leida igale komponendile juurde osakaal kogu tarbimisest. Järgmisena kirjeldati koormuskarakteristikute leidmise meetodeid, kus tavaliselt leiavad kasutust kaks lähenemisviisi – mõõtmistel põhinev või kirjanduse allikate alusel. Käsitletavas töös kasutatakse komponentidepõhist meetodit kuna korrektsete mõõtmiste tulemuste saamine on väga ajamahukas ning kallis töö. Samuti on vajalik süsteemis luua teatud isoleeritud üksus, kus vajalike süsteemi häiringuid saab läbi viia nõutud ulatuses. Viimaseks antakse ülevaade koormuse sagedussõltuvuste põhjustest. Suuremat rõhku pannakse mootorite kirjeldusele kuna nende koormuse osakaal ja mõju on sagedusele enamasti üks suurimaid.

Töö teises peatükis keskenduti koormuskomponentidele ning nende sageduskarakteristikutele. Süsteemi loomisel kasutati grupeerimist, kus teatud funktsioonide ja sagedustundlikkuse sarnasuse abil on võimalik luua elektriliste komponentide grupid. Käesolevas töös defineerisin neli seadmete tüüprühma:

- Elektroonika – arvutid, televiisorid ja muu elektroonika;
- Aktiivtakistusega – pliidad, veekeetja, kütteseadmed;
- Mootorid – asünkroonmootor, õhukonditsioneer, pumbad;
- Valgustus – hõõglamp, luminofoorlamp, LED.

Selle järgselt leiti kirjanduse alusel komponentidele osakaalud ning aktiiv- ja reaktiivkoormuse sagedustundlikkustegurid. Rohkem keskenduti jällegi mootori rühmale ning leiti igale koormusklassile sagedustundlikkuskoeffitsient. Defiineeritud rühmade arvutuste koostamisel on kõige suuremaks takistuseks kindlasti algmaterjali leidmine ning kogutud info põhjal korrektse analüüsini jõudmine.

Viimases peatükis leiti sagedustundlikkustegurid defiineeritud koormusklassidele:

- Kodutarbijad – Maja või korteri tüüpi elamurajoonid, mille põhifunktsiooniks on inimestele elutingimuste pakkumine.
- Avalik – Eri kontorite tüüpi rajoon, mille põhifunktsiooniks on inimestele teenuste pakkumine.
- Tööstus – Laohoonete või tehaste tüüpi rajoon, mille põhifunktsiooniks on inimestele kaupade valmistamine.
- Põllumajandus – Kasvanduste või farmide tüüpi rajoon, mille põhifunktsiooniks on inimestele põllumajandussaaduste kasvatamine.

Kõigi koormusklasside jaoks leiti tüüp koormusrühmade osakaalud, millest oli võimalik arvutada sageduskarakteristikute tegurid. Suurt rõhku tuleks paigutada tööstuse ja põllumajanduse andmete kogumisele Eesti seisukohast lähtuvalt kuna nende juures on info kõige puudulikum. Täpsemate väärtuste leidmiseks tuleks kindlasti võtta analüüsi sisse ka reaalsed mõõtmised, mille kaudu oleks leitud tulemusi võimalik valideerida. Koormusklasside koosseisude kohta oleks vajalik luua ühtne andmebaas, mille andmed on võimalik hankida küsitlustega kui ka alles ilmuvatest kirjanduse allikatest.

Kokkuvõtvalt saab välja tuua kaks põhilist punkti, koormuse modelleerimise täpsemaks muutmisel tuleks kindlasti arvestada sageduse sõltuvusega ning täpsemate mudelite koostamisel tuleks kasutada Eesti kohta leiduvat informatsiooni. Väga raske on hinnata tulemuste korrektsust vastavate kirjanduse allikate põhjal kuna enamustel artiklitel puudub põhjalik tulemuste saamise analüüsi osa ning paljudel jäävad uuringud mõne aastakümne taha. Kui vaadata peale lõplikele koormusklasside sagedustundlikkusteguritele, siis on selgesti näha

eri allikate tulemuste sarnasust koormusklassi sees. Seega on igal klassil olemas kindel vahemik, mida on ajapikku alati võimalik täpsustada ja täiendada. Suurt uuendamist vajab ka üksikute komponentide endi sageduskarakteristikute koefitsentide info kuna aja möödudes ning tehnoloogia arenguga ei ole korrektne kasutada aastakümnete vanuseid väärtusi. Selle seisukoha pealt tuleks kõige rohkem tähelepanu pöörata valgustuse ja elektroonika koormusrühmadele, kus muutused on olnud kõige suuremad. Käsitletav töö annab väga hea raamistiku koormuse sagedussõltuvuse uuringute jätkamiseks, mille leitud väärtusi tuleks aja jooksul uuendada ja täiendada.

Kirjandus

- [1] H. Tammoja, Ü. Treufeldt, J. Kilter M. Meldorf, Jaotusvõrgud. Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2007.
- [2] Tallinna Tehnikaülikool, "Eesti elektrisüsteemi ülekandevõrgu koormuste staatilised ja dünaamilised karakteristikud I etapi aruanne," 2015.
- [3] C. Cresswell, "Steady State Load Models for Power System Analysis," The University of Edinburgh, 2009.
- [4] Cigre Working Group C4.605, "Modelling and Aggregation of Loads in Flexible Power," CIGRE, 556, 2014.
- [5] E. Tiigimägi, Elektrivõrgud. Tallinn: TTÜ Kirjastus, 1997.
- [6] J. Kilter M. Meldorf, Elektrisüsteemi stabiilsus. Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2011.
- [7] Tallinna Tehnikaülikool, "Eesti elektrisüsteemi ülekandevõrgu koormuste staatilised ja dünaamilised karakteristikud II etapi aruanne," 2016.
- [8] P. Kundur, Power System Stability and Control. New York: McGraw-Hill, 1993.
- [9] E. Karin, "Kodutarbijate tüüpkoormusseadmete pingekarakteristikute modelleerimine tarkvaraga PSCAD," Tallinna Tehnikaülikool, 2017.
- [10] M. A. Kashem, M. Negnevitsky K. G. Sabbir, "Response Analysis of Large Induction Motors at Different Voltages and Frequencies," Australasian Universities Power Engineering Conference, Melbourne, 2006.
- [11] H. Minxiao, T. Xiaojun, W. Yong Z. Bo, "Electric load dynamic frequency modelling and its application for islanding operation control," Sustainable Power Generation and Supply (SUPERGEN 2012), Hangzhou, 2012.
- [12] Tallinna Tööstushariduskeskus. TÄITURID - ELEKTROMEHAANILISED TÄITURID. [Võrgumaterjal]. http://www.tthk.ee/MEH/Taiturid_6.html
- [13] Schneider S.A. (1995) Adjustable Frequency Controllers. Seadme kasutusjuhend.

- [14] C. Cresswell, "Advanced Load Modelling for Power System Studies," The University of Edinburgh, 2013.
- [15] Fraunhofer-Institute for Systems and Innovation Research, "Study on the Energy Savings Potentials in EU Member States, Candidate Countries and EEA Countries Final Report," European Commission Directorate-General Energy and Transport, 2009.
- [16] S. Palm and P. Schegner, "Static and Transient Load Models Taking Account Voltage and Frequency Dependence," Power Systems Computation Conference, 2016.
- [17] W.-S. Kao, "The Effect of Load Models on Unstable Low-Frequency Oscillation Damping in Taipower System Experience w/wo Power System Stabilizers," IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, vol. 16, no. 3, pp. 463-472, 2001.
- [18] C. Concordia and S. Ihara, "Load Representation in Power System Stability Studies," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-101, no. 4, 1982.
- [19] M. Sedighizadeh and A. Rezazadeh, "Load Modeling for Power Flow and Transient Stability Computer Studies at BAKHTAR Network," International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering, vol. I, 2007.
- [20] A. P. Tellez, "Modelling aggregate loads in power systems," KTH Royal Institute Of Technology, Stockholm, 2017.
- [21] E. H. Allen ja M. D. Ilic, "Interaction of transmission network and load phasor dynamics in electric power systems," IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, vol. 47, no. 11, pp. 1613–1620, 2000.
- [22] H. Hamadani, L. Wang K. Morison, "Practical Issues in Load Modeling for Voltage Stability Studies," Power Engineering Society General Meeting, 2003, pp. 1392-1397.
- [23] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic, "Standard Load Models For Power Flow and Dynamic Performance Simulation," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 10, pp. 1302-1313, 1995.
- [24] J. Achammer, H. Iwamoto, M. Iwasaki J. Donlon, "Power Modules for appliance motor control," IEEE Industry Applications Magazine, 2002.
- [25] F. Bartos, "ABB hosts technology day in Sweden," Control Engineering, 2004.

- [26] P. Pijenburg, "Non-Intrusive Load Modeling Using Newton-Phaselet Frames," University of New Brunswick, 2015.
- [27] IEEE Task Force, "Load representation for dynamic performance analysis," IEEE Transactions on Power Systems, vol. VIII, no. 2, pp. 472-482, 1993.
- [28] Y. Runming ja S. Koen, "A method of formulating energy load profile for domestic buildings in the UK," Science Direct, 2004.
- [29] Eesti Statistikaamet, "Energiatarbimine kodumajapidamises," 2010.
- [30] B. Hirl, N. Labanca P. Bertoldi, "Energy efficiency status report 2012," European Commission, Scientific and Policy Reports 136 2012.
- [31] C. U. Brunner P. Waide, "Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems," IEA Energy Papers, 2011.
- [32] Andrea, Ochoa ja L. F. Ballanti, "Initial Assessment of Voltage-Led Demand Response from UK Residential Loads," IEEE, 2015.
- [33] D. Lebedev, "Energiasalvestil põhineva energiahaldussüsteemi uurimine ja väljatöötamine kodumajapidamistele," Tallinna Tehnikaülikool, 2017.
- [34] A.K. Sinha. Lecture - 15 Load Model. [Võrgumaterjal]. <http://textofvideo.nptel.iitm.ac.in/108105067/lec15.pdf>
- [35] A. Gaikwad and P. Pourbeik. Latest Research on Load Modeling & Dynamic Behaviour of Loads. [Võrgumaterjal]. <http://resourcecenter.ieee-pes.org/product/-/download/partnumber/PESSL11247>
- [36] I. Drovтар, S. Link, H. Hõimoja, H. Mölder, T. Möller A. Rosin, "Tarbimise juhtimine," Elering AS, 2014.
- [37] jt. M. Altmann, "Overview of Energy Efficiency measures of European," European Parliament's Committee on Industry, Research and Energy (ITRE), 2010.
- [38] I. Drovтар, "Tarbimise juhtimise võimaluste uurimine ning rakendatavus pingereguleerimise teenusteks Eestis," Tallinna Tehnikaülikool, 2016.

- [39] M. Tokieda, W. Hubbi, ja H. Andou T. Hiyama, "Artificial neural network based dynamic load modeling," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 12, no. 4, pp. 1576-1583, 1997.
- [40] A. J. Collin, J. L. Acosta, B. P. Hayes Djokic, and S. Djokic Z., "Component-based Aggregate Load Models for Combined Power Flow and Harmonic Analysis," in 7th Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion, Ayia Napa, 2010, pp. 1-10.

Lisad

1. L.1. Koormuse koosseisu küsitlus

L.1. Koormuse koosseisu küsitlus

Palun kindlasti täita lahtrid, mis on siniselt tähistatud! Ülejäänud lahtrite täitmine valikuline. Kaldkirjas on välja toodud koormusklassidele iseloomulikud komponendid, mille saab lähtekohaks võtta. See nimekiri ei ole kindlasti lõplik!

1) Mootorid: nt. soojuspump, konditsioneer, asünkroonmootor, ventilaator, veepumbad jne;

2) Elektroonika: nt. televiisor, arvuti, väike elektroonika jne;

3) Valgustus: nt. hõõglamp, LED, halogeenlamp, luminofoorlamp jne;

4) Aktiivtakistusega: nt. elektriküte, sagedusmuunduriga ühendatud mootor, veekeetja, pliit jne.

Tabel 1. Koormuse suvine ja talvine koosseis

Koormuse tüüp	Koosseis suvel (%)	Aktiivvõimsus (kW)	Reaktiivvõimsus (kvar)	Lisainfo/kommentaarid
1) Mootorid				
2) Elektroonika				
3) Valgustus				
4) Aktiivtakistusega				
Koormuse tüüp	Koosseis talvel (%)	Aktiivvõimsus (kW)	Reaktiivvõimsus (kvar)	Lisainfo/kommentaarid
1) Mootorid				
2) Elektroonika				
3) Valgustus				
4) Aktiivtakistusega				

Läbi sagedusmuunduri ühendatud mootorid suvel				
Läbi sagedusmuunduri ühendatud mootorid talvel				
Mootorid sealhulgas:				
*Külm koormus				
**Märg koormus				

Vastamisel võib abiks olla järgnevalt esitatud tabel. Võimsused võiksid vastata tüüpilisele olukorrale.

* Näiteks: külmkapp, külmik, õhukonditsioneer, soojuspump, tolmuimeja

** Näiteks: nõudepesumasin, pesumasin, kuivati