



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
ELEKTROENERGEETIKA INSTITUUT

# **Eesti elektrisüsteemi ülekandevõrgu koormuste staatilised ja dünaamilised karakteristikud**

Uurimistöo 1.1-4/2015/227 / Lep 15066 I etapi lõpparuanne

Tallinn 2015

Uurimistöö täitjad:

Ülo Treufeldt	dotsent, tellimustöö vastutav täitja, TTÜ elektroenergeetika instituut
Madis Leinakse	doktorant, insener, TTÜ elektroenergeetika instituut
Uku Salumäe	insener, TTÜ elektroenergeetika instituut
Tanel Sarnet	doktorant, nooremteadur, TTÜ elektroenergeetika instituut
Mati Meldorf	professor, TTÜ elektroenergeetika instituut



Jako Kilter	PhD, elektrisüsteemi ekspert, „Eesti elektrisüsteemi ülekandevõrgu koormuste staatilised ja dünaamilised karakteristikud“ R&D projekti juht, Elering AS
Andrus Reinson	automaatika ja releekaitse talitluse juhataja, Elering AS
Imre Drovtar	elektrisüsteemi analüütik, Elering AS

# SISUKORD

Sissejuhatus .....	6
1 Ülevaade koormuse modelleerimisest.....	8
1.1 Koormuse matemaatiline mudel .....	8
1.1.1 Matemaatilise mudeli põhikomponendid .....	8
1.1.2 Koormuse temperatuurisõltuvus .....	14
1.1.3 Koormuse juhuslikkus.....	18
1.2 Koormuse staatilised ja dünaamilised karakteristikud .....	22
1.2.1 Üldist.....	22
1.2.2 Terminid ja mõisted .....	26
1.2.3 Sõlmekoormuste staatilised karakteristikud.....	28
1.2.4 Elektrivõrgu tarbijate staatilised karakteristikud.....	31
1.2.5 Sõlmekoormuse summaarne staatiline karakteristik .....	38
1.2.6 Astmelülititega trafo mõju staatilistele karakteristikutele.....	39
1.2.7 Sõlmekoormuste staatiliste karakteristikute mudelid.....	39
1.2.8 Asünkroonmootori dünaamilised karakteristikud .....	42
1.2.9 Asünkroonmootori dünaamiliste karakteristikute mudelid .....	44
1.3 Kirjandus .....	49
2 Koormusmudelid ja nende rakendamine.....	50
2.1 Koormuse matemaatilise mudeli omadused ja rakendused.....	50
2.1.1 Elektrivõrgu koormuse kirjeldamine matemaatilise mudeliga.....	50
2.1.2 Koormuse temperatuurisõltuvus .....	50
2.1.3 Ilmastiku lisafaktorite mõju .....	54
2.1.4 Matemaatilise mudeli realiseerimine.....	58
2.1.5 Koormuse analüüs ja prognoos .....	61
2.2 Koormuse staatiliste ja dünaamiliste koormuskarakteristikute modelleerimine .....	71
2.2.1 Modelleerimise põhimõtted.....	71
2.2.2 Ülevaade koormuskarakteristikute mudelite arendusest .....	71
2.2.3 Komponentidel põhinev modelleerimine .....	74
2.2.4 Komponentidel põhinevate meetodite eelised ja puudused .....	76
2.2.5 Mõõtmistel põhinev modelleerimine .....	77
2.2.6 Meetodite põhieelised ja -puudused.....	81
2.3 Koormuskarakteristikute mudelid .....	82
2.3.1 Üldist .....	82

2.3.2	Koormuskarakteristikute staatilised mudelid .....	83
2.3.3	Koormuskarakteristikute dünaamilised mudelid.....	94
2.4	Koormuskarakteristikute mudelite kasutamine .....	101
2.5	Kirjandus .....	104
3	PSS/E ja PSCAD tarkvarade koormusmudelite ülevaade .....	107
3.1	PSCAD koormusmudelite ülevaade .....	107
3.2	PSCAD eksponentmudeli omadused.....	111
3.2.1	Simulatsioonideks koostatud mudeli kirjeldus.....	111
3.2.2	Simulatsioonide kirjeldus .....	114
3.2.3	Pingetundlikkuse omadused .....	117
3.2.4	Pingetundlikkuse omaduste kokkuvõte.....	129
3.2.5	Sagedustundlikkuse omadused.....	130
3.2.6	Sagedustundlikkuse omaduste kokkuvõte.....	136
3.2.7	Lühiskatsed pingetundliku koormusmudeliga .....	137
3.2.8	Eksponeentsiaalse koormusmudeli omaduste kokkuvõte .....	143
3.3	PSS/E koormusmudelite ülevaade .....	146
3.3.1	Koormusmudelid püsitalitluse arvutusteks .....	146
3.3.2	PSS/E staatilised koormusmudelid dünaamika arvutusteks.....	151
3.3.3	PSS/E asünkroonmootori mudelid dünaamika arvutusteks .....	152
3.3.4	PSS/E komposiitmudelid dünaamika arvutusteks .....	158
3.4	Kirjandus .....	167
4	Koormussõlmede mõõteandmed .....	168
5	Tarbijate tüüpgruppide osakaalud koormussõlmedes .....	178
5.1	Eesti 110 kV elektrivõrgu kliendid.....	179
5.2	Tarbijate tüüpgruppide osakaalud Elektrilevi jaotusvõrkudes .....	181
5.2.1	Elektrilevi tarbijate tüüpgrupid .....	181
5.2.2	Ebakõlad Elektrilevi esitatud andmetes .....	183
5.2.3	Andmetöötluse meetoodika.....	184
5.3	Elektrilevi koormussõlmede grupeerimine.....	185
5.3.1	Ühetüübiline koormus (tüüpgrupp 3).....	186
5.3.2	Domineeriv tüüpgrupp 3 (teenindus) .....	187
5.3.3	Domineeriv tüüpgrupp 1 (kodutarbijad) .....	203
5.3.4	Tüüpgrupp 1 ja 3 (kodu- ja teenindustarbijad) moodustavad enamiku koormusest .....	212
5.3.5	Tüüpgruppide 1, 3 ja 4 (kodu-, teenindus ja tööstustarbijate) kombinatsioon. 220	



5.3.6	Tüüpgruppide 1, 2, 3 ja 4 (kodu-, põllumajandus-, teenindus ja tööstustarbijate) kombinatsioon .....	225
5.3.7	Olulise tööstuskoormusega (tüüpgrupp 4) liitumispunktid .....	230
5.3.8	Olulise põllumajanduskoormusega (tüüpgrupp 2) liitumispunktid.....	235
5.3.9	Olulise avaliku koormusega (tüüpgrupp 5) liitumispunktid .....	242
5.4	Kokkuvõte .....	246
5.5	Kirjandus .....	246
6	Koormusklasside koosseisu kuuluvad iseloomulikud tarbimisseadmed.....	247
	Kokkuvõte .....	249
Lisa 1	PSCAD eksponentsiaalse koormusmudeli simulatsiooni tulemused .....	252
Lisa 2	Eleringi 110 kV elektrivõrgu kliendid.....	264
Lisa 3	Elektrilevi liitumispunktid 110 kV elektrivõrgus .....	267
Lisa 4	Elektrilevi tarbimine ja tüüpgruppide osakaalud.....	269
L4.1	Ühetüübiline koormuskoosseis.....	269
L4.2	Domineeriv tüüpgrupp 3 (teenindus).....	272
L4.3	Domineeriv tüüpgrupp 1 (kodutarbijad).....	279
L4.4	Tüüpgrupp 1 ja 3 (kodu- ja teenindustarbijad) moodustavad enamiku koormusest	286
L4.5	Tüüpgruppide 1, 3 ja 4 (kodu-, teenindus ja tööstustarbijate) kombinatsioon .....	291
L4.6	Tüüpgruppide 1, 2, 3 ja 4 (kodu-, põllumajandus-, teenindus ja tööstustarbijate) kombinatsioon .....	295
L4.7	Olulise tööstuskoormusega (tüüpgrupp 4) koormussõlmed .....	299
L4.8	Olulise põllumajanduskoormusega (tüüpgrupp 2) koormussõlmed.....	301
L4.9	Olulise avaliku koormusega (tüüpgrupp 5) koormussõlmed.....	303

## Sissejuhatus

Käesoleva uurimustöö sisuks on määratleda Eesti põhivõrgu alajaamade koormuste staatilised ja dünaamilised pinge- ja võimalusel sagedussõltuvuse karakteristikud keskpinge liitumispunktides ja/või 110 kV pingel liitumisalajaamades. Nende karakteristikute määratlemine võimaldab täpsemini teostada võrguarvutusi ning seeläbi paremini analüüsida ja plaanida elektrivõrgu talitlust. Koormuste staatiliste ja dünaamiliste karakteristikute abil on võimalik täpsemini prognoosida koormusi elektrivõrgu sõlmedes, eriti koormuse muutusi siirdetsesside käigus ja selle põhjal adekvaatsemalt määrata elektrisüsteemi talitusparameetreid, nagu liinide läbilaskevõimeid, elektrisüsteemi talitluse dünaamilisi piire ning muid stabiilsusega seotud küsimusi. Olulisel kohal uurimustöös on aastate jooksul SCADA vahendusel kogutud mõõteandmete kasutamine. Vajaduse korral ei ole välistatud ka täiendavate mõõtmiste tegemine katselistes eriolukordades. Lisaks on võimalik koormuste dünaamiliste karakteristikute määratlemisel kasutada ka kvaliteedianalüsaatorite, häiresalvestite ja laiseiresüsteemi vahendusel saadavaid andmeid.

Sõlmekoormuste modelleerimine toimub koormuste matemaatilise mudeli alusel. Mudeli parameetreid hinnatakse eraldi igale sõlmekoormusele lähtudes olemasolevatest mõõteandmetest. Sõlmekoormuste staatiliste ja dünaamiliste karakteristikute määramiseks arvestatakse kõrvuti mõõteandmetega ka tarbijate struktuuri koormussõlmedes ning erinevate tarbimisseadmete pinge- ja sagedustundlikkusega. Koormuste staatiliste ja dünaamiliste karakteristikute leidmisel ja modelleerimisel arvestatakse arvutustarkvarade PSCAD ja PSS/E tehniliste nõuete ja võimalustega.

Uurimustöö raames töötatakse välja ülekandevõrgu koormuste modelleerimise metoodika ning hinnatakse selle rakendatavust Eesti elektrisüsteemi kontekstis. Hinnatakse koormuskarakteristikute erinevate parameetrite määramise aluseid ning võimalusi saadaval olevate mõõteandmete alusel. Koormuse staatiliste ja dünaamiliste karakteristikute määramisel esitatakse koormussõlmede kaupa agregeeritud tarbimise iseloomustus (tarbija tüüpgruppide kooslus) ning samuti hinnatakse jaotusvõrku liitunud hajatoodangu (PV paneelid, tuulikud jms.) mõju karakteristikutele. Koormuse staatiliste ja dünaamiliste karakteristikute iseloomustamisel lähtutakse sesoonsuse (kevad, suvi, sügis, talv) ja nädala (tööpäevad, puhkepäevad, nädalavahetus) põhimõttest. Töö käigus selgitatakse välja, kas koormuste model-

leerimisel on oluline kasutada mitmeid koormusmudeleid või on võimalik esitada üldistatud ja ühene koormuse mudel.

Uurimustöö peaesmärgiks on koostada Eesti elektrisüsteemi põhivõrgu alajaamade koormuste staatilised ja dünaamilised karakteristikud. Koostatavad koormuste karakteristikud esitatakse üldistatud kujul ning samuti ka võrguarvutustarkvaradele PSCAD ja PSS/E sobival kujul. Koormusmudelite täpsustamine võimaldab tõsta elektrivõrgu plaanimise ja juhtimise täpsust. Võimalik on adekvaatsemalt hinnata elektrisüsteemi dünaamilisi omadusi ning ülekandevõimsuse piire. Elering AS-i strateegiliste eesmärkide poolelt on projekti tulemused rakendatavad elektrisüsteemi energiavarustuskindluse tagamiseks, optimaalsemate läbilaskevõimete määratlemiseks, elektrisüsteemi dünaamiliste omaduste hindamiseks ja kaudsemalt ka energiaturu efektiivsemale toimimisele.

Uurimustöö aktuaalsus tuleneb otseselt vajadusest täpsustada võrguarvutuste teostamiseks kasutatavaid mudeleid. Praegusel ajal kasutatavad koormuse mudelid on suhteliselt üldised ning ei kajasta tänapäeva alajaamade koormuste füüsikalisi omadusi. Samuti ei ole varem Eesti ülekandevõrgu tasemel koormuste staatilisi ja dünaamilisi karakteristikuid uuritud ega määratletud. Täpsemate mudelitega on võimalik adekvaatsemalt hinnata Eesti elektrisüsteemi talitlust ning seeläbi tagada suuremad võimsusvood süsteemi siseselt ja süsteemide vahel ning analüüsida süsteemi stabiilsuse varu.

Projekti esimese etapi ülesandeks on anda ülevaade koormuse matemaatilisest modelleerimisest ning staatiliste ja dünaamiliste karakteristikute määramise kaasaegsetest meetoditest kirjanduse alusel. Karakteristikute määramiseks vajalike mudelite olemuse, omaduste ja kasutusvõimaluste selgitamine. Uuritavate koormussõlmede loetelu täpsustamine. Sobiva koormusmudeli valimine. Uuritavate koormussõlmede kohta käivate mõõtmistulemuste hankimine: aktiiv- ja reaktiivkoormuse, pinge ning sageduse aegread. Staatiliste ja dünaamiliste karakteristikute modelleerimiseks vajaliku diskreetimissageduse ja ajalõigu määratlemine. Alajaamade koormuskoosseisude uurimine tarbija tüüpgruppide (koormusklasside) alusel. Koormussõlmedes koormusklasside kindlakstegemine ja protsentuaalse osakaalu määramine. Koormusklasside koosseisu kuuluvate iseloomulike tarbimisseadmete väljaselgitamine.

# 1 Ülevaade koormuse modelleerimisest

## 1.1 Koormuse matemaatiline mudel

Elektrivõrgu koormus väljendab elektritarbimise intensiivsust teatud piirkonnas. Koormus kujuneb suure hulga elektritarvitite ühismõjuna. Enamasti on tegemist summaarse koormusega, mis kujutab madalama taseme üksikkoormuste ja võrgukadude summat.

Koormust võib vaadelda kui objekti, mida iseloomustavad üldandmed, koormusandmed ja matemaatiline mudel. Üldandmetesse kuuluvad koormuse nimetus, liitumispunkt, piirvõimsus, tüüp, elektritarvitite koosseis jm. Koormusandmeteks loetakse igasugust kvantitatiivset teavet koormuse kohta. Sinna kuuluvad aktiiv- ja reaktiivvõimsuse ning voolu väärtused, aga ka sõlmepinge ja temperatuuri ning muude suuruste väärtused, mida kasutatakse koormuse käsitlemisel. Koormusandmed võivad olla nii regulaarsed (aegread) kui mitteregulaarsed, näiteks aastaenergia, minimaalsed ja maksimaalsed väärtused jm. Enamasti mõistetakse koormust kitsamas mõttes kui võimsust või voolu. Koormuse täpsem määratlus selgub kontekstist.

Matemaatiline mudel kirjeldab koormuste muutumise seaduspärasusi. Mudel arvestab koormuse regulaarseid muutusi, temperatuurisõltuvust ja stohhastilisust. Regulaarseteks muutusteks on koormuse trend, aastasisene (sesoonne), nädalasisene ja ööpäevasisene perioodilisus ning iseloom erandpäevadel. Staatiliste karakteristikute abil on võimalik arvesse võtta veel koormuse pinge- ja sagedusetundlikkust. Koormuse muutusi siirdeprotsessides (nt lühise korral elektrivõrgus) kirjeldavad dünaamilised karakteristikud.

### 1.1.1 Matemaatilise mudeli põhikomponendid

Koormuse (aktiivvõimsus, reaktiivvõimsus või vool) muutusi kirjeldavat matemaatilist mudelit võib vaadelda koosnevana kolmest komponendist

$$P(t) = E(t) + \Gamma(t) + \Theta(t) \quad (1.1)$$

kus  $E(t)$  – matemaatiline ootus

$\Gamma(t)$  – temperatuurisõltuvuskomponent

$\Theta(t)$  – stohhastiline komponent.

Matemaatiline ootus kirjeldab koormuse regulaarseid muutusi nagu üldine kasv (trend) ning sesoonne, nädalasisene ja ööpäevasisene perioodilisus. Matemaatiline ootus on põhimõtteliselt mittejuhuslik ja vastab normaaltemperatuurile.

Temperatuurisõltuvus kujutab koormuse hälvet, mis on tingitud välisõhu temperatuuri kõrvalekaldest normaaltemperatuuri suhtes. Normaaltemperatuuriks (temperatuuri matemaatiliseks ootuseks) on välisõhu 30 aasta keskmine temperatuur aastasisese aja mingil hetkel. Kui tegelik temperatuur vastab normaaltemperatuurile, siis temperatuuri mõju puudub. Komponenti  $\Gamma(t)$  aluseks on koormuse temperatuuritundlikkus  $R(t)$  – koormuse juurdekasv temperatuuri tõusmisel 1 °C võrra.

$$\Gamma(t) = R(t)\gamma(t) \quad (1.2)$$

kus  $R(t)$  – koormuse temperatuuritundlikkus

$\gamma(t)$  – normeeritud temperatuurisõltuvuskomponent.

Stohhastiline komponent kirjeldab koormuse juhuslikke hälbeid. Autokorrelatsioonist tingituna on koormuse hälbed üksteisest stohhastiliselt sõltuvad. Stohhastilist komponenti võib vaadelda koosnevana deviatsioonist  $\zeta(t)$ , mis on juhusliku komponendi tinglik matemaatiline ootus, ja normaalse jaotusega mittekorreleeritud jääkhälbest (valgest müra)  $\xi(t)$ . Arvestada tuleb veel piikhälvet  $\pi(t)$ , mis vastab koormuse suurtele positiivsetele või negatiivsetele hälvetele, mis ei allu normaaljaotusele. Stohhastilist komponenti on otstarbekas normeerida. Normiks sobib koormuse ruuthälve  $S(t)$ . Kokku võttes

$$\Theta(t) = S(t)[\zeta(t) + \xi(t) + \pi(t)] \quad (1.3)$$

Deviatsioon  $\zeta(t)$  võimaldab muuhulgas koormust lühiajaliselt prognoosida. Prognoosi saab, kui liita koormuse matemaatilisele ootusele deviatsioon ja temperatuurisõltuvus. Tulemuseks on

$$E_{\tau}[P(t)] = E(t) + R(t)\gamma_{\tau}(t) + S(t)\zeta_{\tau}(t) \quad (1.4)$$

kus  $\tau$  on ennetusaeg diskreetsussammu (tund või selle osa) ühikutes. Märgime, et koormuse analüüsimisel ning koormusmudeli adekvaatsuse kontrollimisel on oluline koht prognoosil ühe sammu võrra edasi  $E_1[P(t)]$ , mida nimetatakse ka koormuse lühiajaliseks ooteväärtuseks (*expexted value of load, short term*).

Koormuse matemaatilist ootust, ruuthälvet ja temperatuuritundlikkust ning ühtlasi kogu koormust on matemaatilise modelleerimise käigus otstarbekas vaadelda aastasisese (üldise) aja  $t$ , ööpäevasisese aja  $h$  ning päevatüübi  $l$  funktsioonina<sup>1</sup>

$$P(t, h, l) = E(t, h, l) + R(t, h, l)\gamma(t) + S(t, h, l)[\zeta(t) + \xi(t) + \pi(t)] \quad (1.5)$$

Matemaatiline ootus, ruuthälve ja temperatuuritundlikkus on esitatavad kujul

$$E(t, h, l) = \mathbf{M}^T(h) \mathbf{G}_{El} \mathbf{N}(t) \quad (1.6)$$

$$S(t, h, l) = \mathbf{M}^T(h) \mathbf{G}_{Sl} \mathbf{N}(t) \quad (1.7)$$

$$R(t, h, l) = \mathbf{M}^T(h) \mathbf{G}_{Rl} \mathbf{N}(t) \quad (1.8)$$

Siin  $\mathbf{M}(h)$  ja  $\mathbf{N}(t)$  on vektorfunktsioonid, mis sisaldavad koormuse ööpäevasisese ja aastasisese muutlikkuse komponente.

$$\mathbf{M}(h) = \begin{bmatrix} \mu_0(h) \\ \mu_1(h) \\ \dots \\ \mu_{MDC}(h) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{N}(t) = \begin{bmatrix} v_0(t) \\ v_1(t) \\ \dots \\ v_{NAC}(t) \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

Maatriksid  $\mathbf{G}_{El}$ ,  $\mathbf{G}_{Sl}$  ja  $\mathbf{G}_{Rl}$  koosnevad päevatüübist  $l$  sõltuvatest parameetritest.

$$\mathbf{G}_{El} = \|\mathbf{g}_{Elks}\|, \quad \mathbf{G}_{Sl} = \|\mathbf{g}_{Slks}\|, \quad \mathbf{G}_{Rl} = \|\mathbf{g}_{Rlks}\|$$

kus  $k = 0 \dots MDC$  ja  $s = 0 \dots NAC$ . Indeksile 0 vastavad vektorfunktsiooni komponendid on triviaalsed

$$\mu_0(h) \equiv 1, \quad v_0(t) \equiv 1$$

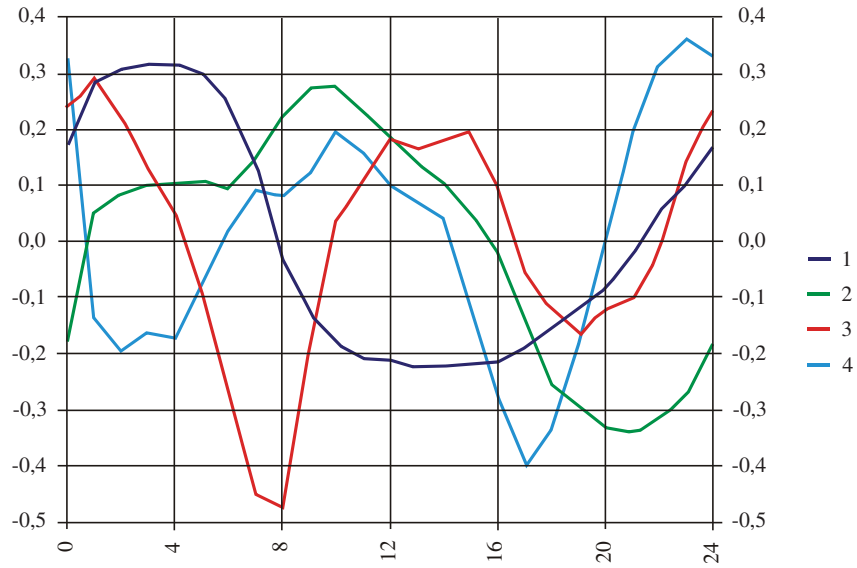
Mittetriviaalsete komponentide arv  $MDC$  ja  $NAC$  on näiteks 4, kuigi võib sellest ka erineda. Vektorfunktsioonide komponente on illustreeritud joonistel 1.1 ja 1.2.

Päevatüübid  $l = 1 \dots NTP$  vastavad ennekõike tavalistele nädalapäevadele ( $l = 1 \dots 7$ ). Lisaks vaadeldakse erandpäevi (pühad, pühade-eelsed ja -järgsed päevad jm), millele  $l > 7$ . Erandpäevatüüpide arv sõltub kalendrist (riigist) ja vajalikust modelleerimistäpsusest. Päevatüüpide koguarv  $NTP$  võib ulatuda 50...60. Lihtsamal juhul vaadeldakse erandpäeva kui mõnda

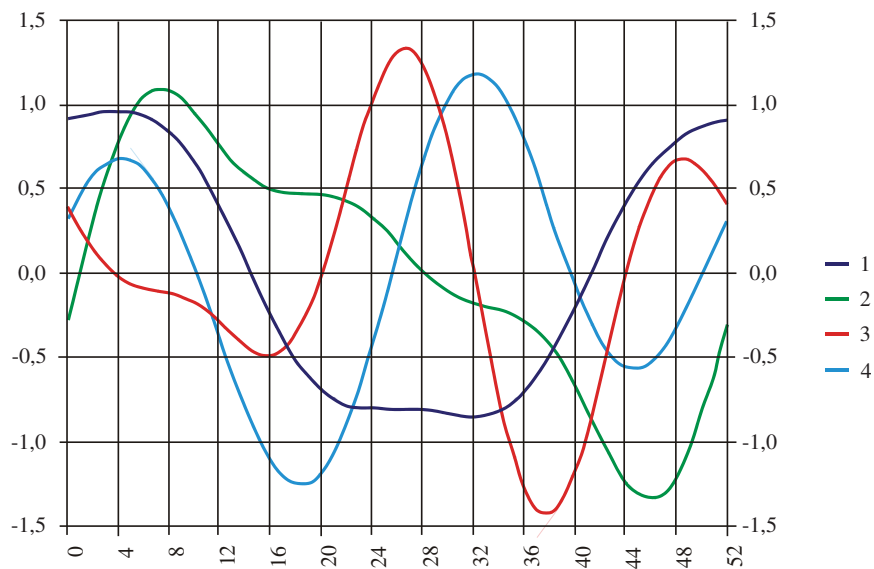
---

<sup>1</sup> Kuna nii aastasisene aeg  $t$ , ööpäevasisene aeg  $h$  kui päevatüüp  $l$  tulenevad üldisest ajast  $t$ , võib nimetatud funktsioone tähistada erinevalt, näiteks nii  $P(t)$  kui  $P(t, h, l)$ .

sarnast nädalapäeva (pühad – pühapäev ( $l = 7$ ), pühade-eelne tööpäev – reede ( $l = 5$ ) jne). Päevatüüpide arv on sel juhul 7.



Joonis 1.1. Vektorfunktsiooni  $M(h)$  komponendid.



Joonis 1.2. Vektorfunktsiooni  $N(t)$  komponendid.

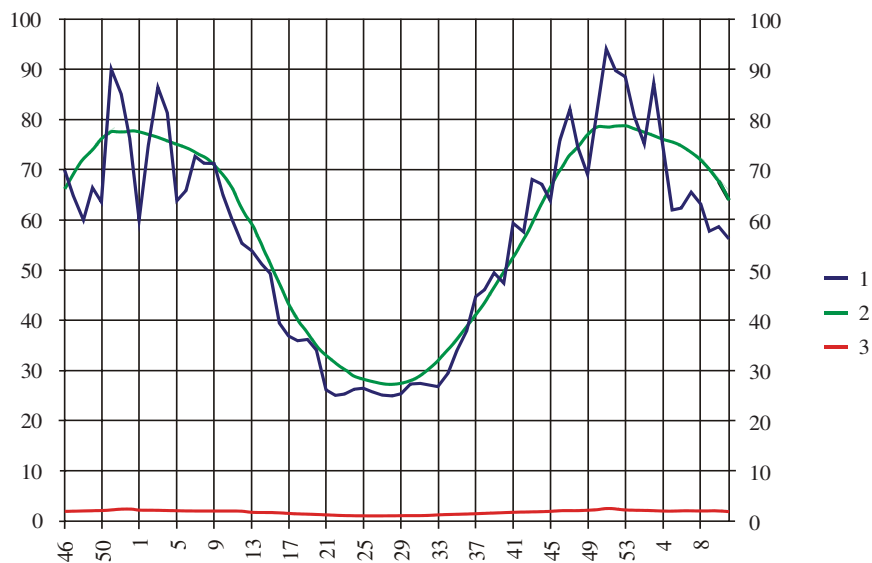
Koormuse kõrval on vaja modelleerida temperatuuri regulaarseid muutusi – normaaltemperatuuri. Kuna temperatuurile ei ole vaja eristada päevatüüpe on temperatuurimudelil vaid üks  $\mathbf{G}_E$ - ja  $\mathbf{G}_S$ -tüüpi maatriks, mis koos vastavate vektorfunktsioonidega määravadki temperatuuri  $T$  matemaatilise ootuse ja ruuthälbe

$$E_T(t, h) = \mathbf{E}[T(t, h)] = \mathbf{M}_T^T(h) \mathbf{G}_{TE} \mathbf{N}_T(t) \quad (1.10)$$

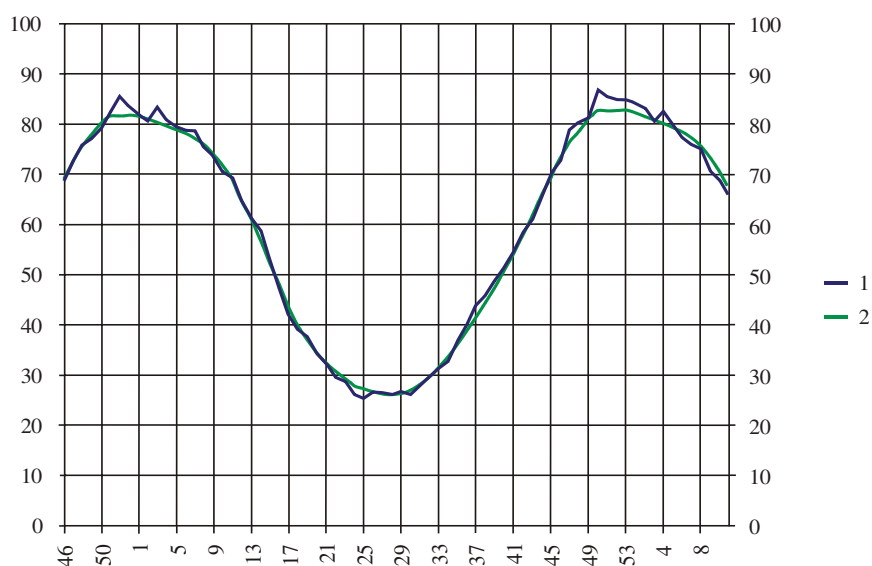
$$S_T(t, h) = \sigma[T(t, h)] = \mathbf{M}_T^T(h) \mathbf{G}_{TS} \mathbf{N}_T(t) \quad (1.11)$$

Matemaatilise mudeli praktiliseks realiseerimiseks on vajalikud mõningad teisendused ja täiendused [1]. Lisada tuleb näiteks koormuse kasv (trend), pinge- ja sagedustundlikkus jm.

Matemaatiline ootus kirjeldab koormuse tõenäoseid väärtusi standardtingimustes. Koormuse võimalikud hälbed on tingitud ilmastiku (temperatuuri) mõjust või on seletatavad juhuslike põhjustega. Joonisel 1.3 on matemaatilist ootust võrreldud koormuse tegelike väärtustega. Koormuse hälbe tuleneb siin peamiselt temperatuuri mõjust. Kui temperatuuri mõju elimineerida, s.t vaadelda koormuse normaliseeritud väärtusi  $P(t) - R(t) \gamma(t)$ , on olukord teine (joonis 1.4).



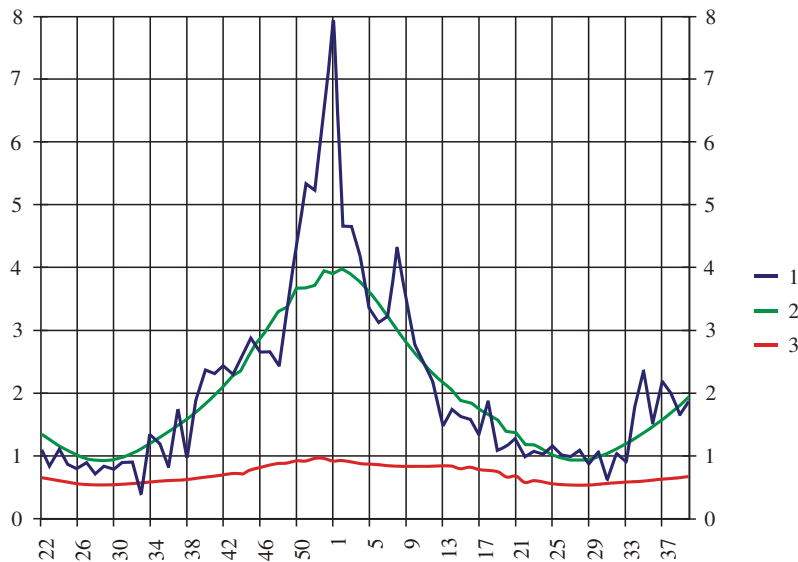
Joonis 1.3. Koormuse tegelik väärtus (1), matemaatiline ootus (2) ja ruuthälve (3) nädalatasemel.



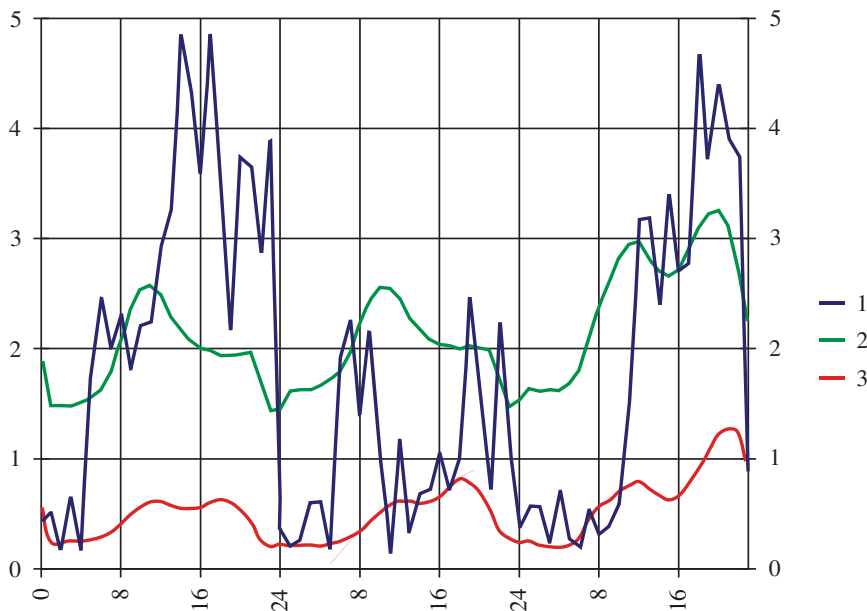
Joonis 1.4. Normaliseeritud koormus (1) ja matemaatiline ootus (2) nädalatasemel.



Vaadeldud näidetes oli koormus mõnekümne megavati suurusjärgus ja ruuthälve vaid mõni protsenti matemaatilisest ootusest nagu sellistele koormustele iseloomulik. Kui vaadelda väiksemaid koormusi, siis koormuse juhuslikkus ja ühtlasi ruuthälve on tunduvalt suuremad. Joonistel 1.5 ja 1.6 on näide elekterküttega eramu koormusest, mõõtühikuna kilovatt. Ka siin on temperatuuri mõju suur (joonisel 1.5 kajastub külm talv), ruuthälve ulatub aga 50% matemaatilisest ootusest ja enamgi.



Joonis 1.5. Eramu koormus (1), matemaatiline ootus (2) ja ruuthälve(3) nädalatasemel.



Joonis 1.6. Eramu koormus (1), matemaatiline ootus (2) ja ruuthälve(3) tunnitaseemel.

### 1.1.2 Koormuse temperatuurisõltuvus

Elektrivõrgu koormus sõltub temperatuuri kõrval veel muudestki ilmastikuteguritest, nagu päikese radiatsioon (pilvisus), tuulekiirus, õhuniiskus jm. Praktiliselt piirduakse põhilise teguri, välisõhu temperatuuri arvestamisega. Muude lisafaktorite mõju käsitletakse peatükis 2.1.3, kus on näidatud, et muid ilmastikutegureid võib arvesse võtta ka temperatuuri teisendatud väärtuse – efektiivse temperatuuri – kaudu.

Koormuse temperatuurisõltuvus avaldub ennekõike seal, kus kasutatakse elekterkütet või kliimaseadmeid. Näiteks Lapimaal, kus elekterkütte osatähtsus on suur ja välisõhu temperatuurimuutused märgatavad, ulatub temperatuurist tingitud koormuse juurdekasv kuni 100% võrreldes koormusega normaaltemperatuuril. Enamasti on temperatuurihälvete mõju siiski väiksem, eriti tööstusliku iseloomuga koormustele.

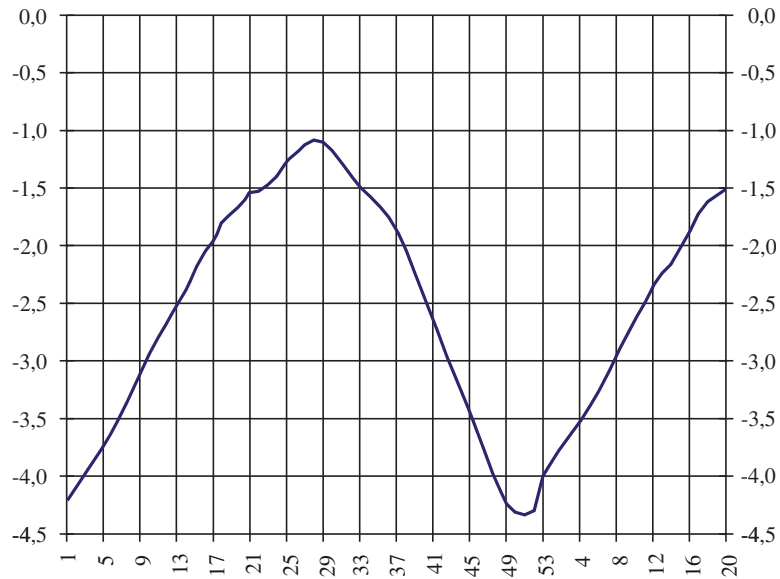
Koormuse temperatuurisõltuvuskomponendi

$$\Gamma(t) = R(t)\gamma(t) \quad (1.12)$$

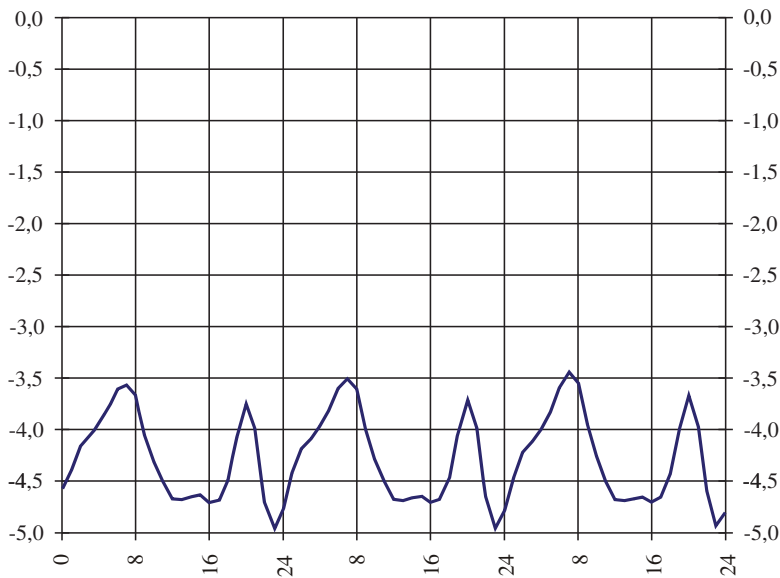
aluseks on temperatuuritundlikkus  $R(t)$  – koormuse juurdekasv temperatuuri tõusmisel 1 °C võrra, mis määrab temperatuurisõltuvuse taseme igale üksikule koormusele ning toetab selle ajalise muutlikkuse arvestamist. Temperatuuritundlikkus on muutuv nii sesoonselt, päevasiseselt kui päevatüüpide kaupa. Joonistel 1.7 ja 1.8 näeb temperatuuritundlikkuse muutumist nädala- ja tunnitaseemel. Temperatuuritundlikkus, mille mõõtühikuks on antud juhul MW/°C, on näites negatiivne – temperatuuri tõus põhjustab koormuse langust ja vastupidi. Temperatuuri mõju on kõige suurem talvel. Ööpäevasisene temperatuuritundlikkuse piik kell 23.00 (joonis 1.8) on ilmselt tingitud elektritarifi muutusest tulenevast kütteseadmete sisselülitamisest sellel kellajal.

Normeeritud temperatuurisõltuvuskomponenti  $\gamma(t)$ , mille ühikuks on °C, võib esimeses lähenduses vaadelda kui temperatuuri hälvet normaaltemperatuuri suhtes

$$\gamma(t) \equiv \Delta T(t) = T(t) - E[T(t)]. \quad (1.13)$$



Joonis 1.7. Koormuse temperatuuritundlikkus nädalatasemel.



Joonis 1.8. Koormuse temperatuuritundlikkus tunnitaseemel.

Enamasti on siiski vajalik komponendi  $\gamma(t)$  täiuslikum esitus, mis võimaldab arvestada koormuse temperatuurisõltuvuse üksikasju, ennekoõike temperatuuri mõju hilistumist (inertsit). Selleks võib komponendi  $\gamma(t)$  kirjeldamisel rakendada aegridade ARIMA-mudelit, mida ka Boxi-Jenkinsi mudeliks nimetatakse, kujul

$$\gamma_t = \frac{\Psi_T(B)}{\Phi_T(B)} \Delta T_t \quad (1.14)$$

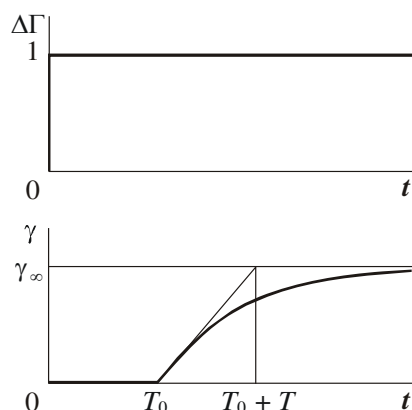
Siin operaatorid  $\Phi_T(B)$  ja  $\Psi_T(B)$  on nihkeoperaator  $B$  ( $Bx_t = x_{t-1}$ ) polünoomid.

Kui operaatorid  $\Phi_T(B)$  ja  $\Psi_T(B)$  esitada kujul

$$\Phi_T(B) = 1 - \varphi B, \quad \Psi_T(B) = \psi B^m \quad (1.15)$$

kus  $\varphi$ ,  $\psi$  ja  $m$  on tegurid, siis vastab komponendi  $\gamma(t)$  mudel joonisel 1.9 näidatud ülekandefunktsioonile parameetritega

$$T_0 = m, \quad T = \frac{\varphi}{1 - \varphi}, \quad \gamma_\infty = \frac{\psi}{1 - \varphi} \quad (1.16)$$

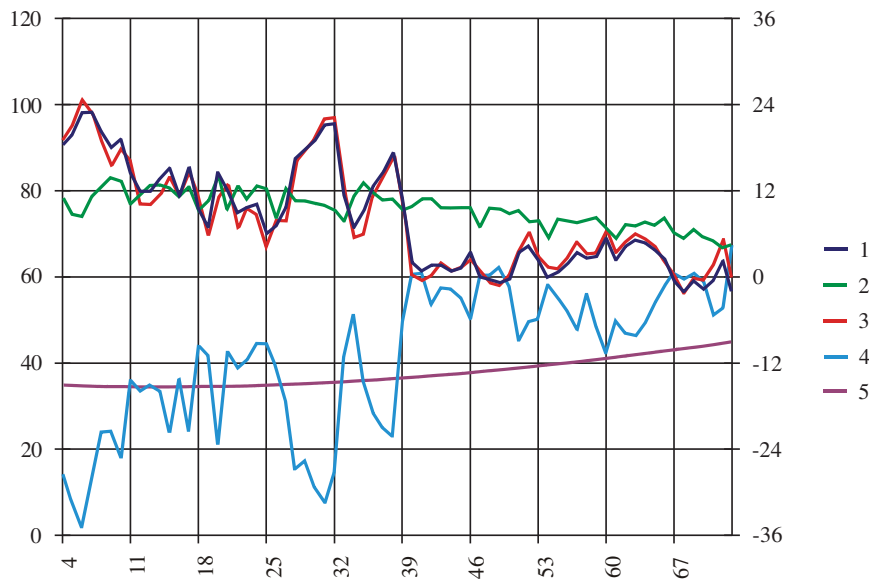


Joonis 1.9. Temperatuurisõltuvuse ülekandefunktsioon.

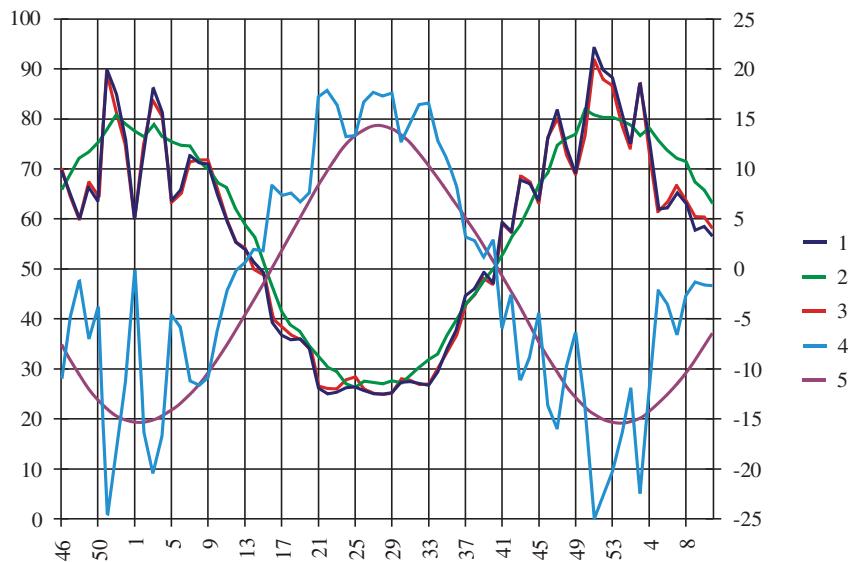
Selle ülekandefunktsiooni kohaselt hakkab temperatuurimuutuse mõju koormusele ilmnema  $T_0$  tunni möödumisel ning  $T$  on temperatuuri mõju ajakonstant. Kui  $T_0 = 5$  ja  $T = 10$ , siis avaldub temperatuurimuutuse mõju täielikult umbes  $T_0 + 2T = 25$  tunni ehk ühe ööpäeva pärast.

Keskmise taseme ja inertsi kõrval on vaja arvestada temperatuurisõltuvuse ajalisi muutusi ja mittelineaarsust. Temperatuuri mõju taseme muutusi väljendab temperatuuritundlikkus  $R(t)$ . Temperatuurisõltuvuse iseloomu muutusi võetakse arvesse sel teel, et komponendi  $\gamma(t)$  parameetreid vaadeldakse ajas muutuvatena. Arvestatakse sesoonset muutlikkust, sest suvine temperatuurisõltuvus erineb märgatavalt talvisest. Vajaduse korral võib tähele panna ka nädalasisest ja ööpäevast muutlikkust. Mittelineaarsus seisneb selles, et temperatuuri teatud väärtuste korral temperatuurisõltuvuse iseloom muutub. Näiteks suvel, kui temperatuurisõltuvus üldjuhul on väike, täheldatakse meie oludes koormuse kasvu, kui temperatuur langeb alla  $14\text{ }^\circ\text{C}$  või tõuseb üle  $25\text{ }^\circ\text{C}$ . Talvel võib koormuse kasvutempo langeda, kui temperatuur langeb alla  $-25\text{ }^\circ\text{C}$ . Need nähtused on seletatavad täiendavate küttevõi jahutusseadmete kasutuselevõtmisega suvel ja kütteseadmete piirvõimsuse saavutamisega või välistööde lõppemisega talvel. Taolisi nähtusi täheldatakse teistelgi perioodidel.

Joonistel 1.10 ja 1.11 on näited koormuse temperatuurisõltuvusest nädala ja päevatasemel. Võrdlusena on esitatud ka temperatuur ning selle matemaatiline ootus (skaleerituna parempoolsele teljele). Siin koormuse (pikaajaliseks) ooteväärtuseks on nimetatud suurust  $E(t) + R(t)\gamma(t)$ , mis saadakse, kui matemaatilisele ootusele lisada temperatuurisõltuvus.



Joonis 1.10. Koormuse tegelik väärtus (1), matemaatiline ootus (2) ja ooteväärtus (3) ning temperatuuri väärtus (4) ja normaaltemperatuur (5) päevatasemel.



Joonis 1.11. Koormuse tegelik väärtus (1), matemaatiline ootus (2) ja ooteväärtus (3) ning temperatuuri väärtus (4) ja normaaltemperatuur (5) nädalatasemel.

Olenevalt modelleerimise vajalikkust täpsusest võib vaadelda muidki koormuse temperatuuri-sõltuvuse üksikasju. Nii ei pruugi koormus langeda tavalisel moel, kui peale pikka külma perioodi (nädal või enam) temperatuur tõuseb normaalsele tasemele. Ka ei täheldata koormuse tõusu temperatuuri lühiajalise järsu languse (temperatuuripiigi) korral. Probleemiks on veel, kuidas esitada akumulieriva elekterküttega koormuse temperatuurisõltuvust. Sel juhul ei sõltu temperatuurist mitte niivõrd kütteseadmete võimsusest kui nende sisselülitamise kestusest.

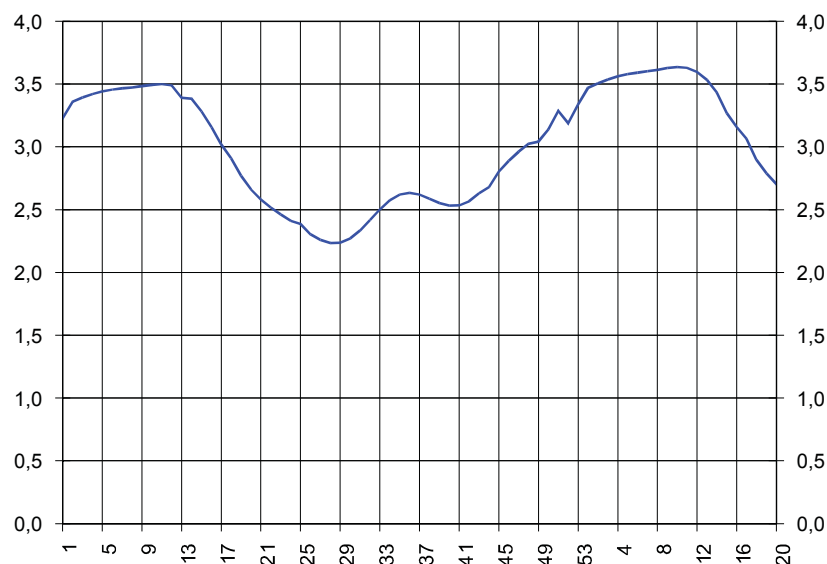
### 1.1.3 Koormuse juhuslikkus

Koormuse juhuslikkust arvestab matemaatilises mudelis stohhastiline komponent

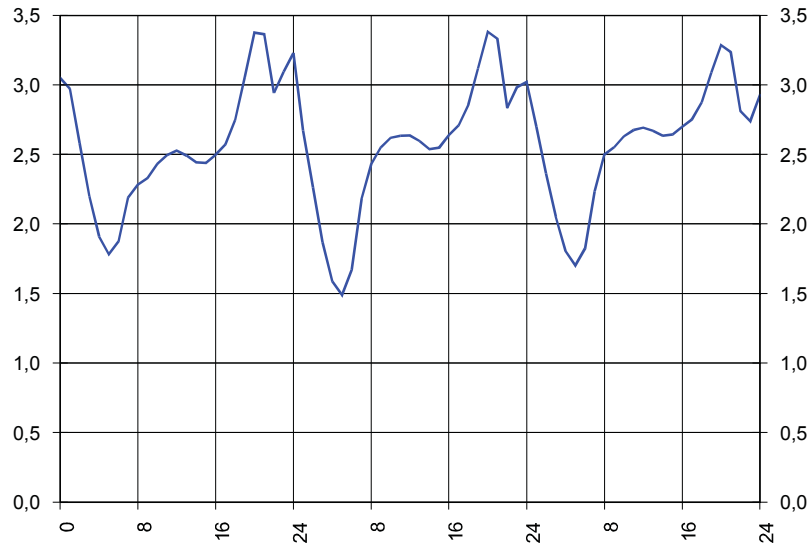
$$\Theta(t) = S(t, h, l)[\zeta(t) + \xi(t) + \pi(t)] \quad (1.17)$$

Juhuslikkuse taset väljendab koormuse ruuthälve  $S(t, h, l)$ , mis on ajas muutuv. Joonistel 1.12 ja 1.13 on koormuse ruuthälve nädala- ja tunnitaseemel.

Näidetest selgub, et ruuthälbe muutused sarnanevad koormuse (matemaatilise ootuse) muutustega, olles suuremad talvel ja õhtuti, väiksemad suvel ja öösi. Lähem uurimine näitab siiski, et ruuthälbe muutumise seaduspärasused ei pruugi kokku langeda matemaatilise ootuse muutustega.



Joonis 1.12. Koormuse ruuthälve nädalatasemel.



Joonis 1.13. Koormuse ruuthälve tunnitaseemel.

Koormuse juhuslik hälve

$$\mathcal{G}(t) = \frac{1}{S(t)} [P(t) - E(t) - \Gamma(t)] \quad (1.18)$$

on kirjeldatav *ARIMA*-mudeliga (Boxi-Jenkinsi mudeliga) kujul

$$\mathcal{G}_t = \frac{\Psi(B)}{\Phi(B)} \xi_t \quad (1.19)$$

kus  $\mathcal{G}_t$  – juhusliku hälbe normeeritud väärtus ajaintervallis

$\Phi(B)$  ja  $\Psi(B)$  – lineaarsed operaatorid

$\xi_t$  – mittekorreleeritud aegrida – koormuse jääkhälve.

Operaatorid  $\Phi(B)$  ja  $\Psi(B)$  esitatakse kujul

$$\Phi(B) = (1 - \varphi_1 B - \dots - \varphi_{MF} B^{MF})(1 - \varphi_M B^M)(1 - \varphi_N B^N) \quad (1.20)$$

$$\Psi(B) = (1 - \psi_1 B - \dots - \psi_{MP} B^{MP})(1 - \psi_M B^M)(1 - \psi_N B^N) \quad (1.21)$$

Siin tähendab operaatorite esimene liige vaadeldavale ajaintervallile vahetult eelnevate (ööpäevasiseste) koormushälvete järelmõju arvestamist. Teine ja kolmas liige võtavad lisaks arvesse hälbeid ööpäev ja nädalal tagasi. Ööpäevasisesed nihketegurid *MF* ja *MP* on praktiliselt piirides 1...2 ning kui diskreetimissagedus on kord tunnis, siis  $M = 24$  ja  $N = 168$ . Koormushälvete mudelis on niisiis kaheksa parameetrit:  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_{24}, \varphi_{168}, \psi_1, \psi_2, \psi_{24}$  ja  $\psi_{168}$ .

Praktikas käsitletakse koormuse juhuslikku hälvet rekursiivselt. Selleks kirjutatakse juhusliku hälbe mudel ümber järgmiselt

$$[1 - \Phi'(B)]\mathcal{G}_t = [1 - \Psi'(B)]\xi_t \quad (1.22)$$

$$\mathcal{G}_t = \xi_t + [\Phi'(B)\theta_t - \Psi'(B)\xi_t] \quad (1.23)$$

Siin  $\mathcal{G}_t$  ja  $\xi_t$  on rekursiivselt otsitavad koormuse juhusliku- ja jääkhälbe järjekordsed väärtused ajahetkel  $t$ . Avaldis nurksulgudes on aga arvutatav nende suuruste möödunud ja seega teada olevate väärtuste alusel. Kuna jääkhälbe väärtused ei ole korreleeritud, siis prognoosimisel võib võtta  $\xi_t = 0$  ja deviatsiooni väärtus ajahetkel  $t$ , milleks on koormuse lühiajaline ooteväärtus ehk prognoos ühe ajaintervalli võrra ette, avaldub kujul

$$\zeta_t = \Phi'(B)\mathcal{G}_t - \Psi'(B)\xi_t \quad (1.24)$$

Seega

$$\mathcal{G}_t = \zeta_t + \xi_t \quad (1.25)$$

Koormuse suurte kõrvalekallete korral, mis jääkhälbesse ei kuulu, lisandub veel piikhälve

$$\mathcal{G}_t = \zeta_t + \xi_t + \pi_t \quad (1.26)$$

Otsustamaks, kas piikhälve avaldub või mitte, võib rakendada kriteeriumit

$$|\xi_t| < c_s \sigma_\xi \quad (1.27)$$

kus  $c_s$  on usaldustegur (näiteks 2,7) ja  $\sigma_\xi$  jääkhälbe ruuthälve. Võimalikud suured hälbed kuuluvad koormuse piikkomponenti  $\pi_t$ .

Kokku võttes leitakse iga järjekordse ajaintervalli kohta deviatsiooni  $\zeta_t$  väärtus. Kui vahe  $\mathcal{G}_t - \zeta_t$  sobib eeltoodud kriteeriumi järgi jääkhälbele, siis  $\mathcal{G}_t - \zeta_t = \xi_t$  ja piikkomponenti väärtus  $\pi_t = 0$ . Muidu on piikkomponenti väärtus nullist erinev ja  $\mathcal{G}_t - \zeta_t = \xi_t + \pi_t$ . Komponentide  $\xi_t$  ja  $\pi_t$  eraldamiseks imiteeritakse jääkhälbe  $\xi_t$  väärtus normaaljaotuse  $\xi'_t = N(0, \sigma_\xi)$  alusel. Seega

$$\begin{cases} \xi_t = \mathcal{G}_t - \zeta_t, & \pi_t = 0, & \text{kui } |\mathcal{G}_t - \zeta_t| < c_s \sigma_\xi \\ \xi_t = \xi'_t, & \pi_t = \mathcal{G}_t - \zeta_t - \xi'_t, & \text{kui } |\mathcal{G}_t - \zeta_t| \geq c_s \sigma_\xi \end{cases} \quad (1.28)$$





## **1.2 Koormuse staatilised ja dünaamilised karakteristikud**

### **1.2.1 Üldist**

Elektrivõrgu stabiilne talitus sõltub elektrisüsteemi võimest pidevalt hoida tasakaalu elektrienergia tarbimise ja tootmise vahel. Selleks, et reguleerida genereerimist vastavalt koormuse muutumisele on vaja koormust väga hästi tunda. Lisaks väljakujunenud ööpäevakoormusgraafikutele ja tüüpkoormusgraafikutele sõltub elektrivõrgu koormus ka võrgu enda parameetritest - pingest ja sagedusest. Kuna koormus jaguneb kaheks komponendiks aktiiv- ja reaktiivkoormuseks, tuleb süsteemi stabiilsuse huvides uurida mõlema komponendi karakteristikut eraldi. Ka elektrienergia tootmise sisukohalt on oluline vaadelda koormust aktiiv- ja reaktiivkoormusena, sest neid komponente reguleeritakse eraldi. Aktiivvõimsust reguleeritakse generaatoriga ühendatud turbiini reguleerimise teel ja reaktiivvõimsust aga generaatori ergutusvoolu muutes. Seega on vaja koormuse muutumise paremaks mõistmiseks teada aktiiv- ja reaktiivkoormuse staatilisi ja dünaamilisi karakteristikuid. Elektrisüsteemi koormuse moodustavad kõik tarbijad, mis on ühendatud elektrivõrku. Tarbijaid on elektrisüsteemis miljoneid: suured asünkroonmootorid, väikesed asünkroonmootorid, suured sünkroonmootorid, elektriühikud, alaldid, valgustus, elukondlik koormus jms ning võrgukaod. Keeruliseks teeb võimsuste bilansi hoidmise asjaolu, et elektrivõrgu koormused on muutlikud ja juhuslikud ning koormuse täpne prognoos igaks ajahetkeks on oluliselt komplitseeritud ülesanne [11].

Elektrivõrgu talitluse seisukohalt vaadeldakse koormusi sõlmekoormustena. Sõlmekoormus on sõlme ühendatud individuaalsete seadmete summaarne aktiiv- ja reaktiivkoormus e sõlme kaudu toidetavate tarbijate summaarne sõlme agregeeritud koormus, millele lisanduvad ka võimsuskadud tarbijaid sõlmega ühendavates liinides ja trafodes. Arvestada tuleb ka vaadeldava sõlme toitepiirkonnas esinevate võimalike genereerivate allikatega e hajatootmisega. Seega sõlme agregeeritud koormus on vaadeldavale sõlmele rakenduv summaarne aktiiv- ja reaktiivkoormus. Eesti põhivõrgu tasandil on koormussõlmedeks 110 kV või kõrgema pingega alajaamad või nende alajaamade latid, kuhu on agregeeritud nende poolt toidetava jaotusvõrgu summaarne koormus. Selliseid sõlmekoormusi on Eestis ligikaudu 194.

Sõlmekoormused kujunevad mitmesuguste erinevate tarbijate koormustest. Vastavalt tarbijate struktuurile eristatakse sagedamini nelja tarbijaklassi:

1. Tootmine (tööstused, tehased, kaevandused jms)

2. Äri (reklaamid, televisioon, side, raadio jms)
3. Kodu (kodumajapidamised, elurajoonid)
4. Segakoormus

Olenevalt lähenemisest, lähteandmete kättesaadusest ja mudelite nõutavast täpsusest, võivad kõne alla tulla veel kaks tarbijaklassi:

5. Põllumajanduslik koormus (nt niisutuspumbad)
6. Elektriyaamade omatarve (abimootorid, pumbad)

Sõlmekoormuste täpsemaks modelleerimiseks ja prognoosimiseks on oluline arvestada sõlmekoormuste sõltuvust pingest ja sagedusest. Pinge ja sagedus muutuvad normaaltalitusel suhteliselt vähe ja aeglaselt ja on seega oluliselt staatilised. Koormuse reaktsiooni sellistele muutustele iseloomustavad nn staatilised karakteristikud. Kui aga pinge või sagedus muutuvad kiiresti ja palju, näiteks lühise tagajärjel, siis on tegu süsteemi siirdeprotsessiga e dünaamilise talitlusega ja koormuse reaktsioon sellistele muutustele on teistsuguse iseloomuga. Sel puhul räägitakse koormuse dünaamilistest karakteristikutest. Vastavalt sellele jagatakse koormuse pingesõltuvuse ja sagedussõltuvuse karakteristikud kaheks: staatilised karakteristikud ja dünaamilised karakteristikud. Lisaks sellele on aktiivkoormuse ja reaktiivkoormuse karakteristikud erinevad, kuna aktiivkoormused ja reaktiivkoormused reageerivad pinge ja sageduse muutustele erinevalt. Siiski esitatakse aktiivkoormuse ja reaktiivkoormuse staatilisi karakteristikud sageli ühel graafikul.

Kuna sõlmekoormused koosnevad paljude erinevate tarbimisseadmete summaarsest koormusest, siis on vaja uurida erinevate tarbimisseadmete ja koormusklasside koormuse pinge- ja sagedustundlikkusi ning koostada vastavad staatilised ja dünaamilised karakteristikud. Saadud karakteristikuid saab ühendada ja summeerida sõlmekoormuste staatilisteks ja dünaamilisteks karakteristikuteks.

Sõlmekoormuse staatiliste karakteristikute lihtsamaks määramiseks võib kasutada ka käsiraamatutest leitavaid üldistatud tüüpkarakteristikuid, mis arvestavad erinevate iseloomudega tarbijaid. Kui koormust moodustavate seadmete osakaal vaadeldavas sõlmes on teada, saab nende andmete põhjal leida antud sõlme summaarsed staatilised karakteristikud.

Sõlmekoormuste dünaamilised karakteristikud kirjeldavad aktiiv- ja reaktiivkoormuse muutumist pinge ja sageduse järskude ning suurte muutuste korral sõltuvalt ajast. Dünaamilisi karakteristikuid kasutatakse koormuse käitumise hindamiseks pärast suuremaid häiringuid.

Tavaliselt võivad suuremad häiringud esineda pingemuutuste kujul (pinge kõikumised, pingelohud ja -muhud, toitekatkestused jms). Elektrisüsteemi sagedus püsib stabiilne nii kaua kui ei ole tegu suurte ülesüsteemiliste avariidega või teatud süsteemiosa saarestumisega. Sellised sündmused on aga suhteliselt haruldased ja sageduskarakteristikute modelleerimiseks vajalikke mõõteandmeid ei ole tavaliselt piisavas koguses saada.

Eriti oluliselt mõjutavad sõlmekoormuste dünaamilisi karakteristikuid asünkroonmootorid ja seda eeskätt kahel põhjusel:

1. Asünkroonmootorite koormus moodustab üldisest koormusest olulise osa
2. Asünkroonmootorite pinge- ja sagedustundlikkus on, eriti dünaamikat arvestades, oluliselt keeruka iseloomuga. Näiteks, kui süsteemis leiab aset toitekatkestus, siis pärast toite taastamist tuleb arvestada asünkroonmootorite suurenenud lühiajalise aktiiv- ja reaktiivvõimsuse tarbimisega.

Elektrivõrgu koormus muutub oluliselt ajas, sõltub ilmastikust ja talitusparameetritest ning on stohhastilise iseloomuga.

Alates 1990 aastast on koormuste koosseis oluliselt muutunud.

Käesoleval ajal kasutatavate koormusmodelite põhipuudus on ebaedukad katsed jäljendada koormuse käitumist pärast äsjast toitekatkestust vastavate mudelite ja analüüsimeetodite abil.

Ka on tekkinud terve rida uut tüüpi suure efektiivsusega juhitavaid koormusi.

Kogukoormuse seas on märkimisväärne osa kaasaegsetel mittelineaarsetel jõuelektroonikal põhinevatel koormustel. Lisaks ei ole ka sobivaid mudeleid otseühendusega ja inverteritega hajatootmiseseadmete modelleerimiseks, mis võivad oluliselt mõjutada aktiiv- ja reaktiivkoormuste olemust, eriti arvestades selliste tootmiseseadmete üha kasvavat hulka.

Koormuskarakteristikute modelleerimine võib vastavalt lähteandmete olemasolul toimuda põhimõtteliselt kahel erineval viisil:

- kasutades mõõteandmeid;
- kasutades teadmisi koormuse komponentidest.

Tähelepanu tuleb pöörata mõõtmispõhiste ja komponentidepõhiste mudelite positiivsetele ja negatiivsetele külgedele.

Käesolevas töös käsitletakse nii statistilistel mõõtmistel kui ka koormuse komponentidel põhinevaid koormusmudeleid ja nende kasutamist sõlmekoormuste staatiliste ja dünaamiliste karakteristikute määramisel.

Tähelepanu tuleb pöörata mõõtmispõhiste ja komponentidepõhiste mudelite positiivsetele ja negatiivsetele külgedele.

Mõõtmispõhisel lähenemisel tuleb tähelepanu pöörata järgmistele teemadele:

- kas mudel põhineb pinge, voolu, võimsuse ja sageduse hetk- või efektiivväärtustel;
- optimaalne sämpimise sammu pikkus, kestus ja mõõteseadmete asukoht;
- mõõteandmete arvutusvalemid: võimsuse arvutamine voolu ja pinge järgi;
- andmete filtreerimine ja töötlus;
- mõõteandmete käsitlemine harmoonikute ja häiringute olemasolu korral;
- vajalike katsetuste kirjeldus;
- kasutatava matemaatilise mudeli olemus ja parameetrite hindamise protseduur;
- koormuste väljalülitumised süsteemis esinevate häiringute korral.

Komponentidepõhisel lähenemisel on olulised ka

- vaadeldavad koormus- ja andmetüübid;
- konkreetsete seadmete ja tarbimisgruppide matemaatilised mudelid;
- erinevate seadmete koormuste ühendamismeetodid;
- andmete olemasolu ja kättesaadavus;
- ümberlülitamised võrgus.

Sõlme agregeeritud koormus sisaldab üldjuhul võrguosa (liinid, kaablid, trafod jms), tegelikku ühendatud koormust ja võimalik, et ka väike- või keskmisi hajatootmiseseadmeid. Nende asjaolude arvestamine on koormuskarakteristikute määramisel oluline.

Üks agregeeritud koormuse koormusmudeli eriliik on erinevatest mudelitest kokku pandud liit- e komposiitmudelid.

Juhul kui vajalikud andmed on saadaval, võib kasutada ka koormuse komponentidel ja mõõtmistel põhinevat kombineeritud hübriidmodelleerimist.

Koormuskomponentidel põhineva modelleerimise aluseks on teadmised koormusklasside esinemisest ja osakaaludest konkreetses vaadeldavas koormussõlmes ning koormusklasside põhilistest tarbimisseadmetest.

### **1.2.2 Terminid ja mõisted**

#### **Staatiline koormusmudel**

Ajast sõltuv koormuse mudel, mis annab informatsiooni asjakohastest koormuskarakteristikutest funktsioonina teadaolevatest või imiteeritud süsteemi parameetritest süsteemi väikeste häiringute korral.

#### **Dünaamiline koormusmudel**

Ajast sõltuv mudel, mis esineb funktsioonina süsteemi teadaolevatest või määratletud parameetritest ja ajast süsteemi suurte häiringute korral.

#### **Koormustüüp**

Rühm samal eesmärgil talitlevaid individuaalseid koormusi, millel võivad olla samad või lähedased karakteristikud.

#### **Genereerimine**

Jaama või generaatori summaarne aktiiv- või reaktiivväljundvõimsus.

#### **Konverterkoormus**

Koormus, mis on ühendatud võrku läbi konverteri.

#### **Tarbija**

Elektritarviti või seade või nende suvaline kombinatsioon, mis tarbib aktiiv- ja vajadusel ka reaktiivvõimsust.

#### **Koormussõlm**

Elektrisüsteemi sõlm kuhu on ühendatud koormus. Koormussõlme võib olla ühendatud ka üks või mitu hajatootmisseadet.

#### **Koormuskarakteristikud**

Komplekt parameetreid ja/või funktsionaalseid sõltuvusi, mis kirjeldavad ja iseloomustavad koormuse reaktsioone süsteemi parameetrite muutustele – suurtele ja väikestele pingele ja/või sageduse häiringutele.

## **Koormusklass**

Tüüpilist koormusstruktuuri esindavate erinevate koormuskomponentide kogum.

## **Koormuskomponent**

Individuaalne elektritarviti või samaks lõppeesmärgiks kasutatavate tarvitite kogum, mille tarbimisseadmed reageerivad süsteemi pinge või sageduse muutustele samal viisil.

## **Koormuse kompositsioon**

Vaadeldavasse koormussõlme ühendatud koormustüüpide murdosaline, suhteline või protsentuaalne kogum. Näiteks: 20 % ühefaasilist mootorkoormust, 30 % kolmefaasilist asünkroonmootorkoormust, jõuelektronikat 10 % ja takistuskoormust 40 %.

## **Koormuskõverad**

Määratletud ajalõigul kujutatud mõõdetud või estimateeritud aktiiv- ja /või reaktiivkoormuse graafikud.

## **Koormustihedus**

Koormusvõimsus suhe piirkonna pindalasse, millel see koormus paikneb.

## **Koormuskestuskõver**

Kõver, mis näitab kui kaua on mingil määratletud ajavahemikul aktiiv- või reaktiivkoormuse tarbimine võrdne või väiksem etteantud väärtusest.

## **Koormusgraafiku täitetegur**

Tarbimise ühtluse mõõt, mis võrdub vaadeldava perioodi, tavaliselt aasta, keskmise ja maksimaalkoormuse suhtega.

## **Koormusmudel**

Analüütiline, matemaatiline või analoogmudel, mida kasutatakse koormuse analüüsiks, prognoosimiseks või estimateerimiseks.

## **Mõõtmispõhine koormuskarakteristikute modelleerimine**

Koormuskarakteristikute modelleerimine normaaltalitluse- ja/või häiringute ajal mõõdetud andmete põhjal.

## **Komponentidepõhine koormuskarakteristikute modelleerimine**

Koormuskarakteristikute modelleerimine lähtudes koormuskoosseisu kuuluvate komponentide karakteristikute mudelitest ja komponentide osakaalust.

### **Agregeeritud koormuse mudel**

Ühte koormussõlme ühendatud sama või erinevate koormuskategooriate rühmi või koormusklasse esindav ühtne koormusmudel.

### **Eksponentkoormus**

Koormus, mille aktiiv- või reaktiivvõimsuse reaktsiooni järsule pingemuutusele saab modelleerida eksponentsiaalse dünaamilise koormuskarakteristikuga e eksponentmudeliga (nt asünkroonmootorid, soojuskoormused ja astmeregulaatoriga trafod.).

### **Polünoomiline ZIP koormusmudel**

Üks enim üldist kasutust leidnud mudeli liik, milles staatiline koormus on esitatud teist järku polünoomiga, mis kirjeldab aktiiv- ja reaktiivkoormuse sõltuvust toitepinge ja/või sageduse muutustest. Nimetus ZIP tuleneb mudeli liikmetest: Z – konstantsele impedantsile vastav liige, I – konstantsele voolule vastav liige ja P – konstantsele võimsusele vastav liige.

### **Komposiitmudel**

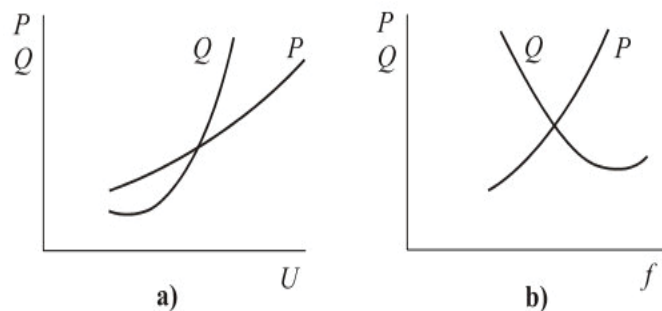
Koormuse grupi või agregeeritud koormuse liitmudel, mis on koostatud eri koormuskomponentide nii staatilistest kui ka dünaamilistest mudelitest.

#### **1.2.3 Sõlmekoormuste staatilised karakteristikud**

Staatiliste karakteristikute all mõistetakse aktiiv- ja reaktiivkoormuse sõltuvust pingest ja sagedusest  $P(U, f)$  ja  $Q(U, f)$ . Konstantse sageduse korral saadakse seosed  $P(U)$  ja  $Q(U)$ , mida nimetatakse koormuse staatiliseks karakteristikuks pinge järgi. Fikseeritud pinge korral saadakse karakteristik, mis kirjeldab aktiiv- ja reaktiivkoormuse sõltuvust sagedusest  $P(f)$  ja  $Q(f)$ . Sellist seost nimetatakse koormuse staatiliseks karakteristikuks sageduse järgi [5]. Koormuste staatiliste karakteristikute tüüpilised kõverad on joonisel 1.15.

Kui vaadelda olukorda, kus pinge ja sagedus ei erine oluliselt nimiväärtustest, saab arvutustesse sisse viia mõningad lihtsustused ja staatilised karakteristikud antud piirkonnas lineariseerida. Koormuse staatilise karakteristiku puutuja tõusu nimetatakse vastavalt aktiiv- ja reaktiivkoormuse ping- ja sagedustundlikkuseks [4].





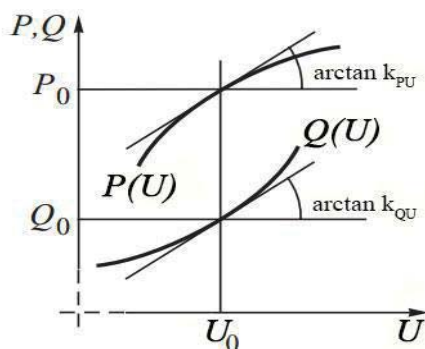
Joonis 1.15. Koormuse staatiliste karakteristikud: a) pinge järgi; b) sageduse järgi [5].

Kui vaadelda olukorda, kus pinge ja sagedus ei erine oluliselt nimiväärtustest, saab arvutustesse sisse viia mõningad lihtsustused ja staatilised karakteristikud antud piirkonnas lineariseerida. Koormuse staatilise karakteristiku puutuja tõusu nimetatakse vastavalt aktiiv- ja reaktiivkoormuse pinge- ja sagedustundlikkuseks [4].

Joonisel 1.16 on kujutatud aktiiv- ja reaktiivkoormuse staatilised karakteristikud, mille pingetundlikkused pingel  $U_0$  juures on vastavalt  $k_{PU}$  ja  $k_{QU}$ . Analoogiliselt lineariseerides saab leida ka sagedustundlikkused mingi sageduse  $f_0$  korral  $k_{Pf}$  ja  $k_{Qf}$ . Koormuse pinge- ja sagedustundlikkust väljendatakse tavaliselt suhtühikutes ja leitakse valemitega

$$k_{PU} = \frac{\frac{\Delta P}{P_0}}{\frac{\Delta U}{U_0}}; k_{QU} = \frac{\frac{\Delta Q}{Q_0}}{\frac{\Delta U}{U_0}}; k_{Pf} = \frac{\frac{\Delta P}{P_0}}{\frac{\Delta f}{f_0}}; k_{Qf} = \frac{\frac{\Delta Q}{Q_0}}{\frac{\Delta f}{f_0}}, \quad (1.29)$$

kus  $P_0, Q_0, U_0, f_0$  – antud suurused nimitingimuste juures ja  $\Delta P, \Delta Q, \Delta U, \Delta f$  – suuruste erinevus nimiväärtustest [2].



Joonis 1.16. Aktiiv- ja reaktiivkoormuse pingetundlikkust iseloomustavad karakteristikud [2].

Tabelis 1.1 on toodud näide tüüpilistest sõlmekoormuse parameetritest pingel ja sageduse järgi. Pinge- ja sagedustundlikkused on antud elukondliku, kaubandusliku ja tööstusliku koor-

muse jaoks. Tabelis olevad väärtused on leitud sõlmekoormuste komponentide /tarbimis-  
seadmete summeerimise teel. Erinevad koormusklassid sisaldavad erinevaid tarbimis-  
seadmeid erinevas proportsioonis. Näiteks tööstuslikku sõlmekoormust iseloomustavad põhiliselt  
induktsioonmootorid ja seega ka vastavad karakteristikud. Elukondlik koormuse karakteris-  
tikuid määrab peamiselt valgustuse ja kütte pinge- ja sagedustundlikkus. Tabelis 1.1 esinevad  
suuruste vahemikud viitavad vastavatele suvistele ja talvistele perioodidele, mille puhul tarbi-  
jate koosseis võib ka sama koormusklassi sees teatud määral erineda. Näiteks on elukondliku  
aktiivkoormuse pingetundlikkus  $k_{PU}$  vahemikus 0,9 ... 1,7. See tähendab, et suvel on pinge-  
tundlikkus 0,9 ja talvel 1,7 [2].

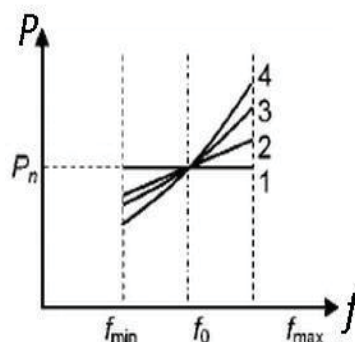
Tabel 1.1. Koormuste pinge- ja sagedustundlikkused koormuse kategooria järgi [2].

Koormuse liik	Võimsustegur	Pingetundlikkus		Sagedustundlikkus	
	$\cos \varphi$	$k_{PU}$	$k_{QU}$	$k_{Pf}$	$k_{Qf}$
Elukondlik	0.87 ... 0.99	0.9 ... 1.7	2.4 ... 3.1	0.7 ... 1	-1.3 ... -2.3
Kaubanduslik	0.85 ... 0.9	0.5 ... 0.8	2.4 ... 2.5	1.2 ... 1.7	-0.9 ... -1.6
Tööstuslik	0.8 ... 0.9	0.1 ... 1.8	0.6 ... 2.2	-0.3 ... 2.9	0.6 ... 1.8

Tööstuses kasutatavate asünkroonmootorite koormus sõltub sagedusest ja mootori koormus  
avaldub kujul

$$P_M = \tau_M \omega_M, \quad (1.30)$$

kus  $\tau_M$  on mootori pöördemoment ja  $\omega_M$  mootori nurkkiirus. Kuna mootori  
pöördemoment on sõltuvuses pöörlemiskiirusest ja mehaanilise koormuse iseloomust, siis ka  
pöördemoment funktsioon mootori pöörlemiskiirusest  $\tau_M = \tau_M(\omega_M)$ .



Joonis 1.17. Aktiivkoormuse sõltuvus sagedusest erinevat liiki koormuste korral.

Ülaloleval joonisel 1.17 kirjeldab sagedusest sõltumatut koormust karakteristik 1. Tunnusjoon  
2 on omane tösteseadmetele, näiteks kaevanduse liftidele ja konveieritele, mis töötavad kons-

tantsetel kiirustel. Tunnusjoon 3 kirjeldab mootoreid mille koormust saab kirjeldada sõnaga „viskoosne“. Näiteks paberivabrikute ja tekstiilitööstuse pressrullid ja kuuma plastiku tootlemisseadmed. Tunnusjoon 4 kirjeldab mootoreid, mille mehaaniline koormuskarakteristik on paraboolne, näiteks ventilatsiooniseadmed [10]. Mootorite kasutusala tulenevalt saab liigitada mootorite pinge- ja sagedustundlikkused kategooriatesse, nagu näidatud tabelis 1.

#### ***1.2.4 Elektrivõrgu tarbijate staatilised karakteristikud***

Kuna agregeeritud sõlmekoormuse staatilised karakteristikud summeeruvad iga individuaalse tarbija staatilistest karakteristikutest on oluline uurida tähtsamate tarbijate individuaalseid staatilisi karakteristikuid. Teades tarbijate osakaalu summaarses koormuses on põhimõtteliselt võimalik tuletada staatilisi karakteristikuid ka agregeeritud sõlmekoormustele.

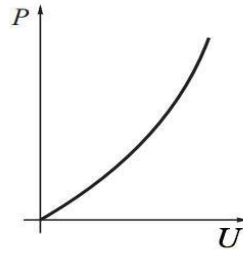
#### **Valgustus ja küte**

Kogu elektritarbimisest umbes ligikaudu 30% kuulub valgustusele ja küttele.

Valgustus jaguneb peamiselt kaheks:

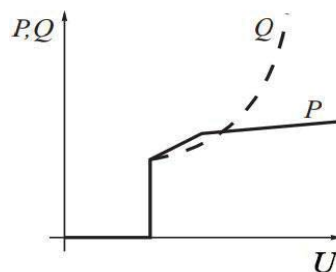
- traditsioonilised hõõglambid;
- lahenduslambid:
  - halogeen,
  - luminofoor,
  - metallhalogeniid,
  - elavhõbe.

**Traditsioonilise hõõglambi** kasutamine hakkab hääbuma, kuna kasutusele võetakse efektiivsemad ja säästlikumad valgusallikad. Traditsiooniline hõõglamp ei vaja põlemiseks reaktiivenergiat ja tema koormus on sagedusest praktiliselt sõltumatu. Oluliseks karakteristikuks hõõglambi puhul on pingetundlikkus, sest sellest sõltub hõõgniidi temperatuur. Seetõttu ei saa hõõglambi takistust pidada konstantseks. Hõõglambi pingetundlikust iseloomustav karakteristik on joonisel 1.18. [2].



Joonis 1.18. Hõõglambi staatiline karakteristik pinge järgi [2].

**Lahenduslambid** on iseloomulikud tööstuslikule ja kaubanduslikule koormusele. Lahenduslampide töötamine on tugevalt seotud toitepingega. Kui pinge langeb alla 65...80 % nimipingest, siis lahenduslambid kustuvad ja käivituvad taas 1-2 sekundijooksul pärast pingetaastumist üle kustumispiiri. Joonisel 1.19. on näidatud lahenduslampi staatiline karakteristik.



Joonis 1.19. Lahenduslampide staatiline karakteristik pinge järgi [2].

**Kütteseadmeid** võiks elektrisüsteemis vaadelda konstantsete takistustena.

Kui kütteseadmep on reguleeriv termostaat, siis säilitatakse konstantne temperatuur ja koormus ka siis, kui pinge muutub. Sellistel juhtudel käsitletakse kütteseadmeid konstantsete koormustena.[2]

### Asünkroonmootorid

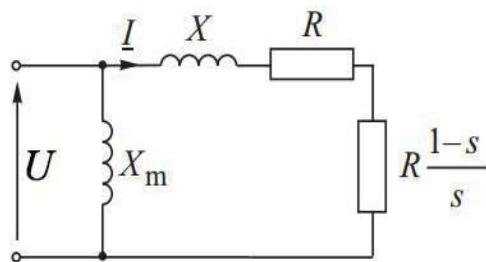
Asünkroonmootorid moodustavad 50-70% kogu süsteemi elektritarbimisest ja on esmajoones iseloomulikud tööstuslikele koormustele. Kaubanduslikus ja elukondlikus sektoris kohtab asünkroonmootoreid vähem .

Joonisel 1.20 on kujutatud asünkroonmootori ekvivalentset aseskeemi, kus  $X$  on staatori ja rootori mähiste ekvivalentne reaktiivtakistus,  $R$  on rootori takistus,  $X_m$  on magnetiseerimisreaktiivtakistus ja  $s$  mootori libistus. Libistus avaldub valemiga

$$s = (\omega_s - \omega_M) / \omega_s , \quad (1.31)$$

kus  $\omega_s$  – sünkroonringkiirus

$\omega_M$  – mootori tegelik ringkiirus



Joonis 1.20. Asünkroonmootori ekvivalentne aseskeem [2].

Võimsus-libistuskarakteristik

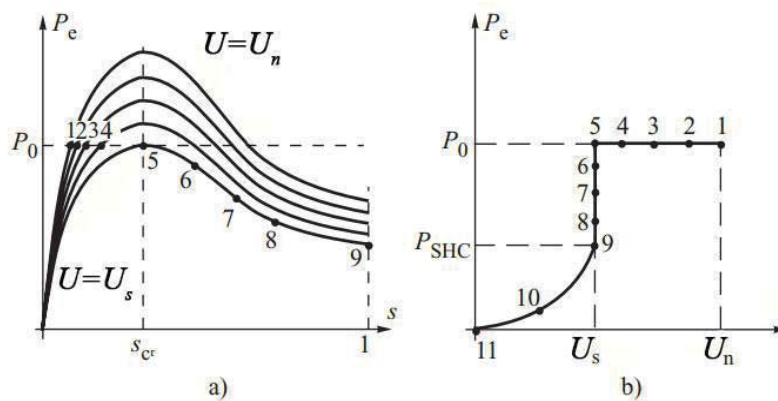
Joonisel 1.20 olevat aseskeemi läbib vool

$$I^2 = \frac{U^2}{X^2 + \left(\frac{R}{s}\right)^2} \quad (1.32)$$

Voolu kaudu avaldub aktiivkoormus järgmiselt:

$$P_e = I^2 \frac{R}{s} = U^2 \frac{Rs}{R^2 + (Xs)^2} \quad (1.33)$$

Valemi alusel saadakse karakteristikud  $P_e(s)$  (joonis 1.21a) erinevate pingete  $U$  väärtuste korral.



Joonis 1.21. Asünkroonmootori karakteristikud: a)  $P_e(s)$  tunnusjooned erinevatel pingetel  $U$ ; b)  $P_e(U)$  tunnusjooned, kui mootor on koormatud konstantse koormusega [2].

Nagu jooniselt 1.21 nähtub, saavutatakse suurim aktiivkoormus  $P_{\max} = \frac{U^2}{2X}$  kriitilise libistuse  $s_{cr}$  korral. Kusjuures tuleb tähele panna, et kriitiline libistus ei sõltu pingest.

### Aktiivvõimsuse-pinge karakteristik

Asünkroonmootori tööpunktiks on mootori võimsuse  $P_e(s)$  karakteristik ja mehaanilise koormuse  $P_m(s)$  karakteristik lõikepunkt. Mehaanilise koormuse suuruse alusel saab asünkroonmootoreid liigitada kahte rühma: kergesti käivituvad (mehaaniline koormus käivitamisel puudub  $\tau_m = 0$ ) ja raskesti käivituvad (mootorile on ka käivitamise ajal rakendatud mehaaniline koormus  $\tau_m \neq 0$ ).

Allpool on vaadeldud raskesti käivituvaid mootoreid konstantse koormuse juures. Selle põhjal saab tulemusi kasutada tüüpkarakteristikute koostamisel [2].

Kui mootor töötab konstantse koormusega  $\tau_m$ , siis mootori poolt tekitatud mehaaniline jõud on:

$$P_m = \tau_m \omega = \tau_m \omega_s (1-s) = P_0 (1-s), \quad (1.34)$$

kus:  $P_0 = \tau_m \omega_s$

Ekvivalenttsel aseskeemil on  $P_0$  võimsuskadu takistil  $R(1-s)/s$ . Mootori summaarne võimsusvajadus avaldub valemiga

$$P_d = P_m + P_{kadu}, \quad (1.35)$$

kus:  $P_{kadu} = I^2 R$

Kokku saadakse valem:

$$P_d = P_m + P_{kadu} = P_0 (1-s) + I^2 R = P_0 (1-s) + \frac{U^2 R s^2}{(Xs)^2 + R^2} \quad (1.36)$$

Mootori libistuse väärtus saadakse  $P_e(s)$  ja  $P_d(s)$  karakteristikute lõikepunktist. Kui panna karakteristikud võrduma  $P_e(s) = P_d(s)$ , saadakse valem:

$$\frac{U^2 R s}{(Xs)^2 + R^2} = P_0 (1-s) + \frac{U^2 R s^2}{(Xs)^2 + R^2} \quad (1.37)$$

Vaatleme olukorda, kus libistus  $s \neq 1$ . Võrrandi lahendamisel saadakse valem:

$$s^2 - 2 \cdot \frac{U^2 s}{2P_0 X} + \left(\frac{R}{X}\right)^2 = 0 \quad (1.38)$$

Asendades  $\frac{U^2}{2P_0X} = a$  ja  $\frac{R}{X} = s_{cr}$ , omandab valem kuju:

$$s^2 - 2as_{cr}s + s_{cr}^2 = 0 \quad (1.39)$$

Saadud ruutvõrrandi lahenditeks saadakse:

$$s_{1,2} = s_{cr} \left( a \pm \sqrt{a^2 - 1} \right) \quad (1.40)$$

Saadud tulemusele tuginedes on võimalik järeldada, et vähim lubatud toitepinge  $U \geq \sqrt{2P_0X}$  peab olema suurem kui seiskumispinge  $U_s = \sqrt{2P_0X}$ , kuna võrrandil on reaalarvulised lahendid ainult juhul, kui  $|a| \geq 1$ . Asendades saadud  $s$  väärtused võimsuse valemisse saadakse võimsuse avaldis kujul

$$P_e = \frac{U^2 R s_{cr} \left( a \pm \sqrt{a^2 - 1} \right)}{X \left( R^2 + X^2 s_{cr}^2 \left( a \pm \sqrt{a^2 - 1} \right)^2 \right)} = \frac{U^2}{2aX} = P_0 \quad (1.41)$$

Saadud tõestuskäik näitab, et raskesti käivituvate mootorite aktiivkoormus, millele on rakendatud konstantne mehaaniline koormus, ei ole sõltuv toitepingest ega mootori libistusest. See karakteristik  $P_0(U)$  on joonisel 1.21a.

Joonisel 1.21b on näidatud vastav  $P_e(U)$  karakteristik [2]. Joonisel 1.21a vastab mootori nimipingel talitlusele ülemise karakteristiku punkt 1. Toitepinge alanemisel võimsus-libistus karakteristik alaneb ja nihutab tööpunkti paremale (joonisel 1.21a punktid 2, 3, 4). Kuna mootori töötamiseks vajaminev aktiivvõimsus  $P_e(U)$  on konstantne, siis joonisel 1.21b kajastub see sirgena (punktid 1, 2, 3, 4). Madalaim karakteristik joonisel 1.21a vastab seiskumispingele (punkt 5). Mootori talitluspunkt 5 vastab ka kriitilisele libistusele. Kui pinge langeb enam, kui punktis 5 näidatud suurus, siis kasvab mootori libistus mööda madalaimat ja ebastabiilsemat karakteristikut (5-9), kuni mootor lõpuks seiskub punktis 9. Samal ajal, kui mootor talitleb mööda seiskumis karakteristikut, väheneb aktiivkoormus, pinge püsib konstantsena ja libistus kasvab. Vastavaid punkte  $P_e(U)$  karakteristikul kujutavad punktid 6, 7, 8. Punktis 9, kus libistus saavutab väärtuse  $s=1$ , tarbib mootor oma lühisvõimsust

$$P_{SHC} = \frac{U^2 R}{R^2 + X^2}. \quad (1.42)$$

Kui pinge jätkuvalt kahaneb, väheneb vajaminev aktiivvõimsus veelgi. Seda iseloomustavad parabooli punktid 9, 10 ja 11 joonisel 1.21b [2].

### Reaktiivvõimsuse-pinge karakteristik

Asünkroonmootori igas faasis tarbitav reaktiivvõimsus koosneb kahest komponendist: magnetimisvõimsusest ja koormusvõimsusest. Joonisel 1.20 on näidatud ekvivalentsed reaktiivtakistused  $X_m$  ja  $X$ . Vastavad reaktiivvõimsused oleksid siis

$$Q_m = \frac{U^2}{2X_m} \quad \text{ja} \quad Q_s = I^2 X = \frac{P_e s}{R} X = P_e \frac{s}{s_{cr}} \quad (1.43)$$

$$Q_m \text{ on } \frac{U^2}{2} = U_f^2 \text{ faasipinge ruut.}$$

Komponent  $Q_m$  sõltub magnetimis-reaktiivtakistusest ja  $Q_s$  koormusvoolust ja mootori reaktantsist. Kui raskesti käivituva koormuse korral on  $\tau_m$  konstant, siis mootori nõutav aktiivkoormus  $P_e = P_0$  ning libistus avaldub stabiilse talitluse korral valemiga

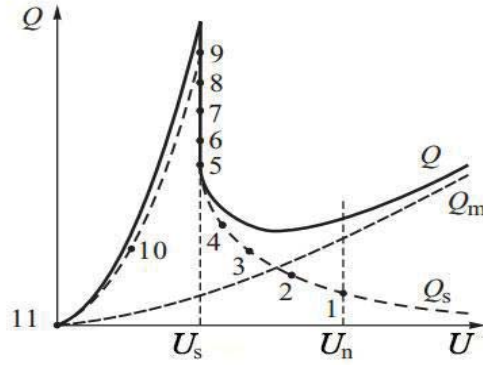
$$s = s_{cr} \left( a - \sqrt{a^2 - 1} \right) \quad (1.44)$$

Asendades saadud tulemuse eelmisesse valemisse, avaldub  $Q_s$  järgmiselt:

$$Q_s = \frac{U^2}{2X} - \sqrt{\left( \frac{U^2}{2X} \right)^2 - P_0^2}, \text{ kui } U > U_s \quad (1.45)$$

Joonisel 1.22 on toodud reaktiivkoormuse staatilised karakteristikud  $Q_m, Q_s$  ja  $Q = Q_m + Q_s$  pinge järgi. Komponent  $Q_m(U)$  on paraboolne ja kasvab 0-st lõpmatuseni. Komponent  $Q_s(U)$  läheneb pinge suurenemisel ( $U \rightarrow \infty$ ) nullile. Kui pinge  $U$  väheneb, siis karakteristik  $Q_s(U)$  kasvab, kuni pinge jõuab seiskumispingeni  $U = U_s$ , mis on graafikul kujutatud punktina 5. Pinge edasisel langemisel liigub karakteristik mööda ebastabiilset osa, mis on graafikul kujutatud punktidega 5, 6, 7, 8, 9. Punktis 9 mootor seiskub  $s = 1$ . Pinge edasine langus põhjustab karakteristiku  $Q_s(U)$  langemise mööda parabooli, mis joonisel on tähistatud punktidega 9,10,11.  $Q$ -ga on joonisel kujutatud reaktiivvõimsuse resulteeriv staatiline karakteristik pinge järgi [2].



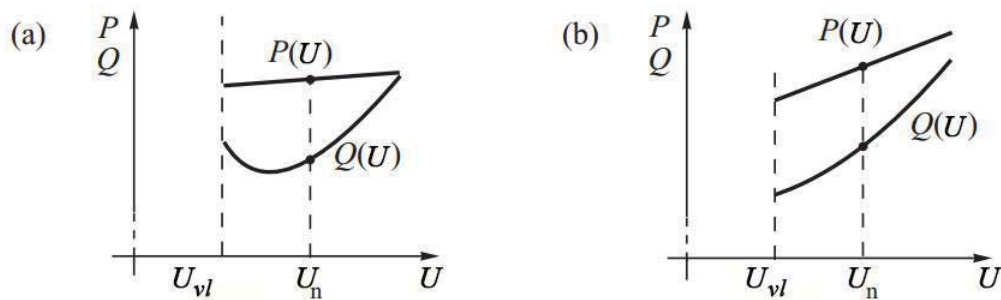


Joonis 1.22. Reaktiivvõimsuse staatiline karakteristik pinge järgi [2].

### Mootori kaitsmine ja käivituse kontrollimine

Eelnevad teoreetilised arvutused ei võta arvesse seadmeid, mis kaitsevad mootorit ja kontrollivad mootori käivitust. Tööstuses kasutatavad asünkroonmootorid on varustatud elektromehaaniliste kontaktoritega, mille kontaktid pinge kukkumisel alla lubatud piiri avanevad ja katkestavad mootori toite. Pinge, milleni jõudes kontaktori kontaktid avanevad, varieerub vahemikus  $0,3...0,7U_n$ .

Ülepingekaitse tagab toite väljalülitamise, kui toitepinge kasvab üle ohtliku piiri. Tänu mootori kaitseseadmetele, saab piirduda koormuse staatiliste karakteristikutega vahemikus, mis vastab kasutatavate kaitseseadmete sätetele.



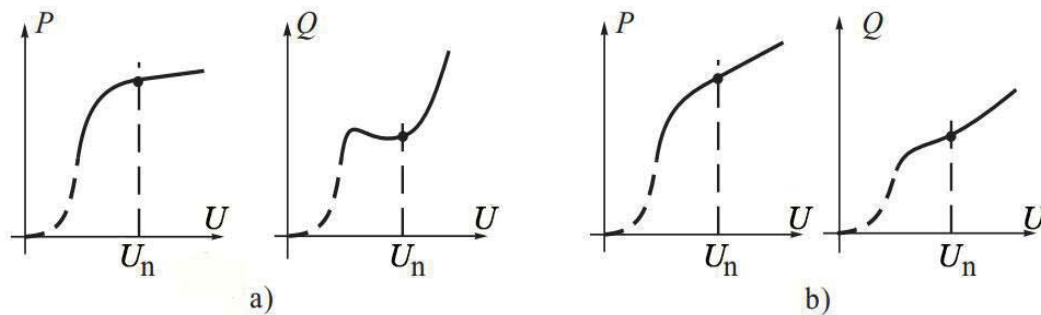
Joonis 1.23. Asünkroonmootori staatilised karakteristikud : a) raskelt käivituv; b) kergelt käivituv [2].

Joonisel 1.9 on asünkroonmootorite staatilisi karakteristikuid iseloomustavad graafikud, kus pinge  $U_{vl}$  on väljalülituspinge ning pinge  $U_n$  mootori nimipinge. Kui pinge langeb alla väljalülituspinge, lülitatakse mootori toide automaatselt välja. Elukondlikud ja kaubanduslikud mootorid on tavaliselt üledimensioonitud ja talitlevad alla 60% nimikoormusel. Seetõttu

võib lugeda neid kergelt käivituvateks ja kirjeldada graafikutega joonisel 1.23b. Suured tööstuslikud mootorid on enamasti valitud töötama nimitingimustel ja mehaaniliselt koor-  
matud. Seega kirjeldab joonis 1.23a raskesti käivituvate asünkroonmootorite staatilisi  
karakteristikuid pinge järgi [2].

### 1.2.5 Sõlmekoormuse summaarne staatiline karakteristik

Sõlmekoormuse summaarne staatiline karakteristik saadakse selle sõlme poolt toidetavate  
individuaalsete tarbimisseadmete karakteristikute summeerimisel. Sellist meetodit nimeta-  
takse ka komposiitmeetodiks. Joonisel 1.24 on toodud kaks näidet sõlmekoormuste staati-  
listest karakteristikutest, mis on saadud tarbimisseadmete karakteristikute summeerimise  
meetodil.



Joonis 1.24. Koormuse staatilised karakteristikud, kui ülekaalus on: a) raskelt käivituvad  
asünkroonmootorid; b) valgustus ja küte [2].

Joonisel 1.24a on näidatud tööstusliku koormuse staatiline karakteristik, kus ülekaalus on  
asünkroonmootorid ja lahenduslambid. Nimitingimuste lähedal on karakteristik  $P(U)$   
lineaarne. Karakteristik  $Q(U)$  on nimipingest suurematel pingetel kiiremini muutuv ja  
positiivse tõusuga. Pinge alanemisel alla nimipinge hakkab reaktiivkoormus  $Q(U)$  kasvama,  
kuna seiskumispingele lähenedes kasvab mootori reaktiivvõimsuse tarbimine. Pinge edasisel  
alanemisel rakenduvad asünkroonmootorites elektromehaanilised kontaktorid, mis  
katkestavad toite. Ka lahenduslambid kustuvad, kui pinge langeb alla lubatud piiri.  
Asünkroonmootorite ja lahenduslampide toide katkestatakse tavaliselt, kui pinge on langenud  
alla 70 protsendi nimipingest.

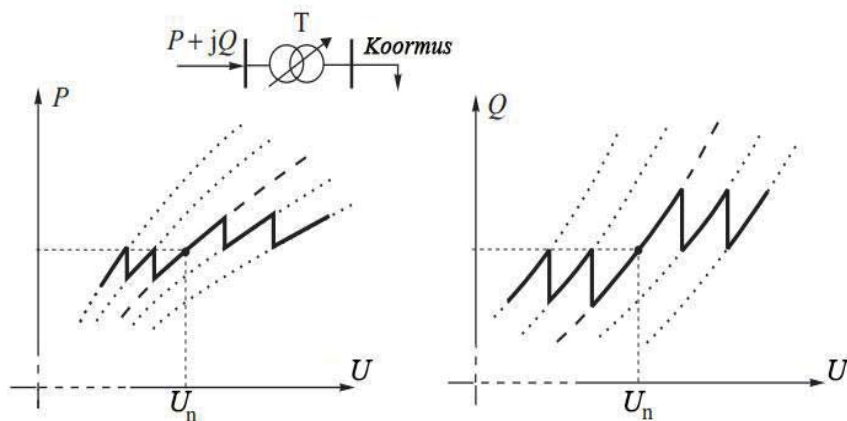
Joonisel 1.24b on kirjeldatud elukondliku ja kaubandusliku koormuse, kus domineerivad  
traditsiooniline hõõglamp ja küte, sõltuvust pingest. Mõlemad karakteristikud  $P(U)$  ja  $Q(U)$   
on nimitingimuste lähedal peaaegu lineaarsed. Pinge langemisel alla 70 protsendi nimipingest

kahaneb järsult nii aktiiv- kui ka reaktiivvõimsuse tarbimine. Kuna ülekaalus on küte ja valgustus, ei mõjuta asünkroonmootorite seiskumispinge lähedal suurenenud reaktiivvõimsuse tarbimine oluliselt karakteristikut  $Q(U)$ .

Joonisel 1.24 toodud karakteristikuid ei saa käsitleda koormuse üldistatud staatiliste karakteristikutena pinge järgi. Graafikud annavad ülevaate, kuidas mõjutavad erinevad tarbimisseadmed sõlmekoormuse staatilist karakteristikut. Tegelik uuritav sõlmekoormus võib olla suuresti erinev, sõltudes erinevate tarbijate sisaldusest elektrivõrgus. Näiteks reaktiivvõimsuse kompenseerimine tarbija lähedal muudab karakteristikut  $Q(U)$  nimitingimuste lähedal lineaarsemaks. Samuti võib ka koormuse staatilist karakteristikut tugevalt mõjutada väiksevõimsuseline hajatootmine, näiteks lõpptarbija, kes müüb tuuleenergiat elektrivõrku.

### 1.2.6 Astmelülititega trafo mõju staatilistele karakteristikutele

Lisaks reaktiivvõimsuse kompenseerimisele ja elektrienergia genereerimisele tarbija lähedal, mõjutab sõlmekoormuse staatilist karakteristikut ka see, kas see on mõõdetud trafo primaar- või sekundaarpoolel. Kui mõõtmised tehakse sõlme kõrgepinge poolel, siis tuleb karakteristikutele juurde arvestada trafo aktiiv- ja reaktiivvõimsuse kaod. Lisaks sellele, on jaotusvõrgu trafod on varustatud astmelülititega, mis aitavad kontrollida pinget elektrivõrgus. Joonisel 1.25 on näidatud, kuidas mõjutab astmelülititega trafo kasutamine koormuse staatilisi karakteristikuid pinge järgi.



Joonis 1.25. Astmetrafo mõju aktiiv- ja reaktiivkoormusele [2].

### 1.2.7 Sõlmekoormuste staatiliste karakteristikute mudelid

Sõlmekoormuse staatilise karakteristikute mudel iseloomustab koormuse karakteristikut igal ajahetkel algebraalse funktsioonina, sõltuvana antud sõlme pingest ja sagedusest antud

momendil. Aktiivkoormust  $P$  ja reaktiivkoormust  $Q$  käsitletakse eraldiseisvatena. Eelmine peatükk kirjeldas elektrivõrgu üksikute komponentide (valgustus, küte, asünkroonmootorid) staatilisi karakteristikuid. Selles peatükis näidatakse, kuidas saab teadaolevaid andmeid rakendada matemaatilistes mudelites, mida on võimalik kasutada süsteemi stabiilsuse arvutustes.

### **EkspONENTMudel**

Tavaliselt iseloomustatakse sõlmekoormuse sõltuvust pingest järgmiste eksponentmudelitega.

$$P = P_0 \left( \frac{U}{U_0} \right)^{k_{PU}} \quad \text{ja} \quad Q = Q_0 \left( \frac{U}{U_0} \right)^{k_{QU}} \quad (1.46)$$

Valemities on suurused  $P$  ja  $Q$  tegelikule pingele  $U$  vastavad aktiiv- ja reaktiivkoormused ning  $P_0$  ja  $Q_0$  on aktiiv- ja reaktiivkoormused vaadeldava sõlme nimipingel.

Suurused  $k_{PU}$  ja  $k_{QU}$  on aktiiv- ja reaktiivkoormuse pingetundlikkused antud sõlmes. Kui  $k_{PU}$  ja  $k_{QU}$  väärtused võrduvad 0, 1 või 2, siis toodud valemid vastavad vastavalt konstantse koormuse, konstantse vooluga või konstantse impedantsiga modelleeritud koormusele.

Kui on tegemist mitme koormusklassi komposiitkoormusega, siis sõltuvad  $k_{PU}$  ja  $k_{QU}$  väärtused koormuse komponentide koondkarakteristikutest. Erinevate koormusklasside pingetundlikkuste  $k_{PU}$  ja  $k_{QU}$  väärtused on tabelis 1.1. Nagu tabelist näha, võivad eri koormusklasside pingetundlikkused muutuda vastavalt piirides  $k_{PU} = 0,1 \dots 1,8$  ja  $k_{QU} = 0,6 \dots 3,1$ . Reaktiivkoormuse pingetundlikkuse  $k_{QU}$  suur erinevus aktiivkoormuse pingetundlikkusest  $k_{PU}$  tuleneb reaktiivkoormuse mittelineaarsest sõltuvusest sõlme pingest. Mittelineaarsuse peamiseks põhjuseks on trafode ja mootorite magnetahelate karakteristikute mittelineaarsus. Seetõttu on kõrgemal pingel reaktiivkoormuse juurdekasv märgatavalt suurem kui aktiivkoormusel [3].

EkspONENTMudel annab hea kujutuse staatilistest karakteristikutest nimipinge läheduses.

### **PolünoomMudel e ZIP-mudel**

Teine laialdaselt kasutatud leidev mudel on polünoomMudel.

$$P = P_0 \left( p_1 \left( \frac{U}{U_0} \right)^2 + p_2 \left( \frac{U}{U_0} \right) + p_3 \right) \quad \text{ja} \quad Q = Q_0 \left( q_1 \left( \frac{U}{U_0} \right)^2 + q_2 \left( \frac{U}{U_0} \right) + q_3 \right) \quad (1.47)$$

Esitatud polünoomudel on tuntud ka ZIP mudelina, kuna see ühendab kolm konstantset parameetrit – konstantse impedantsi ( $Z$ ), konstantse voolu ( $I$ ) ja konstantse koormuse ( $P$ ).

Parameetrid  $p_1, p_2, p_3$  ja  $q_1, q_2, q_3$  määravad iga komponendi osakaalu vaadeldavas sõlmes [3].

Polünoomudel, nagu ka eksponentmudel, annab hea kujutuse staatilistest karakteristikutest nimipinge läheduses.

### **Pinge- ja sagedussõltuvust arvetav mudel**

Selline mudel võimaldab arvestada lisaks sõlmekoormuse pingesõltuvusele ka sõlmekoormuse sõltuvust sagedusest.

Sageduse arvestamiseks on mudelisse lisatud tegur  $(1 + k_{Pf}\Delta f)$ , kus  $\Delta f$  on sageduse hälve ja  $k_{Pf}$  on sõlmekoormuse sagedustundlikkus. Selle tulemusel võtavad mudelid kuju

$$P = P_0 \left( \frac{U}{U_0} \right)^{k_{PU}} (1 + k_{Pf}\Delta f) \quad \text{ja} \quad Q = Q_0 \left( \frac{U}{U_0} \right)^{k_{QU}} (1 + k_{Qf}\Delta f) \quad (1.48)$$

Tavaliselt varieeruvad sagedustundlikkused  $k_{Pf}$  ja  $k_{Qf}$  vahemikes  $k_{Pf} = -0,3 \dots 2,9$  ja  $k_{Qf} = -2,3 \dots 1,8$ . Suuruste  $k_{Pf}$  ja  $k_{Qf}$  väärtused on tabelis 1.1. Süsteemi stabiilsuse arvutustes kasutatavates mudelites ei ole sõlme sagedus tavaliselt iseseisev parameeter, vaid tuletatakse vaadeldava sõlme pingenurga ja aja järgi [3].

### **Komposiitmudel**

Sõlmekoormuse staatiline komposiitmudel saadakse kõikide eelnevate mudelite kombineerimise teel. Mudeli eeliseks on võimalus modelleerida erinevaid koormuse tüüpe.

Aktiivkoormuse staatiline komposiitmudel avaldub järgmiselt [3]:

$$P = P_0 (P_{ZIP} + P_{EX1} + P_{EX2}), \quad (1.49)$$

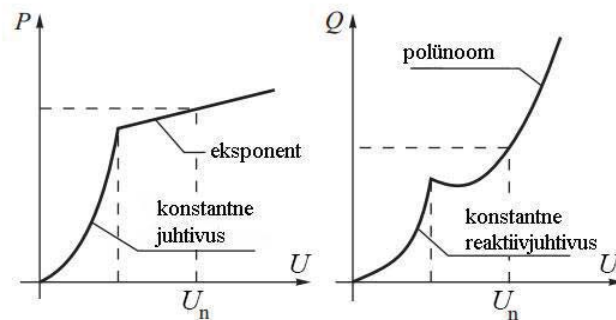
kus: 
$$P_{ZIP} = p_1 \left( \frac{U}{U_0} \right)^2 + p_2 \left( \frac{U}{U_0} \right) + p_3 \quad (1.50)$$

$$P_{EX1} = p_4 \left( \frac{U}{U_0} \right)^{k_{PU1}} (1 + k_{Pf1}\Delta f) \quad (1.51)$$

$$P_{EX2} = p_5 \left( \frac{U}{U_0} \right)^{k_{PU2}} (1 + k_{Pf2}\Delta f) \quad (1.52)$$

### Ositi lähendamine

Ositi lähendamise abil on võimalik uurida, mis juhtub pärast pinget langemist alla 70% nimipingest. Nimitingimuste lähedal kasutatakse aktiivkoormuse korral eksponentmudelit ja reaktiivkoormuse korral polünoommudelit. Kui pinget on langenud vahemikku 30...70% nimipingest, siis kasutatakse konstantse impedantsiga mudelit. Joonisel 1.26 on näidatud sellise lähenemise tulemus. Võrreldes ositi lähendamisel saadud tulemust joonisel 1.24a toodud staatilise karakteristikuga on tulemused väga sarnased [2].



Joonis 1.26. Näide ositi lähendatud staatilistest karakteristikutest pinget järgi [2].

### **1.2.8 Asünkroonmootori dünaamilised karakteristikud**

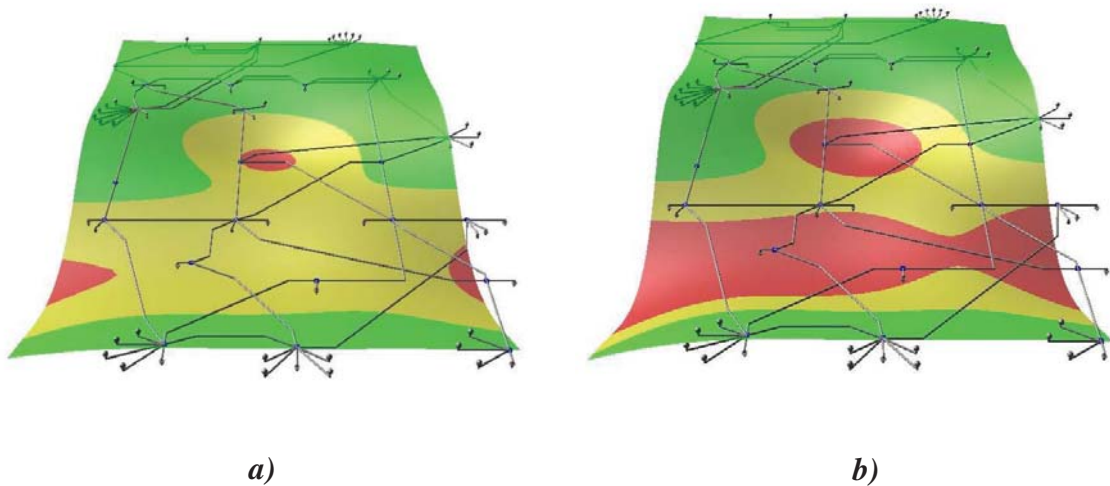
Elektrisüsteemi dünaamilised omadused sõltuvad oluliselt asünkroonmootorite dünaamikast. Asünkroonmootorite kiirus ei saa hetkeliselt muutuda tänu rootori inertsile. Kuna asünkroonmootorid moodustavad suure osa kogu elektritarbimisest, on mootorite siirdeprotsessiga arvestamine oluline. Tavaliselt kujutatakse asünkroonmootoreid elektrisüsteemi mudelites konstantsete koormustena. Selline käsitlusviis on õige juhtudel, kui süsteem talitleb normaaltingimustel. Kui aga elektrisüsteemi talitluses tekib ootamatu suur häiring, näiteks pinget suur ja järsk kõrvalekalle, siis ei tööta asünkroonmootorid enam konstantse koormusega.

Elektrisüsteemi stabiilse talitluse tingimustes töötab asünkroonmootor punktis, kus mootori elektromehaaniline pöördemoment on võrdne mootorile rakenduva mehaanilise koormusega. Kui pinget asünkroonmootori klemmidel peaks järsult muutuma, ei asetse mootori tööpunkt enam elektromehaanilise võimsuse ja mehaanilise koormuse lõikepunktis. Tööpunkti nihkumise tulemusena hakkab mootori pöörlemiskiirus kas kasvama või kahanema. Asünkroonmootori dünaamiline mudel võimaldab arvutada süsteemi talitlust suvalisel ajahetkel pärast riket. Dünaamilise mudeli vajalikkuse illustreerimiseks on allpool toodud

kaks näidet 24 sõlmega süsteemi rikketalitlusest. Arvutused on tehtud RTS (*IEEE 24-bus reliability test system*) mudeliga [7].

Joonistel 1.27a ja 1.27b on rohelisega kujutatud piirkonnad, kus pinge väärtus hälbib nimipingest 5 % piires. Kollasega näidatud piirkonnas hälbib pinge vahemikus 5...10 % ja punane tähistab pinge hälbumist nimipingest rohkem kui 10 %.

Joonisel 1.27a on kaardistatud 24 alajaama sõlmepinged rikke olukorras, eeldusel, et sõlmekoormused on konstantsed. Joonisel 1.27b on sama rikketalitus, kuid eeldusel, et igas sõlmes on 50% koormusest asünkroonmootorite koormus ja asünkroonmootoreid modelleeritakse dünaamiliste mudelitega. Erinevus joonisel 1.27a kujutatuga tuleneb asünkroonmootorite libistuse muutumisest rikketalitusel esineva siirdeprotsessi käigus.

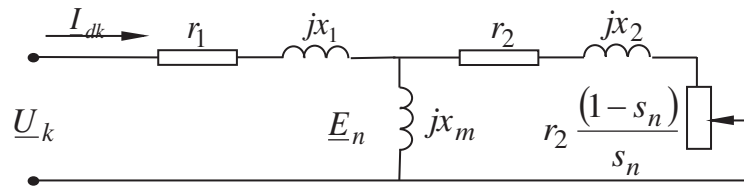


*Joonis 1.27. RTS simulatsioonid: a) sõlmekoormuste staatiliste karakteristikutega ja b) sõlmekoormuste dünaamiliste karakteristikutega.*

Normaaltingimustel töötab mootor punktis, kus elektromagnetiline võimsus võrdub mehaanilise koormusega. Rikke korral nihkub see punkt normaalasendist välja. Kuna asünkroonmootorite reaktiivkoormus muutub koos libistuse muutumisega, siis rikketalitusel mõjutavad süsteemis olevad asünkroonmootorid oluliselt süsteemi sõlmepingeid. Seepärast on süsteemi dünaamiliste protsesside korral vaja kasutada asünkroonmootoreid sisaldava koormuse käitumise uurimiseks dünaamilisi mudeleid. Kui joonis 1.27a kirjeldab pinge hälbeid tuginedes staatilistele karakteristikutele, siis joonis 1.27b kujutab pingete hälbumist, arvestades asünkroonmootoreid sisaldavate koormuste dünaamilisi karakteristikuid. [7]

### 1.2.9 Asünkroonmootori dünaamiliste karakteristikute mudelid

Selleks, et modelleerida asünkroonmootorite dünaamikat, on välja töötatud ühefaasiline ruutvõrrandiline asünkroonmootori mudel (*Quadratized induction machine model for power flow analysis*) [6]. Mudeli algandmeteks on asünkroonmootori sildiandmed, sõlme elektrilised parameetrid ja mehaanilise koormuse andmed. Mudeli ülesehitus tugineb joonisel 1.28 näidatud asünkroonmootori ekvivalentsele aseskeemile. Mudel hõlmab kahte erinevat mehaanilise talitlust: konstantse libistusega ja pöördemomentide bilansiga talitlust [7].



Joonis 1.28. Asünkroonmootori ekvivalentne ühefaasiline aseskeem sõlmes  $k$ .

Asünkroonmootori ekvivalentsest aseskeemilt saadakse kaks järgnevat valemist:

$$\underline{I}_{dk} = (g_1 + jb_1)(\underline{U}_k - \underline{E}_n) \quad (1.53)$$

$$0 = jb_m \underline{E}_n + \underline{E}_n \frac{s_n}{r_2 + jx_2 s_n} - (g_1 + jb_1)(\underline{U}_k - \underline{E}_n) \quad (1.54)$$

Asünkroonmootori elektrilised olekumuutujad seotakse mootori poolt tekitatud pöördemomendiga järgmiste valemite abil:

$$T_{em} \omega_s (1 - s_n) = |I_2|^2 r_2 \frac{1 - s_n}{s_n} \quad \text{või} \quad 0 = \left| \frac{\underline{E}_n}{r_2 + jx_2 s_n} \right|^2 r_2 s_n - T_{em} \omega_s, \quad (1.55)$$

kus:  $s_n$  – asünkroonmootori libistus,

$T_{em}$  – mootori poolt tekitatud pöördemoment

$\omega_s$  – rootori sünkroon-ringkiirus.

Dünaamiliste mudelite valemities asendatakse takistused juhtivustega järgmiselt:

$$\frac{1}{r_1 + jx_1} = g_1 + jb_1; \quad (1.56)$$

$$\frac{1}{jx_m} = jb_m \quad \text{ja}$$

$$\frac{1}{r_2 + jx_2} = g_2 + jb_2$$



### Konstantse libistusega mudel

Eelneva nelja valemi põhjal saab tuletada konstantse libistusega mudeli, kus mootor talitleb konstantsel kiirusel. Mootori libistuse väärtus saadakse mootori kiiruse järgi ja seega on mudel lineaarne [6].

$$\underline{I}_{dk} = (g_1 + jb_1)\underline{U}_k - (g_1 + jb_1)\underline{E}_n \quad (1.57)$$

$$0 = -(g_1 + jb_1)\underline{U}_k + \left( g_1 + jb_1 + jb_m + \frac{s_n}{r_2 + jx_2s_n} \right) \underline{E}_n, \quad (1.58)$$

kus:  $\underline{U}_k$  – sõlmepinge;

$\underline{E}_n$  – rootori mähises tekkiv elektromotoorjõud.

Valemid on antud kompleksmuutujate kujul. Kui eraldada üksteisest reaali- ja imaginaarosa, saadakse neli lineaarset võrrandit. Nende nelja võrrandiga kirjeldatakse olekuvektorit

$$X^T = \|\underline{U}_{kr} \quad \underline{U}_{ki} \quad \underline{E}_{nr} \quad \underline{E}_{ni}\| \quad (1.59)$$

Indeks  $r$  tähistab sõlmepinge ja rootori mähises tekkiva elektromotoorjõu reaalosa ja ja indeks  $i$  imaginaarosa [7].

### Pöördemomentide bilansi mudel

Pöördemomentide bilansi põhivõrranditeks on eespool toodud valemid

$$\underline{I}_{dk} = (g_1 + jb_1)(\underline{U}_k - \underline{E}_n); \quad (1.60)$$

$$0 = jb_m \underline{E}_n + \underline{E}_n \frac{s_n}{r_2 + jx_2s_n} - (g_1 + jb_1)(\underline{U}_k - \underline{E}_n); \quad (1.61)$$

$$0 = \left| \frac{\underline{E}_n}{r_2 + jx_2s_n} \right|^2 r_2 s_n - T_{em} \omega_s. \quad (1.62)$$

Kuna libistus ei ole sellise mudeli juures konstantne, saadakse mittelineaarsed võrrandid, kus libistus saab olekuvektori osaks. Olekuvektor avaldub nüüd kujul

$$X^T = \|\underline{U}_k \quad \underline{E}_n \quad s_n + jU_n \quad \underline{Y}_n \quad \underline{W}_n\|, \quad (1.63)$$

kus:  $\underline{Y}_n = \frac{1}{r_2 + jx_2s_n}$  (1.64)

$$\underline{W}_n = \underline{Y}_n \underline{E}_n \quad (1.65)$$

$$U_n = \underline{W}_n \underline{W}_n^* \quad (1.66)$$

### **Ruutvõrrandiline asünkroonmootori dünaamiline mudel**

Eelnevates peatükkides käsitletud valemite abil on võimalik avaldada ruutvõrrandilise asünkroonmootori mudeli võrrandid [7]:

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_{dk} &= (g_1 + jb_1) \underline{U}_k - (g_1 + jb_1) \underline{E}_n \\ 0 &= -(g_1 + jb_1) \underline{U}_k + (g_1 + jb_1 + jb_m) \underline{E}_n + \underline{W}_n s_n \\ 0 &= -T_{em} \omega_s + U_n s_n r_2 \\ 0 &= \underline{W}_n \underline{W}_n^* - U_n \\ 0 &= r_2 \underline{Y}_n + jx_2 s_n \underline{Y}_n - 1 \\ 0 &= \underline{W}_n - \underline{Y}_n \underline{E}_n \end{aligned} \right\} \quad (1.67)$$

Siit esimesest valemist saadakse asünkroonmootori staatori vool.

Teine võrrand on saadud ekvivalentse aseskeemi alusel.

Kolmas võrrand täpsustab asünkroonmootori pöördemomendi seost mootori elektriliste parameetritega.

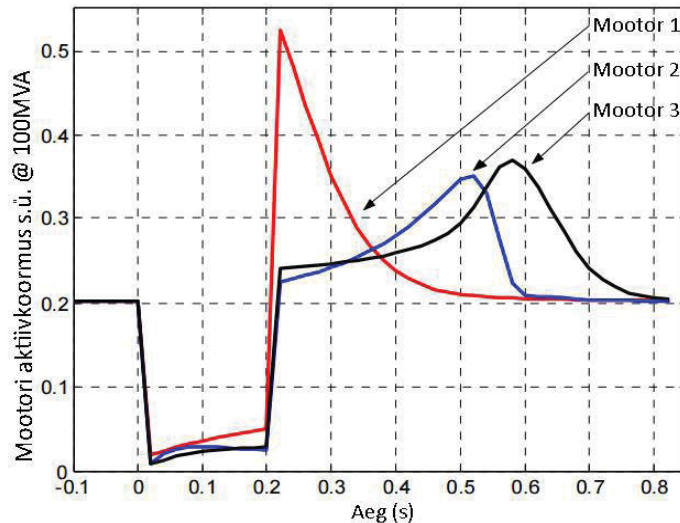
Viimased kolm võrrandit seovad täiendavaid muutujaid olemasolevate elektriliste parameetritega [8].

### **Asünkroonmootori dünaamilise modelleerimise tulemused**

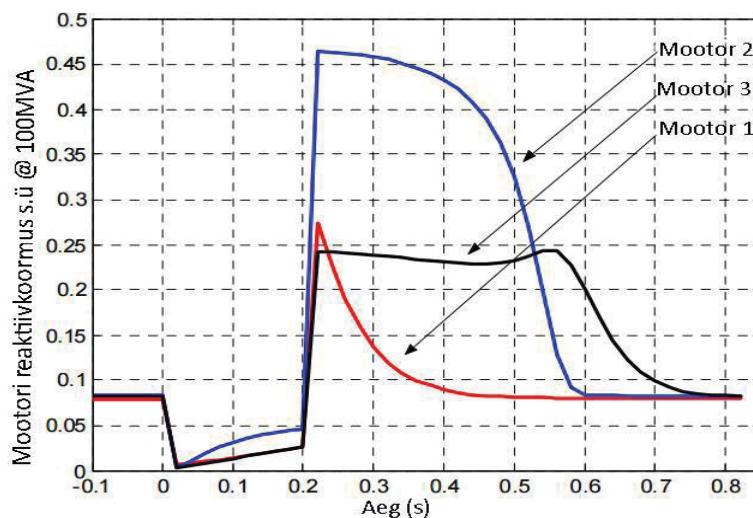
Simulatsiooni teoreetiline pool tugineb allikas [7] käsitletud arendusele. Selline ruutvõrrandiline käsitusviis aitab saada asünkroonmootorite modelleerimisel realistlike tulemusi mootorite dünaamika kohta. Mudel võtab arvesse mootorite sildandmeid (elektrilised parameetrid), mootorite mehaanilise koormuse iseloomu ja võrgu topograafiat. Mudelis arvutatakse mootorite aeglustumise kiirus vastavalt sellele, milline on igal ajahetkel elektromehaanilise pöördemomendi suurus võrreldes mehaanilise koormusega. Kui mehaaniline koormus on suurem elektromehaanilisest pöördemomendist, mootor aeglustub.



Joonisel 1.30 on näha asünkroonmootorite klemmpinge dünaamilised karakteristikud. Mootori 1 klemmpinge taastub kõige kiiremini tänu tugevale toitevõrgule. Seetõttu saavutab mootor 1 ka kõige kiiremini oma normaalse pöörlemiskiiruse. Mootorite 2 ja 3 klemmpinge taastub aeglasemalt ja seetõttu on ka nende kiiruskarakteristiku taastumine veidi aeglasem.



Joonis 1.31. Asünkroonmootori aktiivkoormuse dünaamiline karakteristik.



Joonis 1.32. Asünkroonmootori reaktiivvõimuse dünaamiline karakteristik.

Joonisel 1.31 ja 1.32 on vastavalt mootorite aktiiv- ja reaktiivkoormus karakteristik. Nagu ka kiiruse ja klemmpinge korral, taastub ka normaalne nimitalitlusele vastav aktiiv- ja reaktiivkoormus mootori 1 korral kõige kiiremini. Erinevused aktiiv- ja reaktiivkoormuse karakteristikutes tekivad tänu mootorite elektriliste ja mehaaniliste parameetrite erinevusele ning antud võrgu topograafiale. Siirdeprotsessi käigus omab kõige suuremat aktiivkoormuse hetkväärtust mootor 1. Pärast lühise likvideerimist on suurim reaktiivkoormus mootoril 2.

### **1.3 Kirjandus**

- [1] Meldorf, M. Electrical Network Load Monitoring. TUT Press, 2008, 144 pp.
- [2] Machowski, J., Bialek, J. W., James R. Bumby, J.R. Power System Dynamics and Stability. Chichester, John Wiley & Sons Ltd, 1997, 658 pp.
- [3] Kundur, P. Power System Stability and Control. New York: McGraw-Hill, 1993, 1167 pp.
- [4] Meldorf, M., Kilter, J., Elektrisüsteemi stabiilsus. Tallinn, TTÜ kirjastus, 2011, 346 lk.
- [5] Tiigimägi, E. Elektrivõrgud. Tallinn, TTÜ kirjastus, 1997, 127 lk.
- [6] Sakis Meliopoulos, A. P., Gao, W., Li, S., Cokkinides, G. J., Dougal, R. Quadraticized induction machine model for power flow analysis.  
[http://www.researchgate.net/profile/AP\\_Meliopoulos/publication/267400075\\_Quadratized\\_Induction\\_Machine\\_Model\\_for\\_Power\\_Flow\\_Analysis/links/54b16f0f0cf28ebe92e050d5.pdf](http://www.researchgate.net/profile/AP_Meliopoulos/publication/267400075_Quadratized_Induction_Machine_Model_for_Power_Flow_Analysis/links/54b16f0f0cf28ebe92e050d5.pdf), 2105, 6 pp.
- [7] Stefopoulos, G. K., Meliopoulos, A. P. Induction Motor Load Dynamics: Impact on Voltage Recovery Phenomena.  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1668591> , 2015, 8 pp.
- [8] Stefopoulos, G. K., Sakis Meliopoulos, A. P. Quadraticized Three-Phase Induction Motor Model for Steady-State and Dynamic Analysis.  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4201297>, 2015, 11 pp.
- [9] Grigsby, L. L. Electric Power Generation, Transmission and Distribution. Third Edition, New York, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012, 43 pp.
- [10] Baggini, A. Handbook of Power Quality. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2008, 613 pp.
- [11] Kivistik, R., Treufeldt, Ü. (juhendaja). Sõlmekoormuste staatilised ja dünaamilised karakteristikud. Bakalaureusetöö. Tallinn, TTÜ, 2015, 38 lk.

## 2 Koormusmudelid ja nende rakendamine

### 2.1 Koormuse matemaatilise mudeli omadused ja rakendused

#### 2.1.1 Elektrivõrgu koormuse kirjeldamine matemaatilise mudeliga

Elektrivõrgu koormuseks nimetatakse tarbitava elektri võimsust või voolu. Elektrivõrgu talitluse plaanimisel ja juhtimisel on vaja teada tulevasi koormusi alates lähimast tunnist kuni aastani ja enam. Analüüsitakse ka möödunud ajavahemike koormusi. Käsitletakse nii elektrivõrgu summaarset kui regioonide, võrgu sõlmede ja üksiktarbijate koormusi. Enamasti vaadeldakse tunni keskmisi koormusi, mõnikord ka koormusi lühema ajavahemiku ulatuses.

Koormus muutub oluliselt ajas nii aastases, nädalases kui päevasises lõikes ning sõltub märgatavalt ilmast, eriti õhutemperatuurist. Oma mõju avaldavad ka päikese radiatsioon, tuule kiirus ja õhu niiskus. Kuna seni on uuritud peamiselt temperatuuri mõju, siis nimetame neid ilma lisafaktoriteks

Meie käsitluses kirjeldatakse koormust matemaatilise mudeliga

$$P(t) = E(t) + \Gamma(t) + \Theta(t) \quad (2.1)$$

kus  $E(t)$  – matemaatiline ootus

$\Gamma(t)$  – ilmastikusõltuvuskomponent

$\Theta(t)$  – stohhastiline komponent.

Matemaatiline ootus kirjeldab koormuse regulaarseid muutusi nagu üldine kasv (trend) ning sesoonne, nädalasisene ja ööpäevasisene perioodilisus. Matemaatiline ootus on põhimõtteliselt mittejhuslik ja vastab normaaltemperatuurile.

#### 2.1.2 Koormuse temperatuurisõltuvus

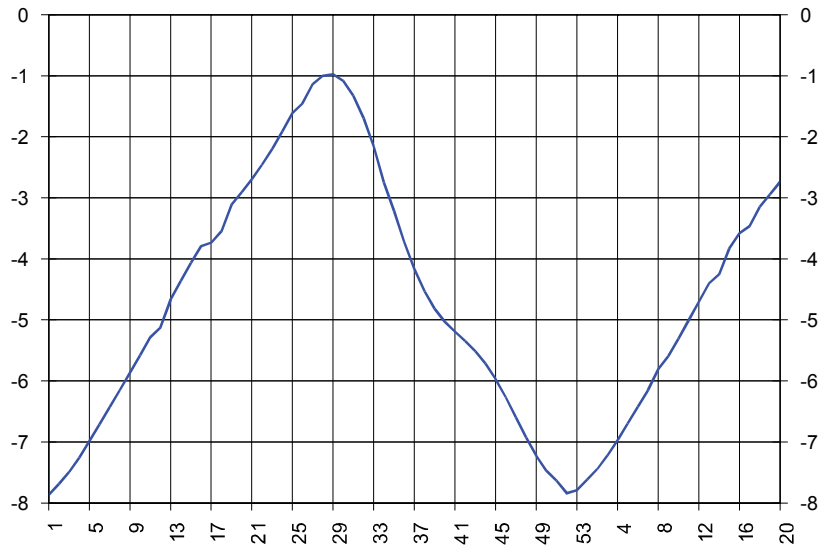
Temperatuurisõltuvus kujutab koormuse hälvet, mis on tingitud välisõhu temperatuuri kõrvalekaldest normaaltemperatuuri suhtes. Normaaltemperatuuriks (temperatuuri matemaatiliseks ootuseks) on välisõhu 30 aasta keskmine temperatuur aastasisese aja mingil hetkel (tunnil). Koormuse temperatuurisõltuvusele on muude seaduspärasuste kõrval iseloomulik hilistumine umbes 24 tunni võrra. Kui tegelik temperatuur vastab (hilistumist arvestades) normaaltemperatuurile, siis temperatuuri mõju puudub.

Koormuse temperatuurisõltuvuskomponent esitatakse kujul

$$\Gamma(t) = R(t)\gamma(t) \quad (2.2)$$

kus  $R(t)$  – koormuse temperatuuritundlikkus

$\gamma(t)$  – suhteline temperatuurisõltuvuskomponent.



Joonis 2.1. Koormuse temperatuuritundlikkus MW/°C nädalatasemel.

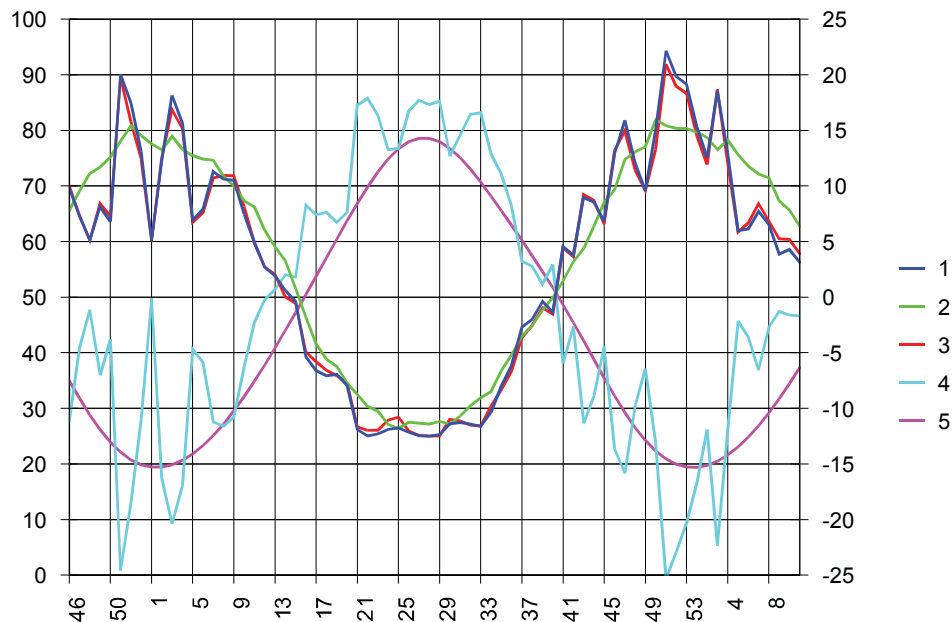


Joonis 2.2. Koormuse temperatuuritundlikkus MW/°C tunnitaseemel.

Temperatuuritundlikkus kujutab endast koormuse juurdekasv temperatuuri tõusmisel 1 °C võrra ning on meie oludes negatiivne. Joonistel 2.1 ja 2.2 on näited temperatuuritundlikkusest nädala- ja tunnitaseemel. Temperatuuritundlikkus on koormusekohane. Näidetes vaadeldav

temperatuuritundlikkus ulatub väärtuseni  $-10$ , mis tähendab, et temperatuuri langemisel ühe kraadi võrra tõuseb vaadeldav koormus kuni 10 MW.

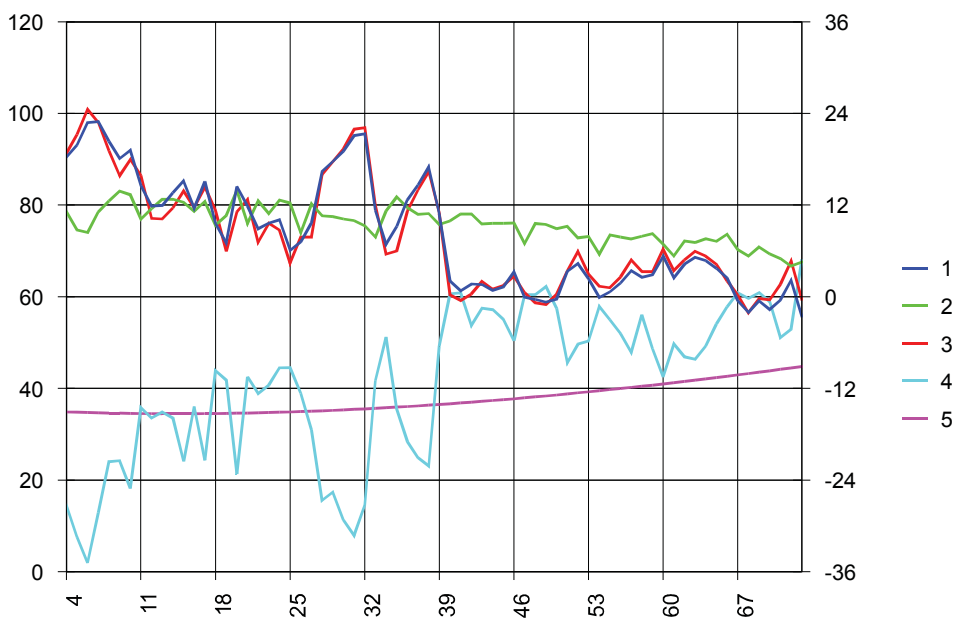
Suhteline temperatuurisõltuvuskomponent  $\gamma(t)$ , mille ühikuks on  $^{\circ}\text{C}$ , kujutab esimesel pilgul temperatuuri hälvet normi suhtes. Tegelikult peab see komponent kajastama ka koormuse temperatuurisõltuvuse muid üksikasju, ennekõike eelpool mainitud hilistumist. Veel võib tähele panna, et suvel, kus koormuse temperatuuritundlikkus on väike, esineb siiski koormuse tõusu, kui temperatuur meie oludes langeb alla  $14^{\circ}\text{C}$  või tõuseb üle  $25^{\circ}\text{C}$ , ilmselt täiendavate kütte- või külmutusseadmete kasutuselevõtu tõttu. Kui talvel peale pikemat külmaperioodi temperatuur tõuseb normaaltasemele, siis koormus esialgu ei vähene, vaid jääb suhteliselt kõrgeks veel mitmeks päevaks. Selliseid ja muidki üksikasju arvestatakse komponendi  $\gamma(t)$  mudelis, mida on lähemalt vaadeldud näiteks monograafias [1].



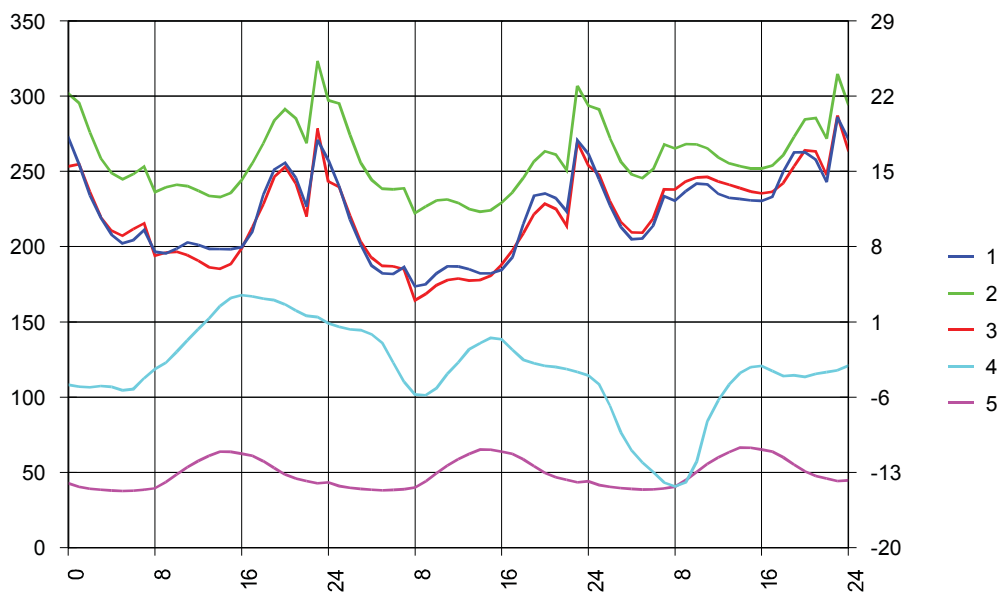
*Joonis 2.3. Koormuse tegelik väärtus (1), matemaatiline ootus (2) ja ooteväärtus (3) ning temperatuuri väärtus (4) ja norm (5) nädalatasemel.*

Joonistel 2.3...2.5 kajastub temperatuuri mõju erinevate hälvete korral. Siin koormuse ooteväärtuseks on nimetatud suurust  $E(t) + \Gamma(t)$ .





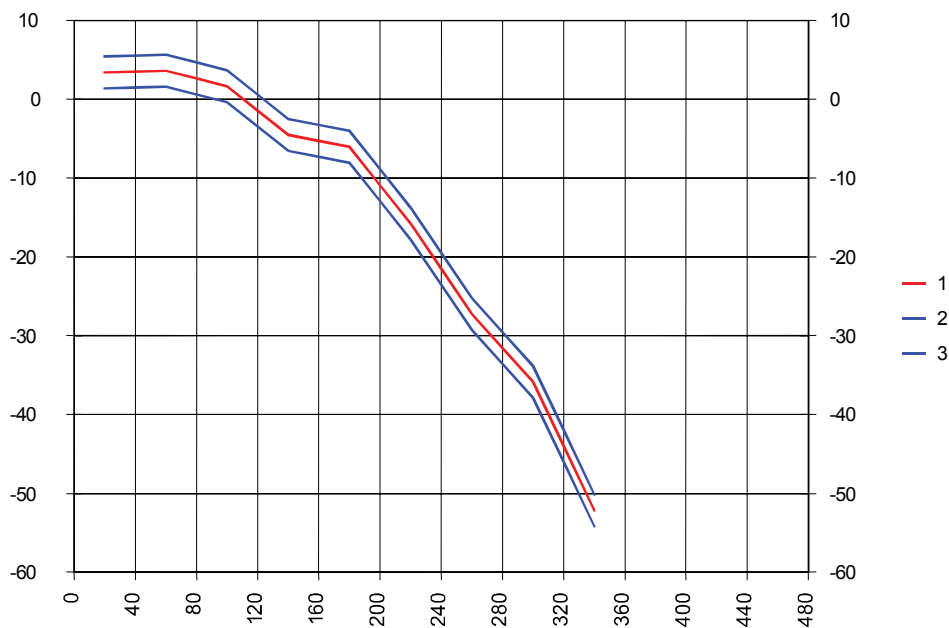
Joonis 2.4. Koormuse tegelik väärtus (1), matemaatiline ootus (2) ja ooteväärtus (3) ning temperatuuri väärtus (4) ja norm (5) päevatasemel.



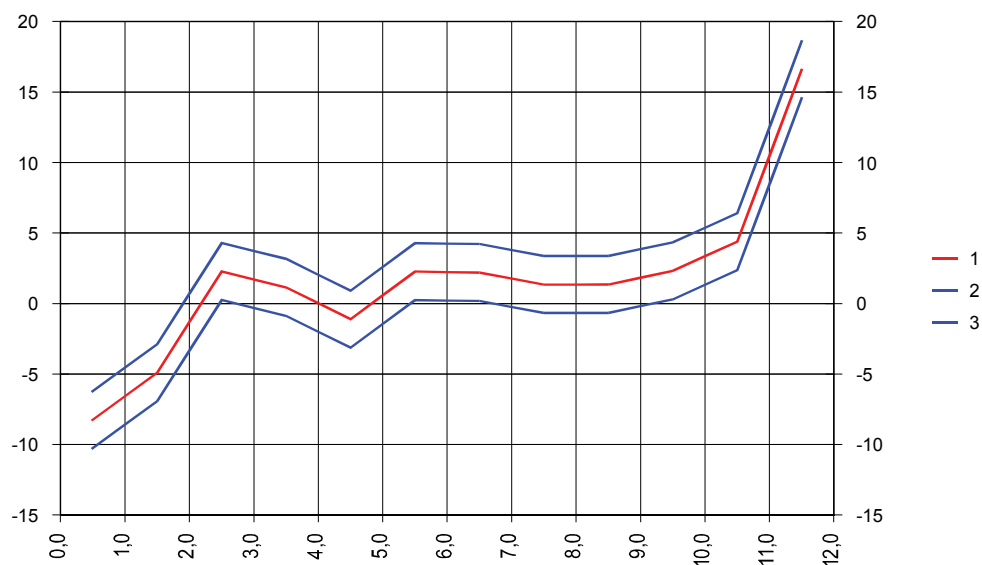
Joonis 2.5. Koormuse tegelik väärtus (1), matemaatiline ootus (2) ja ooteväärtus (3) ning temperatuuri väärtus (4) ja norm (5) tunnitaseemel.

### 2.1.3 Ilmastiku lisafaktorite mõju

Allpool on toodud ilma lisafaktorite (päikese radiatsioon, tuule kiirus ja õhu niiskus) mõju koormusele Eesti elektrivõrgu Kesk-Lääne regioonis. Näidatud on ka 25% kvantiilid, mis iseloomustavad andmete hajuvust. Radiatsiooni mõju on suurim veebruari–märtsi kuus ning ulatub 8% keskmisest koormusest. Ka radiatsiooni mõjule võib täheldada hilistumist, mis ulatub 4 tunnini. Tuule kiiruse mõju on suurim aastavahetusel (detsember–veebruar) ning õhu niiskuse mõju kevadel (märts–mai). nende suuruste mõju hilistumine jääb ühe tunni piiridesse.



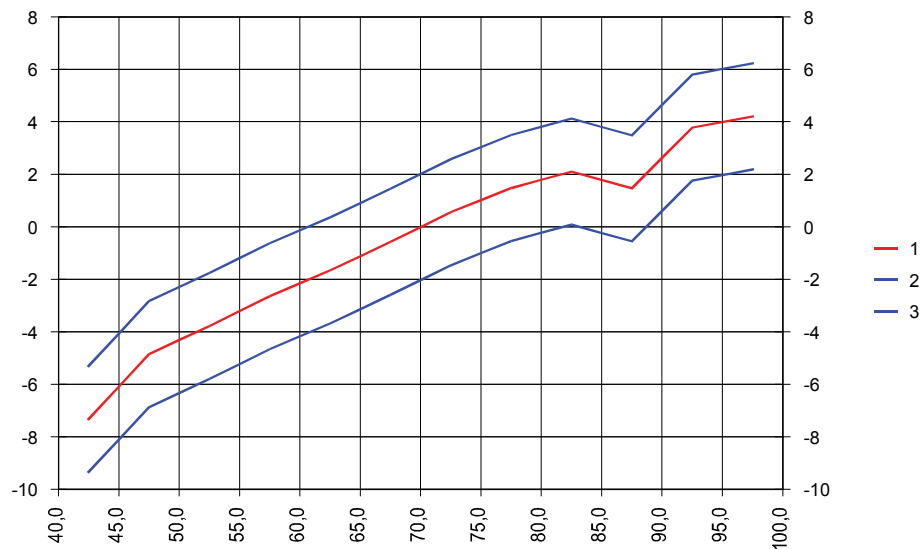
Joonis 2.6. Radiatsiooni  $W/m^2$  mõju MW 25% kvantiilidega.



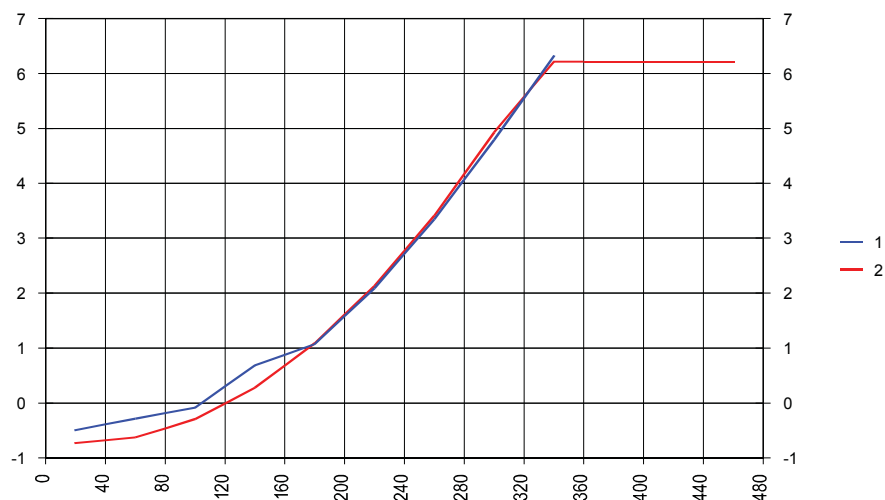
Joonis 2.7. Tuule kiiruse m/sek mõju MW 25% kvantiilidega.

## Efektiivne temperatuur

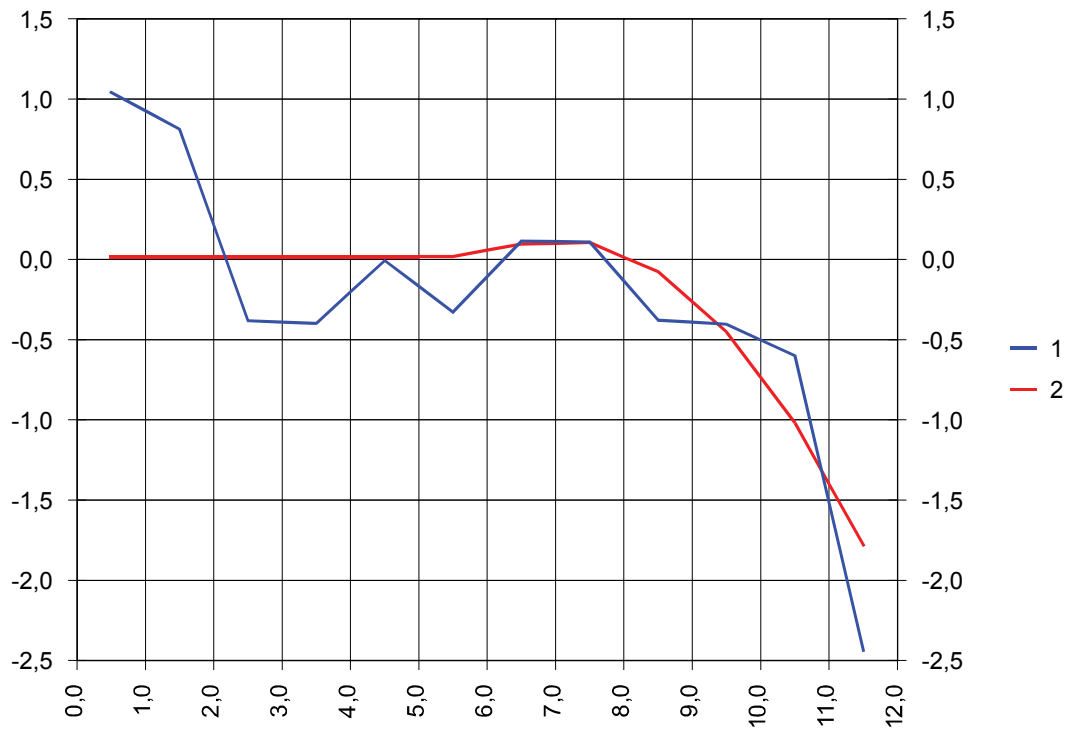
Kõige hõlpsam viis lisafaktorite arvestamiseks koormuse matemaatilises mudelis on nende mõju transformeerimine efektiivseteks temperatuurihälveteks. Need hälbed lisatakse õhu temperatuurihälbele ja korrutatakse koormuse temperatuuritundlikkusega. Tulemuseks on ilma mõju koormusele arvesse võttes kõiki vaadeldavaid faktoreid. Muidugi vaadeldakse sellist transformatsiooni koormuse, mitte inimese hubasuse seisukohalt, nagu see meteoroloogias on tuntud (*effective temperature, temperature-humidity index, human comfort index, wind-chill index* jm). Kui vastavad sõltuvused aproksimeerida lihtsate polünoomidega, muudab see lisafaktorite arvestamise eriti hõlpsaks. Joonistel 2.8...2.11 on näiteid mainitud sõltuvustest. Lisaks veel paar näidet päikese radiatsiooni mõju kohta.



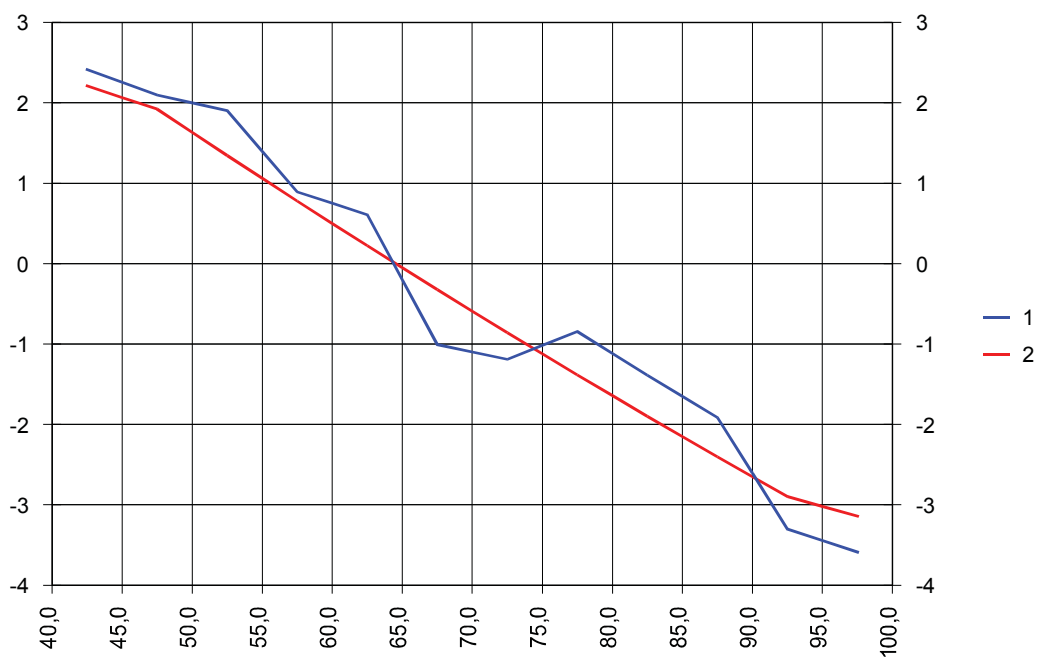
Joonis 2.8. Õhu niiskuse mõju MW 25% kvantiilidega.



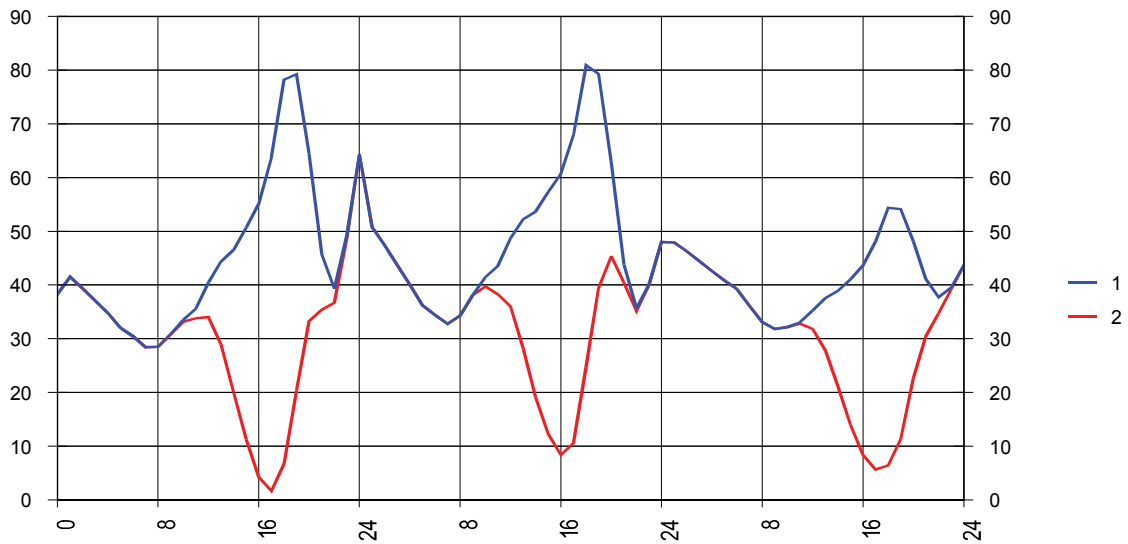
Joonis 2.9. Radiatsiooni transformeeritud mõju °C (1), aproksimeerituna (2).



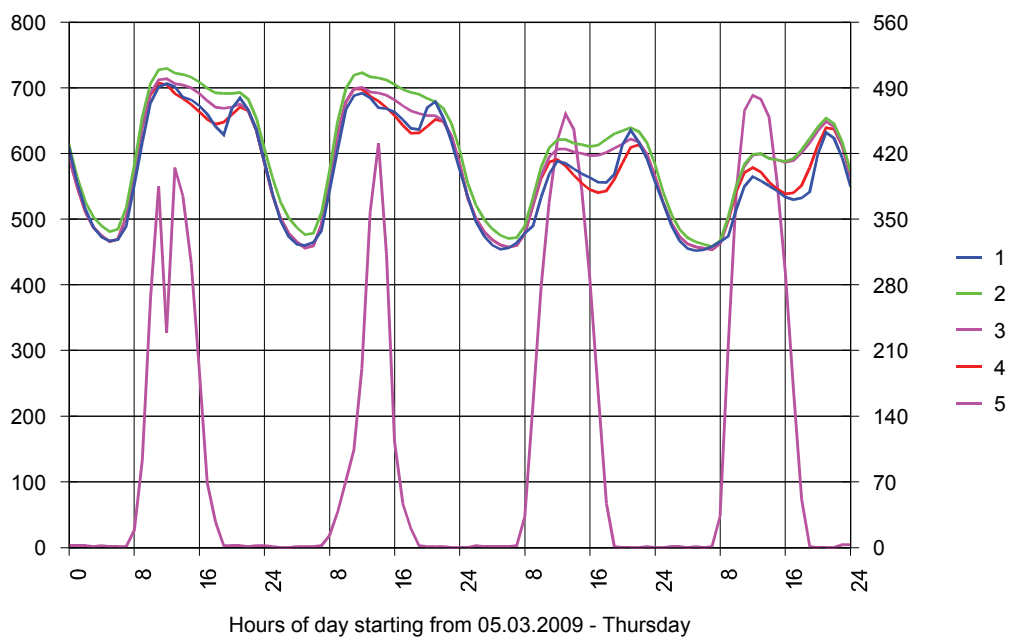
Joonis 2.10. Tuule kiiruse transformeeritud mõju °C (1), aproksimeerituna (2).



Joonis 2.11. Õhu niiskuse transformeeritud mõju °C (1), aproksimeerituna (2).



Joonis 2.12. Temperatuuri mõju koormusele päikese radiatsiooni arvestamata (1) ja seda arvestades (2).

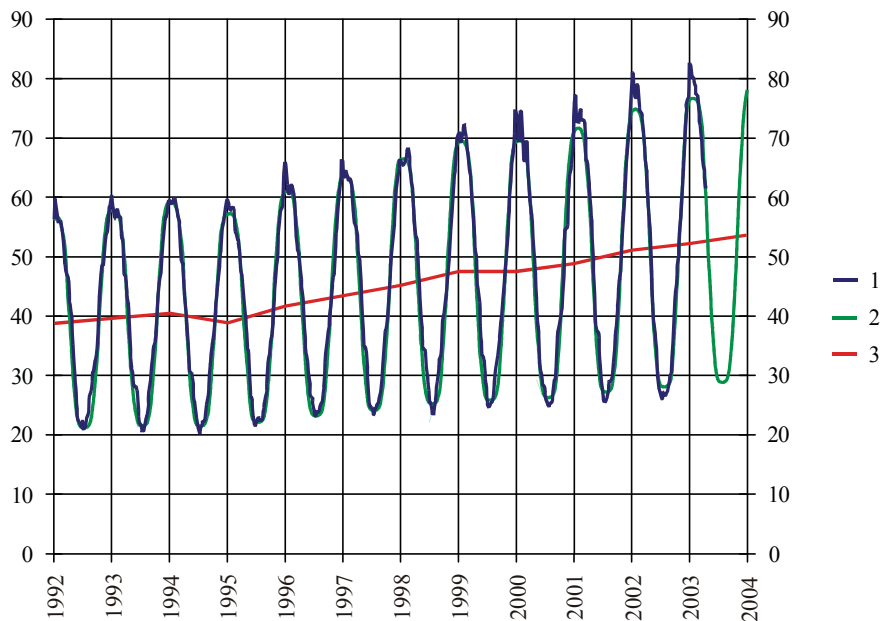


Joonis 2.13. Tegelik koormus (1), matemaatiline ootus (2), ooteväärtus radiatsiooni mõju arvestamata (3), ooteväärtus radiatsiooni mõju arvestades (4), radiatsiooni väärtus (5) (parempoolne telg).

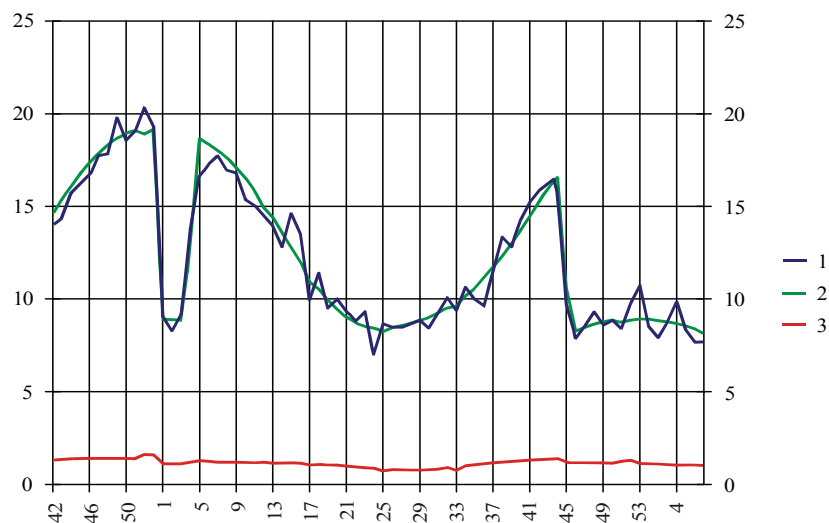
### 2.1.4 Matemaatilise mudeli realiseerimine

Koormuse matemaatilise mudeli põhiseoseid võib ära kasutada esmasel kujul, kuid enamasti on nende rakendamise viisi vaja selgitada sõltuvalt koormuse iseloomust ja modelleerimise täpsusest. Igal juhul tuleb mudeli rakendamisel lahendada rida praktilisi küsimusi.

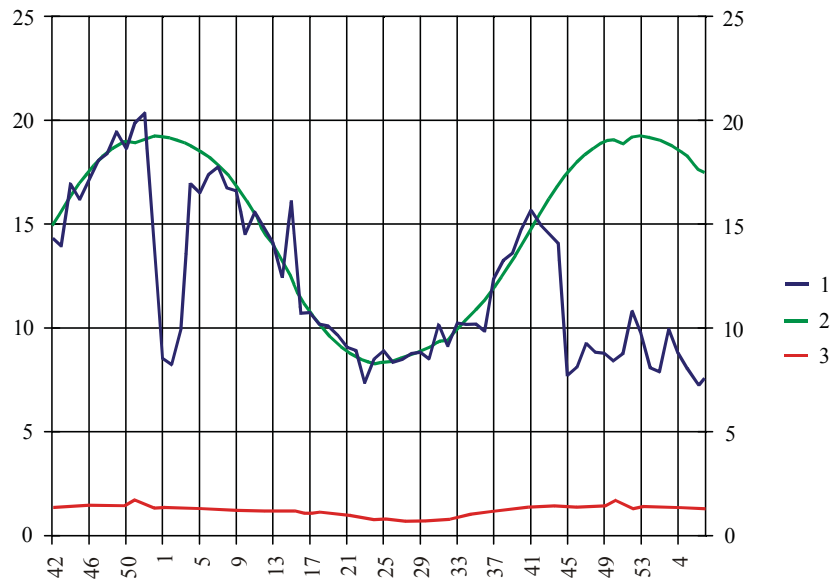
Koormuse taseme määrab matemaatilises mudelis trend, mis pika ajavahemiku korral võib kujutada murdlineaarsena üksikute ajaperioodide kaupa. Joonisel 2.14 on regiooni summaarse koormuse temperatuuri järgi normaliseeritud väärtused, matemaatiline ootus ja trend 12 aasta kohta.



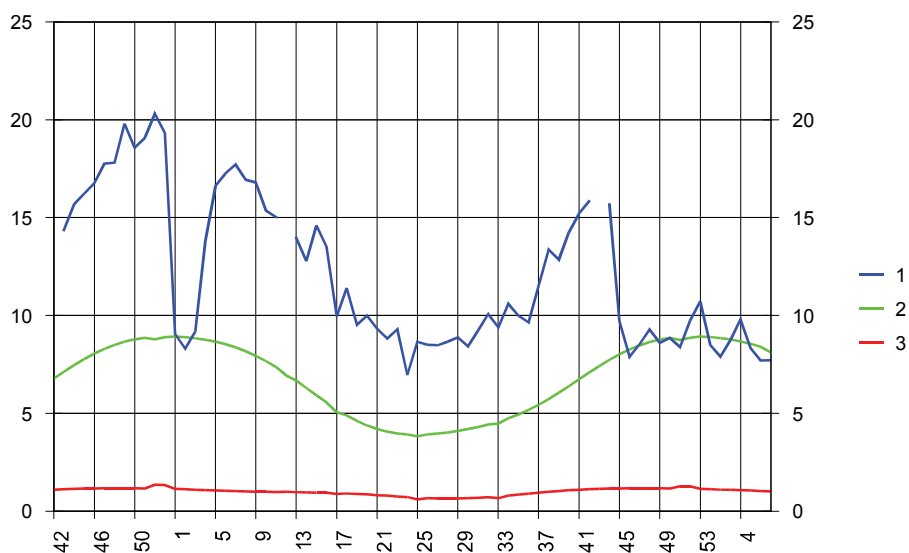
Joonis 2.14. Koormuse normaliseeritud andmed (1), matemaatiline ootus (2) ja trend (3).



Joonis 2.15. Elektrivõrgu sõlmekoormus (1), matemaatiline ootus (2) ja ruuthälve (3) nädalatasemel.



Joonis 2.16. Elektrivõrgu sõlmekoormus (1) ning matemaatilise ootuse (2) ja ruuthälbe (3).  
Esimene juhtum.



Joonis 2.17. Elektrivõrgu sõlmekoormus (1) ning matemaatilise ootuse (2) ja ruuthälbe (3).  
Teine juhtum.

Elektrivõrgu sõlmekoormuste muutumine võib eespool vaadeldud seaduspärasuste kõrval olla tingitud ka ümberlülitustest madalama taseme võrgus, suurte elektritarbijate (tehaste) käikulaskmisest või nende töö lõppemisest, reaktiivvõimsuse kompenseerimisseadmete sisse- või väljalülitamisest jms. Kirjeldatud hüppelisi muutusi võib vaadelda koormusjuhtumitena, millele vastavad matemaatilise mudeli erinevad parameetrid. Joonisel 2.16 on esitatud põhivõrgu sõlmekoormuse graafik, kus muutused on tingitud ümberlülituste tõttu jaotusvõrgus. Võib täheldada kahte koormusjuhtumit, millele mudelis vastab erineva

tasemega matemaatiline ootus ja ruuthälve (joonised 2.16 ja 2.17). Neid mudeli variante võib rakendada ka tulevase koormuse prognoosimisel või imiteerimisel vastavalt sellele, milline koormusjuhtum arvatakse kehtivaks. Elektrivõrgu talitluse arvutamisel on koormusjuhtumid otstarbekas ühendada koormusstsenaariumiteks, milles iga koormus on esindatud teatud juhtumiga. Ühest küljest on üksikute juhtumite etteandmine kõigile koormustele võrgu talitluse arvutamise käigus tülikas, teisalt ei ole kõigil võimalikel koormusjuhtumite kombinatsioonidel mõtet. Näiteks mingi alajaama seadmete remondi ajaks tehtavad ümberlülitused vähendavad koormust ühes ja tõstavad samas mõnes teises või ka enamas alajaamas.

Nii nagu trendi murdlineaarne esitamine ei nõua mudeli põhiseoste muutmist ka koormusjuhtumite arvestamine, vaid seda on võimalik teha programmiliste vahenditega. Veelgi enam, trendimuutuste ja koormusjuhtumite esitust võib ühendada sel teel, et vaadeldakse mudeli parameetrite erinevaid komplekte, millest igaüks kehtib teatud ajavahemikus. Muidugi muudetakse parameetreid vaid vajalikul määral. Kui koormusjuhtumeid vaadelda pole vaja, siis on trendi murdlineaarse esitamise korral iga aasta kohta erinevad trenditegurid, muud mudeli parameetrid jäävad aga muutumatuks.

Erandpäevad (pühad, pühade-eelsed ja -järgsed päevad jms) võivad moodustada aasta päevade hulgast 10% ja enamgi. Matemaatilises mudelis osutab erandpäevadele päevatüüp  $l$ , mille väärtus on 8 ja enam (esimesed seitse päevatüüpi vastavad tavalistele nädalapäevadele esmaspäevast pühapäevani). Niisiis, kui erandpäevale vastava päevatüübi number on teada, leitakse mudeli parameetrite hulgast vajalikud kujutegurid ja arvutused jätkuvad tavalises korras.

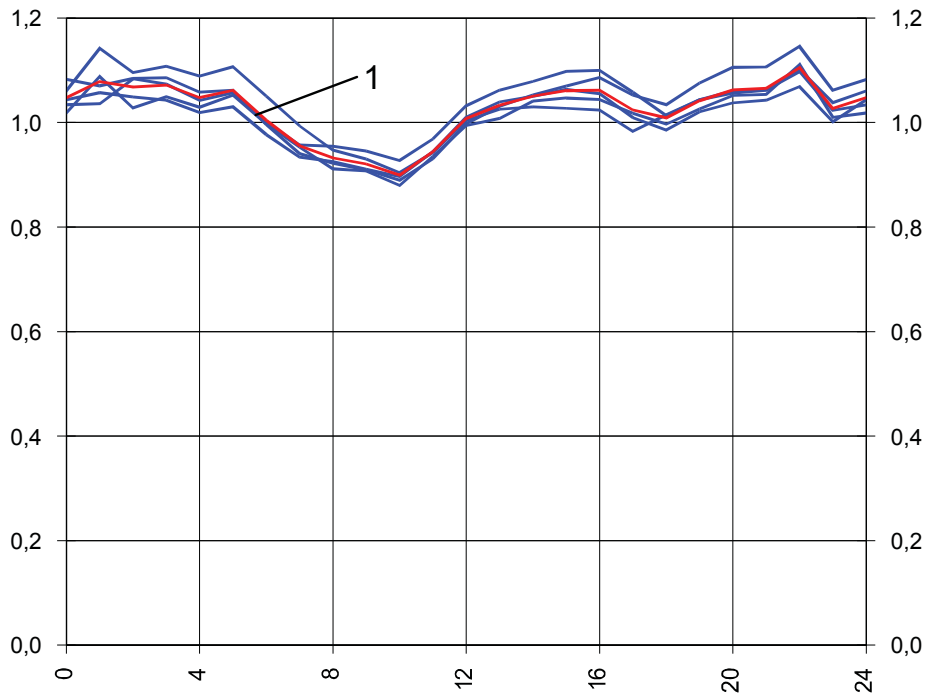
Erandpäevakohaste tegurite estimateerimisel seatakse erandpäevadele vastavusse  $n$  baaspäevad (*reference day*), milleks on erandpäevade iseloomuga kõige enam sarnanevad tavalised nädalapäevad (pühad – pühapäev ( $l = 7$ ), pühade-eelne tööpäev – reede ( $l = 5$ ) jne). Kuna päevatüübi  $l$  võib matemaatilises mudelis vabalt iga kuupäeva kohta ette anda, siis vastab sel teel leitud baaspäevakohane matemaatiline ootuse ja temperatuurisõltuvus enamasti küllaltki hästi erandpäeva koormusele. Lihtsamal juhul vaadeldaksegi erandpäevi kui sarnaseid nädalapäevi. Päevatüüpide arv mudelis on sel juhul 7.

Täpsemal modelleerimisel vaadeldakse koormuse matemaatilise ootuse suhet erand- ja baaspäevadel

$$E(t, h, l) = \lambda_l(h)E(t, h, l_B) \quad (2.3)$$



kus  $\lambda_l(h)$  on erandpäeva  $l$  matemaatilise ootuse suhte baaspäeva  $l_B$  ( $l_B = 1 \dots 7$ ) matemaatilisse ootusesse. Joonisel 2.18 on näitena uusaastapäeva temperatuuri järgi normaliseeritud koormuse  $P'(t) = P(t) - \Gamma(t)$  suhte koormuse esimeseks jaanuariks arvatud baaspäeva (pühapäev) matemaatilisse ootusesse viiel aastal. Arvutustes võetakse aluseks keskmine kõver (joonisel kõver 1).



Joonis 2.18. Koormuse suhtekõverad uusaastapäeval.

### 2.1.5 Koormuse analüüs ja prognoos

Matemaatiline mudel kirjeldab koormust, kuid ei määra otseselt kindlaks vajalikke suursi, näiteks koormuse prognoosi. Nimetatud suursi, koormusnäitajaid, on aga võimalik mudeli alusel leida.

Koormusnäitajad võib jagada esmasteks ja tuletatuteks. Esmased näitajad saadakse matemaatilisest mudelist otse. Tuletatud näitajad leitakse esmaseid näitajaid kombineerides lihtsate aritmeetiliste seoste abil. Vajaduse korral võib esmaseid näitajaid täiendada matemaatilise mudeli mõningase laiendamise teel.

Esmasteks koormusnäitajateks näiteks on koormuse matemaatiline ootus  $E(t)$ , ruuthälve  $S(t)$ , temperatuuri mõju  $R(t)\gamma(t)$  jt. Koormuse ja temperatuuri tegelikke väärtusi  $P(t)$  ja  $T(t)$  võib samuti lugeda esmasteks koormusnäitajateks (tabel 2.1). Mõnikord on esmaste näitajate

leidmiseks vajalikud lisaparameetrid, mis koormuse matemaatilisse mudelisse ei kuulu. Temperatuuri imiteerimisel tuleb näiteks lisada imiteerimistingimused. Tabelis 2.1 näidatud identifikaatorit *CharID* kasutatakse programmis tuletatud näitajate leidmisel.

Tegelikke koormusandmeid  $A[P]$  kasutatakse analüüsimisel. Neid võib vaja minna ka mõne muu näitaja, näiteks koormuse deviatsiooni, leidmisel.

Tabel 2.1. Esmased koormusnäitajad.

CharID	Tähis tekstis	Tähis valemis	Nimi	Lisaparameetrid
PA	$A[P]$	$P(t)$	Tegelik koormus	
PRE	$AR[P]$	$P_{RE}(t)$	Ennistatud koormus	IPRE, CS
PE	$E[P]$	$E(t)$	Koormuse matemaatiline ootus	
PS	$S[P]$	$S(t)$	Koormuse ruuthälve	
PR	$R[P]$	$R(t)$	Koormuse temperatuuritundlikus	
PET	$TP[P]$	$A(t)$	Koormuse trend	
PD	$D[P]$	$\theta(t)$	Koormuse normeeritud hälve	
PC	$C[P]$	$S(t)\zeta(t)$	Koormuse deviatsioon	
PX	$X[P]$	$S(t)\xi(t)$	Koormuse jääkhälve	
PPX	$P[P]$	$S(t)\pi(t)$	Koormuse piikhälve	
PI	$I[T,P]$	$R(t)\gamma(t)$	Temperatuuri mõju koormusele	
PIZ	$I[Z[T],P]$		Imiteeritud temperatuuri mõju	ISim
PDL	$DP[P]$	$\Delta P(t)$	Kaovõimsus	C0, C1, CS
TA	$A[T]$	$T(t)$	Tegelik temperatuur	
TZ	$Z[T]$		Imiteeritud temperatuur	ISim
TE	$E[T]$		Temperatuuri matemaatiline ootus	
TS	$S[T]$		Temperatuuri ruuthälve	
TD	$D[T]$		Temperatuuri hälve	

Vajadus koormusandmete ennistamiseks tekib, kui osa koormuse tegelikest väärtustest puudub või need ei ole usaldatavad. Ennistatud andmed AR[P] leitakse tingimusega

$$P_{RE}(t) = \begin{cases} P(t) \\ E(t) + R(t)\gamma(t) + S(t)[\zeta(t) + \xi(t)] \end{cases} \quad (2.4)$$

Selle tingimuse kohaselt asendatakse puuduvad või ebasobivad koormusandmed lühiajalise prognoosiga, millele on lisatud koormuse jääkhälbe imiteeritud väärtus  $\xi(t)$ . Ennistatud koormusandmed on käsitletavad standardsete statistiliste meetoditega. Näiteks saab ennistatud andmeid summeerides leida ööpäeva või kuu energia tõepärase väärtuse ka siis, kui osa tunniandmetest puudub. Ennistatud koormuse leidmisel on lisaparameetriks tunnus  $IPRE$  ja usaldustegur  $CS$ .

Koormuse matemaatiline ootus  $E[P]$ , ruuthälve  $S[P]$ , temperatuuritundlikkus  $R[P]$  ja trend  $TP[P]$  saadakse matemaatilise mudelist otse. Normeeritud koormus  $D[P]$  leitakse valemiga

$$\theta(t) = \frac{P(t) - E(t) - R(t)\gamma(t)}{S(t)} \quad (2.5)$$

Ka koormuse deviatsioon  $C[P]$ , jääkhälve  $X[P]$ , piikhälve  $P[P]$  ja temperatuuri mõju koormusele  $I[T,P]$  tulenevad matemaatilise mudelist otse. Nende väärtused esitatakse nimiühikutes, so läbi korrutatuna vastavalt koormuse ruuthälbe või temperatuuritundlikkusega.

Temperatuuri mõju leidmiseks kasutatakse temperatuuri tegelikke või meteoroloogiliselt prognoositud andmeid. Kui temperatuuriandmeid imiteerida, saab leida imiteeritud temperatuuri mõju  $I[Z[T],P]$ . Temperatuuri on võimalik imiteerimine kahel viisil. Kui tunnuse  $ISIM$  väärtus on vahemikus -30...30, siis loetakse see temperatuuri hälbeks normi suhtes. Kui taas  $ISIM > 1900$ , siis võetakse aluseks mõne varasema, tunnusega  $ISIM$  näidatud aasta temperatuuri väärtused, mis muidugi peavad temperatuuriandmete failis eksisteerima. Lõpuks, kui tunnus  $ISIM = 100$ , siis arvutatakse temperatuurisõltuvus vaadeldava aasta andmetel.

Kaovõimsus  $DP[P]$  väljendab jaotusvõrgu kadude ligikaudset väärtust, mis leitakse empiirilise valemiga

$$\Delta P(t) = P_{\max} \left[ c_0 + c_1 \left( \frac{P(t)}{P_{\max}} \right)^2 \right] \quad (2.6)$$

Siin  $P(t)$  ja  $P_{\max}$  on jaotusvõrgu summakoormus ja selle maksimumväärtus ning  $c_0$  ja  $c_1$  on tegurid. Tavaliselt  $c_0 = 1...2\%$  ja  $c_1 = 2...6\%$ . Kui tegemist on tegeliku koormusega, siis

maksimaalkoormus leitakse vaadeldava ajavahemiku andmetest. Prognoosi korral rakendatakse valemit

$$P_{\max}^{CS} = \max[E(t) + c_S S(t)] \quad (2.7)$$

kus  $E(t)$  ja  $S(t)$  on koormuse matemaatiline ootus ja ruuthälve ning  $c_S = 2,5 \dots 5$  on usaldustegur.

Tegelikke temperatuuriandmeid  $A[T]$  kasutatakse temperatuuri mõju arvutamisel. Tinglikult loetakse tegelikeks andmeteks ka temperatuuri meteoroloogilist prognoosi. Imiteeritud temperatuur  $Z[T]$  leitakse selle mõju arvutamisel eelpool kirjeldatud viisil.

Temperatuuri matemaatiline ootus  $E[T]$  on sama, mis normaaltemperatuur vaadeldavas paikkonnas (ilmajaamas). Analoogiliselt koormusega võib vaadelda ka temperatuuri ruuthälvet  $S[T]$  ja kõrvalekallet normaaltemperatuurist  $D[T]$ .

Kaovõimsus  $DP[P]$  esindab koormusnäitajaid, mis on küll koormuse matemaatilise mudeli alusel leitavad, kuid tavaliselt vähetuntud. Sarnaseid esmaseid näitajaid võib vajaduse korral lisada. Selleks tuleb arvutiprogrammi täiendada asjakohaste segmentidega. Need segmendid ei muuda matemaatilise mudeli struktuuri ja põhitoiminguid.

Tuletatud näitajad saadakse esmaseid näitajaid kombineerides. Võimalikud seosed koormuse prognoosimisel on näiteks järgmised:

$E[P]$  – pikaajaline prognoos normaaltemperatuuril

$E[P] + I[T,P]$  – koormuse pikaajaline ooteväärtus

$E[P] + I[Z[T],P]$  – pikaajaline prognoos imiteeritud temperatuuril

$E[P] + I[T,P] + C[P]$  – lühiaajaline prognoos.

Siin koormuse ooteväärtus kuulub ennekõike analüüsimise juurde, kus välisõhu temperatuur on teada. Ooteväärtuse võrdlemisel tegeliku koormusega võib hinnata matemaatilise mudeli sobivust. Samas näitab see ka pikaajalise prognoosi usaldatavust, kus temperatuuri imiteeritakse. Koormuse analüüsimise eesmärgil võib lisaks leida ka järgmised näitajad:

$A[P] - I[T,P]$  – normaliseeritud koormus

$A[P] - I[T,P] + I[Z[T],P]$  – imiteeritud koormus

Normaliseeritud koormus, kus tegelikest andmetest on eemaldatud temperatuuri mõju, vastab temperatuuri normile. Imiteeritud koormus vastab temperatuuri imiteerimistingimustele.

Ülaltoodust tasub tähele panna, et koormuse prognoos vahetult matemaatilise mudeli juurde ei kuulu. Tõepoolest, matemaatiline mudel kirjeldab koormuse muutumise seaduspärasusi, mis õigupoolest on kehtinud minevikus. Tuleviku kohta tuleb prognoosimisel ette anda lisatingimusi, mis võivad koormuse kujunemist muuta. Vaid triviaalsetel juhtumitel (nt lühiajalisel prognoosimisel) saadakse prognoos esmaste koormusnäitajate alusel otseselt. Varjatult on siiski ka siin lisatingimused – prognoosi ennetusaeg ja temperatuuri prognoos. Pikemaajalisel prognoosimisel, ennetusajaga nädal ja enam, seatakse lisatingimused otseselt. Ennekõike võib ette anda (imiteerida) temperatuuri, pikema ajavahemiku kohta ja ka koormuse juurdekasvu (trendi). Võimalikud on muudegi tingimuste varieerimine. Sellises käsitluses saab eristada koormuse prognoosimist ja imiteerimist vaid tinglikult. Näiteks nii, et koormuse kõige tõenäosemat väärtust tulevikus nimetada prognoosiks, muid võimalikke variante imiteerimiseks.

Kui prognoosi ennetusaeg on suurusjärgus aasta või enam, on soovitatav koormuse trendi täpsustada. Trendi hindamisel on aluseks asjatundjate nägemus vaadeldava koormuse muutumisest majanduslikku kasvu ja tehnilisi tingimusi arvestades. Siin tuleb tähele panna, et matemaatilises mudelis väljendab trend koormuse nõ puhast kasvu, kus on elimineeritud nii koormuse juhuslikkus ja temperatuurisõltuvus kui ka töö- ja puhkepäevade suhte muutumine erinevate aastate lõikes. Nimetatud suhe võib muutuda näiteks selle tõttu, et kindla kuupäevaga riiklikud pühad võivad erinevatel aastatel sattuda kas tööpäevadele või nädalalõppudel. Kuna trend kuulub matemaatilise ootuse juurde, mille estimateerimisel jäetakse erandpäevadele lisaks kõrvale ja ka muud erandlikud koormused, mis võivad olla põhjustatud avariidest, ulatuslikest streikidest jms, siis ei kajastu ka need nähtused trendi statistiliselt leitud väärtustes. Kuna sellist "puhast" koormuse juurdekasvu saab määrata vaid matemaatilise mudeli alusel, võivad tulemused olla asjatundjatelegi üllatuseks. Trendi määramine tuleviku kohta nõuab asjatundjatelt seega mõningat kohandumist koormuse matemaatilise mudeli kasutamisega.

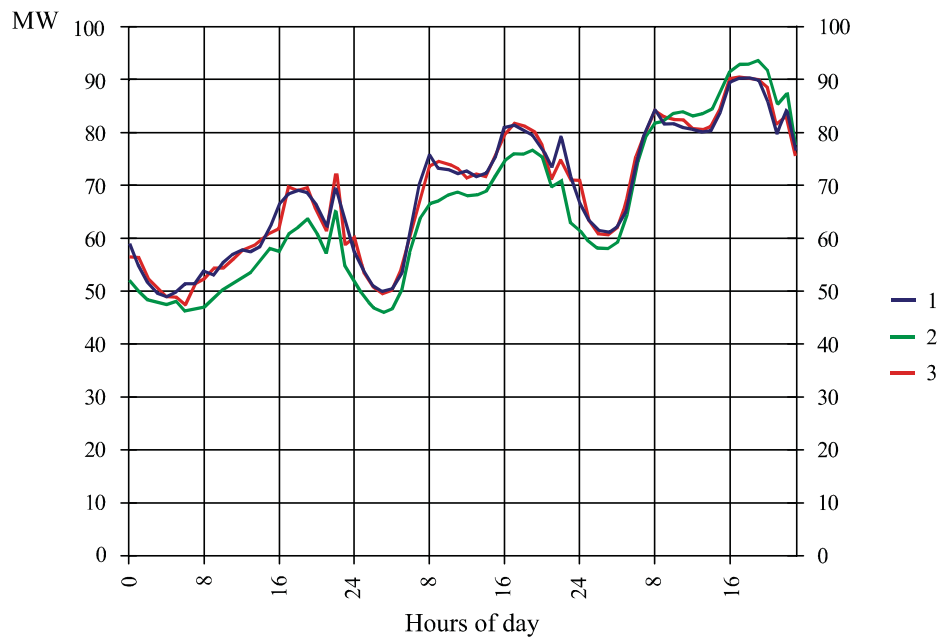
Trendi täpne määramine võib olla vajalik suuremate, kümnetesse ja sadadesse megavattidesse ulatava koormuse korral, millele pööratakse erilist tähelepanu. Väiksemate, näiteks jaotusvõrgu sõlmekoormuste osas on olulisem tähele panna koormusjuhtumeid, mis on tingitud ümberlülitustest madalama taseme elektrivõrgus, ettevõtete töö ebaregulaarsusest jms. Võimalikud koormusjuhtumid fikseeritakse matemaatilise mudeli estimateerimisel. Koormusjuhtumiteks loetakse vaid selliseid olukordi, mida asjatundjad oskavad määratleda ning mis võivad tulevikus korduda. Avariid ja muud juhusikud olukorrad siia ei kuulu.

Matemaatilises mudelis estimeeritakse erinevate koormusjuhtumite kohta osa matemaatilise mudeli teguritest. Kui nüüd on ette näha näiteks ümberlülitused elektrivõrgus, siis vastaval ajahetkest alates mudeli parameetreid muudetakse. Sellised muutused on praktiliselt teostatavad operatiivselt jälgitava elektrivõrgu osas, kus ümberlülitusi planeeritakse ja nende toimumise aeg on ette teada. Operatiivselt mittejälgitavate koormuste osas koormusjuhtumi muutumise aeg pole teada, kuid ka siin võib juhtumite arvestamine osutada mõttekaks. Näitena võib tuua ebaregulaarselt töötava ettevõtte, mis võib töötada ka nädalavahetusel ja mitte töötada nädala sees. Kui nüüd nädalavahetuseks plaanitakse kohaliku elektrivõrgu remonti, siis tuleb arvestada, et selline ettevõtte, mille võimsus võib olla märgatav, võib olla töös. Kokku võttes võib tõdeda, et koormusjuhtumitena võetakse arvesse vaid tehnilisest seisukohast määratletud korduvaid olukordi ja nendega arvestatakse niivõrd, kui see on elektrivõrguvõrgu töö plaanimise ja juhtimise seisukohalt võimalik ja vajalik.

Koormuse seirel tuleb tähele panna erandpäevi ja -perioode. Riigikohane (võimalikult ka regioonikohane) erandpäevade kalender moodustatakse seiresüsteemi installeerimisel aastateks ette. Kalender võib siiski ka muutuda näiteks riiklike pühade osas. Võimalikud on ühekordsed muutused, näiteks mingi puhkepäeva kuulutamine tööpäevaks või vastupidi. Tuletame meelde, et erandpäevade arvestamise aluseks on baaspäevad – tavalised nädalapäevad, mille koormuse iseloom kõige enam sarnaneb erandpäevade koormusega. Seetõttu kirjeldab matemaatiline mudel koormust arvestatava täpsusega ka siis, kui vaadeldav erandpäev on uudne ning mudeli sellekohane komponent puudub. Erandpäevade kalender toimib ühte viisi nii suurematele kui väiksematele koormustele. Seevastu erandperioodid, mis kuuluvad koormuse trendi juurde, on koormusekohased ja neid on mõttekas jälgida ja täpsustada vaid suuremate koormuste korral.

Matemaatiline ootus, vastab normaaltemperatuurile. Välisõhu tegeliku temperatuuri hälve normaaltemperatuuri suhtes põhjustab koormuse juurdekasvu. Kuna prognoosimisel temperatuuri tegelikud väärtused puuduvad, asendatakse need meteoroloogilise prognoosiga või imiteeritakse. Meteoroloogiline prognoos on praktiliselt usaldatav vaid mõneks päevaks ette. Pikema ennetusaja korral tuleb temperatuuri imiteerida. Eespool on välja pakutud kaks imiteerimisviisi, mis põhinevad temperatuuri hälbe etteandmisele normaaltemperatuuri suhtes või mõne varasema aasta andmete kasutamisele. Temperatuuri imiteerimisviise võib lisada. Nii võib koormuse lühiajalisel prognoosimisel varieerida temperatuuri prognoosi hälvet, selgitamaks välja koormuse võimalikud piirväärtused.

Koormuse lühiajalise prognoosi saamiseks lisatakse matemaatilisele ootusele temperatuuri mõju ja deviatsiooni  $\zeta(t)$  väärtus. Deviatsiooni arvutamisel on aluseks koormuse temperatuuri suhtes normaliseeritud andmed viimase 10 ööpäeva jooksul. Selleks on vajalikud koormuse ja temperatuuri tegelikud andmeid. Prognoosiperioodil, kus koormuse tegelikud andmed puuduvad, kahaneb deviatsioon ennetusaja kasvades, muutudes praktiliselt nulliks 7...10 ööpäeva pärast. Prognoosi usaldusvahemiku leidmiseks võib lisaks temperatuuri prognoosi varieerimisele hinnata koormuse võimalikku hälvet deviatsiooni suhtes. Koormuse stohhastikamudeli kohaselt koosneb koormuse hälve normaaljaotusega jääkhälbest ja piiknormaaljotusega piikhälbest. Jääkhälbe ruuthälve on vahemikus 0,5...1 koormuse ruuthälbega  $S(t)$  võrreldes. Piikhälve tuleb esile väiksemate, alla 10 MW koormuste juures, ulatudes koormuse ruuthälbe kümnekordsete väärtusteni ja enamgi. Tõsi, koormuse sellised suured hälbed tulevad ette harva ja puuduvad suurematel koormustel hoopiski.



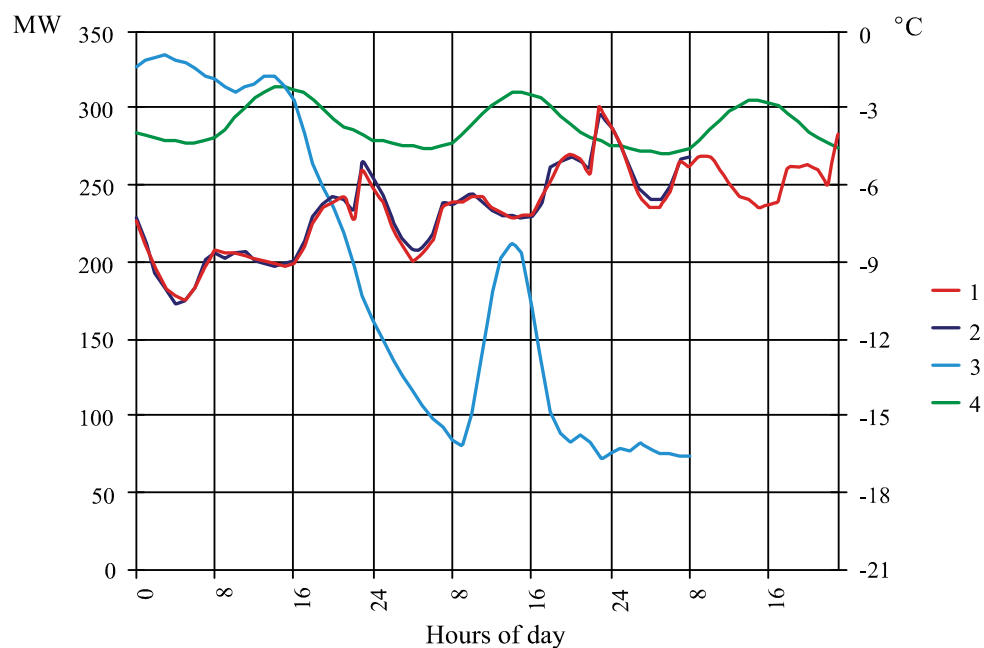
Joonis 2.18. Tegelik koormus (1), ooteväärtus (2) ja lühiajaline prognoos (3) tunnitaseemel.

Jooniste 2.19 on näide koormuse pika- ja lühiajalise prognoosi kohta. Pikaajalist prognoosi esindab siin koormuse ooteväärtus, mis on leitud temperatuuri tegelikel andmetel, Tegelikul pikaajalisel prognoosimisel temperatuuri imiteeritakse. Ooteväärtus näitab, millised võivad olla modelleerimisvead. Lühiajaline prognoos on saadud koormuse deviatsiooni lisamisel. Joonisel 2.20 on lisaks lühiajalisele prognoosile näidatud ka tegelik ja normaaltemperatuur, mis on skaleeritud parempoolsele teljele. Joonisel 2.21 on koormuse matemaatiline ootus (kõver 1) ning imiteeritud väärtused. Kõver 2 on saadud varasema aasta

temperatuuriandmetel, kus tegemist on olnud külma talvega. Kõver 3 on vastab temperatuuri hälbele  $-10^{\circ}\text{C}$  normaaltemperatuuri suhtes.

Koormuse prognoosimine, nii nagu matemaatilise mudeli praktiline rakendamine üldiselt, on meie käsitluses interaktiivne tegevus. Asjatundjad hindavad tulevikus võimalikult ette tulevaid olukordi ja juhivad prognoosi kujunemist vastavalt vajadusele nende käsutuses oleva teabe põhjal. Asjatundjad peavad tunda koormuse seiresüsteemi võimalusi, kuid mitte tingimata matemaatilise mudeli ehitust. Asjatundjatele sobival tasemel peab olema rakendusprogrammi kasutajaliides, mille kaudu prognoosimistoimingud juhitakse. Vajalikud matemaatilise mudeli parameetrite muutused ning arvutustoimingud teeb seiresüsteem.

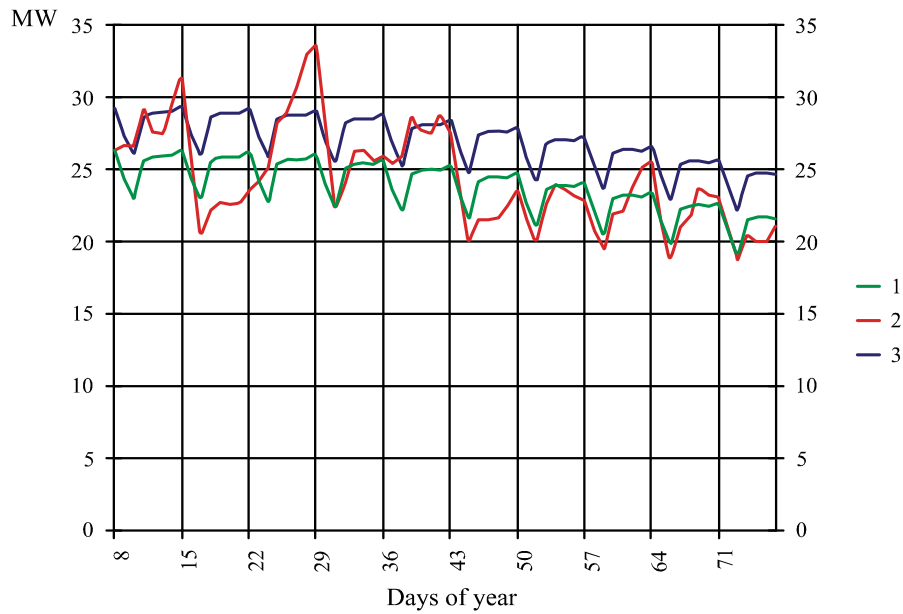
Koormuse analüüsimine, nii nagu prognoosimine ja imiteeriminegi, ei ole määratletav matemaatilise mudeli vaid seiresüsteemi lõppkasutaja seisukohast. Matemaatilise mudeli alusel võib leida erinevaid koormusnäitajaid. Mis eesmärgil näitajaid kasutatakse, jääb lõppkasutaja otsustada. Analüüsimise formaalseks tunnuseks on enamasti see, et koormuse tegelikud andmed on teada.



*Joonis 2.19. Koormuse lühiajaline prognoos (1), tegelik koormus (2), tegelik temperatuur (3) ja normaaltemperatuur (4) tunnitaseemel.*

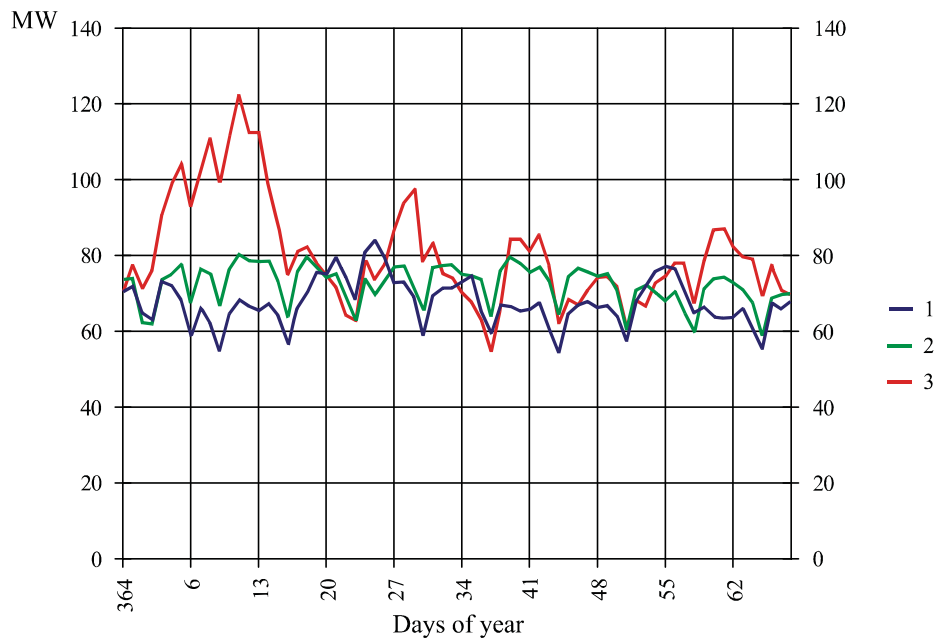
Koormuse analüüsimise praktiliseks eesmärgiks on ühelt poolt koormuse muutumise seaduspärasuste jälgimine ning teisalt koormusandmete ja matemaatilise mudeli vastavuse kontroll. Viimane on vajalik mudeli täpsustamise vajaduste väljaselgitamiseks, aga ka koormuse suurte mõõtevigu (eksituste) avastamiseks.





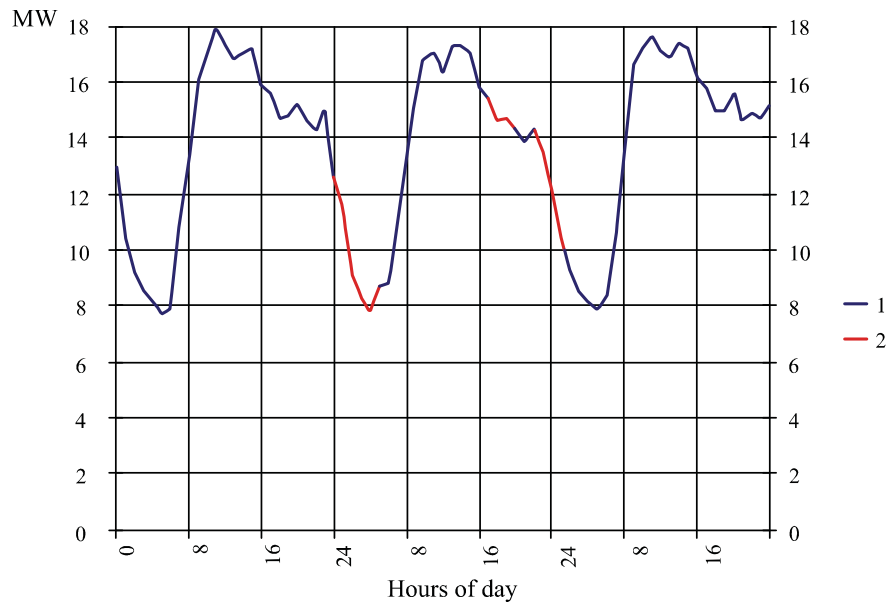
Joonis 2.20. Koormuse matemaatiline ootus (1) ning imiteeritud väärtused (2) ja (3) päevatasemel.

Koormuse muutumise põhjuste jälgimisel pakub ennekõike huvi temperatuuri mõju. Temperatuuri järgi normaliseeritud andmed saadakse, kui tegelikest andmetest temperatuuri mõju lahutada. Kui tulemusele lisada imiteeritud temperatuuri mõju, selgub, milline koormus oleks võinud olla näiteks külmal talvel (joonis 2.22).



Joonis 2.22. Koormuse tegelik (1), normaliseeritud (2) ja imiteeritud (3) väärtus päevatasemel.

Mitmesuguste kokkuvõtete tegemisel koormuse kohta võib vajalikuks osutuda andmete ennistamine. Kui osa mõõteandmetest puuduvad, osutub võimalikuks keskmistatud koormuste (energiate) või ka summakoormuste arvutamine. Joonisel 2.23 on näide koormusest mille kohta mõningad tunniandmed puuduvad (kõver 1). Vajalikud ööpäeva keskmised väärtused võib aga arvutada Ennistatud väärtuste (kõver 2) alusel.



Joonis 2.23. Mõõdetud (1) ja ennistatud (2) koormus.

Matemaatilise mudeli sobivust koormusega saab välja selgitada ka koormusandmeid lühiajalise ooteväärtusega võrreldes, milleks on lühiajaline prognoos ennetusajaga  $\tau = 1$ . Nende näitajate hea kooskõla nii nagu joonisel 2.19 osutab matemaatilise mudeli täpsusele aga ka koormuse mõõteandmete usaldatavusele. Ulatusliku mõõtesüsteemi korral, näiteks dispetšisüsteemi puhul, võib mõni mõõteandur või muu seade osutada riknenuks ilma, et see kajastuks süsteemi töös. Kui näiteks mõnda koormust toidetakse kahe trafo kaudu ja ühe trafo mõõteandur üles ütleb, kajastub see vaadeldava koormuse vähenemisenähtena kaks korda. Kuna selline koormus on dispetšisüsteemi seisukohalt vastuvõetav, võib anduri rike jääda pikaks ajaks tähele panemata. Koormuse seiresüsteem seevastu võimaldab selliseid hälbeid lihtsalt avastada. Koormuse suurte hälvete põhjused jäävad muidugi asjatundjate otsustada. Tegemist võib olla näiteks koormusjuhtumiga, mis nõuab asjakohast käsitlemist.

## **2.2 Koormuse staatiliste ja dünaamiliste koormuskarakteristikute modelleerimine**

### **2.2.1 Modelleerimise põhimõtted**

Koormuskarakteristikute modelleerimine on üks elektrisüsteemi modelleerimise tähtsamaid aluseid. Enamik tänapäeval kasutatavatest mudelitest on loodud juba mitukümmend aastat tagasi ja neid ei ole ka adekvaatselt uuendatud. Sageli ei ole neis mudelites arvestatud koormuse koosseisu ja karakteristikute muutumisega.

Kuigi adekvaatse koormuse mudeli tähtsust üldiselt rõhutatakse, siis paljudel juhtudel kasutatakse tüüpilisi staatilisi konstantse impedantsi või voolu või võimsusega koormuse mudeleid. Dünaamiliste mudelite osas piirduakse vaid asünkroonmootorite standardsete dünaamiliste mudelitega.

Koormuse karakteristikutel on oluline mõju elektrisüsteemi nii püsitalitlusele kui ka dünaamilistele talitlustele.

Koormuse adekvaatne modelleerimine on oluliselt keerukas ülesanne, kuna arvestada tuleb suure hulga mõjuvate teguritega puuduliku informatsiooni tingimustes. Veelgi enam, arvestada tuleb ka koormuse koosseisu ja iseloomu ööpäevaste, nädalaste ja sesoonsete muutustega. Koormuse pingesõltuvuse karakteristikuid mõjutavad ka jaotustrafod, reaktiivvõimsuse kompensatorid ja ka jaotusvõrgu fiidrid.

Adekvaatsed koormuse staatilised ja dünaamilised karakteristikud on väga olulised elektrisüsteemi talitluse ja dünaamika õigel mõistmisel. Erinevad koormusmudelid võivad anda süsteemi stabiilsuse ja siirdeprotsesside analüüsimisel väga erinevaid tulemusi.

### **2.2.2 Ülevaade koormuskarakteristikute mudelite arendusest**

Koormusmudelite ebaadekvaatsus on üheks peamiseks süsteemi plaanimise ja talitluse juhtimise ebatäpsuse allikaks [2,3]. Adekvaatne koormuskarakteristikute modelleerimine on keerukas ülesanne peamiselt järgmiste põhjuste tõttu:

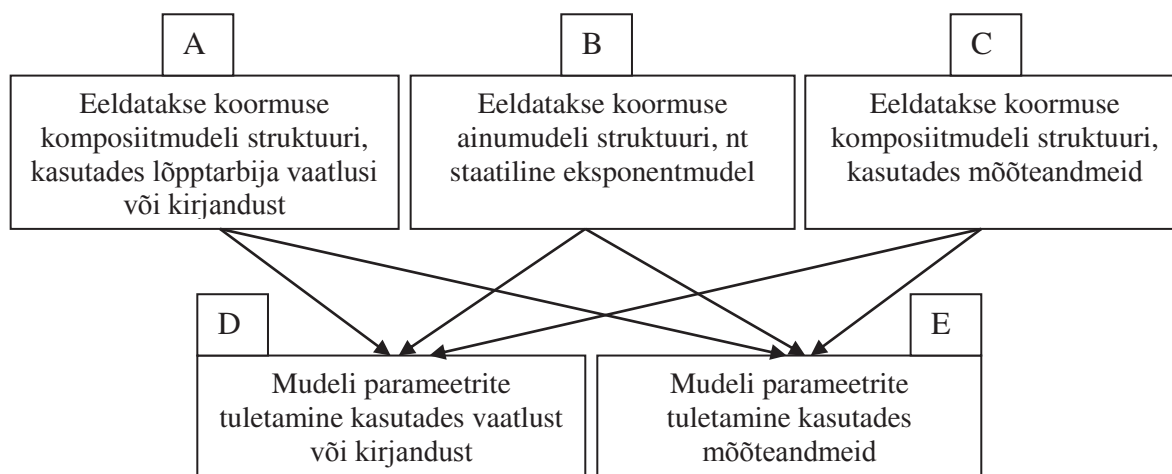
- elektrivõrku ühendatud koormuskoosseisude mitmekesisus ja ajaline muutlikkus ja juhuslik iseloom [4];
- mõnede koormuste mittelineaarne ja katkendlik iseloom (konditsioneeride seiskumine, mootorite väljalülitumine dünaamilise stabiilsuse piirväärtuste ületamisel, jõuelektroonika väljalülitumine liiga madala või kõrge pinge korral);

- täpse teabe puudumine agregeeritud koormuse struktuuri ja komponentide kohta;
- raskused koormusmodelite aktsepteerimisel.

Kõrgepingevõrkude sõlmedesse agregeeritud koormus sisaldab tavaliselt erinevate koormusklasside koormuste segu. Seetõttu on selliste sõlmede puhul siiani kasutatud peamiselt lihtsaid eksponentmudeleid. Teisalt, fiidri tasemel sisaldab koormuse reaktsioon häiringutele enam teavet koormuse kompositsiooni kohta. Seetõttu saab madalamatel pingetel kasutada komplekssemaid ja detailsemaid koormusmudeleid. Seega tuleb erinevatel olukordadel kasutada erinevaid koormusmudeleid.

Koormusmodelite arendamisel on vaja teada erinevate koormuste koormuskoosseise ja nende muutumist ööpäeva, nädala, kuu ja aasta lõikes. selleks kasutatakse kas lõpptarbimise vaatlusi ja mõõteandmeid koormussõlmedes [5]. Selle alusel valitakse sobiv koormusmodel. See model arvestab ka piirkonda toitva trafo ja fiidritega. Mudeli parameetrite määramiseks kasutatakse lisaks lõpptarbija vaatlustele ka olemasolevat kirjandust ja mõõteandmeid (erinevatel häiringujuhtumitel kogutud aegriidide salvestised). Joonisel 2.24 on kujutatud koormusmodeli kujundamise üldist protsessi, mis koosneb kahest osast: koormusmodeli struktuuri valikust ja mudeli parameetrite tuletamisest.

Komposiitmodelitesse valitakse ja ühendatakse koormuse staatilised ja dünaamilised protsentuaalselt: nt ZIP mudel 80 %+ asünkroonmootori mudel 20 %.



Joonis 2.24. Koormuskarakteristikute modelite koostamise üldskeem [3].

Vastavalt joonisele 2.24 on võimalikud 6 erinevat modelleerimisprotseduuri.

CE protseduuri kasutatakse rohkem kui 2 komponenti sisaldavate liitmudelite korral. Näiteks, ZIP mudel ja komposiitmudel või asünkroonmootori mudel ja ZIP mudel. Pärast seda, kui koormusmudeli struktuur ja ülesehitus on määratud kindlaks mingil piiratud ajalõigul mõõdetud andmete alusel, tuleb mudeli parameetrid tuletada pikaajalisel mõõtmisel saadud andmete aegriidade põhjal.

CD lähenemisviisi kasutatakse samuti mitmest komponendist koosneva mudeli korral. Pärast seda, kui koormusmudeli struktuur ja ülesehitus on määratud kindlaks mingil piiratud ajalõigul mõõdetud andmete alusel, tuleb mudeli parameetrid tuletada kirjandusest või lõpptarbija vaatlusest saadud teabe või teadmiste põhjal.

AE protseduur, nagu ka kaks eelnevat, kohaldub mitmest komponendist koosnevale koormuse mudelile. Kui mudeli struktuur ja ülesehitus on kindlaks tehtud lõpptarbijate vaatluse või kirjanduse alusel, siis mudeli parameetrid tuletatakse pikaajaliste mõõtmistulemuste järgi.

AD on teine lähenemisviis, mida rakendatakse mitmest komponendist koosneva mudeli korral. Kui mudeli struktuur ja ülesehitus on kindlaks tehtud lõpptarbijate vaatluse või kirjanduse alusel, siis tuletatakse mudeli parameetrid samuti lõpptarbijate vaatluse või kirjanduse alusel.

BE lähenemist kasutatakse ainult üht mudeli komponenti, näiteks ainult eksponentkomponenti või ainult konstantse võimsuse/voolu/impedantsi mudelit sisaldavate mudelite korral. Mudeli struktuuri/ülesehitust ei pea sel juhul eraldi määrama, kuna on tegu vaid ühe komponendiga. Mudeli parameetrid tuletatakse kestevmõõtmiste andmete põhjal.

BD on alternatiivne lähenemine ühe komponendiga mudeli loomiseks. Ka siin on mudeli struktuur eelnevalt teada, kuid mudeli parameetrid tuletatakse lõpptarbijate vaatluse või kirjanduse alusel.

Praktiliselt kasutatakse ligikaudu 50 % juhtudest mõõteandmeid ja 40% ulatuses koormuskoosseisude uuringuid või kirjandust. Lisaks kasutatakse üle poolte juhtumite korral ainult ühekomponendilisi mudeleid. [6] Seetõttu on enim kasutust leidnud lähenemised BE ja BD.

Mõõteandmete kasutamise raskus suurtes elektrisüsteemides seisneb eelkõige pinge ja sageduse suhtelises stabiilsuses e nende väheses muutumises. Ka suuri häiringuid esineb suurtes süsteemides haruharva. Vajalike mõõteandmete saamiseks tahtlikult tekitatud häiringuid saab kasutada ainult väga piiratud ajas ja ruumis.

Seetõttu kasutatakse laialdaselt väga lihtsustatud lähenemisviise, nagu konstantne ZIP mudel, kus võimsuse sõltuvust pingest väljendatakse lihtsa eksponentmudeliga. Selliseid mudeleid saab kasutada süsteemi staatilisel talitusel, kuid need ei ole sobivad dünaamiliste karakteristikute modelleerimiseks, eriti seal, kus on tegu asünkroonmootorite suure osakaaluga.

Koormuskarakteristikute adekvaatne modelleerimine on raskendatud järgmiste probleemide tõttu:

- koormuse tegelikule struktuurile ning staatilistele ja dünaamilistele karakteristikutele vastava mudeli identifitseerimine;
- staatiliste ja dünaamiliste koormuskomponentide protsentuaalse osakaalu leidmine ja vastavate mudelite parameetrite määramine.

Nende probleemide ületamiseks on kasutatud kahte lähenemisviisi [7]:

komponentidel põhinev lähenemine (alt-üles või teadmistepõhine lähenemine);

mõõtmistel põhinev lähenemine (ülalt-alla või koormuse käitumisel põhinev lähenemine)

Üldiselt kasutatakse komponentidepõhist lähenemist mitmekomponendiliste mudelite korral (ZIP mudel rööbiti komposiitmudeliga). Mõõtmistel põhinevat lähenemist kasutatakse nii ühe- kui ka mitmekomponendiliste mudelite korral.

### **2.2.3 Komponentidel põhinev modelleerimine**

Komponentidel põhinevat lähenemist võib nimetada tinglikult ka teadmistele põhinevaks lähenemiseks. Modelleerimise metodoloogia on „alt-ülespoole“ ülesehitusega, mille kohaselt agregeeritud koormuse karakteristikute mudelid tuletatakse:

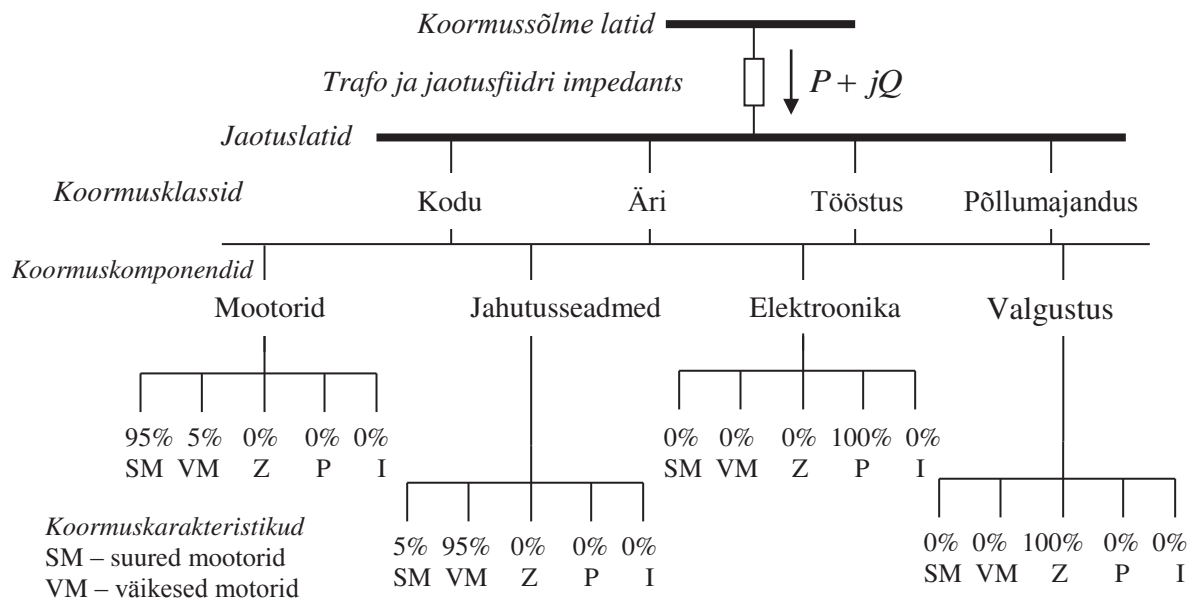
- teades alajaama ühendatud koormusklasse;
- teades koormusklassides esinevate koormuskomponentide struktuuri ja koosseisu;
- teades koormuskomponentide tüüpilisi karakteristikuid.

Selliselt agregeeritud mudel seob põhilisi koormuskomponente ja väljendub asünkroonmootorite mudeliga ühendatud polünoommudeli kujul või komposiitmudeli kujul.

Komponentidel põhineva modelleerimise üldskeemi näide on joonisel 2.25.

Koormusklassidesse jagamine on praktiliselt keeruline ülesanne, kuid seda tuleb teha nii detailselt kui olemasolev teave võimaldab.

Koormusklassideks jagamisel on abiks ka alajaamadest saadud koormuse mõõtmisandmed.



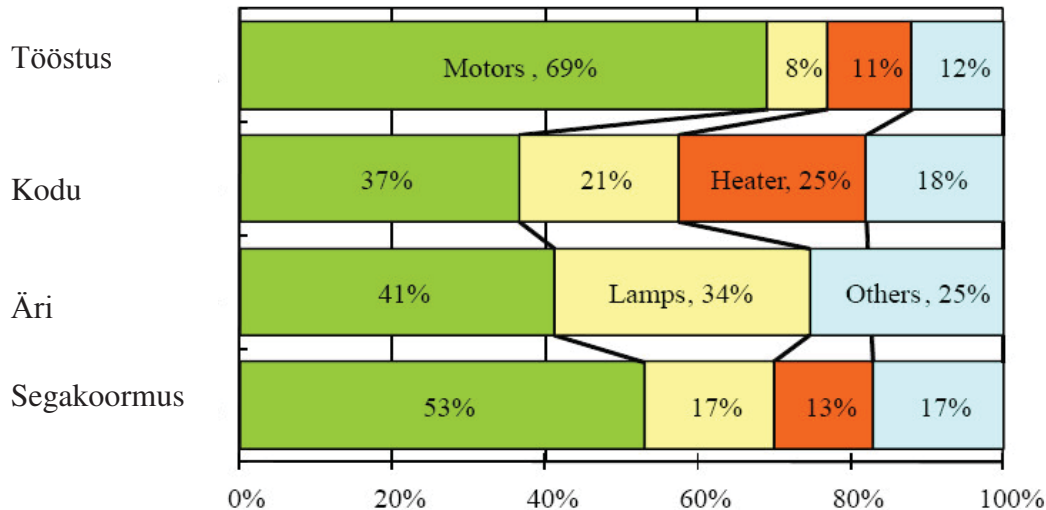
Joonis 2.25. Näide komponentidepõhisest lähenemisest koormuskarakteristikute modelleerimisele.

Järgmine samm pärast koormusklassidesse jagamist on koormusklassides sisalduvate koormuskomponentide ja nende osakaalu määramine. Igal koormusklass sisaldab mingeid sellele omaseid tüüpilisi koormuskomponente. Probleemiks on tavaliselt nende komponentide osakaalu leidmine, kuna osakaalud muutuvad nii ajas kui ruumis. Selle probleemi ületamiseks on välja pakutud järgmine lihtsustav lähenemine [8]:

- igale sõlmele koormusklasside kombinatsiooni leidmine;
- igale koormusklassile mingi keskmise tüüpilise komponentide koosseisu leidmine;
- igale komponendile koormuskarakteristikute mudelite leidmine.

Koormuskarakteristikud haaravad nii staatilisi (konstantse impedantsi, konstantse voolu ja konstantse võimsuse) kui ka dünaamilisi (üht või mitut tüüpi asünkroonmootoreid) koormuskarakteristikute mudeleid. Nii näiteks modelleeritakse koormuse takistuskomponente (hõõglambid ja elekterküte) konstantse impedantsiga, aga inverterpõhiseid komponente konstantse võimsusega koormustena. Siinjuures on eeldatud, et võimalik pinge alanemine koormussõlmedes on suhteliselt väike.

Näiteks Jaapanis tüüpilised koormuskomponendid ja nende osakaalud erinevates koormusklassides on joonisel 2.26.



Joonis 2.26. Tüüpiliste koormusklasside tüüpiliste koormuskomponentide jagunemine Jaapanis [3].

Korrektseks agregeeritud koormuse karakteristikute modelleerimiseks on vaja arvesse võtta ka keskpinge võrgu toitetratfosid ja reaktiivvõimsusallikaid. Seega igasugused muutused nii koormuskoosseisudes kui ka võrgu konfiguratsioonis võivad põhjustada muutusi agregeeritud koormuse karakteristikutes.

#### 2.2.4 Komponentidel põhinevate meetodite eelised ja puudused

Eelised:

- tekib seos koormuskarakteristikute mudelite ja seadmete füüsiliste karakteristikute vahel;
- kasutatakse ära üldiselt teadaolevaid andmeid konkreetse sõlme koormusklasside kohta;
- meetodikat on lihtne rakendada komposiitmodelite koostamiseks;
- puudub vajadus kohapeal mõõtmiste järele, kui on vaatluste põhjal või eelnevalt teada agregeeritud koormuse koormuskomponentide struktuur ja koosseis;
- meetod on rakendatav erinevate võrkude ja tingimuste korral;
- meetod tagab paindlikkuse tarbimise juhtimisel, st juhitavate koormuskomponentide identifitseerimist;
- meetod kergendab võrgu tundlikkuse määramist koormuskoosseisu muutustele modelleerimise abil.



Puudused:

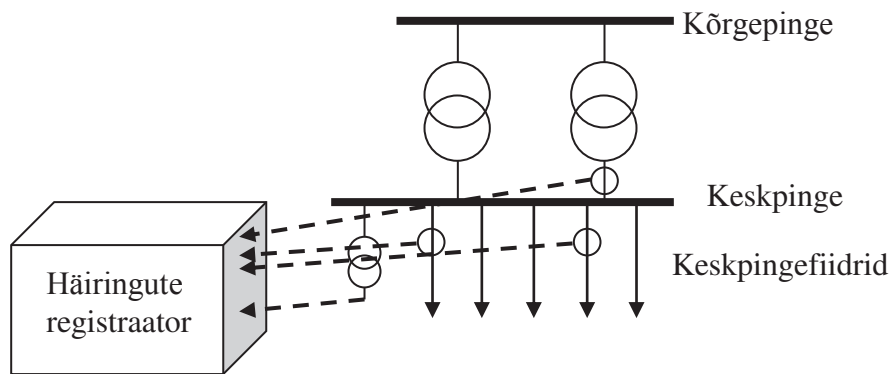
- saadud mudelid eeldavad tavaliselt, et modelleeritud koormuste karakteristikud, struktuur ja koosseis ajas ei muutu sõltuvalt ööpäevast, aastaajast, ilmastikutingimustest või lõpptarbijate käitumisest. Seega vastavate muutuste arvestamiseks tuleb kasutada erinevaid mudeleid;
- kui on loodud mudel ühele koormussõlmele, siis seda ei saa ilma täiendava analüüsita üle kanda teise sõlme jaoks;
- koormusklasside koosseis ja andmed koormuskomponentide kohta ei ole tavaliselt saadaval. Seega on vajaliku hulga ja kvaliteediga andmete saamiseks vaja laialdast koormuste uurimist;
- kui koormussõlme ühendatakse uus või tundmatu koormus, mis ei kuulunud ühtegi varem määratletud komponendi alla, põhjustab see vea mudeli parameetrite määramisel;
- isegi kui koormuskomponentide osakaal on sama, võivad mudeli parameetrid erineda ja muutuda laias vahemikus sõltuvalt ajast, tootjast, lõpptarbijast jms. Näiteks võib asünkroonmootorite ajakonstant olla eri mootoritel erinev;
- ülekandevõrgu operaatoritele ei pruugi tarbijavõrkudes olevate seadmete tüübid ja asukohad olla kättesaadavad. See raskendab kõrgepingevõrgu tasandil komponentidepõhise meetodi rakendamist koormuste staatiliste ja dünaamiliste karakteristikute modelleerimisel.

### **2.2.5 Mõõtmistel põhinev modelleerimine**

Digitaalsed häiringusalvestid võeti kasutusele 80-ndatel aastatel. Tänapäeval leiavad digitaalsed häiringusalvestid laialdast kasutamist. Mõõtmistel põhinev lähenemine on nn „ülalt-alla“ lähenemine. Häiringusalvesti andmete alusel saab tuletada koormuskarakteristikuid. Koormuskarakteristikute ja nende parameetrite leidmiseks on esmalt vajalik kindlaks teha mudeli struktuur.

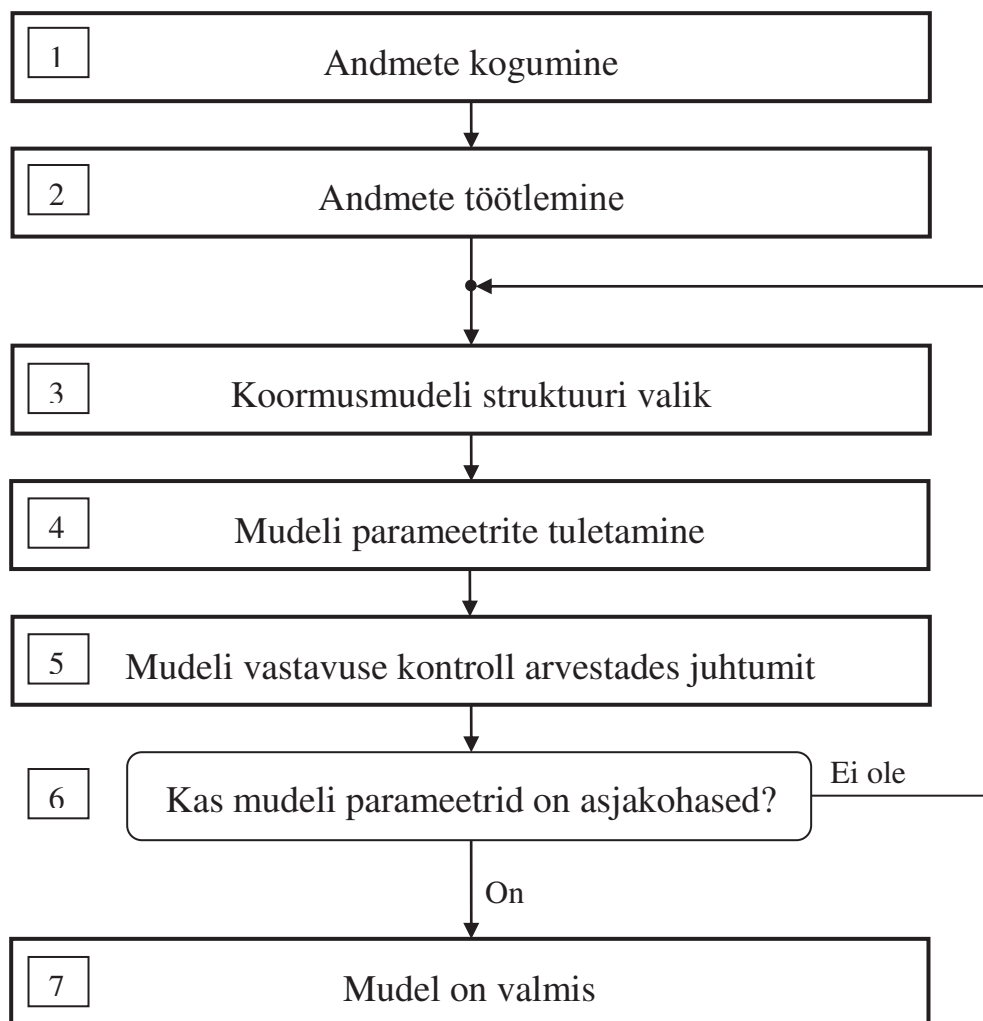
Koormuse reaktsioon häiringutele salvestatakse. Samas võib ka jälgida koormuse reaktsiooni pinge aeglastele muutustele normaaltalituse korral. Siinjuures võib kasutada erinevaid andmetöötlusseadmeid, nagu näiteks kvaliteedimõõtureid ja digitaalseid rikkosalvesteid [10,11,12].

Mõõtmistel põhinevat lähenemist illustreerib joonis 2.27.



Joonis 2.27. Häiringute mõõtmine [9].

Mõõtmistel põhinev modelleerimise loogikaskeem on joonisel 2.28.



Joonis 2.28. Mõõtmistel põhineva modelleerimise plokk skeem.

Mudeli parameetreid hinnatakse, sobitades mõõteandmeid eeldatavasse mudeli struktuuri. Selleks kasutatakse parameetrite identifitseerimise ja kõvera sobitamise tehnikat. Keerukamate mudelite ja suurema hulga fikseeritud häiringute korral tuleks kasutada kompleksse estimateerimise tehnikat.

Saadud mudel peab kirjeldama adekvaatselt koormuse reaktsioone häiringutele.

### **Plokkskeemi sammude toimingud**

- 1 Koguda häiringute andmeid: faasipingete, faasivoolude sageduse, aktiiv- ja reaktiivkoormuse muutumist ajas häiringute ajal. Tüüpiline andmete kogumise koht on keskpingetrafo sekundaarpool, millega on ühendatud radiaalsed fiidrid.
- 2 Pinge, voolu, aktiiv- ja reaktiivkoormuse põhikomponentide arvutamiseks kasutada signaalitöõtlustehnikat, nagu näiteks diskreetne Fourier teisendus. Eri seadmetele sobivad tüüpilised diskreerimissammud on tabelis 2.1.

*Tabel 2.2. Tüüpilised diskreerimissammud.*

<b>Diskreerimissamm (maks.)</b>	<b>Koormusmudel</b>	<b>Usaldatavus</b>
1 ms	Dünaamiline/ZIP+as.mootor	Kõrge
	Harmooniline koormusmudel (ainult madalamad harmoonikud)	Keskmine/madal
10 ms	Dünaamiline/as.mootor	Keskmine
	Staatiline/ZIP	Kõrge
100 ms	Dünaamiline/as.mootor	Madal
	Staatiline/ZIP sagedus- ja pingepüsivus	Kõrge
	Staatiline/ZIP dünaamiline stabiilsus	Madal
1 s	Staatiline/ZIP sageduspüsivus	Keskmine
	Staatiline/ZIP pingepüsivus	Keskmine/kõrge
2s	Staatiline/ZIP sageduspüsivus	Madal
	Staatiline/ZIP pingepüsivus	Keskmine

- 3 Valida sobiv koormusmudel ja vastav mudeli struktuur. Struktuuri võib muuta, kui vastava mudeli parameetreid ei saa määrata.

- 4 Koormusmudeli parameetrite määramisel kasutada sihifunktsiooni minimeerimiseks/maksimeerimiseks mittelineaarset optimeerimist. Antud juhul tuleb minimeerida koormuse mõõdetud ja modelleeritud reaktsiooni erinevust. Optimeeritavat parameetrite algväärtused annab ette modelleerija. Oluline on valida põhjendatud algväärtused ja nende piirid. sellest sõltub oluliselt lõpptulemuse usaldatavus ja täpsus.
- 5 Mudeli valideerimine. Võrrelda mudeli abil leitud koormuse muutusi tegelikult mõõdetud aktiiv- ja reaktiivkoormuse muutustega häiringute korral. Kui tulemused ei rahulda eeldatavaid täpsuse nõudeid, tuleb protseduuri korrata alates teistsuguste algväärtuste valimisega kuni valitud koormusmudeli muutmisega.
- 6 Kui on leitud asjakohased mudeli parameetrid, võetakse need kasutusele süsteemi uuringutes. Kui mitte, siis tuleb leida mudelile teine struktuur ja korrata protseduuri alates plokist 3. Kui siiski ei õnnestu leida asjakohast mudelit, siis võib järeldada, et kasutatud algandmed ei ole sobivad. Tuleb kasutada uusi andmeid ja korrata kogu protseduuri algusest peale.

### **Mõõteandmetel põhineva meetodi eelised ja puudused**

Põhilised eelised:

- meetod on lihtsam, kui komponentidel põhinev meetod, kuna kasutatakse reaalsest võrgust vahetu mõõtmise teel salvestatud andmeid koormuse dünaamilisest sõltuvusest;
- kui mõõtmised on pikaajalised, siis meetod võimaldab leida ühendatud koormuse ajutisi muutusi;
- meetodit saab rakendada suvalise koormuse korral.

Põhilised puudused:

- modelleerimine on raske, kui puuduvad andmed suuremate häiringute kohta (näiteks selliste kohta, kus ootamatu pinge muutus ületaks 20...30 % normaalsest pingest) ja kui reaalne pingeline on suhteliselt stabiilne ja ei anna vajalikku teavet koormuse pingetundlikkuse kohta;
- otsene mudeli identifitseerimine on raskendatud, kui pingehäiringute korral mootor(id) seiskuvad või lülitub koormus ajutiselt välja;

- koormusmudelite komposiit- või kompleksstruktuuri korral viib optimeerimine paljude parameetrikomplektide kasutamiseni või ei võimalda üldse leida optimaalseid parameetreid. Sel juhul võib tulemus mitte vastata tegelikule koormuse reaktsioonile;
- lisaks on vaja, et koormuse loomulikud muutused ei mõjutaks pinget ja/või sagedust. Koormuse mõju pingele ja sagedusele tuleks eelnevalt elimineerida. Võimalus oleks arvestada protsesse ainult alates vahetult enne häiringu algust;
- võimetus määrata kindlaks koormuse koosseisu muutusi ajas (juhul kui ei mõõdetata pidevalt).

### **2.2.6 Meetodite põhieelised ja -puudused**

#### **Komponentidel põhineva meetodi põhieelis**

Koormusmudel põhineb tarbijate uuringu tulemustel või baseerub kirjanduses toodud andmetel. Mudelite koostamine toetub koormuses sisalduvate komponentide teadaolevatele karakteristikutele.

#### **Komponentidel põhineva meetodi põhipuudus**

Raskused koormuste koosseisude täpsel määramisel ja koosseisude võimalikud muutused ajas.

#### **Mõõtmistel põhineva meetodi põhieelis**

Reaalses võrgus mõõdetud ja salvestatud andmete kasutamine. Puudub vajadus uurida koormuste koosseisu.

#### **Mõõtmistel põhineva meetodi põhipuudus**

Mudeli valideerimiseks ja parameetrite estimateerimiseks vajalike asjakohaste (suurte ja oluliste häiringute kohta käivate) mõõteandmete puudumine.

## **2.3 Koormuskarakteristikute mudelid**

### **2.3.1 Üldist**

Eristatakse staatilisi ja dünaamilisi koormuskarakteristikute mudeleid.

Tänapäeval kasutatakse väga mitmesuguseid staatilisi ja dünaamilisi mudeleid.

Staatilised mudelid on:

- eksponentmudelid;
- polünoommudelid;
- lineaarmudelid;
- komposiitmudelid;
- staatilised asünkroonmootori mudelid;
- jõuelektroonika mudelid.

Peamised dünaamilised mudelid on:

- eksponentmudelid;
- dünaamilised asünkroonmootori mudelid;
- asünkroonmootori ülekandefunktsiooni mudelid;
- komposiitmudelid.

Dünaamilised mudelid leitakse sõltumatult staatilistest mudelitest.

Staatilisi mudeleid saab tuletada dünaamilistest mudelitest. Vastupidine ei ole võimalik.

Staatilised mudelid annavad koormuse hetkelisi sõltuvusi pingest ja sageduse hetkväärtustest.

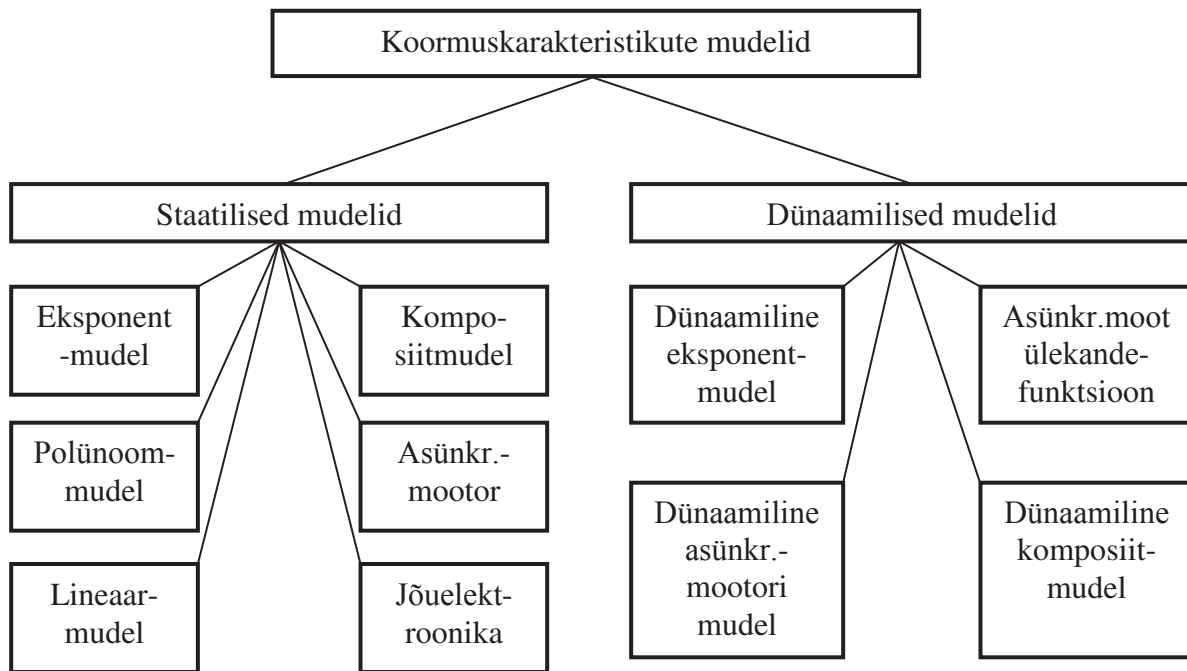
Dünaamilised mudelid peegeldavad ajast sõltuvaid ning süsteemi ja koormuse eelneva seisundi mõju järgnevale arvestavaid koormuse reaktsioone häiringutele.

Dünaamilised mudelid kirjeldavad koormuse sõltuvusi pingest ja sagedusest harilikult diferentsiaalvõrrandite kujul.

Süsteemi dünaamika uurimisel kasutatakse nii staatilisi kui ka dünaamilisi mudeleid.

Mudelite valikul on oluline arvestada, milline mudeli tüüp on konkreetsele koormusklassile sobiv.

Koormuskarakteristikute mudelid on joonisel 2.29.



Joonis 2.29. Koormuskarakteristikute mudelid.

### 2.3.2 Koormuskarakteristikute staatilised mudelid

Staatiliste koormuskarakteristikute üldkuju, mis peegeldab koormuse sõltuvust pingest ( $U$ ) ja sagedusest ( $f$ ) on järgmine:

$$P = f_P(U, f) \quad (2.8)$$

$$Q = f_Q(U, f) \quad (2.9)$$

Staatilisi mudeleid kasutatakse esmajoones resistiivsete koormuste korral, nagu valgustus, üldine kodutarbija jms, kus agregeeritud koormuses on suurte asünkronmootorite ja muude ajamite osakaal suhteliselt väike.

#### EkspONENTmudel

EkspONENTmudeli üldkuju on

$$P = P_n \left( \frac{U}{U_n} \right)^{k_{pu}} \left( \frac{f}{f_n} \right)^{k_{pf}} \quad (2.10)$$

$$Q = Q_n \left( \frac{U}{U_n} \right)^{k_{qu}} \left( \frac{f}{f_n} \right)^{k_{qf}} \quad (2.11)$$

Alaindeks  $n$  tähistab normaaltalitlusele vastavaid parameetreid.

Koormuse sõltuvuse suurust iseloomustavad eksponendid  $k_{pu}$ ,  $k_{qu}$ ,  $k_{pf}$  ja  $k_{qf}$ .

Eksponentide väärtused on tabelis 2.3

Tabel 2.3. Eksponentmudelite (2.10) ja (2.11) tüüpilised parameetrid [3].

Tarbijad/koormusklassid		$k_{pu}$	$k_{qu}$	$k_{pf}$	$k_{qf}$
Õhukonditsioneerid	3-faasiline	0,088	2,5	0,98	-1,3
	1-faasiline	0,202	2,3	0,9	-2,7
	Aknatüüpi	0,468	2,5	0,56	-2,8
Boilerid, ahjud, kuivatid		2	0	0	0
Nõudepesumasinad		1,8	3,6	0	-1,4
Pesumasinad		0,08	1,6	3,0	1,8
Pesukuivatid		2,0	3,2	0	-2,5
Külmikud		0,77	2,5	0,53	-1,5
Telerid		2	5,1	0	-4,5
Hõõglambid		1,55	0	0	0
Lahenduslambid		0,96	7,4	1	-2,8
Tööstuslikud mootorid		0,07	0,5	2,5	1,2
Ventilaatorid		0,08	1,6	2,9	1,7
Põllumajanduslikud pumbad		1,4	1,4	5	4
Kaarahjud		2,3	1,6	-1	-1
Tühijooksus trafod		3,4	11,5	0	-11,8
Kodu	Suvel	1,2	2,9	0,8	-2,2
	Talvel	1,5	3,2	1	-1,5
Äri	Suvel	0,99	3,5	1,2	-1,6
	Talvel	1,3	3,1	1,5	-1,1
Tööstus		0,18	6	2,6	1,6
Elektrijaamade omatarbeseadmed		0,1	1,6	2,9	1,8



Tähelepanu tuleb pöörata järgmistele juhtumitele:

- ebatüüpiliste sündmuste modelleerimisel, kui tavalised eeldused tugevast elektrivõrgust ja stabiilsest sagedusest ei pea paika väga suurte häiringute korral.
- väikeste süsteemide modelleerimisel, millel on väike inerts või aeglane sagedusereguleerimine.

Mõlemal juhul võib süsteemi sagedus muutuda mitme või enamgi protsendipunkti võrra.

Kui pinge eksponentide  $k_{pu}$  või  $k_{qu}$  väärtused on 0, 1 või 2, siis on tegu vastavalt kas konstantse võimsusega, konstantse vooluga või konstantse impedantsiga koormuskarakteristikuga.

Kuna sagedus erinevalt pingest on tavaliselt väga konstantne, siis vaadeldakse sageli vaid koormuse pingesõltuvust:

$$P = P_n \left( \frac{U}{U_n} \right)^{k_{pu}} \quad (2.12)$$

$$Q = Q_n \left( \frac{U}{U_n} \right)^{k_{qu}} \quad (2.13)$$

Parameetrite  $k_{pu}$  ja  $k_{qu}$  võimalikud väärtused mudelite (2.12) ja (2.13) jaoks on tabelis 2.4.

Tabelite 2.3 ja 2.4 võrdlemisel selgub, et osadel koormuskomponentidel on nendes tabelites erinevad mudeliparameetrid. Kuna nende tabelite allikad on erinevad, siis sellest järeldub, et koormuskarakteristikute mudelite parameetrid sõltuvad oluliselt modelleerimisel tehtud eeldustest ja lihtsustustest.

Sõltuvust sageduse väikestest hälvetest saab modelleerida ka konstantsel pingel Tayloriga, kuna sageduse muutused on oluliselt väiksemad kui pingemuutused. Seega alternatiivne üldmudeli kuju oleks [13]

$$P = P_n \left( \frac{U}{U_n} \right)^{k_{pu}} (1 + k_{pf} \Delta f) \quad (2.14)$$

$$Q = Q_n \left( \frac{U}{U_n} \right)^{k_{qu}} (1 + k_{qf} \Delta f) \quad (2.15)$$

Siin  $\Delta f$  on sageduse suhteline hälve

$$\Delta f = \frac{f - f_n}{f_n} \quad (2.16)$$

Mudelite (2.14) ja (2.15) võimalikud parameetrid on koondatud tabelisse 2.5.

Tabel 2.4. Eksponentmudelite (2.12)ja (2.13) parameetrite  $k_{pu}$  ja  $k_{qu}$  väärtused erinevate tarbijate ja koormusklasside korral [7].

Tarbijad/koormusklassid		$k_{pu}$	$k_{qu}$
Kuivati küttekehad		1,95	0
Kuivati mootorid		0,77	2,13
Pesumasinad		0,34	1,51
Soojuspumbad		0,33	5,74
Külmikud/külmutid		2,11	1,89
Akulaadijad		2,59	4,06
Kompaktluminofoorlambid		1,03	0,46
Kõrgrõhu naatriumlambid		1,9	-4,25
Kontorivarustus		0,24	0
Mikrolaineahjud		0,83	24,17
Tööstusküttekehad/soojapuhurid		1,98	1,42
Põrandaküteseadmed		2	0
Küttekehad		1,93	0
Pliidiplaadid		1,95	0
Luminofoorlambid		1,69	4,67
Elavhõbelambid		2,52	3,50
Asünkroonmootorid nimipingel	koormatud 80 %	0,5	4,5
	koormatud 55 %	0,7	5,3
	koormatud 30 %	0,9	5,7
	tühijooksul	4,3	7,8
Kodu	talvel	1,761	3,656
	suvel	1,572	4,101
	aastaringelt	1,629	3,968

Tabel 2.5. Mudelite (2.14) ja (2.15) võimalikud parameetrite  $k_{pu}$  ja  $k_{qu}$  ning  $k_{pf}$  ja  $k_{qf}$  väärtused [14,15,16].

Tarbijad/koormusklassid		$k_{pu}$	$k_{qu}$	$k_{pf}$	$k_{qf}$
Hõõglambid		1,55	0	0	0
Luminofoorlambid		1,96	7,38	1	-26,6
Õhukonditsioneerid		0,2	2,3	0,9	-2,667
Kuivatid		2,04	3,27	0	-2,63
Külmikud, külmutid		0,77	2,5	0,53	0
Elektripliidid		2	0	0	0
As. mootoriga pumbad-ventilaatorid		0,08	1,6	2,9	1,8
Küttekehad		2	0	0	0
TV, arvutid jms		2	5,2	0	-4,6
Segakoormus	Suvel	0,78	3,29	0,69	-8,889
	Talvel	1,21	3,88	0,77	-10,85
Tööstuskoormus		0,772	4,522	0,331	6,479

Arvestades reaktiivvõimsuse kompenseerimist [17], võtab reaktiivvõimsuse mudel kuju

$$Q = \left( Q_n - \frac{dQ}{dP} P_n \right) \left( \frac{U}{U_n} \right)^2 \left( 1 + \frac{\Delta f}{f_n} \right) + \frac{dQ}{dP} P_n \left( \frac{U}{U_n} \right)^{k_{qu}} (1 + k_{qf} \Delta f) \quad (2.17)$$

Valemi esimene pool arvestab reaktiivvõimsuse kompenseerimist, samal ajal kui teine pool arvestab kompenseerimata reaktiivvõimsust või induktiivset tarbijat

Kompensaatori reaktiivvõimsus avaldub valemiga

$$Q_c = \frac{dQ}{dP} P_n - Q_n \quad (2.18)$$

Tuleb tähele panna, et positiivne  $Q_c$  väärtus tähendab mahtvuslikku koormust, kuid positiivne  $Q$  väärtus vastab induktiivsele koormusele. meetodi kohaselt peab olema tegu konstantse kompenseerimisega.

### **Polünoommudel e ZIP-mudel**

Teine laialdaselt kasutatud leidev mudel on polünoommudel. Sageduse sõltuvust arvestamata on polünoommudeli üldkuju

$$P = P_0 \left( p_1 \left( \frac{U}{U_0} \right)^2 + p_2 \left( \frac{U}{U_0} \right) + p_3 \right) \text{ ja} \quad (2.19)$$

$$Q = Q_0 \left( q_1 \left( \frac{U}{U_0} \right)^2 + q_2 \left( \frac{U}{U_0} \right) + q_3 \right) \quad (2.20)$$

Esitatud polünoommudel on tuntud ka ZIP mudelina, kuna see ühendab kolme konstantset parameetrit – konstantse impedantsi ( $Z$ ), konstantse voolu ( $I$ ) ja konstantse koormuse ( $P$ ).

Polünoommudel, nagu ka eksponentmudel, annab hea kujutuse staatilistest karakteristikutest nimipinge läheduses.

Parameetrid  $p_1, p_2, p_3$  ja  $q_1, q_2, q_3$  määravad iga komponendi osakaalu.

Parameetrite  $p_1, p_2, p_3$  ja  $q_1, q_2, q_3$  väärtused erinevate tarbijate ja koormusklasside jaoks on tabelis 2.6.

Parameetrid  $p_1$  ja  $q_1$  määravad ära konstantse impedantsiga mudeli osakaalu,  $p_2$  ja  $q_2$  määravad ära konstantse vooluga mudeli osakaalu ja  $p_3$  ja  $q_3$  määravad ära konstantse võimsusega mudeli osakaalu. Koormuse osa igas osamudelis on suhtelise osakaaluga 0...1, seega on osakaalude summa kokku 1.

Arvestades sageduse mõjuga, võtab mudel kuju

$$P = P_0 \left( p_1 \left( \frac{U}{U_0} \right)^2 + p_2 \left( \frac{U}{U_0} \right) + p_3 \right) \cdot (1 + k_{pf} \Delta f), \quad \sum_{i=1}^3 p_i = 1 \quad (2.21)$$

$$Q = Q_0 \left( q_1 \left( \frac{U}{U_0} \right)^2 + q_2 \left( \frac{U}{U_0} \right) + q_3 \right) \cdot (1 + k_{qf} \Delta f), \quad \sum_{i=1}^3 q_i = 1 \quad (2.22)$$

Mudeli parameetrid tööstuskoormuse korral on [3]:

$$p_1 = 0,189; p_2 = 0,42; p_3 = 0,391; q_1 = 2; q_2 = -1; q_3 = 0; k_{pf} = 0,3398; k_{qf} = 3,355$$

Tabel 2.6. Parameetrite  $p_1, p_2, p_3$  ja  $q_1, q_2, q_3$  väärtused erinevate koormuskomponentide korral.

Tarbijad/koormusklassid		$p_1$	$p_2$	$p_3$	$q_1$	$q_2$	$q_3$
Kuivati küttekehad		0,96	0,05	-0,01	0	0	0
Kuivati mootorid		1,96	-2,23	1,33	2,51	-2,34	0,83
Pesumasinad		0,05	0,31	0,63	-0,56	2,2	-0,65
Soojuspumbad	Puhuriga	5,46	-14,21	9,74	-14,85	31,59	-15,74
	Kompressoriga	0,85	-1,4	1,56	22,92	-40,39	18,47
Külmikud/külmutid		1,19	-0,26	0,07	0,59	0,65	-0,24
Akulaadijad		3,51	-3,94	1,43	5,8	-7,26	2,46
Kompaktluminofoorlambid		0,16	0,79	0,05	0,18	-0,83	-0,35
Kõrgrõhu naatriumlambid		0,98	-0,03	0,06	29,84	-45,26	14,41
Kontorivarustus		0,34	-0,32	0,98	0	0	0
Mikrolaineahjud		-2,78	6,06	-2,28	0	0	0
Tööstusküttekehad/soojapuhurid		0,98	0,02	0	0,69	0,25	0,06
Põrandaküteseadmed		1	0	0	0	0	0
Küttekehad		0,771	0,398	-0,163	0	0	0
Pliidiplaadid		1,293	-0,635	0,336	0	0	0
Luminofoorlambid		0,584	0,528	-0,111	8,045	-11,42	4,376
Elavhõbelambid		0,589	1,344	-0,935	3,534	-3,612	1,079
Asünkroonmootorid nimipingel	koormatud 80 %	4,148	-7,793	4,646	16,84	-29,14	13,31
	koormatud 55 %	3,075	-5,465	3,391	13,68	-22,07	9,39
	koormatud 30 %	2,928	-4,901	2,973	13,91	-22,07	9,165
	tühijooksul	13,10	-21,89	9,788	20,07	-32,36	13,29
Kodu	talvel	1,089	-0,45	0,361	11,10	-18,94	8,847
	suvel	0,877	-0,213	0,336	14,95	-26,35	12,40
	aastaringsest	0,827	-0,049	0,222	14,14	-24,84	11,70

## Lineaarmudel

Lineaarmudel on kasutatav juhul kui pinged hõlmed normaalpingest on väikesed, st kui on tegu väikeste häiringutega. Suurte häiringute korral võivad lineaarmudelid olla ebatäpsed.

$$P = P_n \left( a_0 + a_1 \frac{U}{U_n} \right) \quad (2.23)$$

$$Q = Q_n \left( b_0 + b_1 \frac{U}{U_n} \right) \quad (2.24)$$

Reaktiivvõimsuse pingesõltuvuse adekvaatseks kirjeldamiseks tuleks siiski eelistada ZIP-mudelit või polünoommudelit.

$$Q = Q_n \left( b_0 + b_1 \frac{U}{U_n} + b_2 \left( \frac{U}{U_n} \right)^2 \right) \quad (2.25)$$

Mudelites võib nimisuuruste  $P_n$ ,  $Q_n$  ja  $U_n$  asemel kasutada häiringule vahetult eelnenuid väärtusi  $P_0$ ,  $Q_0$  ja  $U_0$ .

Mudeli parameetrid kodukoormuse jaoks on [3]:

$$a_0 = 0,55; a_1 = 0,45; b_0 = 9,2; b_1 = -20,4; b_2 = 12,2.$$

Kui esinevad sisselülitatud kompenseerivad kondensaatorid, siis [3]:

$$a_0 = 0,51; a_1 = 0,49; b_0 = 9,5; b_1 = -21,4; b_2 = 13,2.$$

## Komposiitmuudel

Komposiitmuudelit on sobiv kasutada suurte häiringute korral, nagu näiteks äärmuslikult madalad pinged. Mudeli mõte on kirjeldada samaaegselt nii staatilisi kui ka dünaamilisi koormuse karakteristikuid, arvestades esmajoones pöörlevate seadmete võimaliku seiskumisega. Lisaks võib äärmuslikult madal pinget põhjustada ka mitmesuguste staatiliste koormuste väljalülitumist, nagu näiteks jõuelektroonikaseadmed.

Erinevatel seadmetel on erinev mittetöötamise lävipinge. Mõned näited:

- HD telerid lülituvad välja 48...65 % pinget puhul
- kompaktluminofoorlambid kustuvad 17...35 % pinget puhul
- jõuelektroonika lülitub välja 80...85 % pinget puhul

- kodukonditsioneeride magnetkontaktorid avanevad 40...52 % pinge puhul
- konditsioneerid ise seiskuvad 50...73 % pinge juures sõltuvalt välisõhu temperatuurist.

Staatilised komposiitmudelid koosnevad ühest polünoommudelidest ja kahest eksponent-mudelidest (igal neist omad parameetrid):

$$P = P_n(P_{ZIP} + P_{EX1} + P_{EX2}), \quad (2.27)$$

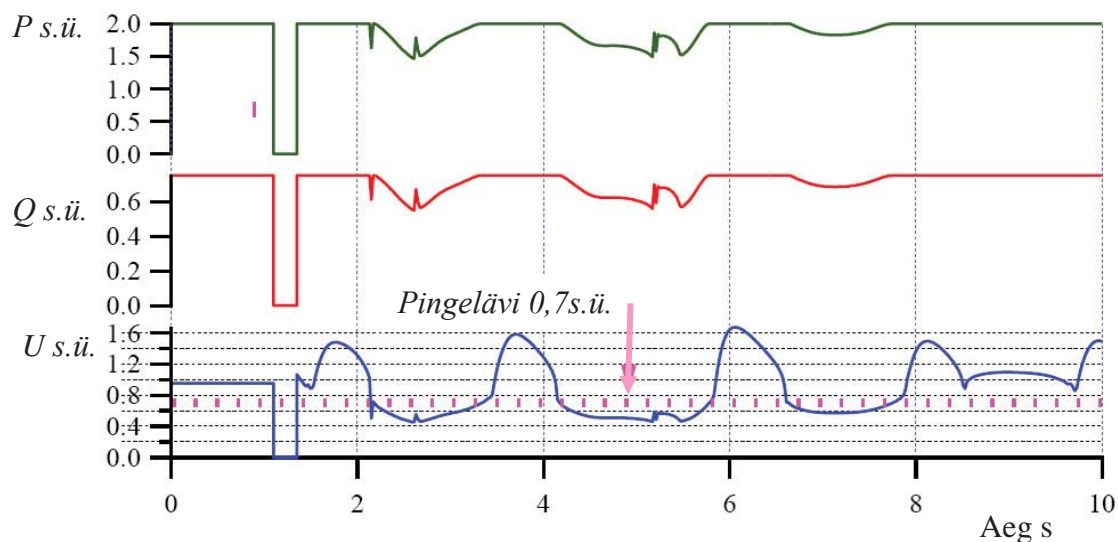
kus: 
$$P_{ZIP} = p_1 \left( \frac{U}{U_n} \right)^2 + p_2 \left( \frac{U}{U_n} \right) + p_3 \quad (2.28)$$

$$P_{EX1} = p_4 \left( \frac{U}{U_n} \right)^{a1} (1 + k_{pf1} \Delta f) \quad (2.29)$$

$$P_{EX2} = p_5 \left( \frac{U}{U_n} \right)^{a2} (1 + k_{pf2} \Delta f) \quad (2.30)$$

Reaktiivkoormuste karakteristikuid modelleeritakse analoogiliste valemitega.

Tavaliselt kasutatakse paljudes tarkvarades konstantse võimsusega ja konstantse vooluga komponente, milles ZIP mudel on lülitatud elliptilisele volu-pinge karakteristikule või juhul kui pinge langeb alla lävipinge (tüüpiliselt 0,7 nimipingest) lülitub konstantse takistusega mudelile. Kui koormussõlme pinge on väga madal, näiteks lühise olukorras, ei jää tarbitav võimsus konstantseks, vaid vol kasvab oluliselt, põhjustades kokkuvõttes arvutusvea.



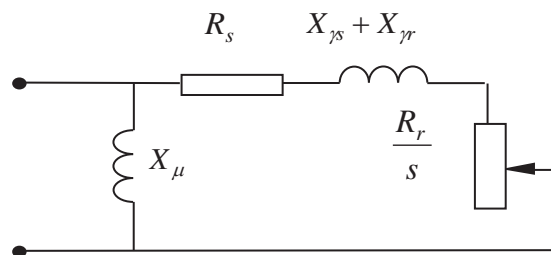
Joonis 2.30. Võimsuse koormuskarakteristikute ümberlülitus.

Joonis 2.30 kirjeldab, kuidas konstantse võimsuse koormuskarakteristik (nii aktiiv- kui ka reaktiivvõimsus) lülitub automaatselt elliptilisele voolu-pinge karakteristikule kui koormussõlme pinge langeb alla 0,7 normaalsest pingest lühisest põhjustatud pingelohu tõttu.

Koormuse tundlikkust sageduse hälvetele kirjeldavad eespool toodud  $P_{EX1}$  ja  $P_{EX2}$  mudelid.

### Asünkroonmootori staatiline mudel

Asünkroonmootorite osakaal koormuses on tavaliselt üsna suur, küündides 60...70 protsendini. Mudel tuletatakse vastavalt asünkroonmootori ekvivalentsele aseskeemile.



Joonis 2.31. Asünkroonmootori ekvivalentne aseskeem.

Siin:  $R_s$  – staatori aktiivtakistus

$R_r$  – rootori aktiivtakistus

$X_{\gamma s}$  – staatori puiste-reaktiivtakistus

$X_{\gamma r}$  – rootori puiste-reaktiivtakistus

$X_{\mu}$  – magneetimisreaktants

$s = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s}$  – rootori libistus

$\omega_s$  – sünkroonringkiirus

$\omega$  – rootori ringkiirus

Aktiivvõimsuse ja reaktiivvõimsuse staatilised karakteristikud avalduvad vastavalt aseskeemile valemitega

$$P = \left( R_s + \frac{R_r}{s} \right) \cdot \frac{U^2}{\left( R_s + \frac{R_r}{s} \right)^2 + (X_s + X_r)^2} \quad (2.31)$$



$$Q = (X_s + X_r) \cdot \frac{U^2}{\left(R_s + \frac{R_r}{s}\right)^2 + (X_s + X_r)^2} + \frac{U^2}{X_\mu} \quad (2.32)$$

IEEE poolt soovitatud asünkroonmootorite mudeliparameetrid on tabelis 2.7.

Tabel 2.7. Mudelite (2.31) ja (2.32) parameetrid [25].

Asünkroonmootori tüüp	$R_s$	$X_s$	$X_\mu$	$R_r$	$X_r$
Väike tööstusmootor	0,031	0,1	3,2	0,018	0,18
Suur tööstusmootor	0,013	0,067	3,8	0,009	0,17
Veepump	0,013	0,14	2,4	0,009	0,12
Elektrijaama omatarve	0,013	0,14	2,4	0,009	0,12
Kaaluteguriga agregeeritud kodumootorid	0,077	0,107	2,22	0,079	0,098
Kaaluteguriga agregeeritud kodu- ja tööstusmootorid	0,035	0,094	2,8	0,048	0,163
Kaaluteguriga agregeeritud mootorid suure konditsioneeride osakaaluga	0,064	0,091	2,23	0,059	0,071

### Jõuelektroonikaga seotud koormuse staatiline mudel

Jõuelektroonikaga seotud koormuse osakaal on viimastel kümnenditel pidevalt suurenenud. Vaadeldakse nelja jõuelektroonikaga koormuse põhitüüpi:

- alalisvoolutoide (SMPS – *switch-mode power supply*)
- kompaktluminofoorlambid (CFL – *compact fluorescent lamps*)
- valgusdiodid (LED – *light-emitting diode*)
- juhitavad mootorid (ASD – *adjustable speed drive*)

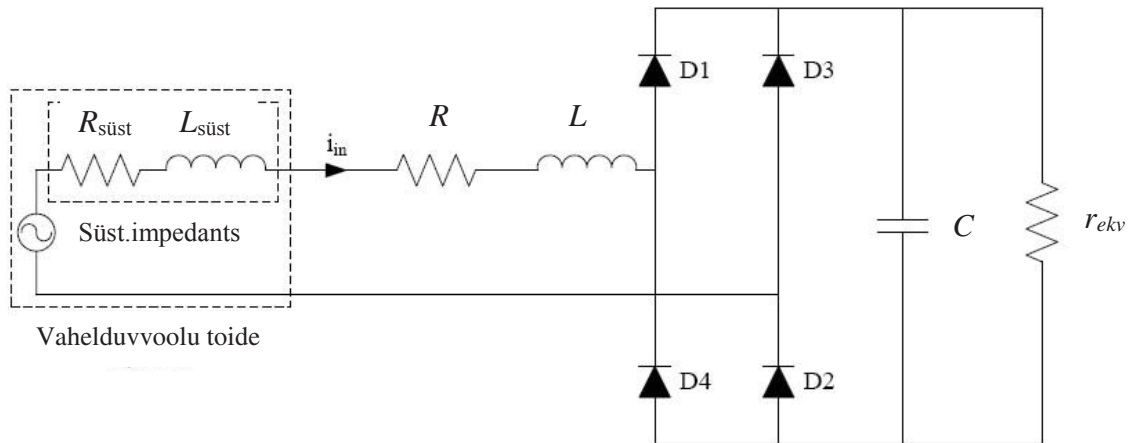
Igale jõuelektroonika tüübile vastab erisugune mudel. Selliste mudelite koostamine vajab detailsemat analüüsi.

Kasutatakse peamiselt kaht mudelitüüpi: täieliku elektri ahela mudelid ja ekvivalentse elektri ahela mudelid.

Täielikud mudelid põhinevad kõiki tegelikult esinevaid elektrilisi ja elektroonilisi elemente haaraval täielikul aseskeemil. Lähenemine on keerukas ja nõuab oluliselt arvutusaega.

Ekvivalentse ahela mudelid on palju lihtsamad ja koosnevad tavaliselt juhitamatust dioodsildalaldist, mille sisendis impedants ( $R$  ja  $L$ ), mahtuvus ( $C$ ) ja ekvivalentne takistus ( $R_{ekv}$ ). Alusskeem on joonisel 2.32. Sisendimpedants ja mahtuvus põhinevad tüüpilistel

vaadeldavas ahelas esinevatel parameetritel. Ekvivalentne aktiivtakistus leitakse analüütilistest sõltuvustest, mis kirjeldavad kõikide mahtuvusest  $C$  tagapool paiknevate elementide käitumist ja leitakse tavaliselt modelleeritava elektroonilise seadme voolu, pinget või võimsuse karakteristikute uurimise tulemusena alalisvoolu ühendusel.



Joonis 2.32. Jõuelektronikaseadmete ekvivalentse ahela mudel.

Jõuelektronikaseadmetega koormuse karakteristikuid võib üldiselt modelleerida eksponent- ja polünoommudelitega.

Kõrvuti jõuelektronikaseadmetega on hakanud levima ka elektriautode pistiklaadurid, mille osakaal tulevikus võib oluliselt suureneada, eriti kodutarbijate sektoris.

### 2.3.3 Koormuskarakteristikute dünaamilised mudelid

Dünaamilisi mudeleid kasutatakse esmajoones koormuste puhul, mille koosseisus on oluline osakaal asünkroonmootoritel ja ajamitel.

Dünaamiliste mudelite üldkuju on sama, kuid valemite parempoolne osa on ajast sõltuv.

Koormuse mitmekesisusest tulenevalt esineb palju mitmesuguseid dünaamilisi mudeleid. Allpool on iseloomustatud sagedamini kasutatavaid mudeleid.

#### Dünaamiline eksponentmudel

Eksponentmudel on oluliselt liigipõhine, kirjeldades vastavalt asünkroonmootorite, soojuskoormuste ja trafo astmelüliti reageerimist suurtele pingemuutustele. Kui pinget astmelise muutuse korral toimub võimsuse eksponentsiaalne taastumine ja vastavad eksponentfunktsioonid  $P_s(U)$  ja  $P_t(U)$  on kindlaksmääratud, võtab mudel kuju

$$T_p \frac{dP_r}{dt} + P_r = P_s(U) - P_l(U) = P_0 \left( \frac{U}{U_0} \right)^{\alpha_s} - P_0 \left( \frac{U}{U_0} \right)^{\alpha_t} \quad \text{ja} \quad (2.33)$$

$$P_l = P_r + P_0 \left( \frac{U}{U_0} \right)^{\alpha_t}, \quad (2.34)$$

- kus:  $P_r$  – aktiivvõimsuse taastumine  
 $P_0$  – aktiivvõimuse algväärtus enne pinge muutumist  
 $U_0$  – pinge algväärtus  
 $T_p$  – aktiivvõimuses taastumise ajakonstant  
 $\alpha_s$  – aktiivvõimsuse staatiline eksponent  
 $\alpha_t$  – aktiivvõimsuse dünaamiline (transient) eksponent  
 $P_l$  – tarbitav koormuse aktiivvõimsus  
 $Q_r$  – reaktiivvõimsuse taastumine  
 $Q_0$  – reaktiivvõimuse algväärtus enne pinge muutumist  
 $T_q$  – reaktiivvõimuses taastumise ajakonstant  
 $\beta_s$  – reaktiivvõimsuse staatiline eksponent  
 $\beta_t$  – reaktiivvõimsuse dünaamiline (transient) eksponent  
 $Q_l$  – tarbitav koormuse reaktiivvõimsus

Reaktiivvõimsuse reaktsiooni kirjeldavad samad valemid, mille parameetreid on vastavalt muudetud, asendades aktiivvõimsuse näitajad reaktiivvõimsuse näitajatega.

Dünaamiline eksponentmudel ei sobi kasutamiseks suure osakaaluga asünkroonmootorikoormuste lühiajaliste reaktsioonide korral, kuna mudel ei arvesta asünkroonmootorite sisemisi seoseid aktiiv- ja reaktiivvõimsuste vahel. Siiski võib mudelit kasutada pikaajalise pingestabiilsuse uurimisel või astmelüliti omava trafo kaudu toidetavas jaotusvõrgus.

Väikeste häiringute jaoks võib kasutada eksponentmudeli lineariseeritud vormi kujul

$$\Delta P_l = \frac{P_0}{U_0} \alpha_s \frac{\left( \frac{\alpha_t}{\alpha_s} T_p s + 1 \right)}{(T_p s + 1)} \Delta U, \quad (2.35)$$

- kus:  $s$  – asünkroonmootori libistus

### **Asünkroonmootori dünaamiline mudel**

Dünaamilist eksponentmudelit kasutatakse juhul, kui piiratud mootorite osakaaluga (nt soojuspumbad) kodukoormus moodustab kogukoormusest olulise osa, [18,19] st kui asünkroonmootorite osakaal kogukoormuses on väike. Kui aga asünkroonmootorite osakaal on suur, siis tuleb kasutada spetsiifilist asünkroonmootorite dünaamilist mudelit. Allpool on kirjeldatud viiendat järku kolmefaasilise asünkroonmootori dünaamilist mudelit [20].

$$\left. \begin{aligned}
 u_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{d\tau} - \omega_s \psi_{qs} \\
 u_{qs} &= R_s i_{dq} + \frac{d\psi_{qs}}{d\tau} + \omega_s \psi_{ds} \\
 u_{dr} &= R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{d\tau} - (\omega_s - \omega) \psi_{qr} \\
 u_{qr} &= R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{d\tau} - (\omega_s - \omega) \psi_{dr} \\
 \frac{d\omega}{d\tau} &= \frac{(M_e - M)}{\omega_b T_m} \\
 \psi_{ds} &= X_s i_{ds} + X_m i_{dr} \\
 \psi_{qs} &= X_s i_{qs} + X_m i_{qr} \\
 \psi_{dr} &= X_m i_{ds} + X_r i_{dr} \\
 \psi_{qr} &= X_m i_{qs} + X_r i_{qr}
 \end{aligned} \right\} \quad (2.36)$$

Siin:  $u_{ds}, u_{qs}$  – staatori pingekomponendid

$u_{dr}, u_{qr}$  – rootori pingekomponendid

$i_{ds}, i_{qs}$  – staatori voolukomponendid

$i_{dr}, i_{qr}$  – rootori voolukomponendid

$\psi_{ds}, \psi_{qs}$  – staatori aheldusvood

$\psi_{dr}, \psi_{qr}$  – rootori aheldusvood

$R_s, R_r$  – staatori ja rootori aktiivtakistused

$X_s = X_\mu + X_{\gamma s}$  – staatori (põik)reaktiivtakistus (vt joon. 2.31)

$X_r = X_\mu + X_{\gamma r}$  – rootori reaktiivtakistus (vt joon. 2.31)

$X_{\gamma s}$  – staatori puiste-reaktiivtakistus

$X_{\gamma r}$  – rootori puiste-reaktiivtakistus

$X_{\mu}$  – magneetimisreaktants

$\omega_s$  – sünkroonringkiirus

$\omega$  – rootori ringkiirus

$\omega_b$  – baasringkiirus

$M$  – mehaaniline koormuse pöördemoment

$\tau = \omega_b t$  – normaliseeritud aeg

$T_m$  – mootori mehaaniline ajakonstant

$M_e = X_{\mu} (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr})$  – elektromagnetiline pöördemoment

Ülaltoodud mudeli praktilistes rakendustes staatori transientidega ei arvestata ja mudel taandub kolmandat järku mudeliks kasutades ülaltoodutest vaid kaht esimest valemit. Viiendat järku mudelit kasutatakse vaid suurte ja kogukoormuse hulgas olulist mõju avaldavate asünkroonmootorite korral. Vastasel juhul piisab tavaliselt kolmandat järku mudelist.

Laialt on kasutusel ühefaasilised induktsioonmootorid, näiteks külmkapid, sügavkülmikud, ventilaatorid, pumbad, nõudepesu- ja pesumasinad. Ühefaasiliste induktsioonmootorite mudeliparameetrid leiduvad kirjanduses [3].

### **Asünkroonmootori ülekandefunktsiooni mudel**

Ülekandefunktsioonid võimaldavad modelleerida koormusi, milles kõrvuti staatilise koormusega on suur osakaal asünkroonmootoritel. Kasutatakse esimest, teist ja kolmandat järku ülekandefunktsioone [21,22].

Esimest järku ülekandefunktsioon:

$$\Delta P(s) = \frac{k_{pf} + T_{pf}s}{1 + T_1 s} \Delta f(s) + \frac{k_{pu} + T_{pu}s}{1 + T_1 s} \Delta U(s) \quad (2.37)$$

$$\Delta Q(s) = \frac{k_{qf} + T_{qf}s}{1 + T_1 s} \Delta f(s) + \frac{k_{qu} + T_{qu}s}{1 + T_1 s} \Delta U(s) \quad (2.38)$$

Teist järku ülekandefunktsioon:

$$\frac{\Delta P(s)}{\Delta U(s)} = \frac{k_{pu}(1+T_{3p}s)}{(1+T_{1p}s) \cdot (1+T_{2p}s)} \quad (2.39)$$

$$\frac{\Delta Q(s)}{\Delta U(s)} = \frac{k_{qu}(1+T_{3p}s)}{(1+T_{1p}s) \cdot (1+T_{2p}s)} \quad (2.40)$$

Kolmandat järku ülekandefunktsioon:

$$\frac{\Delta P(s)}{\Delta U(s)} = \frac{K(1+T_{4p}s) \cdot (1+T_{5p}s)}{(1+T_{1p}s) \cdot (1+T_{2p}s) \cdot (1+T_{3p}s)} \quad (2.41)$$

$$\frac{\Delta Q(s)}{\Delta U(s)} = \frac{K(1+T_{4q}s) \cdot (1+T_{5q}s)}{(1+T_{1q}s) \cdot (1+T_{2q}s) \cdot (1+T_{3q}s)} \quad (2.42)$$

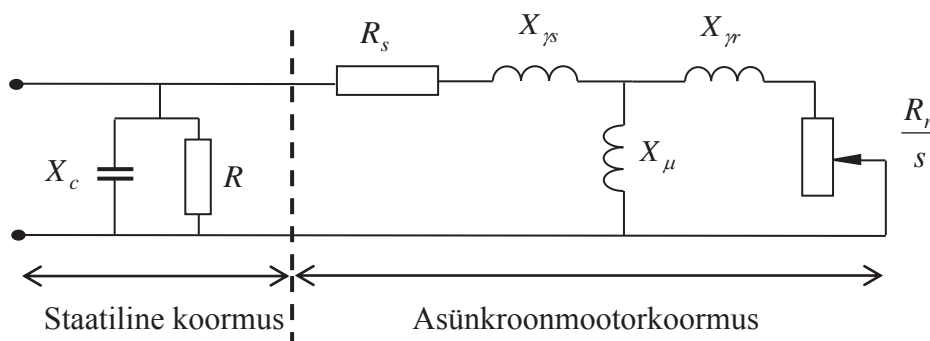
Koormuskatsete tulemusel on kindlaks tehtud, et dünaamiliste siirdeprotsesside korral annavad adekvaatsemaid tulemusi teist ja kolmandat järku mudelid.

### Dünaamiline komposiitmodel

Dünaamiline liitmodel sobib kasutamiseks sõlmedes, kuhu on agregeeritud nii erinevad staatilised kui ka dünaamilised (peamiselt asünkroonmootorite) koormused, eriti juhtudel kui sõlm toidab ka märkimisväärset tööstuskoormust. Joonisel 2.33 on kujutatud ekvivalentne staatilist koormust ja asünkroonmootorit sisaldav aseskeem [23]. Kasutatakse kolmandat järku ülekandefunktsiooni. Sealjuures aktiiv- ja mahtuvusliku koormuse voolu piki- ( $d$ ) ja põiktelje ( $q$ ) komponendid avalduvad valemitega

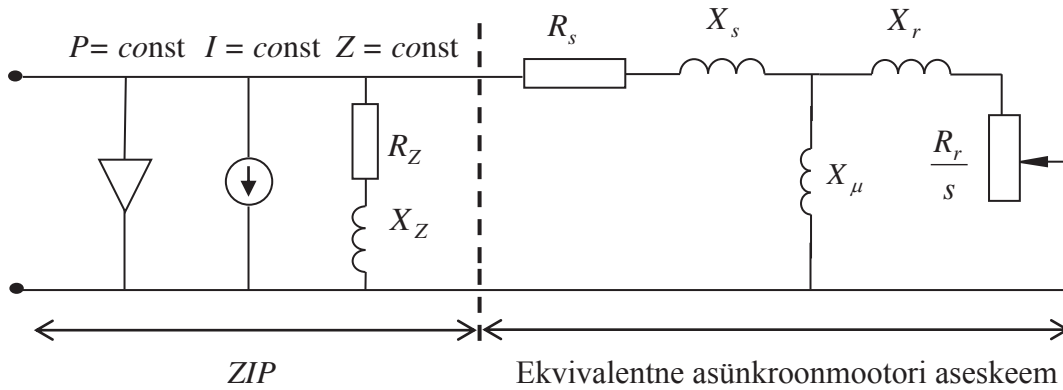
$$i_{dr} = \frac{u_{ds}}{R}; \quad i_{qr} = \frac{u_{qs}}{R}; \quad i_{dc} = -\frac{u_{qs}}{X_c}; \quad i_{qc} = \frac{u_{qs}}{X_c}; \quad (2.43)$$

Liitmodelisse võib vastavalt vajadusele haarata ka staatilise koormuse võrrandeid, ekvivalentse asünkroonmootori võrrandeid (tüüpiliselt kolmandat järku ülekandefunktsioonidena) ja ka ekvivalentse sünkroonmootori võrrandeid.



Joonis 2.33. Komposiitmudeli ekvivalentne aseskeem.

Segakoormuse modelleerimiseks on mitmesuguseid variante. Näiteks võiks staatilist koormust modelleerida ZIP mudeliga. Sellise mudeli aseskeem on joonisel 2.34.



Joonis 2.34. ZIP + asünkroonmootor mudeli ekvivalentne aseskeem.

Aseskeemi staatilist ZIP-mudeli osa kirjeldavad valemid:

$$P_s^* = P_Z^* \left( \frac{U}{U_0} \right)^2 + P_I^* \left( \frac{U}{U_0} \right)^2 + P_P^* \quad (2.44)$$

$$Q_s^* = Q_Z^* \left( \frac{U}{U_0} \right)^2 + Q_I^* \left( \frac{U}{U_0} \right)^2 + Q_Q^* \quad (2.45)$$

$$P_Z^* + P_I^* + P_P^* = 1 - K_{pm} \quad (2.46)$$

$$Q_Z^* + Q_I^* + Q_P^* = 1 - \frac{Q_{moot}}{Q_0} \quad (2.47)$$

Siin  $K_{pm}$  on mootorkoormuse ja sõlmekoormuse algväärtuste suhe ning  $Q_{moot}$  on mootori reaktiivkoormuse algväärtus ja  $Q_0$  on sõlme reaktiivkoormuse algväärtus. Ülaindeks „\*“ tähistab suhtelisi suurusid.

Dünaamiliste komponentide mõju kogukoormusele iseloomustatakse parameetriga  $M_{lf}$  :

$$M_{lf} = \frac{P_{moot}}{S_{baasmoot}} \bigg/ \frac{U_0}{U_{baas}}, \quad (2.48)$$

kus  $S_{baasmoot}$  – mootori ekvivalentne niminäivvõimsus

$U_0$  ja  $U_{baas}$  – vastavalt sõlmepinge algväärtus ja baaspinge.

Koormuse dünaamilist osa kirjeldavad võrrandid

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{dE'_d}{dt} &= -\frac{1}{T'} [E'_d + (X - X')I_q] - (\omega - 1)E'_q \\
 \frac{dE'_q}{dt} &= -\frac{1}{T'} [E'_q + (X - X')I_d] + (\omega - 1)E'_d \\
 \frac{d\omega}{dt} &= -\frac{1}{2H} [(A\omega^2 + B\omega + C)T_0 - (E'_d I_d + E'_q I_q)] \\
 I_d &= \frac{1}{R_s^2 + X'^2} [R_s(U_d - E'_d) + X'(U_q - E'_q)] \\
 I_q &= \frac{1}{R_s^2 + X'^2} [R_s(U_q - E'_q) + X'(U_d - E'_d)]
 \end{aligned} \right\} \quad (2.49)$$

kus:  $E'_d, E'_q$  – piki- ( $d$ ) ja põiktelje ( $q$ ) mööduvad elektromotoorjõud

$U_d, U_q$  – piki- ( $d$ ) ja põiktelje sõlmepinged

$H$  – rootori inertsiooni konstant

$A$  – kiiruse ruudust sõltuv pöördemomendi tegur

$B$  – kiirusest sõltuv pöördemomendi tegur

$C$  – konstantne pöördemomendi tegur

$T_0$  – koormuse pöördemoment nimisagedusel

$$T' = \frac{(X_{\gamma r} + X_{\mu})}{R_r}$$

$$X_r = X_{\mu} + X_{\gamma r}$$

$$X = X_s + X_{\mu}$$

$$X' = \frac{X_s + X_{\mu} X_r}{X_{\mu} + X_{\gamma r}}$$

$$A + B + C = 1$$

Kui on vaja täiendavalt arvestada reaktiivvõimsuskadudega trafode ja mootorite raudsüdames, siis tuleb liitmudelisse võtta ka trafode ja mootorite küllastuskarakteristikud [24].



## 2.4 Koormuskarakteristikute mudelite kasutamine

Praktikas leiavad erinevad mudelit kasutamist eri sagedusega. Tabelis 2.8 on toodud andmed erinevate mudelite suhtelise kasutamise kohta.

Tabel 2.8. Staatiliste ja dünaamiliste koormusmudelite suhteline kasutamine.

Koormusmudel		P(Q) = const	I = const	Z = const	ZIP	Ekspon. mudel	ZIP + AsM	Eksponent-mudel + AsM.	Liitmudel
Staatilised karakteristikud		84%	3%	3%	8%	2%	-	-	-
Dünaam. karakteristikud	P	23%	19%	4%	19%	7%	16%	0%	10%
	Q	23%	0%	22%	19%	9%	17%	0%	10%

Konstantse võimsuse staatiliste mudelite  $P(Q) = const$  suur kasutatavus (84%) põhineb eeldusel, et astmeregulaatoritega trafod ja muud pingereguleerimise seadmed suudavad reeglina koormussõlmedes hoida praktiliselt konstantset nimipingele lähedast pinget ka pärast tavaliselt mitte eriti suuri häiringuid.

Dünaamiliste protsesside modelleerimisel, nagu näiteks süsteemi dünaamiline stabiilsuse, sageduse stabiilsuse või lühiajaline pingestabiilsuse analüüsi korral, on kasutusel erinevad mudelid.

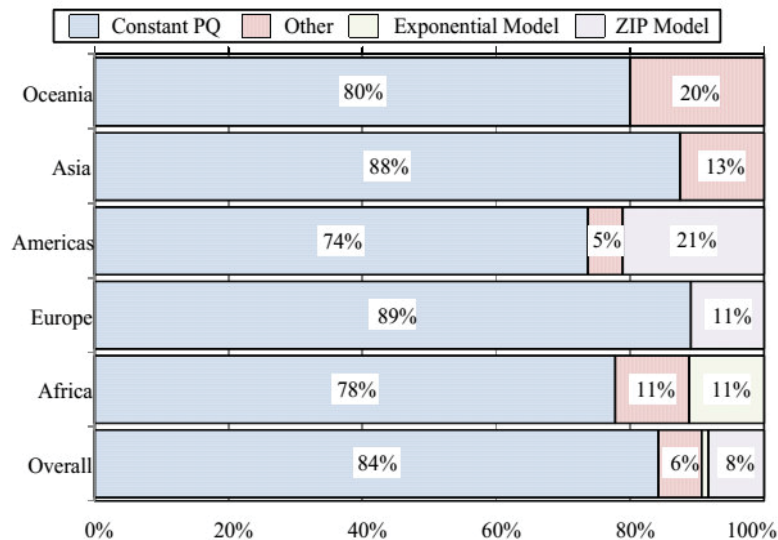
Erinevaid mudeleid kasutatakse ka aktiiv- ja reaktiivkoormuste modelleerimisel.

Kuigi sama mudelit võidakse kasutada eri sõlmekoormuste korral, siis nende mudelite parameetrid on reeglina erinevad sõltuvalt koormusklassidest. Siiski kuni 75% ülekandevõrkudest ei tee vahet koormusklassidel, kuna usaldatavaid andmeid koormusklasside kohta sõlmedes on ülekandevõrgul raske saada. Tavaliselt on need andmed teada jaotusvõrkudes.

Lisaks pakub huvi kui sagedasti on vaja mudelite parameetreid värskendada. Praktikas pea pooled ülekandevõrkudest uuendavad mudelite parameetreid vähemalt 5 aasta jooksul, ülejäänud kas ei muuda või muudavad harvemini.

**Staatilistes mudelites** kirjeldatakse aktiivkoormuse  $P$  ja reaktiivkoormuse  $Q$  sõltuvust sõlmepingest ja sagedusest. Praegusel ajal kasutab Elering AS võrguarvutuste teostamisel lähenemist, kus koormuste modelleerimisel kasutatakse „Constant MVA“ tüüpi koormusi ning

vajadusel muudetakse koormuste väärtusi, kuid aktiiv- ja reaktiivvõimsuses suhted jäävad paika. Seega, hetkel Elering AS võrguarvutustes pinge ja sagedussõltuvust ei arvestata. Sarnast lähenemist kasutab CIGRE küsitluse [3] põhjal 89% Euroopa ülekandevõrgu operaatoritest/võrguettevõtetest, kasutuselt järgnev on polünoomne mudel (ZIP mudel), mida kasutavad ülejäänud 11% Euroopa vastanutest.



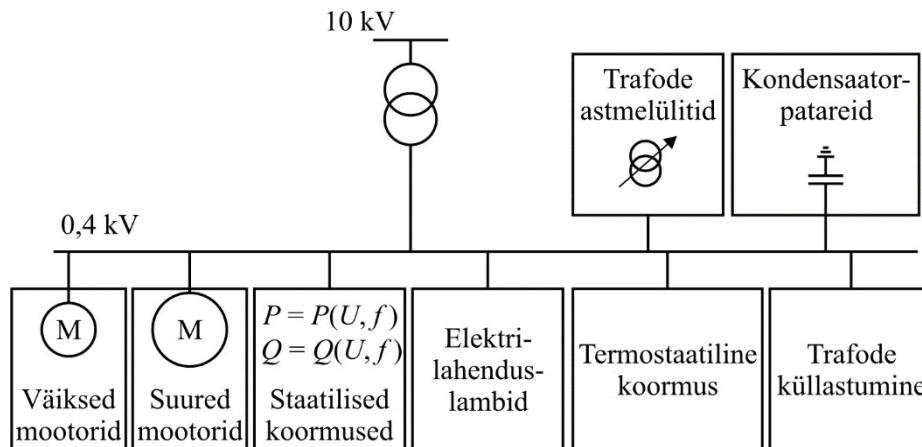
Joonis 2.35. Koormusmudelite kasutus püsitalitluse arvutustes [3].

Madalate pingete korral ei ole vaadeldud staatilised mudelid adekvaatsed. Lisaks võivad tekkida arvutuslikud probleemid võrguvõrrandite lahendamisel. Seetõttu kasutatakse madalate pingete korral konstantse takistusega mudelit.

**Koormuste dünaamilised mudelid.** Koormuse siirdeprotsessid sumbuvad pinge ja sageduse mõõdukatel muutustel enamasti küllaltki kiiresti, mistõttu staatiline mudel on vastuvõetav. Elektrisüsteemi kesk- ja pikaajaliste siirdeprotsesside korral, mida vaadeldakse pingestabiilsuse ja regioonidevahelise võnkumise käsitlemisel, tuleb siiski arvestada ka koormuse dünaamikat. Olulisel kohal on asünkroonmootorite dünaamika tundmine ning täiendavalt tuleb tähelepanu pöörata järgmistele seadmetele (joonis 2.36):

- Elektrilahenduslambid kustuvad, kui pingel langeb alla 0,7...0,8 suhtelises ühikutes ning sütivad pingel tõustes 1...2-sekundilise viitega.
- Elektrimootoreid käivitavad kontaktorid lülituvad välja pingel 0,5...0,8, külmutid ja kliimaseadmete väikesed mootorid lülitatakse välja termilise ülekoormuskaitse poolt 10...30 sekundi möödudes.

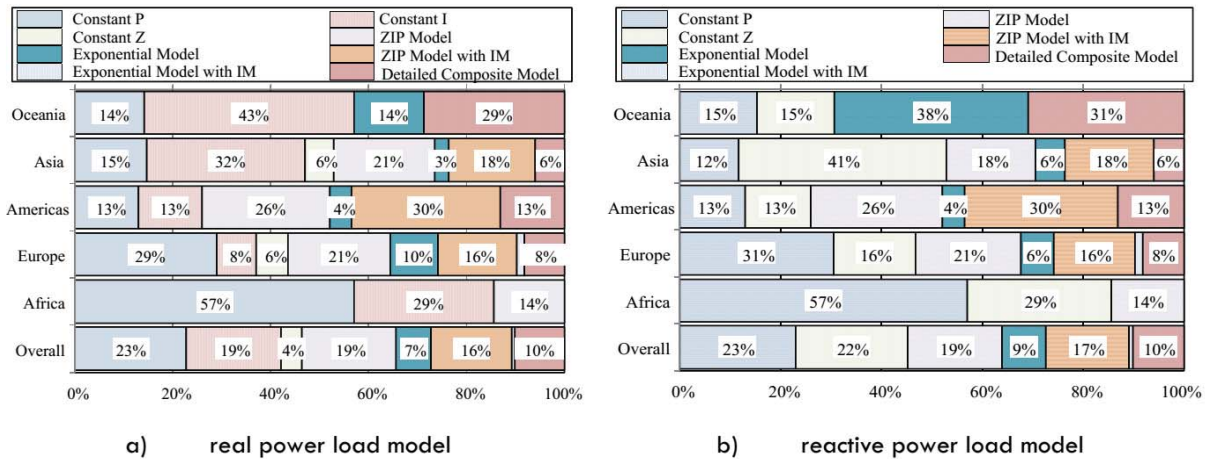
- Termostaatiline koormus (ruumide küte ja jahutus, veeboilerid, külmutid ja kliimaseadmed) toimib madalama pinge korral kauem, mistõttu vool elektrivõrgus tõuseb.
- Pinge langemisel vool trafodes väheneb, mistõttu väheneb ka nende küllastatus ning reaktiivvõimsuse tarve tõuseb.
- Pinget reguleerivate trafode astmelülitid ja juhitavad kondensaatorpatareid reageerivad pinge langusele umbes 1 minuti jooksul, püüdes pinget taastada 2...3 minuti pärast.



Joonis 2.36. Staatilised ja dünaamilised koormused.

Praegusel ajal modelleeritakse Elering AS dünaamikaarvutustes aktiivvõimsust kui „constant current“ (konstantne vool). CIGRE küsitluse [3] põhjal on Euroopas levinuimad aktiivkoormuse mudelid dünaamika arvutusteks pidev aktiivvõimsus (29% vastanutest), polünoomne mudel (21%), polünoomne mudel koos asünkroonmootoriga (16%) ja eksponentsiaalne mudel (10%). Eleringi kasutatav konstantne vool on kasutusel 8% vastanutest.

Reaktiivvõimsuse modelleerimiseks kasutatakse Elering AS dünaamikaarvutustes „constant admittance“ (konstantne juhtivus) mudelit. CIGRE küsitluse [3] põhjal on Euroopas levinuimad reaktiivkoormuse mudelid pidev reaktiivvõimsus (31% vastanutest), polünoomne mudel (21%), konstantne takistus (16%) ja polünoomne mudel koos asünkroonmootoriga (16%). Eleringi kasutatav konstantne juhtivus on seega kasutusel 16% vastanutest.



Joonis 2.37. Koormusmudelite kasutus dünaamika arvutustes [3].

## 2.5 Kirjandus

- [1] Meldorf, M. Electrical Network Load Monitoring. TUT Press, 2008, 144 pp.
- [2] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, “Load representation for dynamic performance analysis (of power systems),” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 8, no. 2, pp. 472–482, May 1993.
- [3] Cigre Working Group C4.605. Modelling and Aggregation of Loads in Flexible Power Networks, CIGRE, 2014, 190 pp.
- [4] D. Han, J. Ma, R. He, and Z.-Y. Dong, “A Real Application of Measurement-Based Load Modeling in Large-Scale Power Grids and its Validation,” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 24, no. 4, pp. 1756–1764, Nov. 2009.
- [5] EPRI, “Advanced Load Modeling – Entergy Pilot Study,” 2004.
- [6] K. Yamashita, S. M. Villanueva, and J. Milanović, “Initial Results of International Survey on Industrial Practice on Power System Load Modelling Conducted by CIGRE WG C4.605,” in CIGRE symposium, Bologna, Italy, 2011.
- [7] P. Kundur, Power System Stability and Control. New York: McGraw-Hill, Inc., 1994.
- [8] EPRI, “Comprehensive Load Modeling for System Planning Studies”, EPRI Product ID 1015999, Palo Alto, USA, 2009.
- [9] K. Yamashita, S. Djokic, J. Matevosyan, F. O. Resende, L. M. Korunovic, Z. Y. Dong, and J. V. Milanovic, “Modelling and Aggregation of Loads in Flexible Power Networks

- Scope and Status of the Work of CIGRE WG C4.605,” in IFAC Symposium on Power Plants and Power Systems Control, 2012.
- [10] C. Cresswell, S. Djokic, and S. Munshi, “Analytical Modeling of Adjustable Speed Drive Load for Power System Studies,” in 2007 IEEE Lausanne Power Tech, 2007, pp. 1899–1904.
- [11] K. Yamashita, M. Asada, and K. Yoshimura, “A development of dynamic load model parameter derivation method,” in 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2009, pp. 1–8.
- [12] EPRI, “Power Quality Monitoring Data Mining for Power System Load Modelling,” 2006.
- [13] J. Ribeiro and F. Lange, “A New Aggregation Method for Determining Composite Load Characteristics,” IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-101, no. 8, pp. 2869–2875, Aug. 1982.
- [14] L. Hajagos and B. Danai, “Laboratory Measurement of Modern Loads Subjected to Large Voltage Changes for Use in Voltage Stability Studies,” 1996.
- [15] L. Korunović and D. Stojanović, “Load Model Parameters on Low and Middle Voltage in Distribution Networks,” Elektroprivreda, vol. 55, no. 2, pp. 46–56, 2002.
- [16] L. M. Korunovic , D. P. Stojanovic , and J. V. Milanovic , “Identification of static load characteristics based on measurements in medium-voltage distribution network,” IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 2, no. 2, p. 227, 2008.
- [17] K. Yamashita, M. Asada, and K. Yoshimura, “A development of dynamic load model parameter derivation method,” in 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2009, pp. 1–8.
- [18] D. Karlsson and D. J. Hill, “Modelling and identification of nonlinear dynamic loads in power systems,” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 9, no. 1, pp. 157–166, 1994.
- [19] G. Delille, “Participation of Storage in the Advanced Management of Power Systems. Organizational, Technical and Economic Approaches in Distribution Grids,” PhD thesis, University of Lille, France, 2010.
- [20] P. C. Krause, Analysis of Electric Machinery. New York: McGraw-Hill, Inc., 1986.

- [21] C.-J. Lin, A. Y.-T. Chen, C.-Y. Chiou, C.-H. Huang, H.-D. Chiang, J.-C. Wang, and L. Fekih-Ahmed, "Dynamic load models in power systems using the measurement approach," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 8, no. 1, pp. 309–315, 1993.
- [22] Y. Li, H.-D. Chiang, B.-K. Choi, Y.-T. Chen, D.-H. Huang, and M. G. Lauby, "Representative static load models for transient stability analysis: development and examination," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 1, no. 3, p. 422, 2007.
- [23] S. A. Y. Sabir and D. c. Lee, "Dynamic Load Models Derived from Data Acquired During System Transients," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-101, no. 9, pp. 3365–3372, Sep. 1982.
- [24] G. Shackshaft, O. C. Symons, and J. G. Hadwick, "General-purpose model of power-system loads," *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 124, no. 8, p. 715, 1977.
- [25] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, "Standard load models for power flow and dynamic performance simulation," *IEEE transactions on Power Systems*, vol. 10, no. 3, pp.1302 – 1313, 1995.

### 3 PSS/E ja PSCAD tarkvarade koormusmodelite ülevaade

Käesolevas peatükis antakse ülevaade tarkvarade PSCAD ja PSS/E koormusmodelitest ning nende pinge- ja sageduskarakteristikutest. PSS/E mudelite osas käsitletakse eraldi püsitalitluse ja siirdeprotsesside arvutuses kasutatavaid koormusmudeleid.

#### 3.1 PSCAD koormusmodelite ülevaade

Käesolev alapeatükk koondab enda alla ülevaate PSCAD standardmudelite kogus kirjeldatud koormusmodelitest. Esmalt kirjeldatakse PSCAD tarkvaras rakendatavaid mudeleid ning analüüsitakse läbiviidud simulatsioonide põhjal peamise koormusmudeli pinge- ja sagedustundlikkust ning mudeli mõju lühistalitlusele.

Tarkvarapaketi standardmudelite andmebaas ei sisalda dünaamilisi koormusmudeleid, mille puhul eeldatakse, et kasutaja koostab vastavad mudelid standardkomponentidest vastavalt modelleeritava probleemi spetsiifikale [1]. Kirjeldatud asjaolule tuginedes kirjeldatakse järgnevalt staatiliste koormuste modelleerimiseks ettenähtud eksponentmudelit (*Fixed Load*) ning kolmefaasilise mahtuvusliku, induktiivse ja aktiivkoormuse mudeleid (*Three-Phase Capacitive/Inductive/Resistive Load*).

#### Koormuse eksponentmudel (*Fixed Load*)

PSCAD fikseeritud koormuse mudel on esitatav võrranditega 3.1 ja 3.2, mis väljendavad vastavalt koormuse aktiivvõimsust ja reaktiivvõimsust.

$$P = P_0 \left( \frac{U}{U_0} \right)^{K_{pu}} (1 + K_{pf} \Delta f) \quad (3.1)$$

$$Q = Q_0 \left( \frac{U}{U_0} \right)^{K_{qu}} (1 + K_{qf} \Delta f) \quad (3.2)$$

$P_0$  ja  $Q_0$  tähistavad vastavalt koormuse nimiaktiivvõimsust ja nimireaktiivvõimsust.  $U/U_0$  tähistab pingesuhet, kus  $U$  on tegelik pinge ja  $U_0$  on nimipinge.  $\Delta f$  tähistab mõlemas võrrandis sageduse erinevust nimisagedusest suhtühikutes. Modelleerimisel kasutatakse astendajaid  $K_{pu}$  ja  $K_{qu}$  koormuse pingetundlikkuse ehk  $dP/dV$  ja  $dQ/dV$  ning kordajaid  $K_{pf}$  ja  $K_{qf}$  sagedustundlikkuse ehk  $dP/df$  ja  $dQ/df$  iseloomustamiseks [1]. Koormuse pinge- ja sagedustundlikkust saab simulatsioonis muuta piirides -5 kuni 5 [1].

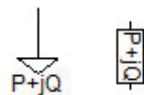
Eeltoodud võrrandeid 3.1 ja 3.2 kasutatakse nii liinikoormuste kui faasikoormuste mudelis. Liinikoormuste modelleerimisel kasutatakse mudelit *Fixed Load L-L* ja faasikoormuse modelleerimisel mudelit *Fixed Load L-G*. Liinikoormusi saab modelleerida ühefaasilistena, faasikoormusi nii ühe- kui kolmefaasilistena.

Tabelis 3.1 on esitatud pingetundlikkuse  $K_{pu}$  ja  $K_{qu}$  laialdaselt kasutatud väärtuste mõju koormuse iseloomule.

Tabel 3.1. Pingetundlikkuse  $K_{pu}$  ja  $K_{qu}$  mõju koormuse iseloomule [2].

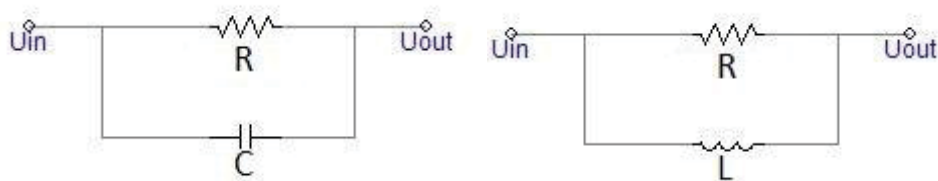
<b>Aktiivkoormuse iseloom</b>	$K_{pu}$
Konstantne aktiivvõimsus P	0
Konstantne vool I	1
Konstantne aktiivtakistus R	2
<b>Reaktiivkoormuse iseloom</b>	$K_{qu}$
Konstantne reaktiivvõimsus Q	0
Konstantne vool I	1
Konstantne reaktiivtakistus X	2

EkspONENTmudeli tingmärgid on esitatud Joonisel 3.1, kus vasakpoolne tingmärk tähistab faasikoormust (*Fixed Load L-G*) ning parempoolne tingmärk liinikoormust (*Fixed Load L-L*).



Joonis 3.1. PSCAD koormuse eksponentsiaalse koormusmudeli tingmärgid.

Simulatsiooni käigus toimib koormuse eksponentmudel kui aktiiv- ja reaktiivtakistuse paralleelühendus, mille väärtusi muudetakse pinge nullist läbiminekul kajastamaks koormuse mittelineaarsust. Joonisel 3.2 on kujutatud kahte eksponentmudeli aseskeemi: vasakul mahtuvusliku iseloomuga koormusmudeli aseskeemi ja paremal induktiivse iseloomuga koormusmudeli aseskeemi.

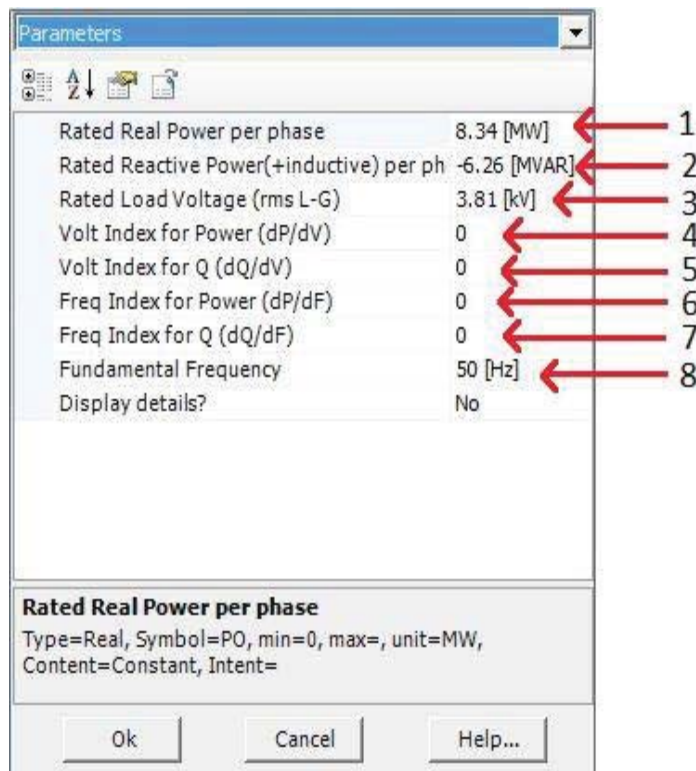


Joonis 3.2. EkspONENTmudeli aseskeemid.



EkspONENTMudel käitub esimese kümne perioodi vältel kui konstantne takistus [1]. Koormusmudeli arvutusliku pinge erineisel koormusmudeli nimipingest üle 20% asendatakse koormuse eksponentmudel konstantse takistusega mudeliga. Sarnane muudatus toimub ka sagedustundlikkuse osas, eksponentmudel asendatakse konstantse takistusega kui sageduse erinevus nimisagedusest ületab sageduspiiri DF, kus DF kolme komponendi minimaalne väärtus, komponentideks on 10,  $90/K_{PF}$ ,  $90/K_{QF}$ .

Joonisel 3.3 on esitatud koormusmudeli konfiguratsiooni aken, millel on tähistatud koormuse nimiaktiivvõimsus (1), nimireaktiivvõimsus (2), nimipinge (3), pingetundlikkused (4 ja 5), sagedustundlikkused (6 ja 7) ja nimisagedus (8). Pingetundlikkust on võimalik määratleda aktiivvõimsuse tundlikkusteguriga  $K_{pu}$  ja reaktiivvõimsuse tundlikkusteguriga  $K_{qu}$ , joonisel 3.3 vastavalt parameetrid 4 ja 5. Analoogselt määratletakse sagedustundlikkus aktiivvõimsuse tundlikkusteguriga  $K_{pf}$  ja reaktiivvõimsuse tundlikkusteguriga  $K_{qf}$ , joonisel 3.3 märgitud kui 6 ja 7.



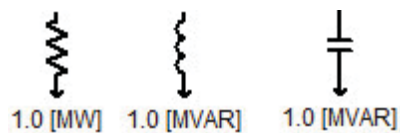
Joonis 3.3. Eksponentsiaalse koormusmudeli seadistusaken.

### Kolmefaasilise passiivlemendi mudelid (*Three-Phase Capacitive/Inductive/Resistive Load*)

Lisaks koormuse eksponentmudelitele võimaldab PSCAD koormuse modelleerimist mahtuvuse (*Three-Phase Capacitive Load*), induktiivsuse (*Three-Phase Inductive Load*) ja aktiivtakistusena (*Three-Phase Resistive Load*). Kasutaja määrab elemendi nimisageduse,

nimipinge ja nimivõimsuse. Kõigi kolme mudeli puhul arvutatakse simulatsiooni käivituses, tuginedes kasutaja poolt sisestatud parameetrite väärtustele, aktiivtakistus, induktiivsus ja mahtuvus ning arvutatud väärtusi kasutatakse kogu simulatsiooni vältel konstantsete väärtustena. Mudelid on oma olemuselt nii pingepinge- kui sagedustundlikud ning käituvad kui konstantsed R, L ja C elemendid [1]. Kuna passiivlemendi parameetrite väärtused arvutatakse ainult üks kord simulatsiooni alguses, annab vaadeldud meetod arvutuskiiruse eelise võrreldes koormuse eksponentmudeliga. Sellest tulenevalt on käesolevat mudelit soovituslik kasutada suurtes skeemides, kus ei vaadelda eraldi koormuskäitumist.

Kolmefaasilise passiivlemendi mudelite tingmärgid on esitatud joonisel 3.4, kus aktiivtakistus on vasakpoolne, induktiivsus keskmine ja mahtuvus parempoolne element.

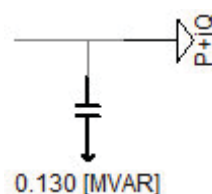


Joonis 3.4. Kolmefaasilise passiivlemendi tingmärgid.

Kirjeldatud mudel ei erine koormuse passiivlementidena – SI ühikutes kirjeldatud aktiivtakistuse, induktiivsuse ja mahtuvusena modelleerimisest, kuid lihtsustab oluliselt andmete sisestamist kuna koormused sisestatakse võimsusühikutes ning puudub vajadus võimsusandmete teisenduseks.

### Erijuhtumiteks koostatud koormusmudelid

Lisaks eespool kirjeldatud koormusmudelitele on võimalik kasutada erinevatest standardmudelitest koostatud koormusmudeleid. Uurimustöös [3] kasutati koormuse eksponentmudelit, mille ette oli ühendatud mahtuvuslik koormus. Eksponentmudeli ette lülitatud põikmahtuvuse eesmärk oli modelleerida jaotusvõrgus esinevaid liinide põikmahtuvusi. Kasutatud põikmahtuvused määrati keskpinge võrgu maatühendusvoolude põhjal ning seda kasutati täpsustamiseks jaotusvõrgu koormuse käitumist asümmeetrilise toitepinge korral [3]. Kirjeldatud koormusmudeli skeem on esitatud joonisel 3.5.



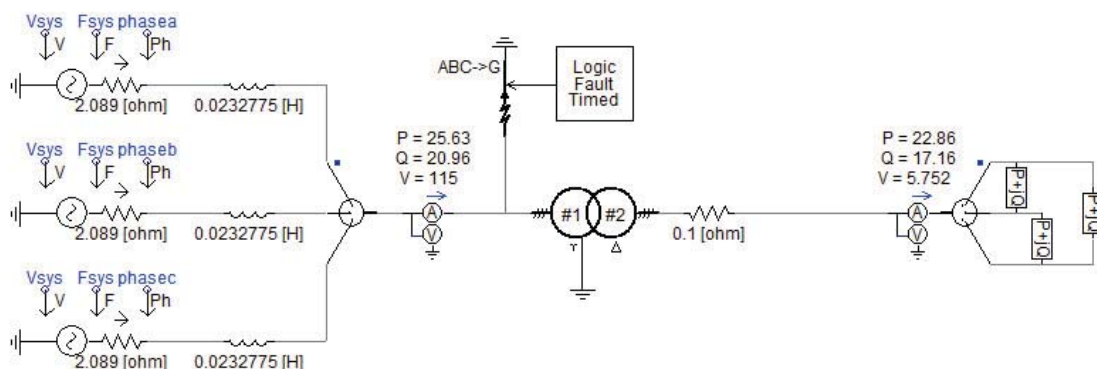
Joonis 3.5. Koormuse eksponentmudel koos põikmahtuvusega.

## 3.2 PSCAD eksponentmudeli omadused

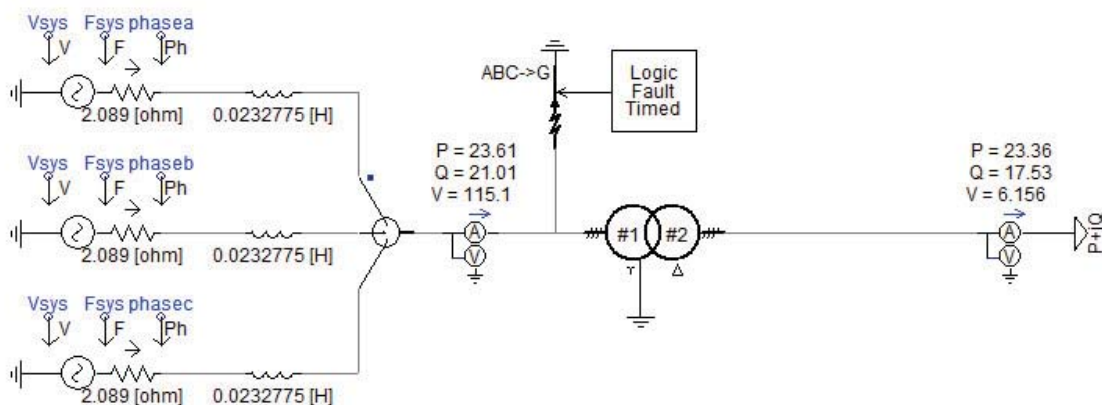
Koormuse eksponentmudeli omaduste visualiseerimiseks, käitumise uurimiseks ekstreemsematel juhtumitel ning mudeli ebakõlade väljaselgitamiseks viidi läbi katseseeria PSCAD eksponentmudeliga. Koostatud simulatsioonide tulemuste põhjal on võimalik üldistada tundlikkustegurite piirväärtusi, mis on abiks nende määramisel koormusele omase karakteristiku iseloomulike andmete puudumisel.

### 3.2.1 Simulatsioonideks koostatud mudeli kirjeldus

Koormuse eksponentmudeli omaduste uurimiseks viidi PSCAD tarkvaras läbi simulatsioonid nii fikseeritud liinikoormustega (*Fixed Load L-L*) kui faasikoormustega (*Fixed Load L-G*). Simulatsioonide käigus jälgiti koormuse käitumist nii sagedus- kui pingemuutuse korral ning lisaks testiti ka koormuse käitumist kolmefaasilise lühise korral. Koormusmudeli testimiseks koostatud mudelid on esitatud joonistel 3.6 ja 3.7. Joonisel 3.6 on esitatud skeem liinikoormuse mudeli uurimiseks ja joonisel 3.7 skeem faasikoormuse mudeli uurimiseks.



Joonis 3.6. Simulatsiooni skeem liinikoormusele.



Joonis 3.7. Simulatsiooni skeem faasikoormusele.

Joonistel 3.6 ja 3.7 kujutatud PSCAD mudelid põhinevad tüüpilise 110 kV alajaama trafo ja fiidri lihtsustatud lahendusele, mida kasutatakse laialdaselt nimetatud tarkvaras mudelite koostamisel. Esitatud PSCAD mudelid koosnevad kolmest ühefaasilisest elektrivõrgu aseskeemist, 110/6 kV jõutrafast ning koormusmudelist. Elektrivõrgu aseskeem on koostatud kasutades PSCAD tarkvara standardset pingellika moodulit „*Singe Phase Voltage source Model 1*“, mis on seadistatud kasutama *Thevenin*'i ekvivalentse näivtakistuse aseskeemi. Tavaliselt rakendatakse *Thevenin*'i ekvivalentskeemi modelleerimiseks pingellikat „*Voltage Source model 3*“, kuid kuna käesolevas uurimistöös on tarvis seadistada enamate parameetrite väärtusi kui vastav mudel seda võimaldaks, oli otstarbekas kasutada erikujulist mudelit toiteallika esitamiseks. Mudeli koostamisel on lihtsustusena arvestatud, et takistuse päri- ja vastujärgnevuskomponendid on võrdsed ning nulljärgnevustakistust ei arvestata. *Thevenin*'i aseskeemis kasutatakse Elering AS-i poolt esitatud takistuse väärtust  $2.089+7.313i \Omega$ , mis vastab keskmise elektritugevusega 110 kV alajaamale (lühisvõimsus 1690 MVA). Mudelites kasutatud 110/6 kV trafo parameetrid on esitatud tabelis 3.2. Jaotusvõrgu pingestate 6 kV ei oma käesolevas simulatsioonis olulist tähtsust ning on valitud vastavalt trafo parameetritele, mis olid uurimistöös koostajatele kättesaadavad. Mudelisse lisatud trafo mõjutab oma omaduste tõttu koormuse käitumist, seetõttu on realistlikud trafo parameetrid mudeli seisukohalt olulised.

Tabel 3.2. Trafo parameetrid.

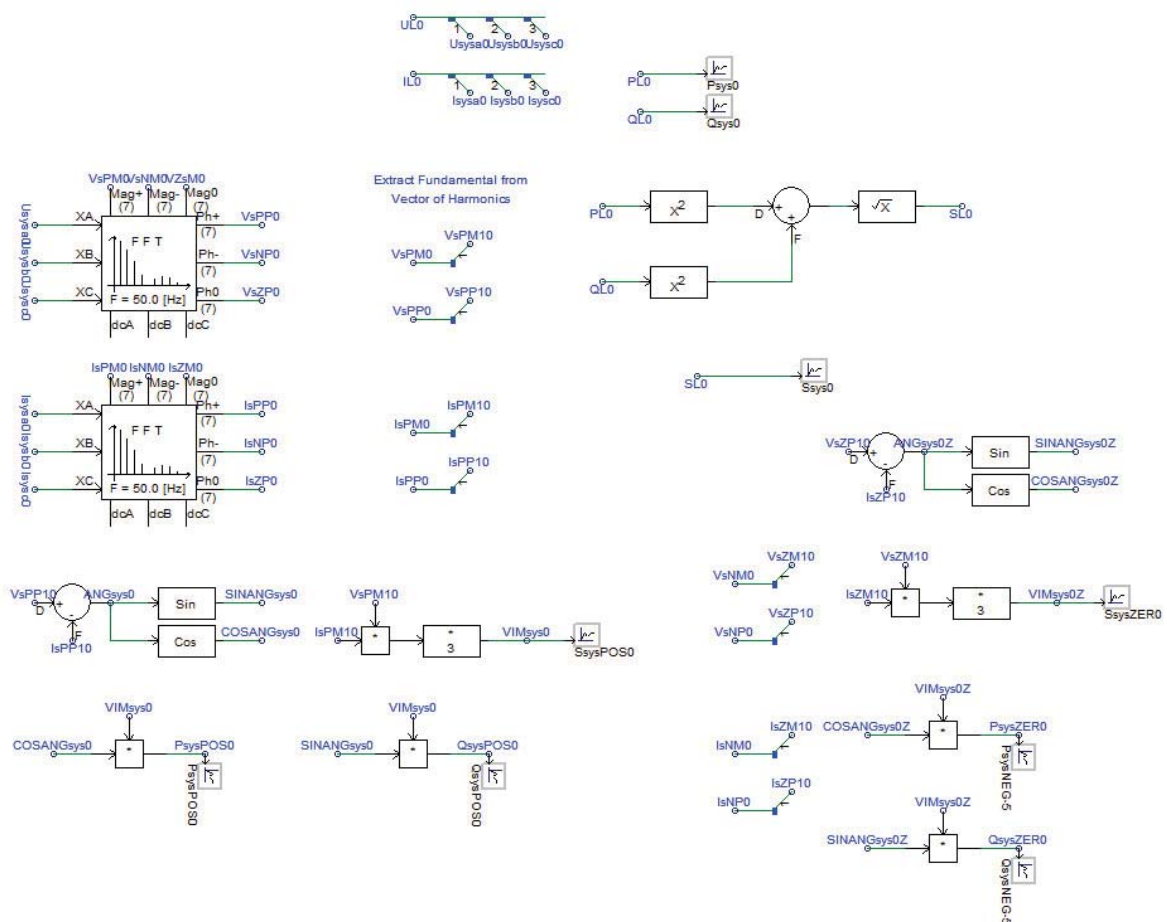
Parameeter	$S_n$ , MVA	$U_n$ , kV	$U_k\%$	$\Delta P_t\%$	$\Delta P_{Cu}$ , %	Ühendusgrupp
Väärtus	32 MVA	115/6,6	0,1032	0,00109	0,00462	YNd-11

Sümmeetriliste koormuste nimivõimsusena kasutatakse nii liini- kui faasikoormuste modelleerimisel kolme faasi summaarset näivvõimsust 31,3 MVA, millest nimiaktiivvõimsus on 25,02 MW ja nimireaktiivvõimsus 18,78 MVar. Koormuse suurus on valitud, arvestades trafo parameetrid ja elektrivõrgu aseskeemi takistusel tekkivat pingelangu, et oleks võimalik võrrelda koormusmudeli pingetundlikkustegurite mõju võrgumudeli püsitalitlusele. Koormust modelleeritakse nii induktiivse kui ka mahtvusliku iseloomuga, et uurida koormusmudeli paindlikkust erinevate koormuste esindamisel. Liinikoormuste modelleerimisel kasutatavas skeemis (joonis 3.6) on trafo ja koormuse vahele lisatud simulatsiooni mõistes väike  $0,1 \Omega$  takistus, et tekitada simulatsiooni arvutusmudeli jaoks sõlm trafo ja koormuse vahele, sest täiendava takistusega ei suuda PSCAD koostada korrektset juhtivusmaatriksit koormusmudeli

algoritmiliste lihtsustuste tõttu. Lühiskatse jaoks on skeemi lisatud kolme faasiline lühis elektrivõrgu asesseemi ja trafo vahele.

Skeemis mõõdetakse elektrilisi suurusid kahes kohas – enne trafot ning vahetult enne koormust. Tulemuste analüüsil kasutati ainult koormuse ees asuvast mõõteplokist mõõdetud suurusid. Katsete käigus mõõdeti koormuse aktiivvõimsust, reaktiivvõimsust ning valitud juhtumitel ka pinget. Aktiiv- ja reaktiivvõimsusel uuriti lisaks päri- ja vastujärgnevuskomponendi suurust.

PSCAD tarkvara standardsed mõõteseadmed mõõdavad arvutatud suurusid hetkväärtuste põhiselt, seetõttu võivad vaadeldavad aktiiv- ja reaktiivvõimsuste mõõtetulemused sisaldada vastu- ja nulljärgnevusest tingitud võnkumisi [1]. Koormuse omadustest täieliku ülevaate saamiseks on vajalik analüüsida lisaks võimsuste hetkväärtustele ka pärijärgnevuskomponente. Päri- ja vastujärgnevuskomponendi mõõtmiseks PSCAD standardkomponentidest koostatud arvutusplokk on esitatud joonisel 3.8.



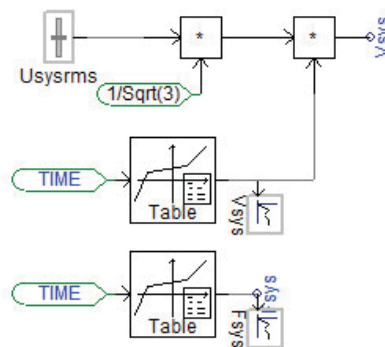
Joonis 3.8. Aktiiv- ja reaktiivvõimsuse päri- ja vastujärgnevuskomponendi arvutusplokk.

Aktiiv- ja reaktiivvõimsuse pärijärgnevuskomponendi arvutamiseks koostatud arvutusplokk põhineb „On-Line Frequency Scanner (FFT)“ mudelil, millega arvutatakse välja pinged ja voolu päri-, vastu- ja nulljärgnevuskomponentide moodulid ning faasinihkenurgad. Mudeli põhjal on võimalik arvutada soovitud komponentidele vastavad aktiiv- ja reaktiivvõimsused kasutades valemeid 3.3 ja 3.4.

$$P = 3 \cdot V_M \cdot I_M \cdot \cos(\varphi_{V_m} - \varphi_{I_m}) \quad (3.3)$$

$$Q = 3 \cdot V_M \cdot I_M \cdot \sin(\varphi_{V_m} - \varphi_{I_m}) \quad (3.4)$$

Elektrivõrgu ekvivalentse toiteallika pinged ja sagedused reguleerimiseks on PSCAD standardkomponentidest koostatud juhtimisblokk, mis on kujutatud joonisel 3.9.



Joonis 3.9. Elektrivõrgu ekvivalenti pinged ja sagedused juhtimisblokk.

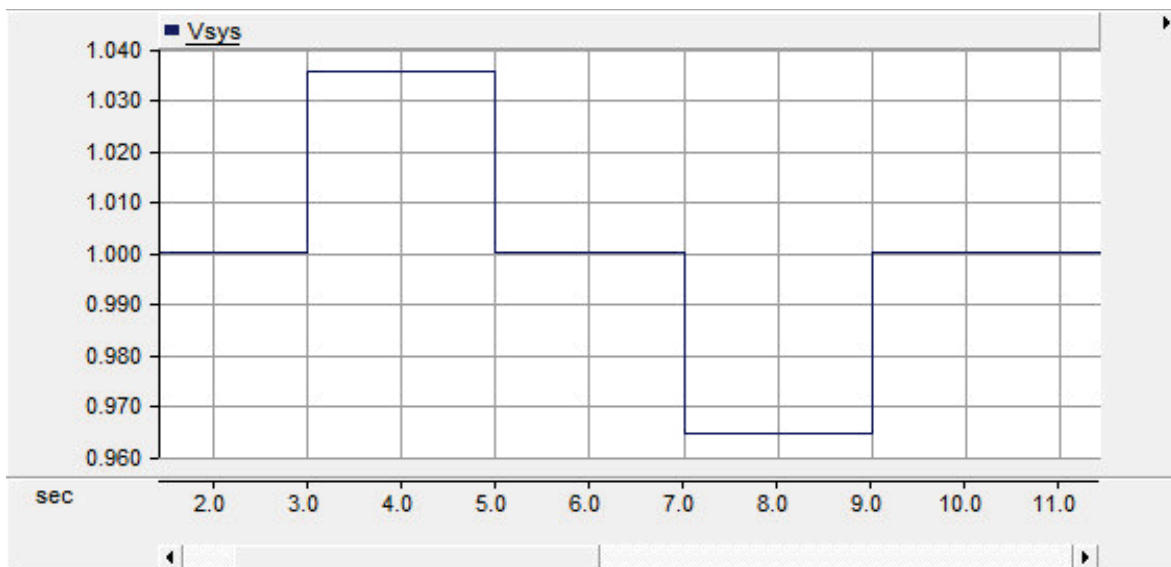
Pinged ja sagedused juhtimiseks kasutatakse „X-Y transfer function“ blokki, mis oma olemuselt on X-Y koordinaatide tabel. Juhtimisbloki komponentidesse sisestatud parameetrite väärtused võimaldavad muuta elektrivõrgu aseskeemi pinget ja sagedust vastavalt joonistel 3.10 ja 3.11 esitatud graafikutele.

### 3.2.2 Simulatsioonide kirjeldus

Koormusmudeli sagedus- ja pingetundlikkuse uurimiseks muudeti koormusmudeli tundlikkustegurite väärtusi piirides -5 kuni 5, sammuga 1, et analüüsida tegurite mõju koormusmudeli talitlusele. Simulatsioonide arvu vähendamiseks muudeti pingetundlikkuse katsetel reaktiiv- ja aktiivvõimsuse pingetundlikkustegureid, vastavalt  $K_{qu}$  ja  $K_{pu}$ , sama väärtuse võrra ning sagedustundlikkustegurite väärtused jäeti võrdseks nulliga. Sagedustundlikkuse uurimiseks kasutatud katsete korral olid analoogselt pingetundlikkusteguri väärtused nullid ning reaktiiv- ja aktiivvõimsuse sagedustundlikkustegurite, vastavalt  $K_{qf}$  ja  $K_{pf}$ , väärtusi muudeti samuti sammuga 1.



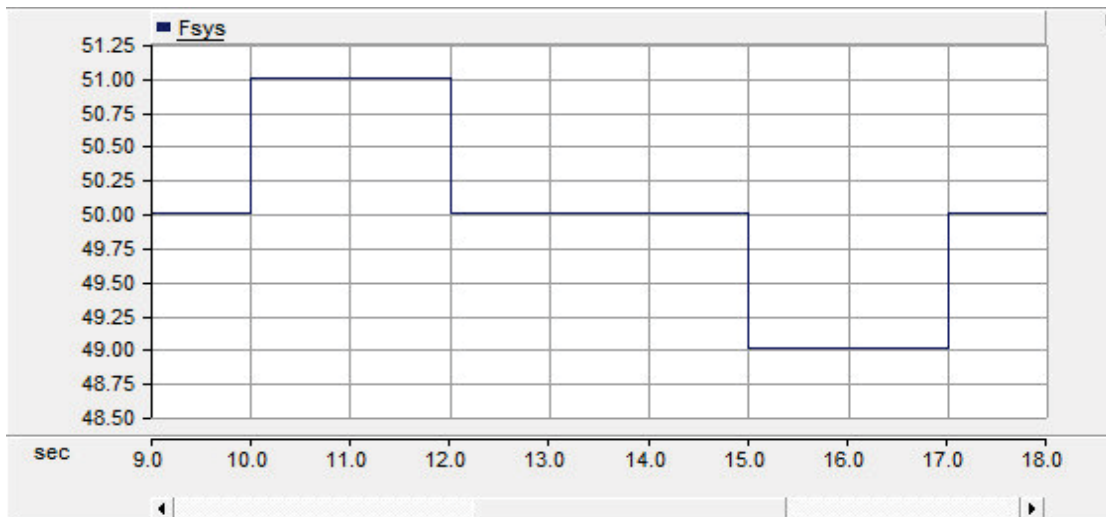
Simulatsioonidega uuriti esmalt koormusmodeli pingetundlikkust muutes võrgu askeemi toitepinge väärtust  $\pm 3,56\%$ , mis vastaks reaalses elektrisüsteemis trafo pingestmelüüti kahe astme lülitusele. Pingeväärtuse muutus on kujutatud joonisel 3.10. Hüppeline muutus on lihtsustus, mis kujutab endast halvimat juhtumit. Lisaks mudeli stabiilsuse uurimisele võimaldab järsk pingemuutus koormuse pingetundlikkusest tingitud muutuse viite vaatlemist. Simulatsioonis korraldati esmalt kahesekundiline pingehüpe,  $+3,56\%$  võrreldes nimipingega, seejärel hoiti pinget nimipingel kaks sekundit ning seejärel kahesekundiline negatiivse suunaga pingehüpe,  $-3,56\%$  nimipinge väärtusest. Kahesekundiline viide pingetaseme muutuste vahel oli piisav, et koormusmodel saavutaks stabiilse püsitalitluse uues režiimis.



Joonis 3.10. Modelleeritud pingehüpe.

Sagedustundlikkuse uurimisel lähtuti sarnasest simulatsiooni katse ülesehitusest ning elektrivõrgu askeemis teostati sageduse muutus (joonis 3.11), mille suurus oli  $\pm 1$  Hz. Sageduse muutuse korral oli mudeli stabiilse püsitalitluse saavutamiseks vajalik muutuste vahelise viite suurendamine kolme sekundini. Eesti elektrivõrgus on 1 Hz sagedushüppe toimumine väga ebatõenäoline, praktikas on sagedusmuutused tunduvamalt väiksemad ning tulenevalt elektrivõrku ühendatud pöörleva massi inertsist ei toimu sageduse muutus hetkeliselt. Kirjeldatud sageduse muutus ning selle karakteristik on võimalik vaid erijuhtumite korral ning kirjeldab koormusmodelile halvimat olukorda piirväärtuste määramiseks. Lisaks võimaldab suur sageduse muutus koormusmodeli stabiilsuse hindamist ning ebastabiilsusest lähtuvate probleemide tuvastamist. Sageduse  $\pm 1$  Hz muutuse piirid kirjeldavad olukorda, kus elektrivõrgus hakatakse teostama operatsioone sageduse stabiilsuse tagamiseks [8].

Sagedusmuutuse simulatsioonide korral on vajalik täpsuse tagamiseks päri- ja vastujärgnevuskomponendi arvutusploki FFT elementide sagedusjärgimise funktsiooni sisse lülitamine. Vastav funktsioon võimaldab sageduse muutusest tingitud mõõtevea kompenseerimist. Mõõteviga tekib FFT mudeli algoritmis, mis eeldab signaali konstantset põhisagedust. Kirjeldatud probleemi ning vea kompenseerimise meetodikat on täpsemalt kirjeldatud dokumendis [1].



Joonis 3.11. Modelleeritud sagedushüpe.

Tulenevalt asjaolust, et PSCAD tarkvara kasutatakse laialdaselt elektrisüsteemi lühiste ja sellest tulenevate dünaamiliste protsesside modelleerimiseks, vaadeldi koormusmudeli käitumist lühistalitluse korral. Lühiskatse läbiviimisel teostati 110 kV lattidel pikk kolmefaasiline lühis, mille kestvus on 0,23 s. Lühiskatsega uuriti koormuse käitumist pingetundlikkusteguri tüüpilisemate väärtuste korral, milleks on 0, 1 ja 2. Sarnaselt pingetundlikkuse katsele kasutatakse võrdset reaktiivvõimsuse pingetundlikkusteguri  $K_{qu}$  ja aktiivvõimsuse pingetundlikkusteguri  $K_{pu}$  väärtust.

Simulatsioonide läbiviimisel muudeti koormusmudeli pinge- ja sagedustundlikkust (joonisel 3.3 märgitud kui 4-7), jättes ülejäänud parameetrid konstantseks, välja arvatud koormusmudeli mahtuvusliku ja induktiivse iseloomu vahetamisel. Mahtuvusliku ja induktiivse koormusmudeli uurimisel muudeti reaktiivvõimsuse märki (joonisel 3.3 märgitud kui 2), mahtuvuslik koormus on koormusmudelis negatiivne ning induktiivne koormus on koormusmudelis positiivne.

Tabelis 3.3 on esitatud simulatsiooni tulemusena saadud jooniste tähistus ning simulatsiooni käigus kasutatud pinge- ja sagedustundlikkuse väärtused. Jooniste legendis ja tabelis 3.3 esitatud tähistel vastavad täht P ja Q vastavalt koormuse aktiiv- ja reaktiivkomponendile.



Tähiste viimase numbriga vahemikus 0 kuni 5 eristatakse pinge- või sagedustundlikkusteguri absoluutväärtusi. Kui tähises esinevad tähed POS, siis on tegemist pärijärgnevuskomponendi mõõteväärtusega.

Tabel 3.3. Joonistel kasutatud tähised ning simulatsioonides kasutatud pinge- ja sagedustundlikkusteguri väärtused.

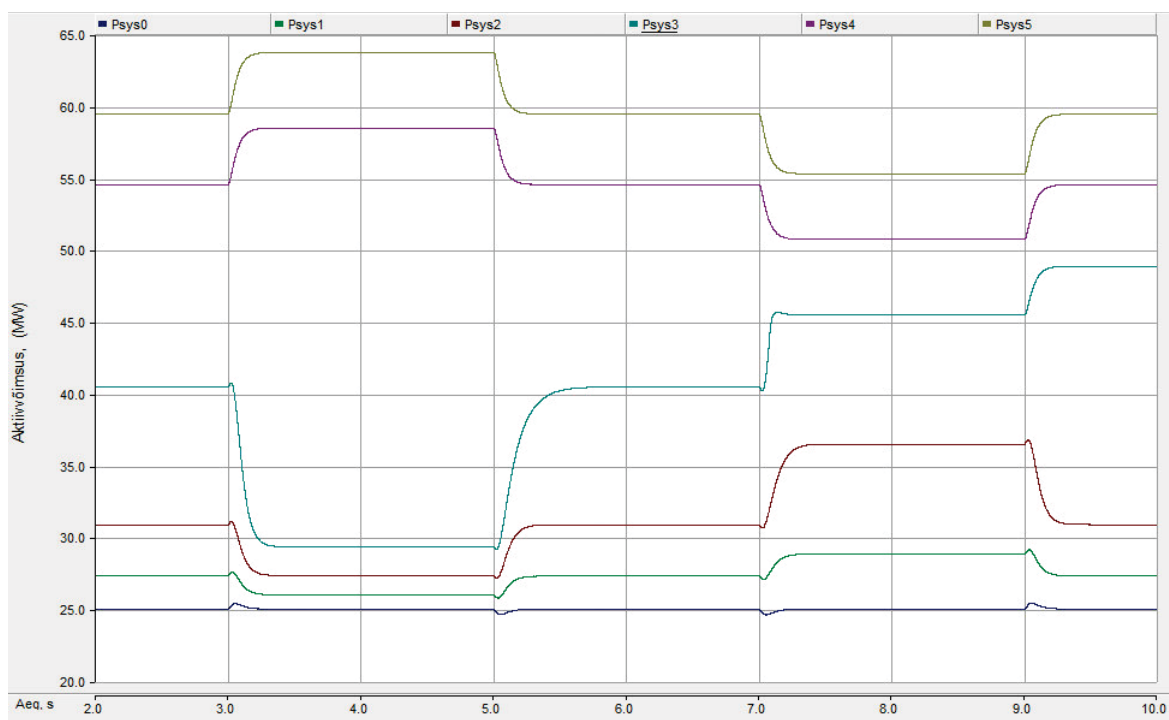
	$K_p$			$K_q$	
	-5...0	0...5		-5...0	0...5
Psys0	0	0	Qsys0	0	0
PsysPOS0	0	0	QsysPOS0	0	0
Psys1	-1	1	Qsys1	-1	1
PsysPOS1	-1	1	QsysPOS1	-1	1
Psys2	-2	2	Qsys2	-2	2
PsysPOS2	-2	2	QsysPOS2	-2	2
Psys3	-3	3	Qsys3	-3	3
PsysPOS3	-3	3	QsysPOS3	-3	3
Psys4	-4	4	Qsys4	-4	4
PsysPOS4	-4	4	QsysPOS4	-4	4
Psys5	-5	5	Qsys5	-5	5
PsysPOS5	-5	5	QsysPOS5	-5	5

### 3.2.3 Pingetundlikkuse omadused

Käesolevas alapeatükis vaadeldakse faasi- ja liinikoormuse mudeli pingetundlikkusteguri mõju eelnevalt kirjeldatud katsete tulemustele. Seejuures analüüsitakse eksponentmudeli aktiiv- ja reaktiivvõimsuse muutust eraldiseisvalt. Reaktiivvõimsuse osas vaadeldakse täiendavalt mudeli talitlust nii induktiivse kui ka mahtvusliku iseloomuga talitusrežiimis. Esmalt analüüsitakse faasikoormuse pingetundlikkusteguri  $K_{pu}$  mõjusid teguri negatiivsete väärtuste korral, väärtustel -5 kuni 0.

Joonisel 3.12 on kujutatud induktiivse iseloomuga faasikoormuse aktiivvõimsuse hetkväärtust pingetundlikkusteguri väärtustel -5 kuni 0. Tulemustest järeldub, et pingetundlikkusteguri negatiivsete väärtuste korral on koormusmudeli tegelik algkoormus ootuspäraselt suurem kui mudelisse sisestatud nimikoormus. Pingemuutuste tingimustes talitleb koormusmudel ootuspäraselt kui pingetundlikkustegur on vahemikus 0 kuni -3. Need tulemused võimaldavad konkreetsele koormusele sobivate pingetundlikkusteguri väärtuste valikut. Alates

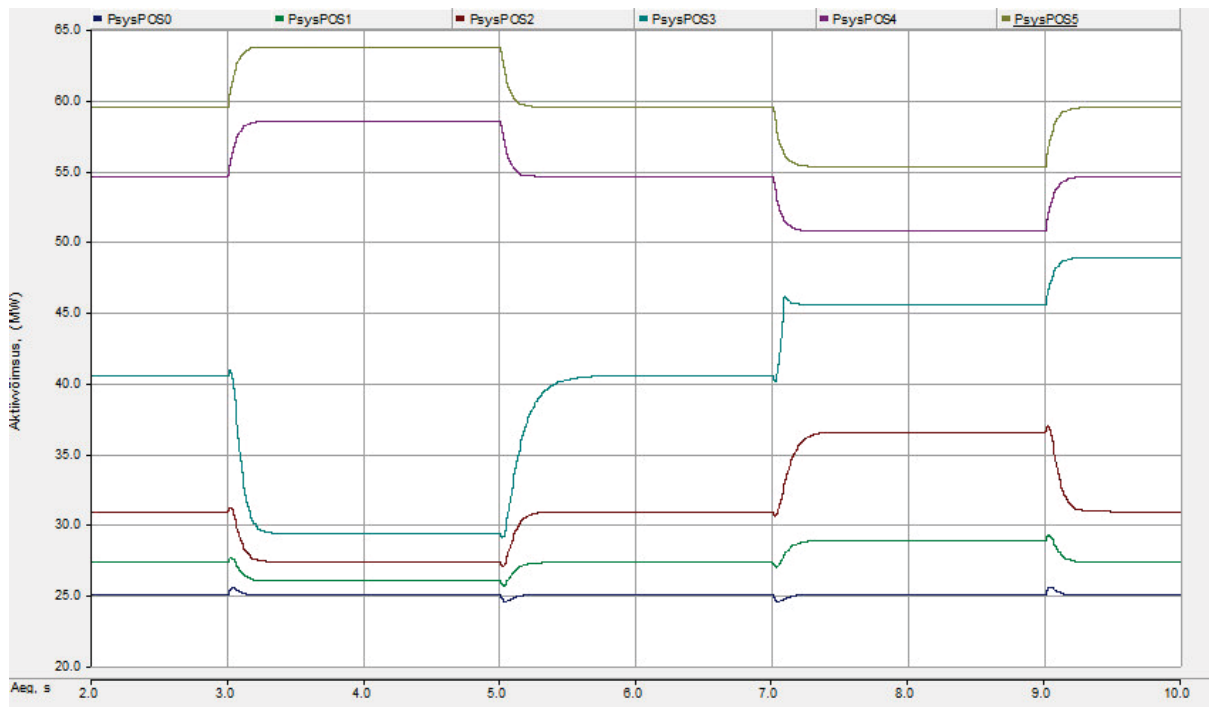
pingetundlikkusteguri väärtusest -3 (kaasaarvatud) ei talitle koormusmodel ootuspäraselt ning modelleeritud elektrivõrk talitleb ebastabiilses regioonis, kus on oht pinge kollapsi tekkimiseks. Koormusmodeli ebastabiilsele regioonile viitab pingetundlikkusteguri väärtuse -3 puhul pingelohu järgselt koormuse edasine kasvamine, kuigi eelduste kohaselt peaks koormuse väärtus taastuma esialgse püsitalitluse väärtusel. Täiendavalt viitavad mudeli ebastabiilsusele pingetundlikkusteguri väärtustega -4 ja -5 saadud tulemused, kus koormusmodel käitub vastupidiselt ootustele - pinge kasvades kasvab ka koormus, kuigi vastavalt pingetundlikkusteguri väärtusele peaks hoopis langema.



*Joonis 3.12. Induktiivse iseloomuga faasikoormuse aktiivkomponendi hetkväärtus pingetundlikkustega -5 kuni 0.*

Tulemused näitavad, et pingetundlikkusteguri väärtus -3 on käesoleva mudeli puhul piirväärtus, millest alates PSCAD tarkvara muudab koormusmodeli käitumist, seda väidet kinnitab joonisel 3.12 vastava joone ebasümmeetrilisuus võrreldes teiste karakteristikutega. Teguri väärtuste -4 ja -5 puhul näitavad tulemused, et kasutatakse teistsuguse pingetundlikkusega mudelit, seejuures mudeli vahetusega ei kaasne püsitalitluse koormuse muutumist (püsitalitluse koormus vastab pingetundlikkuste väärtustele -4 ja -5). Kirjeldatud mudeli vahetus simulatsiooni käigus eeldab olulist tähelepanu mudeli koostamisel ning võib põhjustada valesid järeldusi suurte simulatsioonide teostamisel.

Joonisel 3.13 on kujutatud faasikoormusmudeli aktiivvõimsuse pärijärgnevuskomponendi väärtust pingetundlikkusteguri väärtuse vahemikus -5 kuni 0 induktiivse iseloomuga koormusel.



Joonis 3.13. Aktiivkoormuse pärijärgnevuskomponendi pingetundlikkus piirides -5 kuni 0.

Võrreldes mõõtmise tulemusi joonistel 3.12 ja 3.13 on näha, et tulemused kattuvad, millest järeldub, et pingemuutuse puhul on koormusmudel numbriliselt stabiilne ning individuaalsete faaside takistusi muudetakse sümmeetriliselt. Tulenevalt asjaolust, et pingetundlikkust käsitletavates katsetes kattuvad koormusvõimsuste pärijärgnevuskomponendi ja hetkväärtuse mõõtetulemused, on järgnevad pärijärgnevuskomponentide mõõtetulemused esitatud aruande Lisas 1.

Tabelis 3.4 on esitatud püsitalitlusele vastavad koormuse aktiivvõimsuse hetkväärtused kirjeldatud pingetundlikkusteguri väärtuste vahemikus.

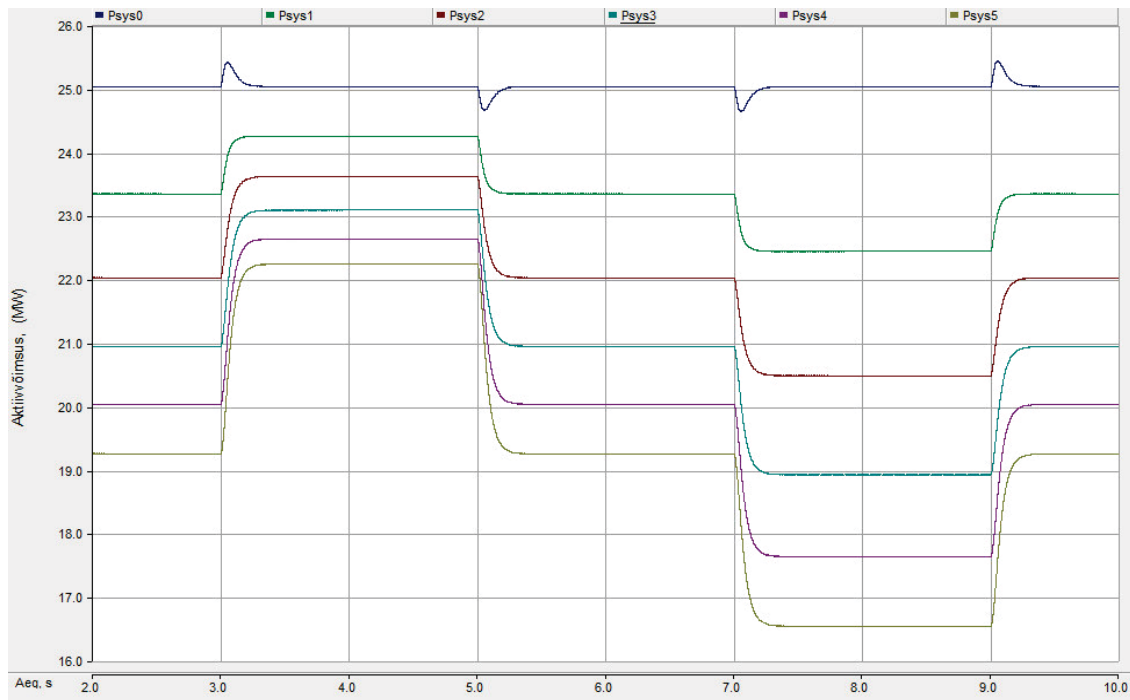
Tabel 3.4. Aktiivkoormuse hetkväärtused pingetundlikkusega 0 kuni -5.

<b>Pingetundlikkus</b>	<b>0</b>	<b>-1</b>	<b>-2</b>	<b>-3</b>	<b>-4</b>	<b>-5</b>
Aktiivvõimsuse algväärtus, MW	25	27,3	30,9	40,5	54,6	59,5

Tabelis 3.4 esitatud väärtustest ning joonisel 3.12 kujutatud tulemustest järeldub, et pingetundlikkustegurite negatiivsete väärtuste korral tekib katses positiivse tagasiside ahel, millest tingituna tegelikud koormusväärtused kasvasid suuremaks kui nimiväärtus. Positiivse tagasiside ahel on põhjustatud elektrivõrgu aseskeemis tekkiva pingelangu ja koormusmudeli käitumise koosmõjust, kus pingelangu tõttu väheneb koormuse toitepinge, mis põhjustab koormuse suurenemist ja see omakorda täiendava pingelangu. Kirjeldatud tsüklil kestab kuni saavutatakse stabiilne talitluspunkt, milleks on mudelis vaadeldud alajaama elektrilise tugevuse korral tabelis 3.4 esitatud väärtused. Tagasiside ahela tsüklit illustreerib joonisel 3.15 pingetundlikkusteguri väärtusele -5 vastav karakteristik, kus negatiivse pingetundlikkusteguri väärtuse mõjul tekkinud positiivne tagasiside põhjustab ülekandevõrgu pingelangemist alla aktsepteeritavat taset. Kuigi tulemust on võimalik mudeli häälestamise ning nimiparameetrite muutmise teel parandada, ei rakendatud seda võimalust käesolevates simulatsioonides. Samadel tingimustel teostatud simulatsioonid võimaldavad visualiseerida mudeli ekstreemseid talitluspiire ning tagavad katsetulemuste võrreldavuse.

Simulatsioonide tulemustest järeldub, et nõrga- ja keskmise tugevusega elektrivõrkudes on võimalik rakendada pingetundlikkusteguri negatiivsete väärtuste vahemikku 0 kuni -3. Seejuures tuleb simulatsioonide koostamisel ja seadistamisel olla tähelepanelik, et vältida võrgumudeli ebarealistlikku käitumist antud pingetundlikkuse regioonis, mida esines joonisel 3.12 ja tabelis 3.4. Pingetundlikkusteguri väärtused -3 kuni -5 on rakendatavad vaid vaadeldava elektrivõrgu punkti elektritugevusega võrreldes väikeste koormuste korral.

Järgnevalt vaatleme induktiivse iseloomuga faasikoormuse eksponentmudeli aktiivvõimsuse muutusi pingetundlikkusteguri väärtuse muutumisel vahemikus 0 kuni 5, mille tulemused on esitatud joonisel 3.14. Joonisel 3.14 esitatud aktiivvõimsuse graafikute põhjal on koormusmudeli talitus kogu vaadeldavas pingetundlikkusteguri väärtuste vahemikus stabiilne ning pingemuutuste tagajärjel ei teki võnkeprotsesse. Samuti ilmneb jooniselt 3.14, et eksponentmudel talitleb positiivsete aktiivvõimsuse pingetundlikkustegurite väärtuste korral vastavalt võrranditele 3.1 ja 3.2. Samalt jooniselt on võimalik märgata, et pingetundlikkusteguri väärtuse kasvades suureneb koormusmudelis pingemuutusele tekkiv viide, mis mõjutab oluliselt elektrivõrgu pinge tegelikku muutust, mille tulemused on esitatud joonisel 3.15.



Joonis 3.14. Induktiivse iseloomuga faasikoormuse aktiivkomponendi hetkväärtus pingetundlikkustega 0 kuni 5.

Tabelis 3.5 on esitatud faasikoormuse aktiivvõimsuse väärtused püsitalitlusel pingetundlikkusteguri väärtuste vahemikus 0 kuni 5.

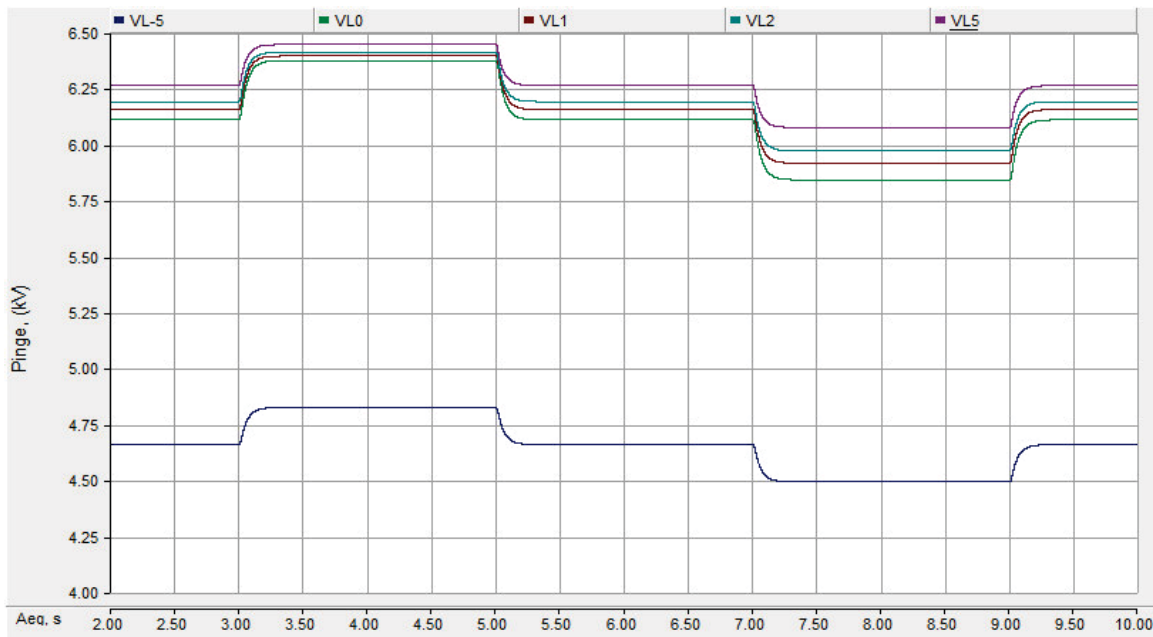
Tabel 3.5. Aktiivkoormuse hetkväärtused pingetundlikkusega 0 kuni 5.

<b>Pingetundlikkus</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
Aktiivvõimsuse algväärtus, MW	25,0	23,4	22	21	20	19,3

Võrreldes joonisel 3.14 kujutatud tulemusi joonisel 3.12 esitatud negatiivsete pingetundlikkusteguri väärtustega, talitleb koormusmudel positiivses regioonis kõigil juhtumitel üheselt ning mudeli käitumist on võimalik prognoosida kogu pingetundlikkusteguri seadistamisvahemikus. Mõlemal joonisel on esitatud tulemused juhtumile, kus pingetundlikkusteguri väärtuseks on seatud 0 ning mõlemal juhul on tulemused võrdväärased, mis näitab, et mõlema pingetundlikkus regiooni vaatlemiseks teostatud simulatsioonides talitleb mudel korrektselt. Sarnaselt pingetundlikkusteguri negatiivse väärtuse korral tekkinud pinge ja koormuse tagasisidele, tekib positiivsete tegurite väärtustega püsitalitluse korral tagasiside ahel elektrivõrgu pinge ning koormuse tegeliku suuruse vahel. Seejuures positiivse regiooni puhul ei teki ohtlikku koosmõju - pingetundlikkuse teguri positiivsete väärtuste korral väheneb koormus pinge vähenemisel ning samaväärselt pinge kasvades suureneb koormus, selline

talitus on oma olemuselt stabiliseeruv. Tingimusel, et elektrivõrgu tegelik pinge on väiksem kui koormusmodelisse sisestatud mudeli nimipinge, on koormusmodeli tegelik koormus väiksem mudelisse sisestatud nimikoormusest, mida on näha joonisel 3.14 ning tabelis 3.5.

joonisel 3.15 on kujutatud liinipingete efektiivväärtused faasikoormusel pingetundlikkustega -5, 0, 1, 2 ja 5. VL-5 on liinipinge faasikoormusel pingetundlikkusega -5, VL0 on vastavalt pingetundlikkusega 0, VL1 on pingetundlikkusega 1, VL2 on pingetundlikkusega 2 ja VL5 on pingetundlikkusega 5.

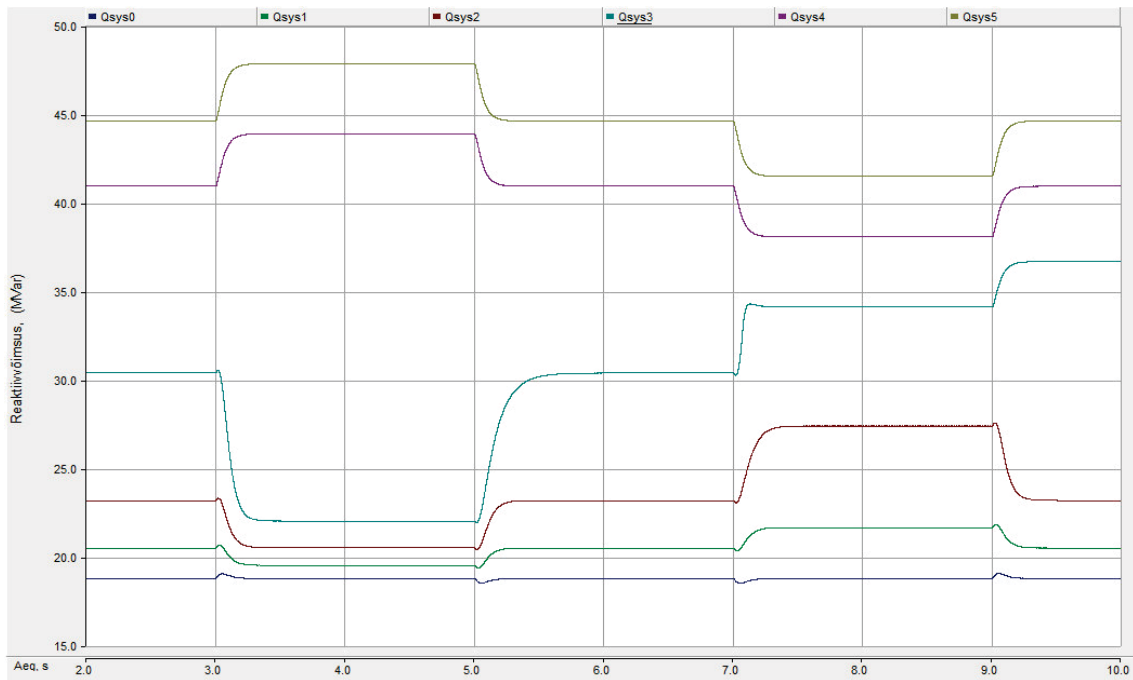


Joonis 3.15. Pinged induktiivse iseloomuga koormustel erinevate pingetundlikkustega.

Joonistel 3.15 esitatud liinipingete efektiivväärtuste graafikud kinnitavad võimsusmuutuste tulemusi ning on võimalik märgata, et pingetundlikkusteguri positiivsed väärtused mõjutavad koormusele rakenduvat pinget vähem kui teguri negatiivne väärtus. Negatiivse pingetundlikkusega faasikoormusmodeli rakendamisel uurimistöodes kaasneb oht, et suure pingemuutuse korral võib pinge negatiivne koormus tagasiside põhjustada eksitavaid tulemusi.

Positiivse pingetundlikkuse korral on pingetulemustest näha koormusmodeli ootuspärast käitumist, kus pingetundlikkuse 0 korral koormusmodel mõjutab minimaalselt liinipingete muutust ning maksimaalse teguri 5 juures vähendavad koormusmodeli omadused oluliselt liinipingete muutumise ulatust. Analoogselt tulemused näitavad, et pingemuutumise kiirus, väheneb pingetundlikkuse teguri väärtuse suurenemisega.

Järgnevalt vaatleme induktiivse iseloomuga faasikoormusmodeli reaktiivvõimsuse käitumist pingetundlikkusteguri  $K_{qu}$  negatiivsetel väärtustel -5 kuni 0.



Joonis 3.16. Induktiivse faasikoormuse reaktiivkomponendi hetkväärtus pingetundlikkusega -5 kuni 0.

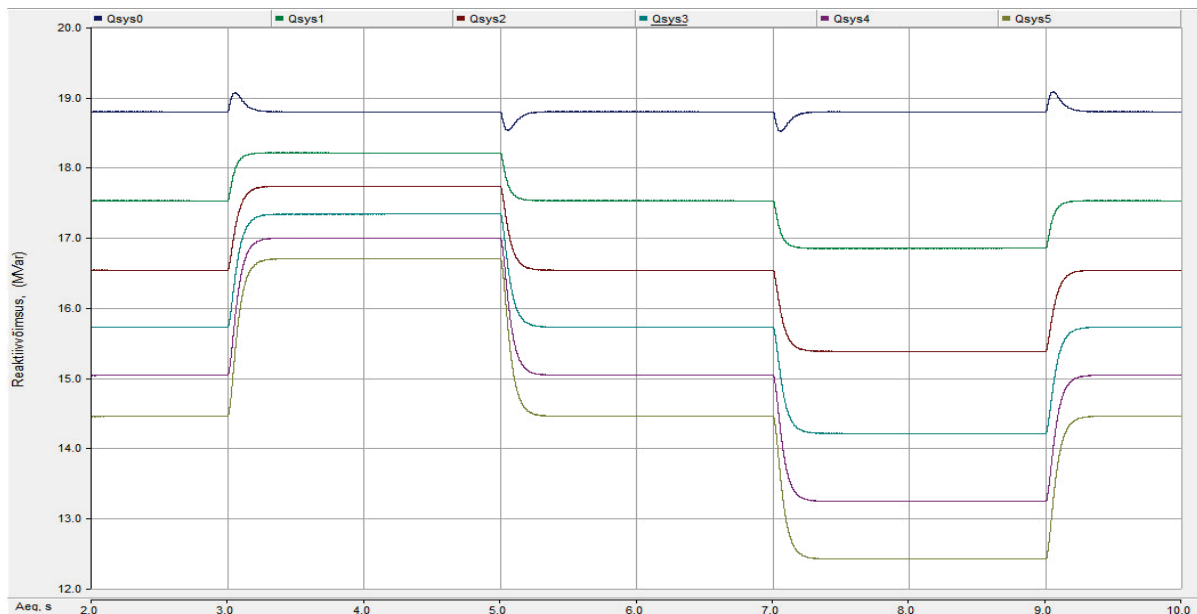
Joonisel 3.16 esitatud tulemustest järeldub, et faasikoormusmudeli induktiivse iseloomuga reaktiivvõimsus käitub sarnaselt eelnevalt vaadeldud aktiivvõimsusele (joonis 3.12). Graafikute kuju sarnaste pingetundlikkustegurite väärtuste korral on samaväärne ning reaktiivvõimsuse korral toimub alates pingetundlikkusteguri väärtusest -3 koormusmudeli talitluses oluline muutus, mida põhjustab PSCAD tarkvaras mudeli automaatne ümbervahetus. Reaktiivvõimsuse pingetundlikkusteguri väärtustel vahemikus -5 kuni 0 tekib samuti positiivse tagasiside ahel ning püsitalitluses on tegelik reaktiivkoormus suurem kui mudelisse sisestatud nimikoormus. Sarnast käitumist kinnitavad Tabelites 3.4 ning 3.6 esitatud püsitalitluse koormuste väärtused, mis kasvavad samas proportsioonis nii aktiiv- kui ka reaktiivvõimsuse korral. Näiteks kasvavad pingetundlikkustegurite  $K_{pu}$  ja  $K_{qu}$  väärtuse -5 korral pingetundlikkusest tingitud positiivse tagasiside tõttu nii aktiiv- kui ka reaktiivvõimsus 2.38 korda võrreldes nimiväärtusega. Joonisel 3.16 kujutatud graafikute püsitalitlusväärtused on esitatud Tabelis 3.6.

Tabel 3.6. Reaktiivkoormuse hetkväärtused pingetundlikkusega -5 kuni 0.

<b>Pingetundlikkus</b>	<b>0</b>	<b>-1</b>	<b>-2</b>	<b>-3</b>	<b>-4</b>	<b>-5</b>
Reaktiivvõimsuse algväärtus, MVar	18,8	20,5	23,2	30,4	41,0	44,6

Arvestades aktiiv- ja reaktiivkoormuse suurenemist püsitalitlusel seoses pingetundlikkusega (Tabelid 3.4 ja 3.6) koormatakse ülejäänud modelleeritud elektrivõrgu komponente üle nende nimivõimsuse. Reaktiivvõimsuse negatiivsete pingetundlikkustega teostatud simulatsioonidest järeldub, et elektriliselt nõrga- ja keskmise tugevusega elektrivõrkudes on võimalik rakendada tegurite väärtuste vahemikku 0 kuni -3 analoogselt aktiivvõimsuse pingetundlikkusteguritele. Seejuures on pingetundlikkusteguri väärtus -3 ja väiksemad väärtused rakendatavad vaid elektrivõrgu tugevuse suhtes väikese koormuse korral. Eritüüpsete lahenduste puhul, kus on vajalik rakendada pingetundlikkusteguri negatiivseid väärtusi, on tarvilik rakendada täiendavaid meetmeid mudelite peenhäälestamiseks.

Järgnevalt vaatleme induktiivse iseloomuga reaktiivvõimsuse pingetundlikkusteguri positiivse regiooni omadusi. Joonisel 3.17 on kujutatud induktiivse iseloomuga faasikoormuse reaktiivvõimsuse hetkväärtust pingetundlikkusteguri väärtuste vahemikus 0 kuni 5.



Joonis 3.17. Induktiivse faasikoormuse reaktiivkomponendi hetkväärtus pingetundlikkusega 0 kuni 5.

Joonisel 3.17 kujutatud tulemustest järeldub, et induktiivse iseloomuga koormus pingetundlikkusteguri väärtuste vahemikus 0 kuni 5 käitub analoogselt aktiivkoormusele samades pingetundlikkuse piirides. Tuginedes allikale [2], talitleb koormus pingetundlikkuse 0 korral konstantse võimsusega, pingetundlikkuse 1 korral konstantse vooluga ning pingetundlikkuse 2 korral konstantse takistusega koormusena. Tabelis 3.7 on esitatud joonisel 3.17 esinenud reaktiivkoormuste algväärtused.

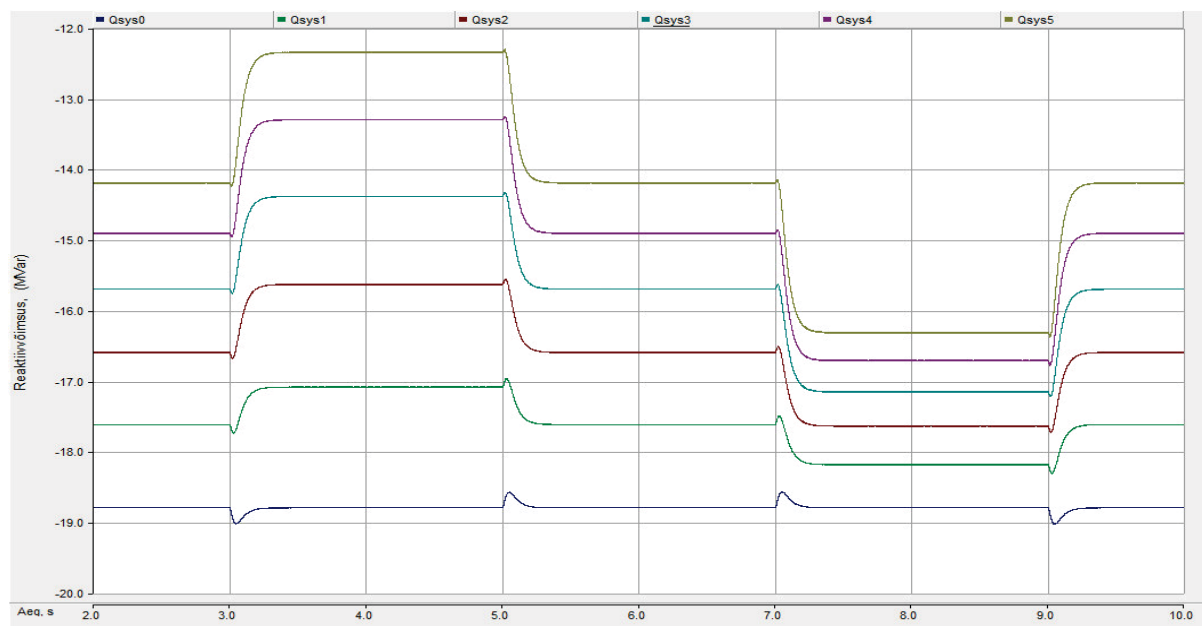


Tabel 3.7. Reaktiivkoormuse hetkväärtused pingetundlikkusega 0 kuni 5.

Pingetundlikkus	0	1	2	3	4	5
Reaktiivvõimsuse algväärtus, MVar	18,8	17,5	16,5	15,7	15,0	14,5

Tulenevalt induktiivse iseloomuga koormusmudeli omadustest pingetundlikkusteguri  $K_{qu}$  positiivses regioonis on mudel rakendatav kõigi positiivsete väärtuste korral ning oht eksimuste tekkeks on väiksem kui negatiivse regiooni korral. Suuremate teguri väärtuste juures tuleb rakendada täiendavaid meetodeid, et saavutada piisava täpsusega tulemused.

Järgnevalt vaatleme mahtvusliku iseloomuga reaktiivkoormuse pingetundlikkusest tulenevaid omadusi. Joonisel 3.18 on kujutatud mahtvusliku iseloomuga faasikoormuse reaktiivvõimsuse hetkväärtust pingetundlikkusteguri väärtuse vahemikus -5 kuni 0.

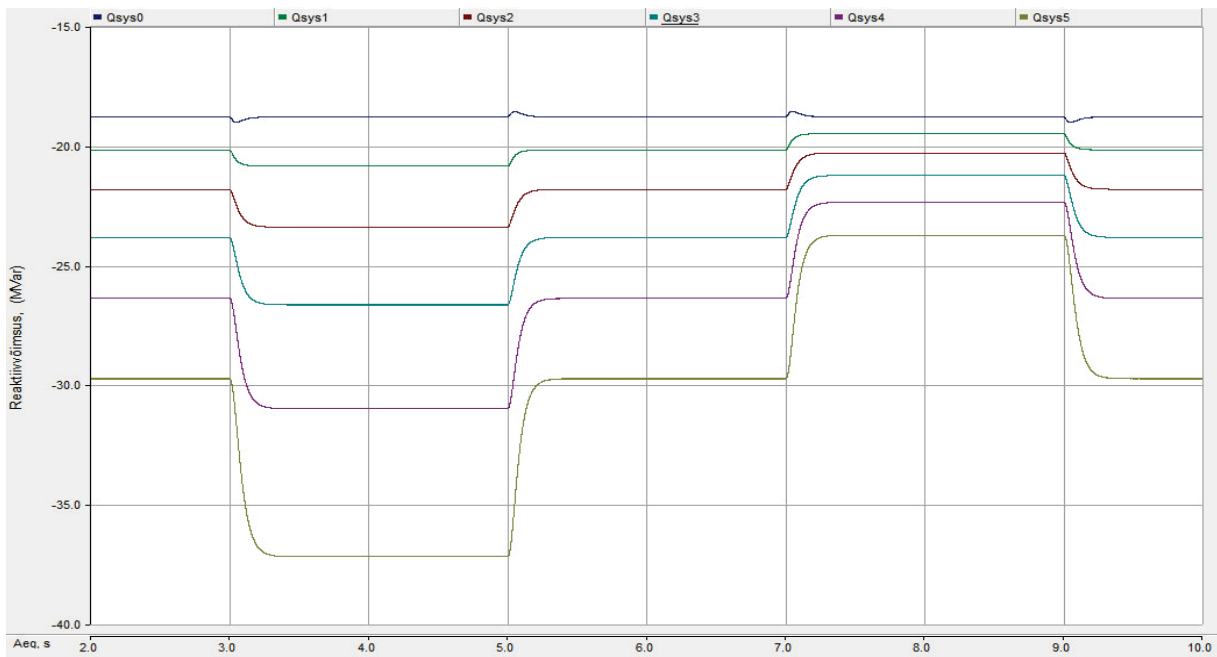


Joonis 3.18. Mahtvusliku faasikoormuse reaktiivkomponendi hetkväärtus pingetundlikkusega -5 kuni 0.

Joonisel 3.18 esitatud tulemused kinnitavad võrrandile 3.2 vastavat koormusmudeli käitumist pingetundlikkusteguri negatiivses regioonis. Selles olukorras pinge suurenemisel genereeritav reaktiivvõimsus väheneb ning analoogselt pinge vähenedes suureneb. Vastav talitus on oluliselt erinev klassikalisest mahtvuslikust talitluskarakteristikust ning selline režiim on võimalik, kui koormuse oluliseks osaks on energiat tarbivad jõuelektroonika seadmed, mis võimaldavad lokaalse võrgupinge reguleerimist.

Vaadeldav mudel käitub kogu vaadeldavas pingetundlikkuse piirkonnas üheselt ning ei esine ebakorrapärast talitlust. Võrreldes induktiivse iseloomuga koormusega on mahtuvusliku iseloomuga koormuse käitumine oluliselt erinev seoses asjaoluga, et mahtuvusliku iseloomuga koormuse korral tõstab genereeritav reaktiivvõimsus elektrivõrgu pinget, mis kompenseerib aktiivvõimsuse põhjustatud pingelangu ning seetõttu talitleb kogu koostatud koormusmudel negatiivse pingetundlikkuse regioonis stabiilsemalt.

Joonisel 3.19 on kujutatud mahtuvusliku iseloomuga faasikoormuse reaktiivvõimsuse hetkväärtust pingetundlikkusteguri väärtuse vahemikus 0 kuni 5.

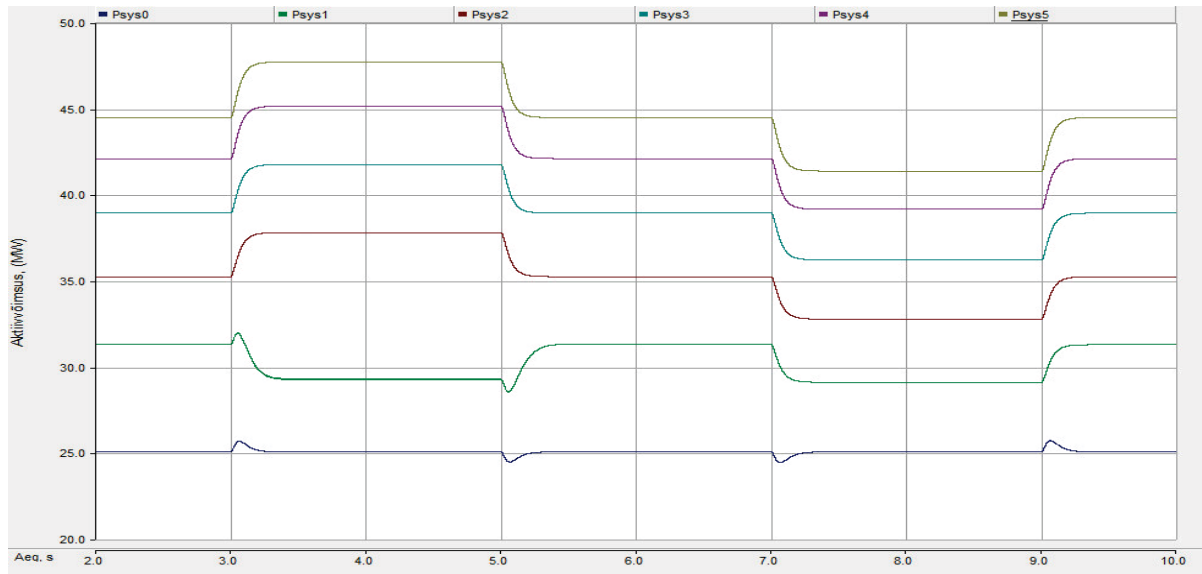


Joonis 3.19. Mahtuvusliku faasikoormuse reaktiivkomponendi hetkväärtus pingetundlikkusega 0 kuni 5.

Joonisel 3.19 esitatud tulemused vastavalt võrrandile 3.2 ning koormusmudelis genereeritav reaktiivvõimsus kasvab vastavalt elektrivõrgu pinge suurenemisele ning analoogselt väheneb pinge langemise korral. Tulemused näitavad, et positiivse pingetundlikkuse piirkonna puhul tekib koostatud elektrivõrgu mudelis pinge suhtes positiivne tagasiside ahel, mille tõttu koormusmudelis kasvab genereeritav reaktiivvõimsus kuni tasakaalupunkti saavutamiseni püsitalitluses. Kirjeldatud talitlus on elektrivõrgus ebasoovitav kuna võib põhjustada ülepinget. Mahtuvusliku iseloomuga koormusmudeli rakendamisel on vajalik teostada täppishäälestamist, et välistada pingetundlikkusest tingitud ebatäpsusi.

Järgnevalt vaatleme liinikoormusmudeli pingetundlikkuse omadusi elektrivõrgu pinge muutumisel analoogsetel alustel kui eelnevalt vaadeldud faasikoormusmudeli korral.

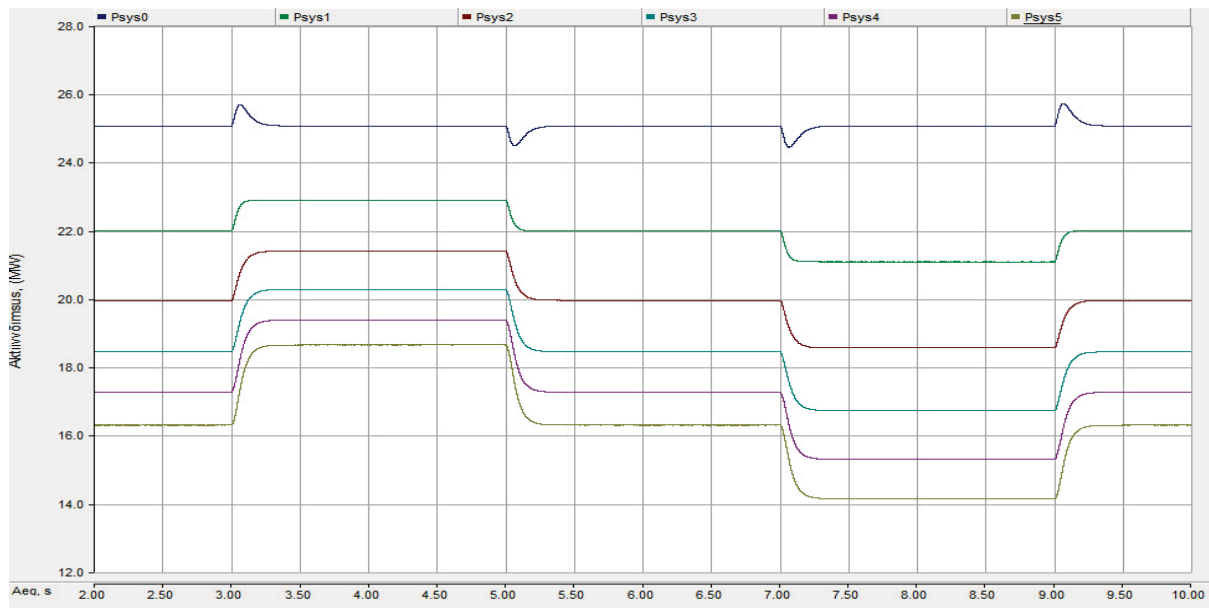
Joonisel 3.20 on kujutatud induktiivse iseloomuga liinikoormuse aktiivvõimsuse hetkväärtust pingetundlikkusteguri väärtuste vahemikus -5 kuni 0.



Joonis 3.20. Liinikoormuse aktiivkomponendi hetkväärtus pingetundlikkusega -5 kuni 0.

Joonisel 3.20 esitatud tulemustest selgub, et liinikoormuse mudel talitleb pingel muutusel sarnaselt faasikoormusmudelile. Taaskord tekib pingel suhtes positiivse tagasiside ahel, mis põhjustab koormuse püsitalitluse väärtuse olulist suurenemist võrreldes nimiväärtusega, kuid võrreldes tulemusi joonisega 3.12 selgub, et koormusmudel käitub faasikoormusmudelilt erinevalt. Suuremate pingetundlikkusteguri väärtuste korral on koormuse püsitalitluse väärtus suurem kui faasikoormusel ning väiksemate pingetundlikkusteguri väärtuste korral jällegi väiksem. Erinevus tuleneb koormuse kolmnurk ühenduse omadustest, mistõttu suuremate pingetundlikkuse väärtuste korral on võimalik suurem pingemuutus ning tulenevalt faasinihkenurkade piiratusel kolmnurga geomeetria tõttu on koormuse suurenemine piiratud väiksemate tegurite korral. Täiendavalt näitavad tulemused, et nõrkades ning keskmise elektrilise tugevusega elektrivõrkudes on antud koormusmudelit võimalik rakendada vaid pingetundlikkusteguri väärtusega -1. Väiksemate pingeteguri väärtuste korral muudab tarkvara koormusmudeli tüüpi ning kuna mudel ei järgi eeldatavat karakteristikut, siis võivad simulatsiooni tulemused olla ebasobivad. Koormusmudeli pingetundlikkusteguri negatiivseid väärtusi on võimalik rakendada täies ulatuses vaid tugevates elektrivõrkudes ja elektrilise tugevuse suhtes väikeste koormuste korral.

Joonisel 3.21 on kujutatud induktiivse iseloomuga liinikoormuse aktiivvõimsuse hetkväärtust pingetundlikkusteguri väärtuste vahemikus 0 kuni 5 koormusel.



Joonis 3.21. Liinikoormuse aktiivkomponendi hetkväärtus pingetundlikkusega 0 kuni 5.

Joonisel 3.21 esitatud tulemustest järeldub, et liinikoormuse mudel talitleb ootuspäraselt  $K_{pu}$  positiivse piirkonna korral. Võrreldes jooniseid 3.21 ning 3.14 selgub, et mudelid talitlevad sarnaselt ning mõlema mudeli puhul on mudeli käitumine üldtingimustel ootustele vastavalt prognoositav. Tulemusi detailsemalt võrreldes selgub, et liinikoormuse mudel on püsitalitlusel tundlikum elektrivõrgu pinge erinevusele mudelisse sisestatud nimipingest ning sellest tulenevalt on püsitalitlusel koormused väiksemad võrreldes faasikoormustega sama  $K_{pu}$  korral, väljaarvatud kui  $K_{pu}$  on võrdne nulliga. Sellisel juhul talitlevad mudelid samaväärselt. Lisaks näitavad tulemused, et liinikoormuse puhul muutub koormus pinge hüpete korral väiksemas ulatuses, mistõttu elektrivõrgu pingel on võimalik muutuda suuremas ulatuses. Tulenevalt väiksemast koormusest on liinikoormuse mudeli puhul samadel katse tingimustel elektrivõrgu liinipinge kõrgem, kui seda on faasikoormuse korral.

Tulemuste põhjal on samaväärselt faasikoormusmudeliga võimalik liinimudelit rakendada modelleerimisel kogu  $K_{pu}$  vahemikus, kuid seejuures eeldab mudeli kasutamine enamat koormuse täppis seadistamist ratsionaalsete tulemuste saavutamiseks.

Tulenevalt liinikoormuse mudeli sarnasest käitumisest faasikoormuse mudeliga on täiendavalt liinikoormuse mudeli simulatsioonide tulemused esitatud Lisas 1 ning täiendavalt käesolevas alapeatükis mudelit edasi ei analüüsita.

### **3.2.4 Pingetundlikkuse omaduste kokkuvõte**

Koormuse eksponentmudeli pingetundlikkuse simulatsioonidest selgus, et faasikoormuse mudelil on võimalik nii aktiiv- kui ka reaktiivvõimsuse negatiivseid pingetundlikkusteguri väärtusi rakendada vaid piiratud juhtumitel, mille puhul on tagatud koormusmudeli ühene rakendatavus. Erandiks on seejuures mahtuvusliku iseloomuga reaktiivkoormuse mudel, mille puhul negatiivne pingetundlikkus on laialdasemalt rakendatav ning võib osutada otstarbekaks jõuelektroniliste muunduritel põhinevate tarbijate lihtsustatud modelleerimiseks.

Faasikoormusmudeli aktiiv- ja reaktiivvõimsuse pingetundlikkustegurite positiivsed väärtused on kasutatavad kogu seadistatavas ulatuses ning pingetundlikkuse määramisel tuleks hinnata koormuse tüübi või simulatsiooni eesmärgi põhjal teguri sobivat väärtust. Täpsem tulemus on võimalik saavutada rakendades mõõtetulemuste põhjal määratud üldistatud pingetundlikkustegurite väärtusi.

Võrreldes pingemuutuste mõju faasi- ja liinikoormusmudelite toimimisele selgus, et mudelid talitlevad sarnaselt ning peamised erisused on tingitud kolmnurkühenduse eripäradest. Piisava täppisseadistusega on võimalik mõlemaid mudeleid rakendada pingetundlikkuse seisukohast samaväärsete tulemustega.

Tulemused näitasid, et koormuse pingetundlikkustegurid mõjutavad oluliselt koormuse talitlust simulatsioonides ning täpsete tulemuste saamiseks tuleks teostada mõõtmiste põhine tundlikkustegurite sobitamine. Seetõttu tuleks konkreetsete alajaamade sobilike pingetundlikkustegurite väärtuste määramiseks läbi viia katsemõõtmised Elering AS-i ülekandevõrgus.

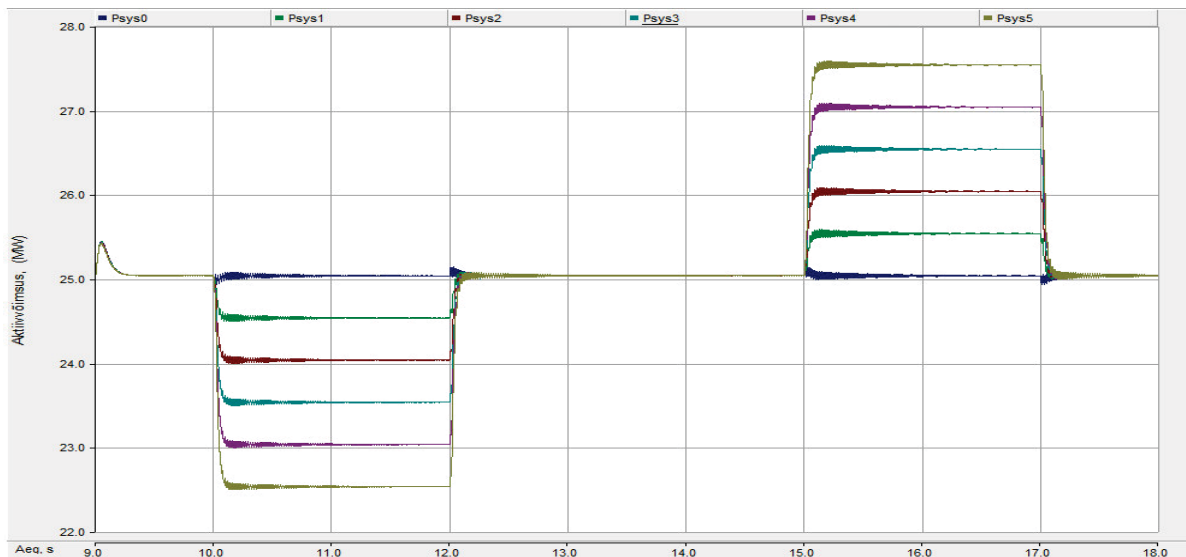
Mõõteinformatsiooni puudumisel on simulatsioonide tulemuste põhjal soovituslik kasutada mudeli seadistamisel pingetundlikkustegurite nullväärtusi, et saavutada korrektne koormusvoogude jagunemine ning sõlmepinged, mille põhjal seada täpsemad koormusmudeli nimiparameetrid. Seadistatud mudeli puhul on soovituslik rakendada simulatsioonides aktiiv- ja reaktiivvõimsuse pingetundlikkusteguri väärtust 2, mille puhul eksponentmudel vastab konstantse takistusega mudelile [2] ning vältida pingetundlikkuse negatiivset regiooni. Informatsiooni puudulikkuse tingimustes on soovituslik rakendada konstantse takistusega mudelit kuna mudeli reaktsioon pingemuutustele on piisavalt suur, et kirjeldada üldjuhtumitel halvimat juhtumit ning eeldatav tekkiv viga on väiksem võrreldes suurema tundlikkusteguri väärtuse kasutusega. Kui simulatsiooni tingimused ei võimalda rakendada teguri väärtust 2,

võib tundlikkusteguri väärtus langetada 1 peale ning kui koormuste dünaamikat mitte arvestada, siis rakendada teguri väärtust 0.

### 3.2.5 Sagedustundlikkuse omadused

Käesolevas alapeatükis vaadeldakse faasi- ja liinikoormusmodelite sagedustundlikkustegurite omadusi vastavalt alapeatükis 3.2.2 esitatud simulatsiooni kirjeldusele. Tulenevalt faasikoormusmodeli ning liinikoormusmodeli tulemuste kokkulangevusest on käesolevas osas täpsemalt analüüsitud faasikoormusmodeli talitlust ning liinikoormusmodeli tulemused on esitatud Lisas 1. Lisaks joonistele 3.22 kuni 3.28 on sagedustundlikku koormust iseloomustavaid jooniseid Lisas 1.

Joonisel 3.22 on kujutatud induktiivse iseloomuga faasikoormuse aktiivvõimsuse hetkväärtust sagedustundlikkuse vahemikus -5 kuni 0.



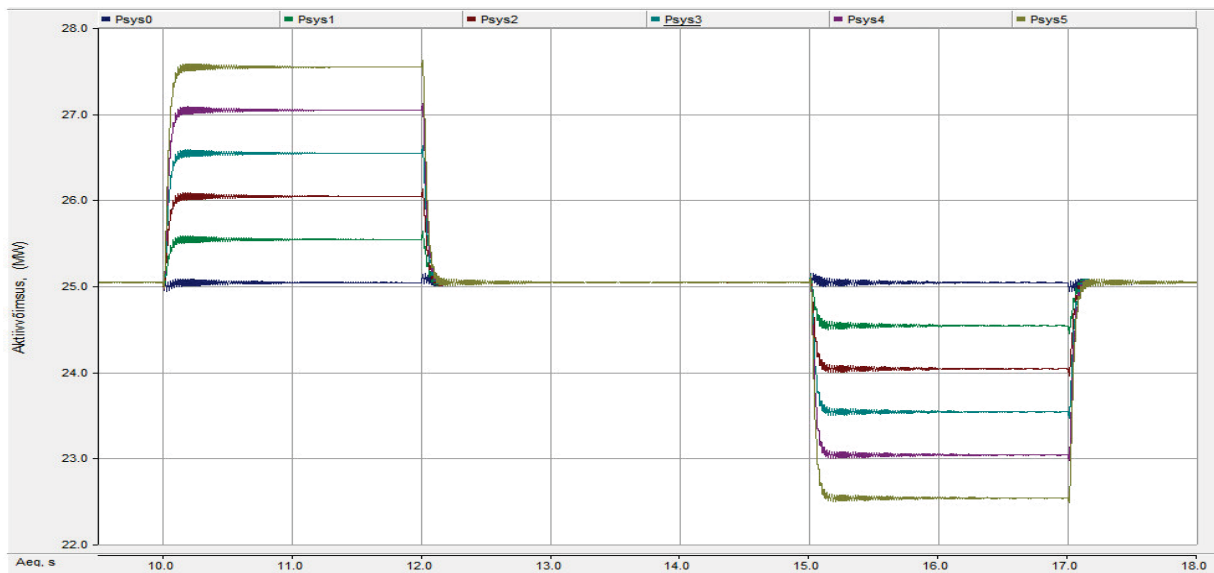
Joonis 3.22. Induktiivse faasikoormuse aktiivkoormuse hetkväärtus sagedustundlikkusega -5 kuni 0.

Joonisel 3.22 esitatud tulemused illustreerivad faasikoormuse aktiivvõimsuse ootuspärast muutust  $\pm 1$  Hz sageduse muutuse korral. Sagedustundlikkuse teguri negatiivse regiooni puhul talitleb koormusmodel analoogselt pingetundlikkuse muutuste juures vaadeldule ning mudeli tegelik aktiivkoormus väheneb vastavalt sageduse suurenemisele. Seejuures on joonisel 3.22 esitatud tulemustest näha, et sagedustundlikkuse puhul ei teki püsitalitluse juures koormuse muutumist, mis on tingitud mudeli lihtsustustest ning ekvivalentsete pingesallikate kasutamisest, mille puhul ei ole koormusel võimalik mõjutada ülekandevõrgu sagedust. Antud lihtsustus on lubatud tulenevalt asjaolust, et vastava suurusjärguga koormus ei mõjuta

ülekandevõrgu sagedust. Võrreldes jooniseid 3.12 ning 3.22 järeldub, et koormusmodel reageerib oluliselt kiiremini elektrivõrgu sageduse muutumisele kui pingemuutusele, samas tundlikkusteguri väärtuste regioonis.

Jooniste 3.22 kuni 3.26 põhjal esineb sageduse muutuse tagajärjel aperioidiliselt sumbuv võnkumine sõltumata sagedustundlikkustegurite väärtusest. See näitab, et sageduse muutuse tagajärjel tekib mudelis transient, mis sumbuib ning mudel saavutab stabiilse püsitalitluse. Vaadeldud transient võib põhjustada täiendavaid häiringuid teistes vaadeldavates mudelites ning võib tulemusi moonutada. Käesolevas projekti osas ei analüüsitud põhjalikumalt antud võnkeprotsessi tekkepõhjust, kuid seda tuleks teostada projekti järgnevas etapis.

Joonisel 3.23 on kujutatud induktiivse iseloomuga faasikoormuse aktiivvõimsuse hetkväärtust sagedustundlikkuse vahemikus 0 kuni 5.



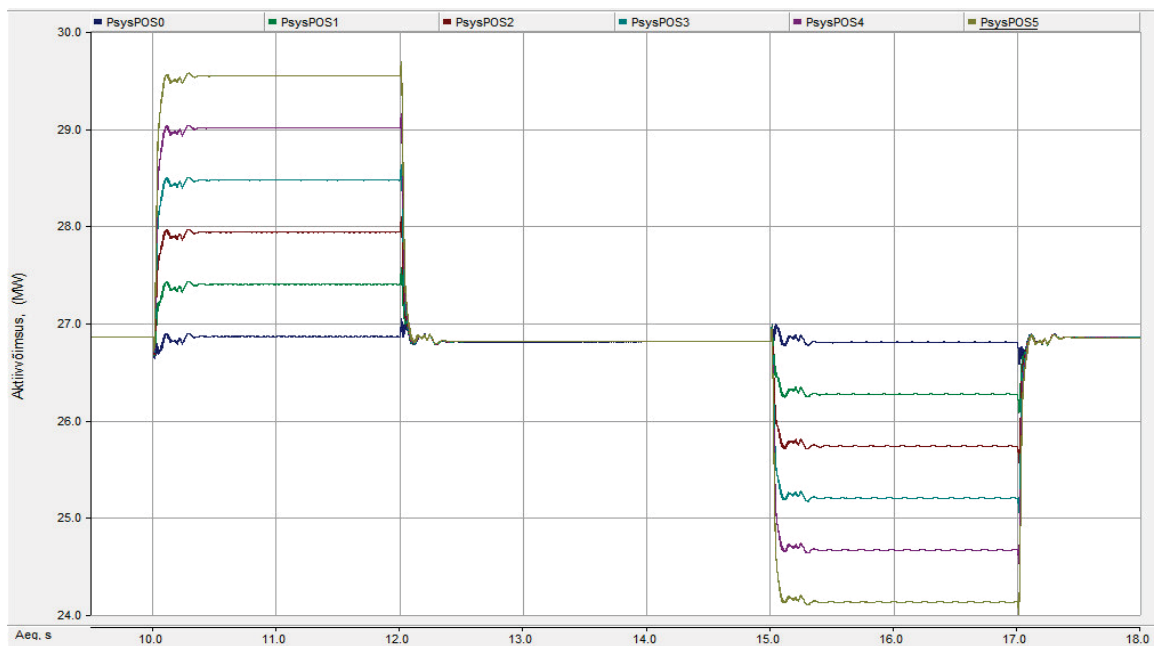
Joonis 3.23. Induktiivse faasikoormuse aktiivkoormuse hetkväärtus sagedustundlikkusega 0 kuni 5.

Joonisel 3.23 esitatud tulemused näitavad, et faasikoormusmodel talitleb sagedustundlikkuse teguri  $K_{pf}$  positiivses regioonis analoogselt negatiivse regiooniga ning tulemuste erinevus on tingitud vaid tundlikkusteguri märgi erinevusest. Võrreldes jooniseid 3.22 ning 3.23 järeldub, et sagedustundlikkuse puhul on faasikoormusmodel sümmeetriline ning mõlema regiooni puhul on aktiivvõimsuskomponendi muutused võrdsed. Võrreldes aktiivvõimsuse muutmise ulatust sagedusmuutuse ning pingemuutuse korral (joonised 3.12, 3.13 ning 3.22, 3.23) on tulemustest näha, et sagedustundlikkus mõjutab oluliselt vähem faasikoormusmodeli tegelikku koormust ning kõik vaadeldavad negatiivsed  $K_{pf}$  väärtused on mudeli puhul rakendatavad. Tegemist on ootuspärase tulemusega, sest pingetundlikkustegur toimib suhtpinge astendajana

ning sagedustundlikkus toimib sagedusmuudu kordajana. Samuti on pingehüpe suurus 3,78% ja sagedushüpe ainult 2% nimiväärtusest. Täpsed aktiivvõimsuskomponendi muutused on esitatud tabelis 3.8.

Järgnevalt vaatleme faasikoormuse aktiivvõimsuse sagedustundlikkuses tulenevat pärijärgnevuskomponendi muutust, mis võimaldab aktiivvõimsuse 50 Hz komponendi analüüsist võnkeprotsessist tingitud muutuste eemaldamist.

Joonisel 3.24 on kujutatud induktiivse iseloomuga faasikoormuse aktiivvõimsuse pärijärgnevuskomponendi sagedustundlikkuse vahemikus 0 kuni 5.



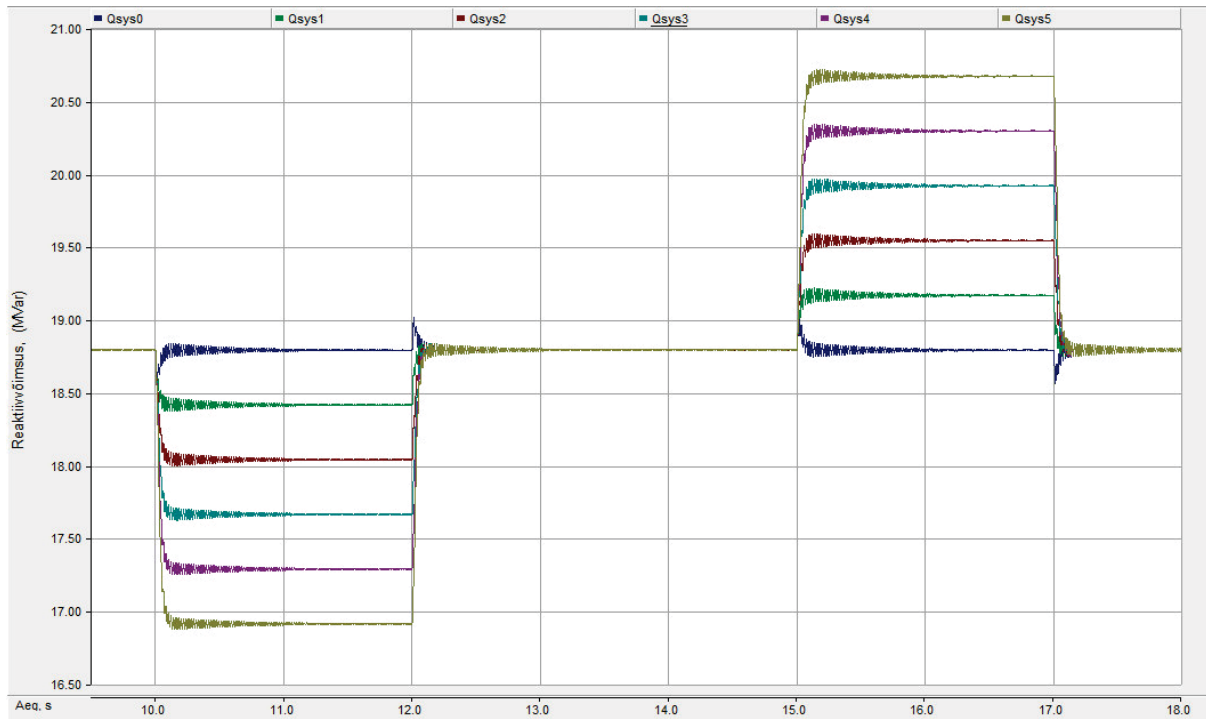
Joonis 3.24. Induktiivse faasikoormuse aktiivkoormuse pärijärgnevuskomponent sagedustundlikkusega 0 kuni 5.

Jooniselt 3.24 ilmneb, et kõikide  $K_{pf}$  teguri väärtuste korral esineb mõõdetud pärijärgnevuskomponendis võnkeprotsess. Käesoleval hetkel ei ole selge, kas pärijärgnevus komponendis tekkiv võnkeprotsess on tingitud mõõtesadmena kasutatud FFT ploki sagedustundlikkusest ning sagedusejärgimise funktsiooni ebatäpsusest või esineb vaadeldavas aktiivvõimsuses protsess ka tegelikult. Vastavat küsimust tuleb järgnevas projekti etapis täiendavalt vaadelda koos täpsemate mõõtemetoodikate ning andmete analüüsiga, kuna pärijärgnevuskomponendis tekkiv võnkeprotsess võib oluliselt mõjutada teiste mudelite talitlemist ning tekitada soovimatuid häiringuid.

Järgnevalt vaatleme induktiivse iseloomuga faasikoormuse reaktiivvõimsuse komponendi sagedustundlikkuse omadusi.



Joonisel 3.25 on kujutatud induktiivse iseloomuga faasikoormuse reaktiivvõimsuse hetkväärtust sagedustundlikkuse vahemikus -5 kuni 0.

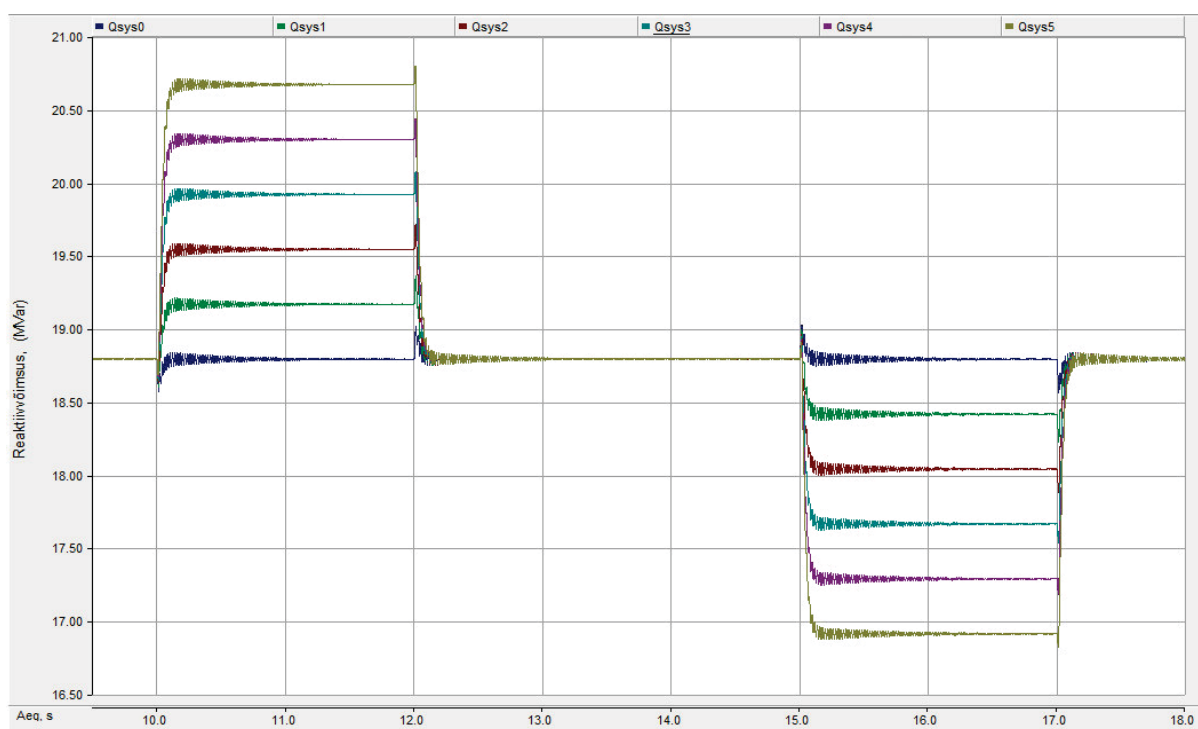


Joonis 3.25. Induktiivse faasikoormuse reaktiivkoormuse hetkväärtus sagedustundlikkusega -5 kuni 0.

Joonisel 3.25 esitatud reaktiivvõimsuse hetkväärtuste graafikutelt jäeldub, et mudel talitleb vastavalt võrrandist 3.2 tekkinud ootustele ning kõik sagedusest tingitud muutused on sarnased aktiivvõimsuse komponendi puhul märgitud omadustele. Oluline on seejuures, et reaktiivvõimsuskomponendi puhul tekib oluliselt suurema amplituudiga võnkeprotsess sageduse muutusest tingituna ning  $K_{qf}$  nullväärtuse puhul tekib sageduse taastumisel märgatav reaktiivvõimsuse ülevõnge.

Joonisel 3.26 on kujutatud induktiivse iseloomuga faasikoormuse reaktiivvõimsuse hetkväärtust sagedustundlikkuse vahemikus 0 kuni 5.

Võrreldes joonistel 3.25 ning 3.26 esitatud tulemusi jäeldub, et ka reaktiivvõimsuse korral on võimsuse muutus sümmeetriline algväärtuse suhtes ning muutuse ulatused on mõlema sagedustundlikkuse regioonis võrdsed. Koormuse muutuste suunad on tingitud sagedustundlikkuse regiooni omadustest analoogselt aktiivvõimsuse komponendi puhul kirjeldatuga. Arvestades reaktiivvõimsuse sagedustundlikkuse muutmise ulatust (tabel 3.8) nii positiivse kui ka negatiivse sagedustundlikkuse korral on kogu mudelis kasutatav tundlikkusvahemik (-5 kuni 5) rakendatav.



Joonis 3.26. Induktiivse faasikoormuse reaktiivkoormuse hetkväärtus sagedustundlikkusega 0 kuni 5.

Sagedustundliku faasikoormuse aktiiv- ja reaktiivkomponendi muutumist +1 Hz suurusel sageduse muutusel on kirjeldatud tabelis 3.8.

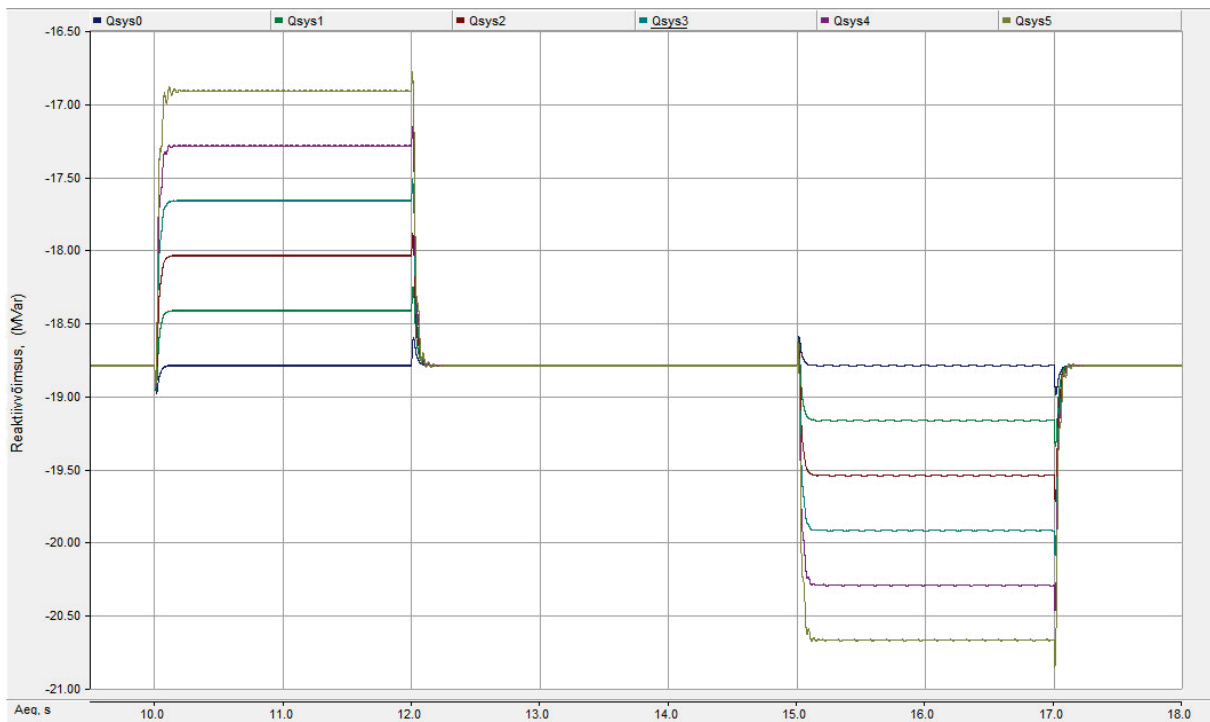
Tabel 3.8. Sagedustundlikku faasikoormuse muutused sagedushüppel 1 Hz.

$K_f$	-5	0	1	2	5
$\Delta P$	-2,5	0	0,5	1	2,5
$\Delta Q$	-2	0	0,4	0,8	2

Järgnevalt vaatleme mahtvusliku iseloomuga faasikoormuse sagedustundlikkuse omadusi sageduse muutusel  $\pm 1$  Hz kui teguri  $K_{qf}$  väärtus muutub vahemikus -5 kuni 5.

Joonisel 3.27 on kujutatud mahtvusliku iseloomuga faasikoormuse aktiivvõimsuse hetkväärtust sagedustundlikkuse vahemikus -5 kuni 0.

Vaadeldes joonistel 3.27 ning 3.28 esitatud simulatsiooni tulemusi järeldub, et mahtvusliku iseloomuga koormus käitub vastavalt eelnevalt kirjeldatud induktiivsele koormusele ning mõlemad  $K_{qf}$  teguri muutumise regioonides. Sellest tulenevalt on mudel rakendatav nii positiivses kui ka negatiivses pingetundlikkuse regioonis.

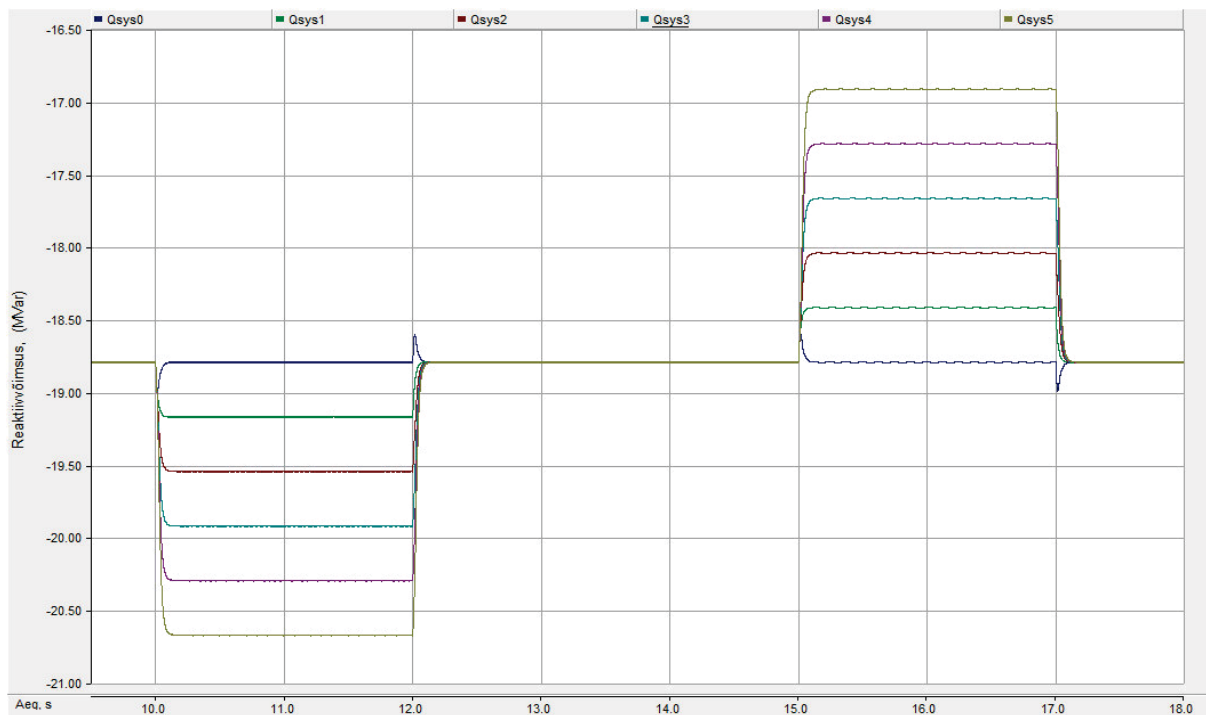


Joonis 3.27. Mahtvusliku faasikoormuse reaktiivkoormuse hetkväärtus sagedustundlikkusega -5 kuni 0.

Võrreldes mahtvusliku iseloomuga faasikoormuse talitlust tulemusi eelnevalt vaadeldud induktiivse iseloomuga faasikoormuse ning aktiivvõimsuse komponendi talitlusega järeldub tulemustest, et mahtvusliku iseloomuga faasikoormuse puhul tekib oluliselt väikese amplituudiga võnkeprotsess ning võngete periood on oluliselt pikem teiste komponentide juures vaadeldutega. Antud mudelite erisust tuleks täpsemalt vaadelda projekti järgnevas etapis läbiviidavas analüüsis.

Käesolevas osas esitatud tulemuste põhjal saab järeldada, et sageduse muutusest tingitud võnkumine mõjutab enam induktiivse iseloomuga koormust ning seal tekkiv võnkeprotsess kandub üle aktiivvõimsus komponenti. Induktiivse komponendi suurem mõju on tingitud induktiivtakistuse füüsikalistest omadustest ning suuremast sõltuvusest sagedusest. Sellest tulenevalt mõjutab sageduse väärtuse väike muutus olulisel määral induktiivtakistuse väärtust, samas mahtvusliku takistuse puhul mõjutab sageduse muutus takistuse väärtust marginaalselt tulenevalt pöördvõrdelisest suhtest. Takistuste sõltuvus sagedusest selgitab osaliselt erinevate reaktiivvõimsus komponentide puhul tekkivate võnkeprotsesside erisust.

Joonisel 3.28 on kujutatud faasikoormuse reaktiivvõimsuse hetkväärtust sagedustundlikkuse vahemikus 0 kuni 5 mahtvusliku iseloomuga koormusel.



Joonis 3.28. Mahtvusliku koormuse reaktiivvõimsuse sagedustundlikkus piirides 0 kuni 5.

### 3.2.6 Sagedustundlikkuse omaduste kokkuvõte

Sagedustundlikkuse analüüsi järeldus, et sageduse muutuse korral talitles koormusmudel vastavalt võrranditest 3.1 ning 3.2 tekkinud ootustele ning võrreldes pingetundlikkusteguriga mõjutab sagedustundlikkustegur tegelikku koormust vähem.

Simulatsioonide tulemused näitasid, et kogu vaadeldavas sagedustundlikkuse vahemikus ei teki tundlikkusteguri väärtusi välistavaid talitlusrežiime, millest lähtudes on mudeli puhul võimalik rakendada kõiki vaadeldavaid teguri väärtusi. Seejuures näitasid nii aktiiv- kui ka reaktiivvõimsuse komponentide simulatsioonide tulemused, et kogu vaadeldavas sagedustundlikkuse vahemikus tekib võimsusväljundis aperioidiliselt sumbuv vönkeprotsess. Pärijärgnevuskomponendi analüüsi tulemused näitasid, et ülejäänud mudeli komponentide osa täpse mõju hindamiseks ei piisa siiani rakendatud meetodikast ning tekkivat vönkeprotsessi ja selle analüüsi meetodikaid tuleb täpsemalt vaadelda projekti järgnevas etapis.

Arvestades simulatsioonis tehtud suurt sageduse muutust ning koormusmudelis tekkivat väljundvõimsuse muutuse ulatust mõjutab koormusmudeli sagedustundlikkus simulatsiooni tulemusi oluliselt vähemal määral kui koormusmudeli pingetundlikkus. Simulatsioonide täpsustamiseks ning tüüpiliste sõlmalaajamade koormuse sagedustundlikkuse määramiseks tuleks teostada vastavad mõõtmised Elering AS elektrivõrgus. Tulenevalt asjaolust, et normaaloludes on sageduse muutused väikesed, on antud sõltuvust keerukas määrata ning

mõõtmisi oleks otstarbekas teostada teiste katsete käigus näiteks Eesti elektrivõrgu eralduskatse käigus.

Mittetäieliku informatsiooni tingimustes oleks otstarbekas sagedustundlikkust koormusmodelites 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 koormusmodelitega teostada sageduse muutusi, mistõttu sagedustundlikkuse mitte arvestamine ei põhjusta olulist viga valdavas osas simulatsioonides.

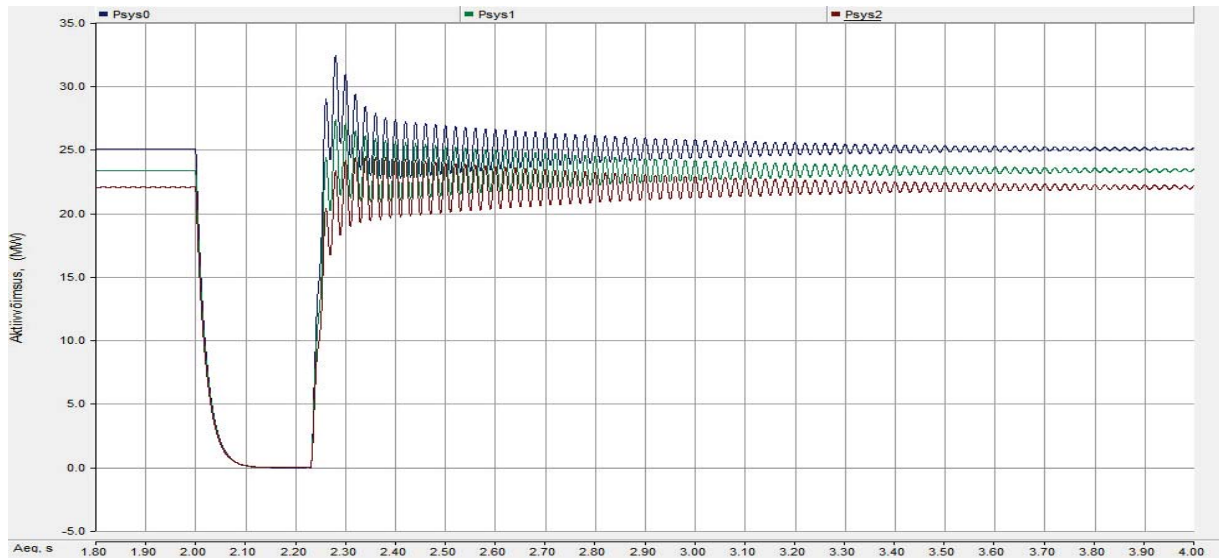
Järgnevas projekti etapis võiks täiendavalt vaadelda koormusmodeli sagedustundlikkuse omadusi juhtumil, kus koormusmodeli toitepinge sisaldab kõrgemaid harmoonikuid, mis võiksid huvi pakkuda just vönkeprotsesside jälgimise seisukohast.

### ***3.2.7 Lühiskatsed pingetundliku koormusmodeliga***

Käesolevas peatükis vaadeldakse nii faasi- kui ka liinikoormusemodeli lühistalitlust pikendatud kolmefaasilise lühise korral vastavalt alapeatükis 3.2.2 esitatud simulatsiooni kirjeldusele. Esmalt käsitletakse faasikoormuse ning seejärel liinikoormuse lühiskatsete tulemusi. Lisaks joonistele 3.29 kuni 3.36 on pingetundliku koormuse lühistalitlust iseloomustavaid ning täiendavaid jooniseid esitatud Lisas 1.

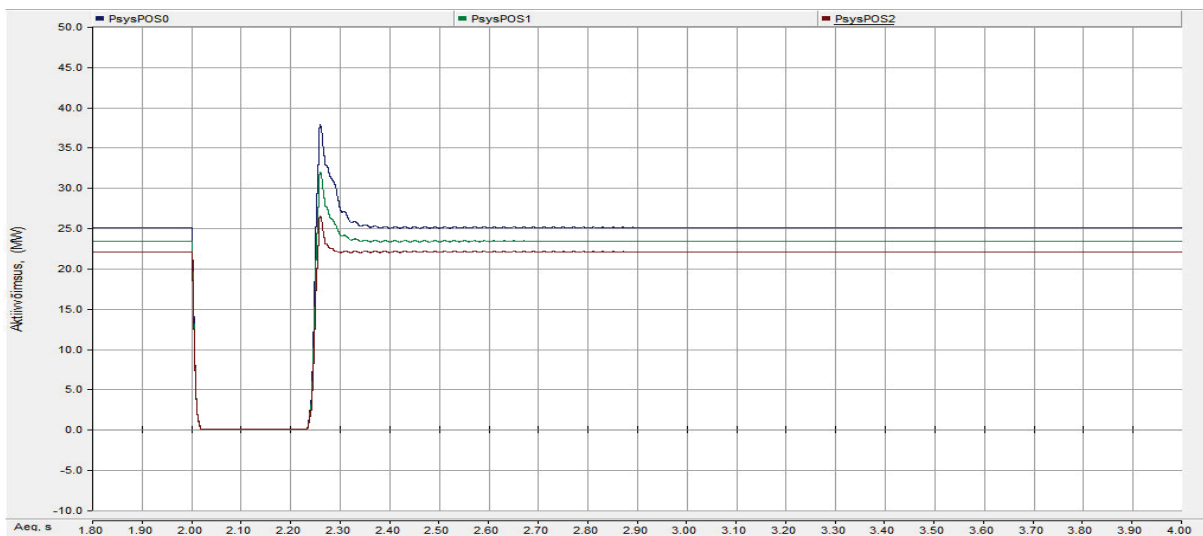
Esmalt vaatleme faasikoormuse aktiivvõimsuskomponendi lühistalitlust pingetundlikkuse teguri enimlevinud väärtustel 0 kuni 2. Nimetatud väärtusi kasutatakse näiteks ZIP mudeli rakendamisel.

Joonisel 3.29 on kujutatud faasikoormuste aktiivvõimsuse hetkväärtusi lühise korral kui koormusmodeli pingetundlikkusteguri väärtust muudetakse vahemikus 0 kuni 2. Joonisel esitatud tulemused näitavad, et koormusmodel talitleb enne lühist ning lühise ajal vastavalt koormusmodeli pingetundlikkuse analüüsi tulemustele ning lühistalitus kulgeb ootuspäraselt. Lühistalitlusest taastumisel tekib koormusmodeli väljundis aktiivvõimsuskomponendi aperioidiliselt sumbu, elektrivõrgu sagedusest suurema sagedusega vönkuv transient.



Joonis 3.29. Induktiivse faasikoormuse aktiivvõimsuse hetkväärtus lühise ajal.

Joonisel 3.30 on kujutatud faasikoormuste aktiivvõimsuse pärijärgnevuskomponenti lühise korral, kui pingetundlikkusteguri väärtus on vahemikus 0 kuni 2.

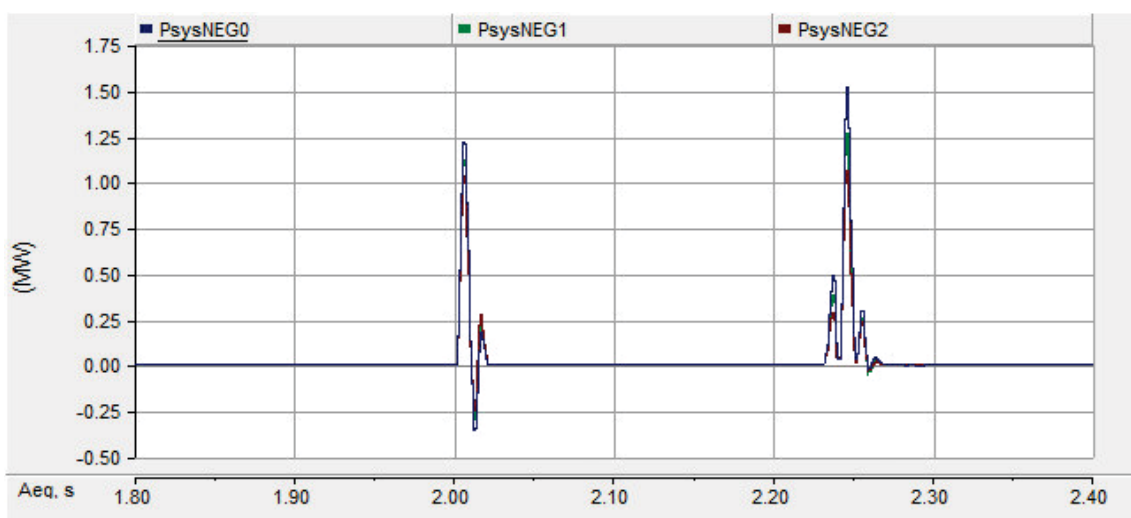


Joonis 3.30. Aktiivvõimsuse pärijärgnevuskomponent induktiivsel faasikoormusel lühise ajal.

Joonisel 3.30 esitatud tulemustest on võimalik järeldada, et mõõdetud hetkväärtustes esinenud aperioidiliselt sumbuv võnkeprotsess ei kandu edasi aktiivvõimsuse pärijärgnevuskomponenti, mis viitab, et võnkeprotsessi põhjustab lühistalitluse toimele tekkiv vastujärgnevuskomponent. Väidet kinnitavad joonisel 3.31 esitatud aktiivvõimsuse vastujärgnevuskomponendi graafikud. Lisaks võnkumistele esineb lühistalitlusest taastumisel pingetundliku koormuse aktiivvõimsuse põhiharmooniku ülevõnget (joonis 3.30). Ülevõngete oli suurim pingetundlikkuse nullväärtusel ning väiksem pingetundlikkuse 2 juures.

Tulemused vastavad pingetundlikkuse analüüsis tehtud järeldustele ning näitavad, et lühiskatse täpseks modelleerimiseks on tarvis määrata pingetundlikkuse tegurite tegelikud väärtused, sest ülevõnke suurus võib oma ulatusest tingituna mõjutada lühiskatses vaadeldava mudeli lühise järgset talitlust ning stabiilsust.

Joonisel 3.31 on kujutatud faasikoormuste aktiivvõimsuse vastujärgnevuskomponenti lühise korral, kui pingetundlikkust muudetakse vahemikus 0 kuni 2. Joonisel tähistab PsysNEG0 aktiivkoormust pingetundlikkusega 0, PsysNEG1 aktiivkoormust pingetundlikkusega 1 ning PsysNEG2 aktiivkoormust pingetundlikkusega 2. Vastujärgnevuskomponendi esinemine ning suurus ei paista sõltuvat koormusmudeli pingetundlikkuse tegurist.

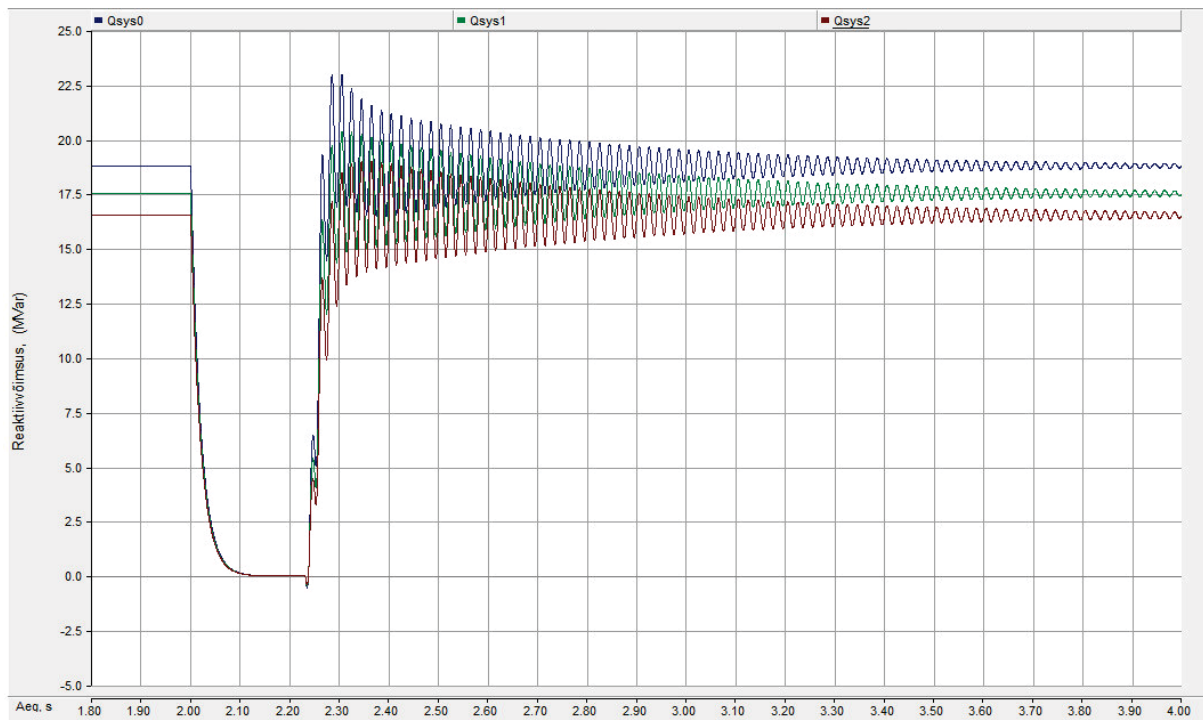


Joonis 3.31. Aktiivvõimsuse vastujärgnevuskomponent induktiivsel faasikoormusel lühise ajal.

Joonis 3.31 näitab, et PSCAD-i pingetundliku eksponentmudeli lühistalitusel tekib pärijärgnevuskomponendile lisaks ka vastujärgnevuskomponent. Vastujärgnevuskomponenti täheldati lühise tekkides ning lühisest taastumisel, mis on tingitud faasipingete hetkväärtusest lühise tekkimise ajahetkel ning erinevate faaside väärtuste langemisel nullini eri aegadel, mis põhjustab olulist hetkelist pingete asümmeetriat. Kolmefaasiline lühis peaks teooria kohaselt ideaaltingimustel sisaldama vaid pärijärgnevuskomponenti [9]. Vastavalt joonisel 3.31 esitatud tulemustele peab teooria paika ka käesolevas mudelis ning vastujärgnevuskomponent tekib vaid siirdeprotsesside käigus, mis on piisav et koormusmudeli talitluses olulise häiringu tekitamiseks.

Joonisel 3.32 on kujutatud faasikoormuste reaktiivvõimsuse hetkväärtust lühise korral, kui koormusmudeli pingetundlikkus on 0 kuni 2.





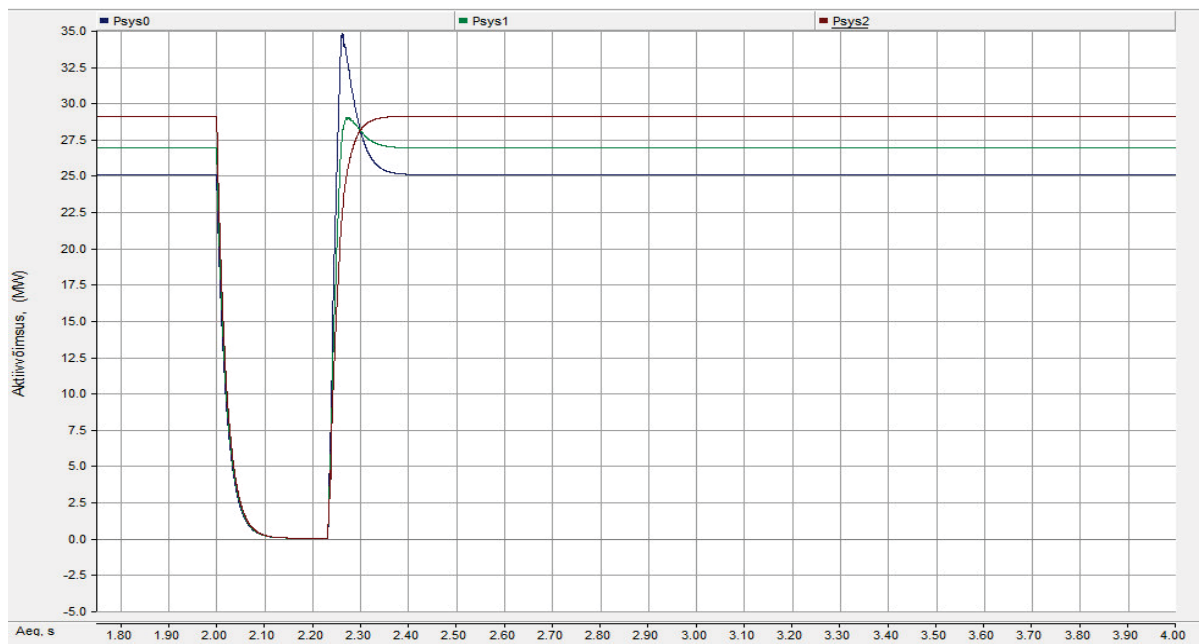
Joonis 3.32. Reaktiivvõimsuse hetkväärtus induktiivsel faasikoormusel lühise ajal.

Induktiivse iseloomuga pingetundlikul faasikoormuse mudelil esineb pinge taastumisel koormuse võnkumine nii aktiivkomponendil (joonis 3.29) kui reaktiivkomponendil (joonis 3.32). Joonisel 3.32 esitatud graafikutelt selgub, et reaktiivvõimsuse komponendi võnkeamplituud on suurem kui aktiivvõimsuskomponendi võnke amplituud ning võnkumist iseloomustab sumbumise pikk periood.

Järgnevalt vaatleme faasikoormuse lühistalitlust mahtuvusliku iseloomuga reaktiivkoormuse korral. Joonisel 3.33 on kujutatud mahtuvusliku faasikoormuse aktiivvõimsuse hetkväärtust lühise korral, kui pingetundlikkust muudetakse vahemikus 0 kuni 2.

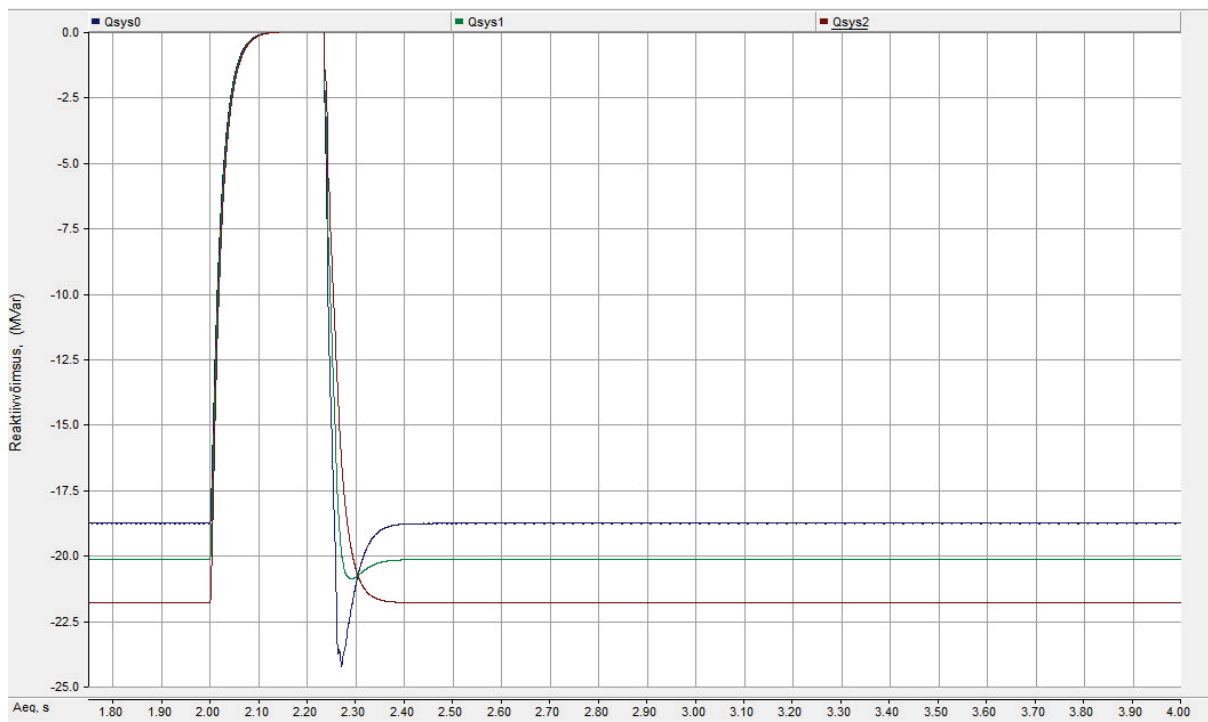
Joonisel 3.33 ning 3.34 esitatud lühistalitluse tulemused on ootuspärased ning kinnitavad pingetundlikkuse alapeatükis mittetäieliku informatsiooni korral soovitatud pingetundlikkuse teguri väärtusi. Nimelt ei teki koormusmudelil pingetundlikkusega 2 lühisest taastumisel koormusvõimsuse ülevõnget ning koormusmudeli mõju teistele uuritavatele mudelitele on minimaalne. Teiste pingetundlikkusteguri väärtuste puhul võib koormusmudeli ülevõnget põhjustada häiringuid ning ebastabiilsust. Lisaks näitavad tulemused, et mahtuvusliku koormuse puhul ei teki lühistalitluse tõttu perioodilist võnkumist, mis viitab, et eelnevalt vaadeldud võnkeprotsesse põhjustavad koormusmudeli induktiivelemendi omadused. Sarnast omadust on kirjeldatud ka sagedustundlikkuse analüüsi alapeatükis.





Joonis 3.33. Aktiivvõimsuse hetkväärtus mahtvuslikul faasikoormusel lühise ajal.

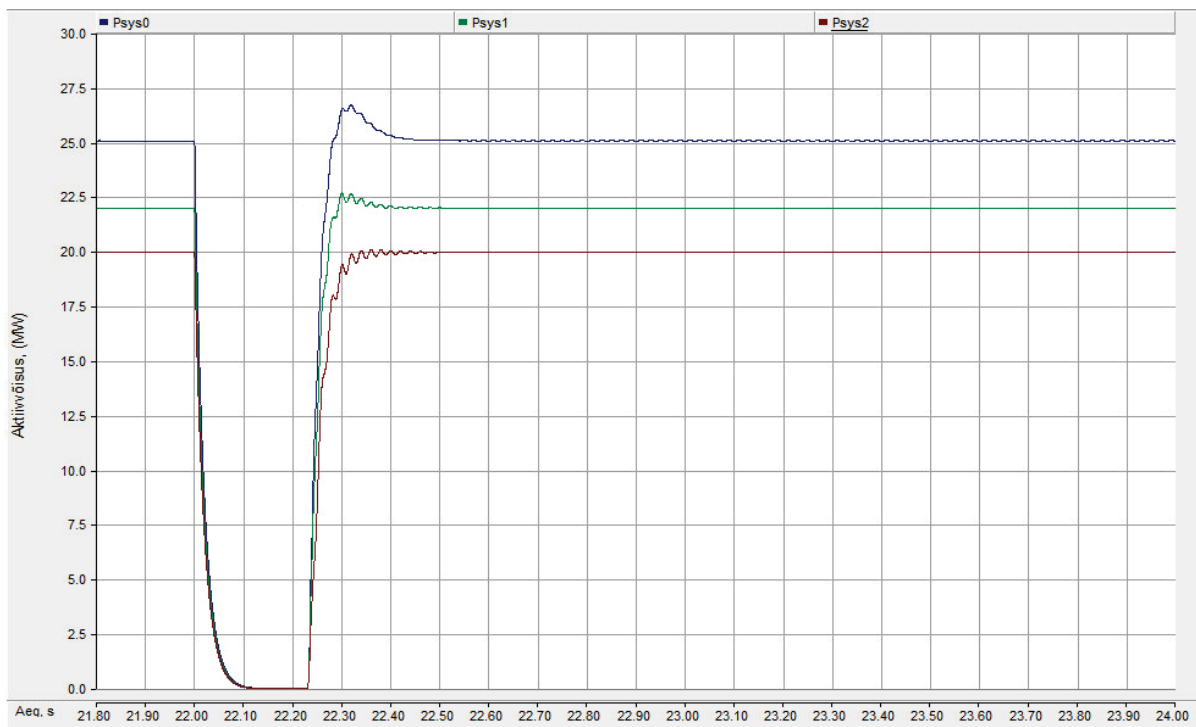
Joonisel 3.34 on kujutatud mahtvusliku iseloomuga faasikoormuse reaktiivvõimsuse hetkväärtust lühise korral, kui pingetundlikkust muudetakse vahemikus 0 kuni 2.



Joonis 3.34. Reaktiivvõimsuse hetkväärtus mahtvuslikul faasikoormusel lühise ajal.

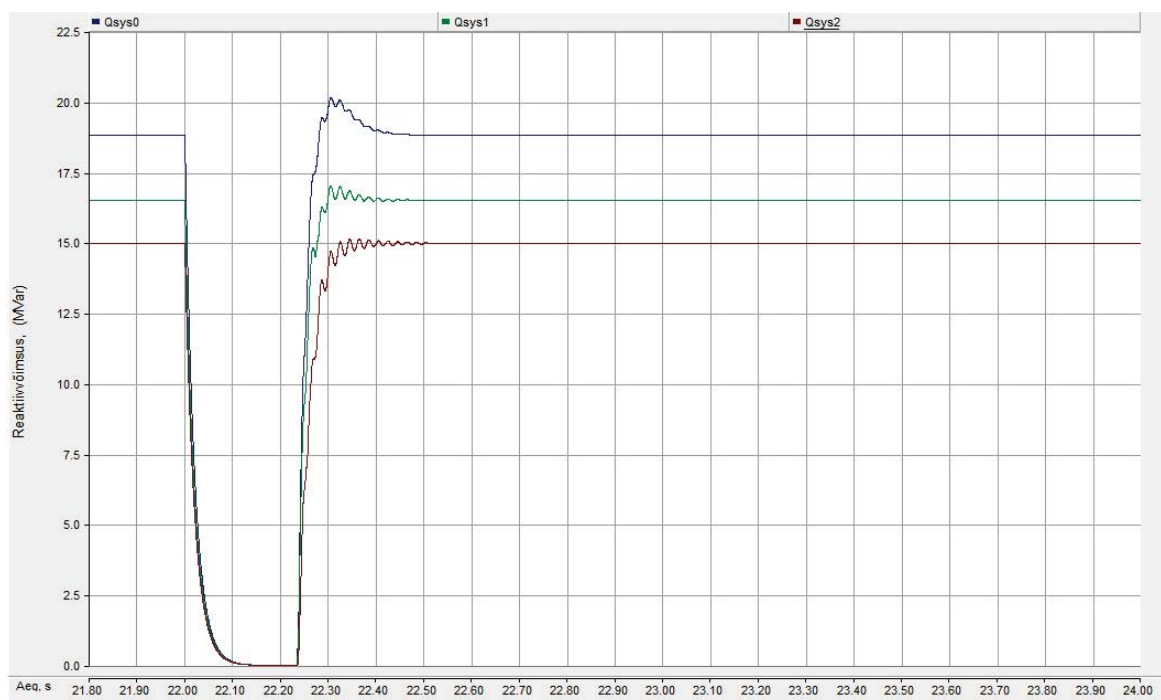
Järgnevalt vaatleme induktiivse iseloomuga liinikoormusmudeli pikendatud lühistalitluse simulatsioonide tulemusi.

Joonisel 3.35 on kujutatud induktiivsete liinikoormuste aktiivvõimsuse hetkväärtusi lühise korral, kui pingetundlikkust muudetakse vahemikus 0 kuni 2.



Joonis 3.35. Aktiivvõimsuse hetkväärtus induktiivsel liinikoormusel lühise ajal.

Joonisel 3.36 on kujutatud induktiivsete liinikoormuste reaktiivvõimsuse hetkväärtust lühise korral pingetundlikkustega 0 kuni 2.



Joonis 3.36. Reaktiivvõimsuse hetkväärtus induktiivsel liinikoormusel lühise ajal.

Induktiivsel liinikoormusel tekib samuti lühialitlusest taastumisel võnkeprotsess, mille amplituud on mõnevõrra väiksem kui faasikoormusel (joonised 3.29 ja 3.36) ning sumbuvus suurem. Võnkumise väiksem amplituud on osaliselt tingitud koormuse kolmnurkühendusest ning selle tasakaalustavast omadusest sümmeetrilise talitluse korral. Täiendavalt mõjutas liinikoormuse iseloomu katsemudelisse, koormuse ja trafo vahele, lisatud  $0,1 \Omega$  takistus. Liinikoormusel esines sarnaselt faasikoormusele koormuse taastumisel ülevõnget, mis oli suurim pingetundlikkuse 0 juures ja väiksem pingetundlikkuse 2 juures, mis täiendavalt kinnitab pingetundlikkuse peatükis esitatud soovitusi pingetundlikkusteguri väärtuse valikuks.

Pikendatud lühialitluse simulatsioonid näitasid, et modelleeritud faasi- ja liinikoormusmudelid talitlesid vastavalt teooriapõhisele ootusele ning pingetundlikkuse analüüsi tulemuste põhjal püstitatud ootustele. Seejuures kinnitasid simulatsioonide tulemused pingetundlikkuse peatükis mittetäieliku informatsiooni tingimusteks soovitatud pingetundlikkuse tegurite väärtusi, mis aitab välistada koormusmudeli väljundvõimsuse ülevõnkest tingitud mõjusid teistele modelleeritavatele mudelitele.

Simulatsioonide tulemused näitasid, et induktiivse iseloomuga faasikoormuse puhul tekib lühisest taastumisel aperiodiliselt sumbuva võnkeprotsess, mis on suuremas osas määratud koormusmudeli induktiivelemendi parameetritega. Mahtuvusliku iseloomuga faasikoormusmudeli puhul vastav võnkeprotsess puudub ning liinikoormusmudeli puhul on võnkeprotsess väiksem tingituna kolmnurkühenduse omadustest ning mudelisse lisatud takistuse väärtusest.

Järgnevas uurimistöös etapis on tarvis põhjalikumalt uurida faasikoormusmudeli võnkeprotsessi ning selle summutamise meetodeid, et minimeerida koormusmudeli ebarealistlikke mõjusid teistele modelleeritavatele uurimisobjektidele.

### **3.2.8 Eksponentsiaalse koormusmudeli omaduste kokkuvõte**

Eelnenud peatükkides 3.1 kuni 3.2 anti ülevaate PSCAD standardmudelite kogus kirjeldatud koormusmudelitest ning nende omadustest. Esmalt kirjeldati peatükis 3.1 staatilise koormuse modelleerimiseks ette nähtud koormuse eksponentmudelit (*Fixed Load*) ning kolmefaasilise mahtuvusliku, induktiivse ja aktiivkoormuse mudeleid (*Three-Phase Capacitive/Inductive/Resistive Load*). Peatüki lõpus kirjeldati erijuhtumiteks koostatud koormusmudeleid.

Alapeatükis 3.2 kirjeldati koormusmudeli omaduste visualiseerimiseks, käitumise uurimiseks ekstreemsematel juhtumitel ning mudeli ebakõlade väljaselgitamiseks läbiviidavaid

katseseeriaid PSCAD eksponentsiaalse koormusmodeliga ning selleks koostatud PSCAD mudeleid.

Alapeatükkides 3.2.3 ja 3.2.4 analüüsiti simulatsioonide põhjal koormusmodeli pingetundlikkuse omadusi. Koormusmodeli pingetundlikkuse simulatsioonidest selgus, et faasikoormusmodeli seadistamisel saab negatiivseid pingetundlikkusteguri väärtusi kasutada vaid juhtumitel, mille puhul on tagatud koormusmodeli ühene rakendatavus. Erandiks on seejuures mahtuvusliku iseloomuga reaktiivkoormus, mille puhul negatiivne pingetundlikkus on laialdasemalt rakendatav ning võib osutada kasulikuks jõuelektrooniliste muundurite põhiste tarbijate lihtsustatud modelleerimiseks. Sealjuures on mahtuvusliku iseloomuga faasikoormusmodeli aktiiv- ja reaktiivvõimsuse pingetundlikkustegurite positiivne regioon kasutatav kogu pakutavas ulatuses.

Mõõteinformatsiooni puudumisel on simulatsioonide tulemuste põhjal soovituslik kasutada nullväärtusega pingetundlikkustegureid kui teostatakse mudelite seadistamist, et saavutada korrektne koormusvoogude jagunemine ning sõlmepinged, mille põhjal seada täpsemad koormusmodeli nimiparameetrid. Seadistatud mudeli puhul on soovituslik simulatsioonides rakendada aktiiv- ja reaktiivvõimsuse pingetundlikkusteguri väärtust 2, mille puhul vastab mudel konstantse takistusega mudelile.

Alapeatükkides 3.2.5 ja 3.2.6 analüüsiti simulatsioonide põhjal koormusmodeli sagedustundlikkuse omadusi. Simulatsioonide tulemused näitasid, et kogu vaadeldavas sagedustundlikkuse vahemikus ei teki ei aktiiv- ega ka reaktiivvõimsuse komponendi puhul tundlikkusteguri väärtust välistavaid talitusrežiime. Sellest tulemusest lähtudes on võimalik modelleerimisel kasutada kõiki pakutavaid sagedustundlikkuse teguri väärtusi (-5 kuni 5). Seejuures näitasid simulatsioonide tulemused, et kogu vaadeldavas sagedustundlikkuse vahemikus tekib nii aktiiv- kui ka reaktiivvõimsuse väljundis aperioidiliselt sumbuv võnkeprotsess. Koormusvõimsuse pärijärgnevuskomponendi analüüsi tulemused näitasid, et perioodilise komponendi täpset mõju mudeli ülejäänud komponentidele ei saa rakendatud meetodikaga hinnata ning vaja on rakendada täiendavaid meetmeid.

Mittetäieliku informatsiooni tingimustes oleks otstarbekas sagedustundlikkust mudelites mitte arvestada ning vastavad sagedustundlikkus tegurid tuleks seada nulliks.

Alapeatükis 3.2.7 vaadeldi faasi- ja liinikoormusmodeli lühistalitlust pikendatud kolmefaasilise lühise korral. Pikendatud lühistalitluse simulatsioonid näitasid, et modelleeritud faasi- ja liinikoormusmodelid talitlesid vastavalt teooriale ning koormusmodeli

pingetundlikkuse analüüsiga püstitatud ootustele. Seejuures kinnitasid simulatsioonide tulemused pingetundlikkuse katsete põhjal mittetäieliku informatsiooni tingimustesse soovitatud pingetundlikkuse tegurite väärtust 2, mis aitab välistada koormusmodeli väljundvõimsuse ülevõnkest tingitud mõjusid teistele modelleeritavatele mudelitele.

Simulatsioonide tulemused näitasid, et induktiivse iseloomuga faasikoormuse puhul tekib lühisest taastumisel aperioidiliselt sumbuv võnkeprotsess, mis on suuremas osas määratud koormusmodeli induktiivelemendi parameetritega. Mahtuvusliku iseloomuga faasikoormusmodeli puhul vastav võnkeprotsess puudub ning liinikoormusmodeli puhul on võnkeprotsess mõjutatud kolmnurkühenduse omadustest ning mudelisse lisatud takistuse väärtusest.

Järgmise etapi tegevused:

- *Elering AS-i ülekandevõrgus teostatavad katsemõõtmised, et määrata tüüpkooormussõlmede tegelikud pingetundlikkustegurite väärtused*
- *Elering AS-i elektrivõrgus tüüpkooormussõlmede sagedustundlikkuse määramiseks mõõtmiste teostamine*
- *Sagedustundlikkuse puhul tekkiva võnkeprotsessi täpsem uurimine ning analüüsi metoodika täpsustamine*
- *Sagedustundlikkuse omaduste uurimine olukorras, kus koormusmodeli toitepinge sisaldab kõrgemaid harmoonikuid*
- *Pikendatud lühistalitluse puhul faasikoormusmodeli võnkeprotsesside täpsem uurimine ning võngete summutamise võimaluste analüüs*

### 3.3 PSS/E koormusmodelite ülevaade

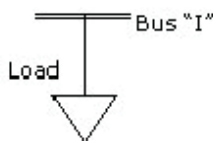
PSS/E tarkvara versioonis 33.5 sisalduvad koormusmodelite pinge- ja sagedusekarakteristikud saab jagada kaheks: püsitalitluse arvutustes kasutatavateks karakteristikuteks ja siirdeprotsesside modelleerimisel kasutatavateks karakteristikuteks. PSS/E käsitleb pinge- ja sageduskarakteristikuid koormusmodelite osana ning seetõttu kirjeldatakse järgnevas ülevaates PSS/E koormusmudeleid.

#### 3.3.1 Koormusmodelid püsitalitluse arvutusteks

Püsitalitluse arvutustes kasutatav üldine koormusmodel (koormusmodel *Load*) ja induktiivmootori mudel (koormusmodel *Induction Machine*) on staatilise karakteristikuga ehk ei sõltu modelleeritavast ajahetkest.

##### Üldine koormusmodel (*Load*)

PSS/E standardmodelite hulgas on passiivsete koormuste modelleerimiseks üldine koormusmodel (*Load*), mida tähistatakse joonisel 3.37 kujutatud tingmärgiga.



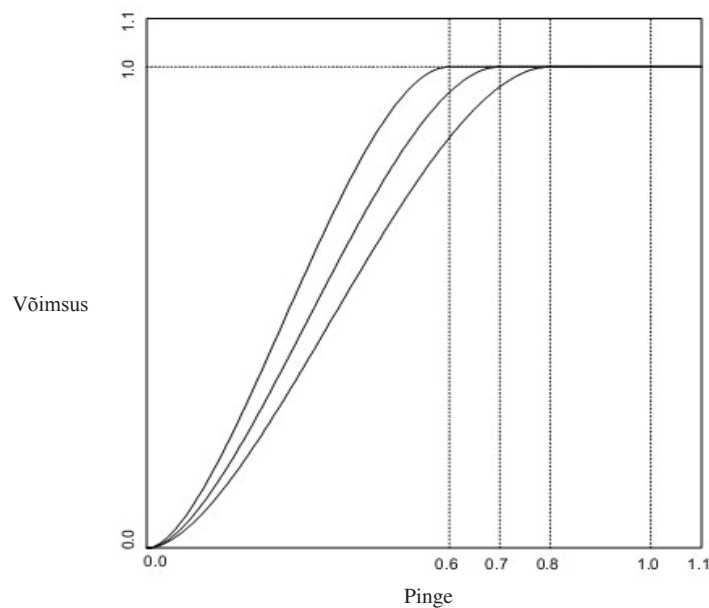
Joonis 3.37. PSS/E staatilise koormusmodeli (*Load*) tingmärk.

Antud mudel kombineerib konstantse võimsusega, konstantse vooluga ja konstantse juhtivusega koormuse pingekarakteristikud [4]. Mudeli seadistamiseks on võimalik kasutada joonisel 3.38 kujutatud akent. Püsiva võimsusega koormuskomponendi aktiiv- ja reaktiivvõimsus nimipingel seadistatakse kasutades muutujaid PL (*Pload*) ja QL (*Qload*), püsivooluga koormuskomponendi seadistamiseks kasutatakse vastavalt muutujaid IP (*IPload*) ja IQ (*IQload*); püsijuhtivusega koormuskomponendi suurus antakse vastavalt muutujatega YP (*YPload*) ja YQ (*YQload*). Väärtuste sisestamisel kasutatakse ühikuna MW, Mvar.

Konstantse võimsusega koormuskarakteristiku kasutamisel on oluline arvestada, et muutujaga *PQBRACK* määratud pingetasemel toimub koormusmodeli muutus vastavalt joonisel 3.39 kujutatud graafikule, kus *PQBRACK* väärtused on valitud hulgast {0,6; 0,7; 0,8}. Pingetel alla väärtuse *PQBRACK* kasutatakse koormusvoolu elliptilist pingekarakteristikut, et tagada voolu nullväärtus pingepuudumisel [5]. Muutuja *PQBRACK* väärtust saab muuta vahemikus 0 kuni 2

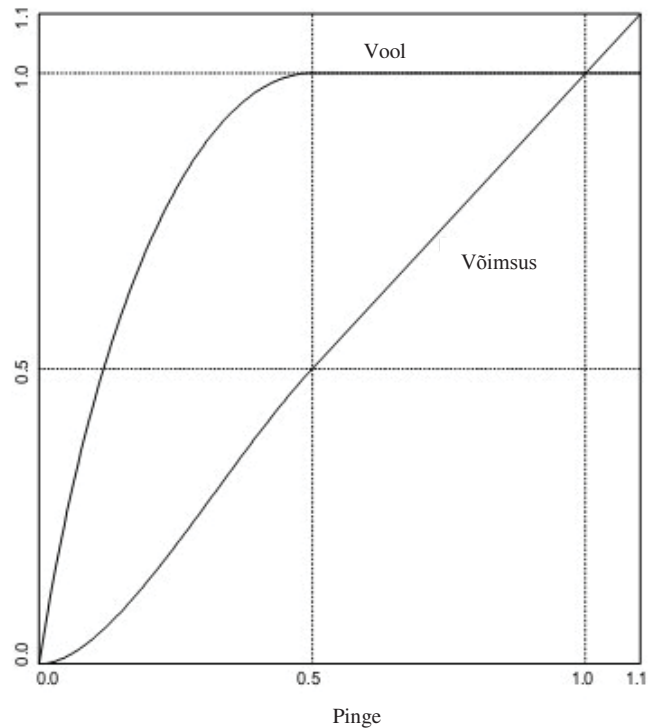
kasutades *Solution Parameters* akna (*Power Flow – Solution – Parameters...- Solution Parameters*) alamjaotist *General*, kus *PQBRAK* on esitatud muutujana *constant power characteristic threshold (PQBRAK)*.

Joonis 3.38. PSS/E mudeli Load seadistus.



Joonis 3.39. Konstantse võimsusega koormuse pingekarakteristik [4].

Sarnane koormuse pingekarakteristiku muutus leiab aset konstantse vooluga modelleeritud koormuste osas. Konstantse vooluga koormuste korral toimub karakteristiku muutus pingetasemel 0,5 suhtühikut vastavalt joonisel 3.40 kujutatud graafikule. Taaskord on madalatel pingetel kasutusel voolu elliptiline pingekarakteristik.



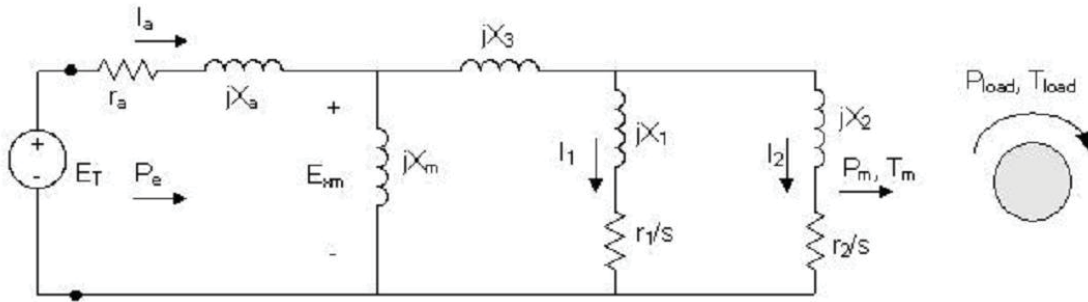
Joonis 3.40. Konstantse vooluga koormuse pingekarakteristikud [4].

### Asünkroonmootori üldmudel

PSS/E kasutatav asünkroonmootori pärijärgevusskeem on esitatud joonisel 3.41 ning seadistamiseks kasutatav aken joonisel 3.43. Mootori ekvivalentskeemis kasutatakse 8 passivelementi: 3 aktiivtakistit ja 5 induktiivtakistust. Samuti on mootori tüüpparameetrite valikuks olemas NEMA (A, B, C, D, E) ja IEC (N, H) tüüpmudelid, mille valikul ignoreeritakse mootori takistuste käsitsi seatud väärtusi. [4].

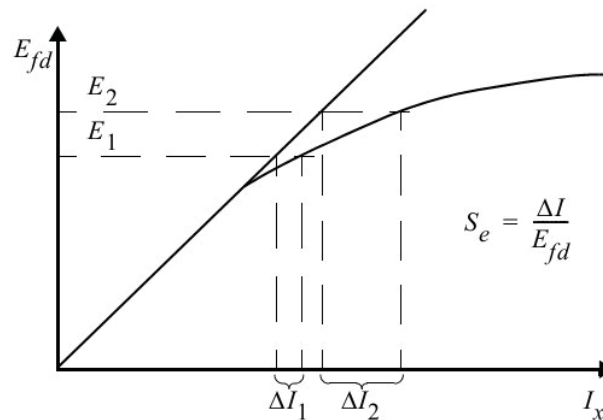
Alaindeksiga  $a$  tähistatakse staatorimähise ekvivalentset aktiivtakistust  $r_a$  ja puisteinduktiivsust  $X_a$ .





Joonis 3.41. PSS/E asünkroonmootori üldmudeli pärijärgnevusskeem püsisalitiitluses [4].

Mootori magneetumise induktiivtakistus on tähistatud  $X_m$ .  $X_m$  mudelis sisaldub magneetimis-karakteristik, mis defineeritakse kasutades elektromotoorjõude  $E_1$  ja  $E_2$ , ning küllastusfaktoreid  $SE_1$  ja  $SE_2$ .  $E_1$  peaks asuma graafiku murdepunkti läheduses ja  $E_2$  küllastumistasemel. Küllastumise saab mudelist eemaldada seades  $E_1$  või  $SE_1$  väärtuseks 0.0. [4] Faktorite  $SE_1$  ja  $SE_2$  väärtuste arvutamiseks saab kasutada joonisel 3.42 kuvatud meetodikat.



Joonis 3.42. Mootori elektromotoorjõud, magneetimisvool ja faktor  $SE$  arvutamine [6].

Rootorimähist modelleeritakse kahe paralleelharuga  $X_1$  ja  $r_1/s$  ning  $X_2$  ja  $r_2/s$ . Ühe kontuuriga rootori modelleerimisel sisestatakse ühe haru takistustele väärtused 999 nt  $r_2=X_2=999.0$ . Induktiivtakistuse  $X_3$  eesmärk mudelis on paindlikkuse suurendamine. [4].

Koormuse pöördemomendi kirjeldamiseks kasutatakse viit muutujat:  $T_{CODE}$  (*Mechanical Torque*),  $A$ ,  $B$ ,  $D$  ja  $E$  [4].

Kui  $T_{CODE}=1$ , kasutatakse lihtsustatud koormusmomendi valemit:

$$T = T_0 \frac{(1-s)^D}{(1-s_0)^D} \quad (3.3)$$

Kus  $s_0$  on mootori libistus ja  $T_0$  koormusmoment nimipingel.

$TCODE=2$  korral kasutatakse võrrandiga 3.4 esitatavat WECC (*Western Electricity Coordinating Council*) mudelit koormusmomendi modelleerimiseks.

$$\begin{aligned} T &= T_0 \left[ A(1-s)^2 + B(1-s) + D(1-s)^E + C_0 \right] \\ C_0 &= 1 - \left[ A(1-s_0)^2 + B(1-s_0) + D(1-s_0)^E \right] \end{aligned} \quad (3.4)$$

Joonis 3.43. Asünkroonmootori andmete sisestamine.

### 3.3.2 PSS/E staatilised koormusmodelid dünaamika arvutusteks

PSS/E võimaldab siirdeprotsesside modelleerimiseks üldise koormusmodeli täiendamist eksponentsiaalse sageduskarakteristikuga (LDFR<sub>xx</sub>) ning asendamist IEEE tüüpmodeliga (IEEE<sub>Lxx</sub>).

#### LDFR<sub>xx</sub> koormuse eksponentsiaalne sageduskarakteristik

Mudel täiendab konstantse võimsusega koormusmodelit eksponentsiaalse sageduskarakteristikuga, mis toimib vastavalt valemitele 3.5 ja 3.6 [6].

$$P = P_0 \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^m \quad (3.5)$$

$$Q = Q_0 \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^n \quad (3.6)$$

Püsivooluga koormuste puhul rakendatakse samuti eksponentsiaalseid sageduskarakteristikuid vastavalt valemitele 3.7 ja 3.8 [6].

$$I_p = I_{p0} \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^r \quad (3.7)$$

$$I_q = I_{q0} \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^s \quad (3.8)$$

Konstantse juhtivusega koormused jäävad mudeli LDFR<sub>xx</sub> kasutamisel muutmata.

#### IEEE<sub>Lxx</sub> koormuse IEEE tüüpmodel

IEEE koormuse tüüpmodel asendab dünaamikaarvutustes täielikult konstantse võimsusega, vooluga ja juhtivusega koormuse (PSS/E üldise koormusmodeli). Koormusmodel on defineeritud kasutades võrrandeid [6]:

$$P = P_0 (a_1 u^{n_1} + a_2 u^{n_2} + a_3 u^{n_3}) (1 + a_7 \Delta f) \quad (3.9)$$

$$Q = Q_0 (a_4 u^{n_4} + a_5 u^{n_5} + a_6 u^{n_6}) (1 + a_8 \Delta f) \quad (3.10)$$

### **3.3.3 PSS/E asünkroonmootori mudelid dünaamika arvutusteks**

Asünkroonmootoreid saab modelleerida kolme erineva detailsusastmega [6]:

- 1) Staatilise pinge- ja sageduskarakteristikuga koormusena. Koormuse pinge-karakteristiku väljendamiseks saab kasutada näiteks PSS/E üldist koormusmudelit ning sageduskarakteristiku jaoks dünaamikamudelit LDFR<sub>xx</sub>.
- 2) Pöörleva koormuse inertsi diferentsiaalvõrrandi ja mootori püsitalitluse detailse mudeliga ilma elektromagnetilise dünaamikata. Näiteks mudel CMOTOR1.
- 3) Detailse pöörleva koormuse ja elektromagnetilise dünaamikaga. Vastava detailsusega on mudelid CIM5<sub>xx</sub>, CIM6<sub>xx</sub>, CIMW<sub>xx</sub>, CIMTR2 and CIMTR4.

Esimene detailsus on mõistlik suure süsteemi analüüsil, sest informatsioon üksikute koormuste omaduste kohta võib olla ebapiisav keerukama mudeli korrektseks seadistamiseks. Mudel on ebapiisav kui asünkroonmootorite siirdeprotsessidel on kriitiline mõju sõlmpingetele ning kui asünkroonmootorid on analüüsitavaks objektiks [6]. Kirjeldatud omadustega PSS/E mudelit, PSS/E üldist koormusmudelit ja sageduskarakteristikut kirjeldati eelnevas peatükis.

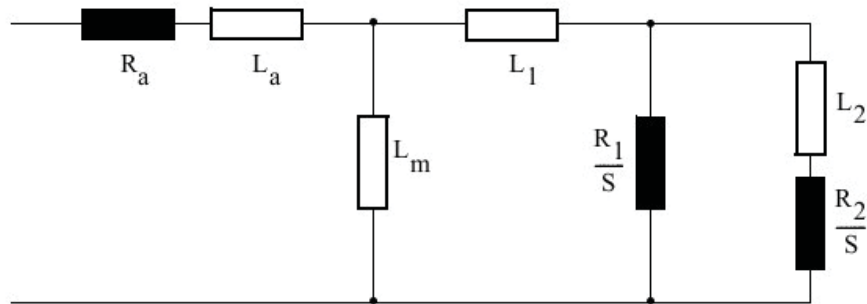
Teine detailsusaste võtab arvesse ainult aheldusvooge, mille ajaline variatsioon koosneb konstantsele libistusele vastavast komponendist ja rootorit mõjutavale pingele vastavast sünkroonkomponendist. Mudel jätab arvestamata mootori sünkroniseerimisel esineva siirdeprotsessi ning magnetvoo nõrgenemise ja pinge languse mootori lahtiühendusel. [6]

Kolmanda lähenemise korral modelleeritakse siirdekomponeenti, mis on püsitalitluses null, kuid mootori toitepinge ja sageduse muutusel kutsub esile rootori aheldusvoogude muutuse. Komponenti amplituud on määratud häiringu suurusega ja sumbuvus sõltub mootori mähise ülilmööduva ja mööduva talitluse ajakomponentidest. [6] PSS/E võimaldab siirdeprotsesside modelleerimisel üldise koormusmudeli asendamist asünkroonmootori mudelitega CIM5<sub>xx</sub>, CIM6<sub>xx</sub>, CIMW<sub>xx</sub>. Mootirrežiimis töötavat elektrimasinat saab asendada asünkroonmootori mudelitega CIMTR2, CIMTR4. Aruande järgnevides lõikudes antakse ülevaade mainitud asünkroonmootori mudelistest.

#### **Ekvivalentse aseskeemi parameetrid**

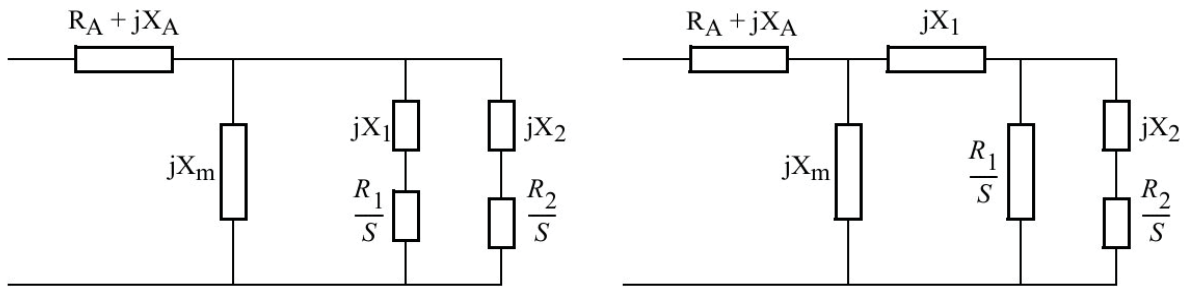
Harilikult antakse asünkroonmootori nimiandmetena nimimoment, nimilibistus, nimivõimsus, võimsusfaktor, käivitusmoment, käivitusvool, käivituse võimsusfaktor ja maksimaalne moment. Sõltuvalt valitud PSS/E asünkroonmootori mudelist kasutatakse mudeli

seadistamiseks kas joonisel 3.44 kujutatud aseskeemi ehk parameetreid  $R_a$ ,  $L_a$ ,  $L_m$ ,  $L_1$ ,  $R_1$ ,  $L_2$  ja  $R_2$  või standardparameetreid  $L_s$ ,  $L'_s$ ,  $L''_s$ ,  $T'_{so}$  ja  $T''_{so}$ . Aseskeemi parameetrite väärtuste tuvastamiseks tuginedes nimiandmetele pakub PSS/E teisendamise rakendust IMD, mida kirjeldatakse juhendi [6] peatükis 20.2.4.3.



Joonis 3.44. Asünkroonmootori aseskeem tarkvaras PSS/E [6]

Mudelite CIM5xx, CIM6xx ja CIMWxx korral toetatakse andmete sisestusel joonisel 3.45 kujutatud aseskeeme, mille erinevuseks on reaktantsi  $X_l$  paiknemine. Lihtuurdega asünkroonmasina korral seatakse  $R_2=X_2=0$  [7].



Joonis 3.45. Mudelite CIM5xx, CIM6xx ja CIMWxx toetatud ekvivalentskeemid (tüüp 1 ja tüüp 2) [6].

Mudelite CIMTR2 ja CIMTR4 korral kasutatakse näivtakistusi  $X$ ,  $X'$ ,  $X''$  ja  $X_l$  ning ajakonstante  $T'$  ja  $T''$ . Lihtuurdega asünkroonmootori korral saab üleliigse mähise kõrvaldada seades  $X''=T''=0$  [7].

Joonisel 3.45 kujutatud mudelite parameetrite teisendamiseks mudelitele CIMTR2 ja CIMTR4 sobivale kujule on võimalik kasutada tabelis 3.9 esitatud valemeid.

Asünkroonmootori mudelites CIM5xx, CIM6xx, CIMWxx, CIMTR2 ja CIMTR4 kasutatakse parameetritena mootori inertsi  $H$  ning induktiivsuse  $X_m$  magneetimiskarakteristiku komponente  $E_1$ ,  $S(E_1)$ ,  $E_2$  ja  $S(E_2)$  (kujutatud joonisel 3.42).  $E_1$  peaks asuma  $X_m$  magneetimis-

karakteristiku murdepunkti läheduses ja  $E_2$  küllastumistasemel. Küllastumise saab mudelist eemaldada seades  $E_1$  või  $SE_1$  väärtuseks 0.0.

Tabel 3.9. Asünkroonmootori mudeli teisendusvalemid [6].

Tüüp 1		Tüüp 2	
Kaksikuurdeline	Lihtkuurdeline	Kaksikuurdeline	Lihtkuurdeline
$L = L_A + L_M$	$L = L_A + L_M$	$L = L_A + L_M$	$L = L_A + L_M$
$L_1 = L_A$	$L_1 = L_A$	$L_1 = L_A$	$L_1 = L_A$
$L' = L_A + \frac{1}{\frac{1}{L_M} + \frac{1}{L_1}}$	$L' = L_A + \frac{1}{\frac{1}{L_M} + \frac{1}{L_1}}$	$L' = L_A + \frac{1}{\frac{1}{L_M} + \frac{1}{L_1}}$	$L' = L_A + \frac{1}{\frac{1}{L_M} + \frac{1}{L_1}}$
$L'' = L_A + \frac{1}{\frac{1}{L_M} + \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2}}$	$L'' = 0$	$L'' = L_A + \frac{1}{\frac{1}{L_M} + \frac{1}{L_1 + L_2}}$	$L'' = 0$
$T_0' = \frac{L_1 + L_M}{\omega_0 R_1}$	$T_0' = \frac{L_1 + L_M}{\omega_0 R_1}$	$T_0' = \frac{L_1 + L_2 + L_M}{\omega_0 R_2}$	$T_0' = \frac{L_1 + L_M}{\omega_0 R_1}$
$T_0'' = \frac{L_2 + \frac{L_1 L_M}{L_1 + L_M}}{\omega_0 R_2}$	$T_0'' = 0$	$T_0'' = \frac{1}{\frac{1}{L_1 + L_M} + \frac{1}{L_2}}$	$T_0'' = 0$

Tabelis  $\omega_0 = 2\pi f = 100\pi$  toitesagedusel 50 Hz; elementide väärtused on suhtühikutes ehk X ja L on võrdsed.

Mudelid CIM5xx, CIM6xx ja CIMWxx kasutavad lisaks eelnevalt mainitud parameetritele mootori baasvõimsust *MBASE*, võimsuskordajat *PMULT* ja mootori sünkroonmomenti  $T_{nom}$ . Võimsuskordajat *PMULT* kasutatakse ainult juhul kui *MBASE*=0, et arvutada mootori baasvõimsus tuginedes mootori aktiivvõimsusele kasutades võrrandit:

$$MBASE = PMULT \cdot P_{mootor}$$

$T_{nom}$  tähistab koormusmomenti sünkroonkiirusel, antud väärtust kasutatakse mootori käivituse modelleerimisel.

Mudel CIMTR4 sisaldab samuti sünkroonmomenti, tähistusega SYN-TOR, mida kasutatakse mootori käivituse modelleerimisel. Seega on CIMTR2 ainuke mudel, mis ei modelleeri asünkroonmootori käivitust.

### Asünkroonmootori koormusmomendi karakteristikud

Mudelid CIM5xx, CIM6xx, CIMWxx, CIMTR2 ja CIMTR4 modelleerivad pöörleva koormuse dünaamikat kahe erineva karakteristikuga [6].

CIMW ja CIM6xx mudelis kasutatakse koormusmomendi jaoks võrrandeid:

$$\begin{aligned} T &= T_0 [A\omega^2 + B\omega + D\omega^E + C_0] \\ C_0 &= 1 - [A\omega_0^2 + B\omega_0 + D\omega_0^E] \\ \omega_0 &= 1 + \Delta\omega_0 \end{aligned} \quad (3.12)$$

Kus  $T_0$  on esialgne koormusmoment,  $\omega$  on rootori pöörlemiskiirus,  $\omega_0$  esialgne mootori kiirus ja  $\Delta\omega_0$  libistus.

Mudelites CIM5xx, CIMTR2 ja CIMTR4 kasutatakse koormusmomendi jaoks võrrandit:

$$T = T_{NOM} (1 + n)^D \quad (3.13)$$

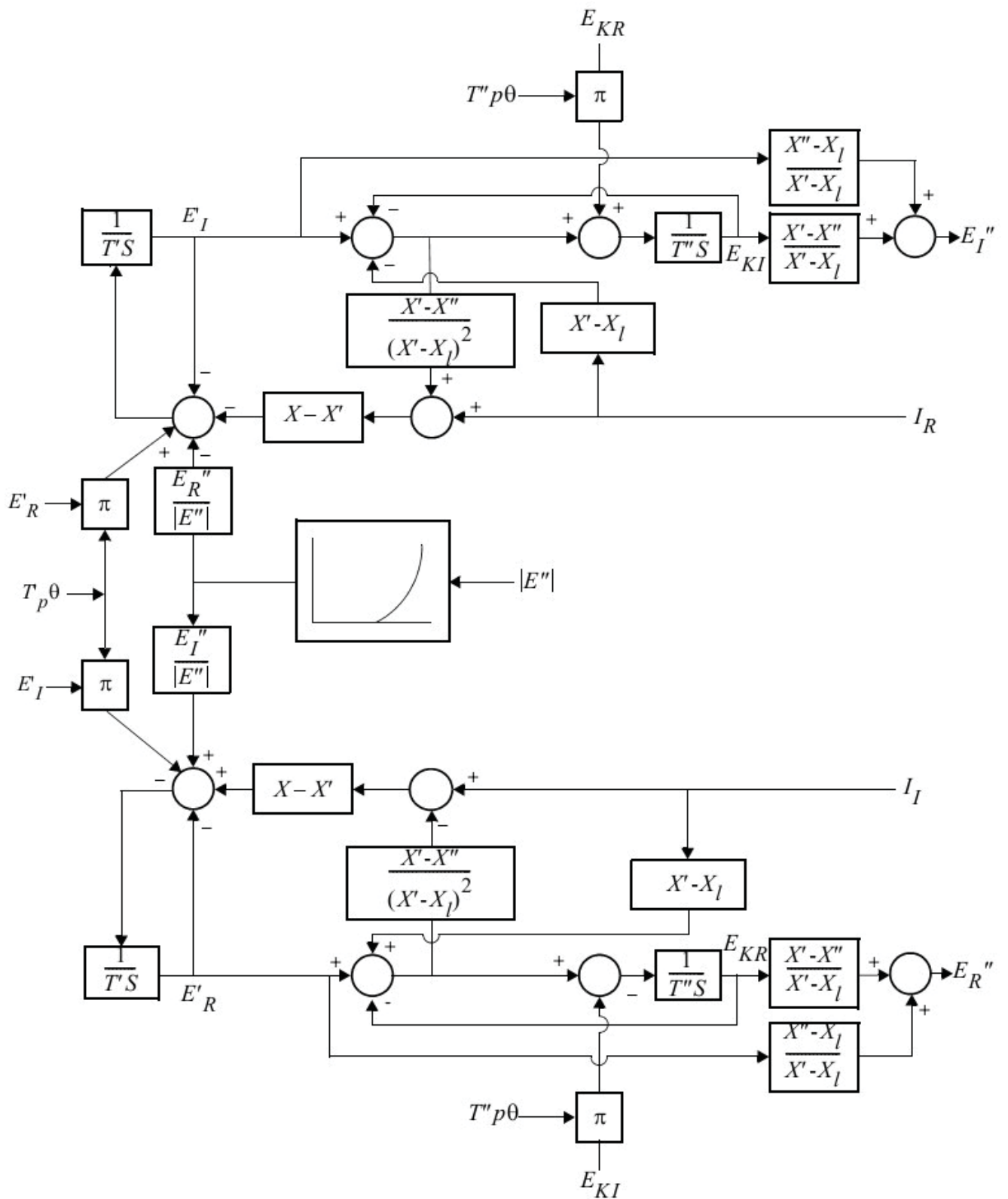
Kus  $n$  on rootori kiiruse erinevus nimikiirusest suhtühikutes ja  $T_{NOM}$  on mootori moment kiirusel 1.0 suhtühikut.

### Asünkroonmootori elektromagnetiline dünaamika

CIM5xx, CIM6xx, CIMWxx, CIMTR2, CIMTR4 kasutavad asünkroonmootori rootori elektromagnetilise dünaamika jaoks joonisel 3.46 esitatud mudelit.

#### Alapinge releekaitse

Mudelid CIM5xx, CIM6xx ja CIMWxx sisaldavad alapinge releekaitse mudelit, mille seadistamiseks kasutatakse parameetreid  $V_l$ ,  $T_l$  ja  $T_B$ , mis tähistavad vastavalt relee aktiveerimise pingetaset, relee viiteaega tsüklites ning võimsuslüliti viiteaega tsüklites.



Joonis 3.46. PSS/E asünkroonmootori elektromagnetilise dünaamika mudel [6].



## Asünkroonmootori ajakonstandid ja mudeli numbriline stabiilsus

Asünkroonmootori ajakonstandid on üldiselt lühikesed ning PSS/E arvutusliku ribalaiuse ülemises osas. **Seetõttu võib asünkroonmootori mudelite kasutamine põhjustada võrgumudeli numbrilist ebastabiilsust!** PSS/E arvutussammu vaikeväärtus on 0.00833 sekundit [6].

Mootori kiiruse ja elektrilise momendi ülekandefunktsioon on [6]:

$$\Delta n = \frac{1}{D_m} \left( \frac{\Delta T_e}{1 + \left( \frac{2H_m}{D_m} \right) s} \right) \quad (3.14)$$

Kus

$$D_m = \frac{\partial T_e}{\partial n} + \frac{\partial T_1}{\partial n}$$

$$\frac{\partial T_e}{\partial n} - \text{mootori momendi-kiiruse karakteristikute tõus}$$

$$\frac{\partial T_1}{\partial n} - \text{koormuse momendi – kiiruse karakteristikute tõus}$$

$$H_m - \text{mootori ja koormuse inerts}$$

Alljärgnevalt on toodud mootori ajakonstandi arvutusnäide suure tsentrifugaalpumba mootori näitel, kui täiskoormusmoment on 1.0 s.ü., libistus 0.005, mootori inertsikonstant 1.0 sekundit ning koormuse momendi-kiiruse karakteristikute tõus 2 [6].

$$\frac{\partial T_e}{\partial n} \cong \frac{1.0}{0.005} = 200$$

$$\frac{\partial T_1}{\partial n} \cong 2$$

$$T = \frac{2 \cdot 1.0}{(200 + 2)} \cong 0.01$$

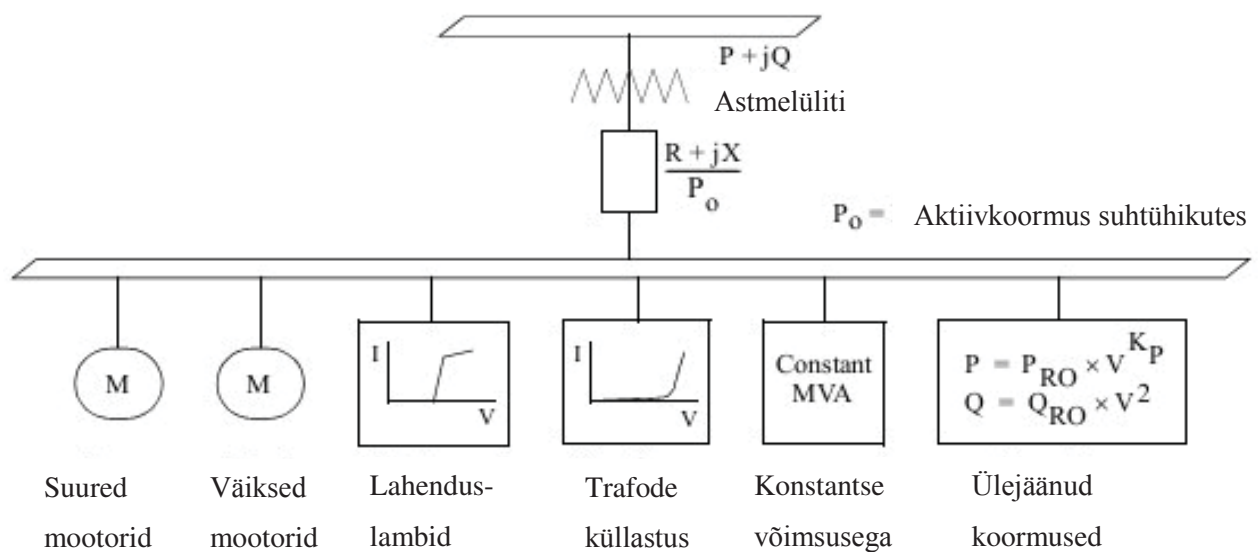
Arvutatud ajakonstandi väärtus 0.01 on lähedane arvutussammule 0.0833 sekundit ning seetõttu oleks analüüsitud mootori korral tarvilik mudeli kontrollimine numbrilise stabiilsuse suhtes.

### 3.3.4 PSS/E komposiitmodelid dünaamika arvutusteks

PSS/E võimaldab siirdeprotsesside modelleerimiseks üldise koormusmodeli asendamist komposiitmodeliga (CLODxx) ja komposiitmodeliga CMLDBL.

#### CLODxx koormuse komposiitmodel

Joonisel 3.47 kujutatud komposiitmodel CLODxx asendab dünaamikaarvutustes täielikult konstantse võimsusega, vooluga ja juhtivusega koormuse (PSS/E üldise koormusmodeli).



Joonis 3.47. PSS/E koormusmodel CLODxx [7].

Koormust modelleeritakse kombinatsioonina suurtest mootoritest, väikestest mootoritest, lahenduslampidest, trafo küllastusest, püsivõimsusega koormusest, eksponentsiaalse pingekarakteristikuga aktiivkoormusest ja konstantse reaktiivtakistusega reaktiivkoormusest. Koormuste osakaalud sisestatakse protsendina kogukoormusest vastavalt joonisel 3.48 kujutatud aknale.

Mudel eeldab, et koormused on ühendatud pingel 0,98 suhtühikut, mida kasutatakse trafo astmelüliti asendi arvutamisel.

Mudelis sisalduv aktiivtakistus  $R$  ja reaktiivtakistus  $X$  on kasutatavad liini või trafo modelleerimiseks.

	Con Value	Con Description
1	0,0000	PC-LM, % large motor
2	0,0000	PC-SM, % small motor
3	0,0000	PC-TX, % transformer exciting current
4	0,0000	PC-DL, % discharge lighting
5	0,0000	PC-CP, % constant power
6	0,0000	Kp, % of remaining
7	0,0000	R, branch resistance (pu load MW base)
8	0,0000	X, branch reactance (pu load MW base)

Joonis 3.48. Mudeli CLODBL seadistusaken.

### Suure mootori mudel

Suurt mootorit modelleeritakse kaksikuuretega asünkroonmootorina tuginedes tüüp 2 ekvivalentskeemile, mille parameetrid on antud tabelis 3.10 ning kiiruskarakteristikud joonisel 3.49.

Tabel 3.10. CLODBL suure mootori parameetrid [6].

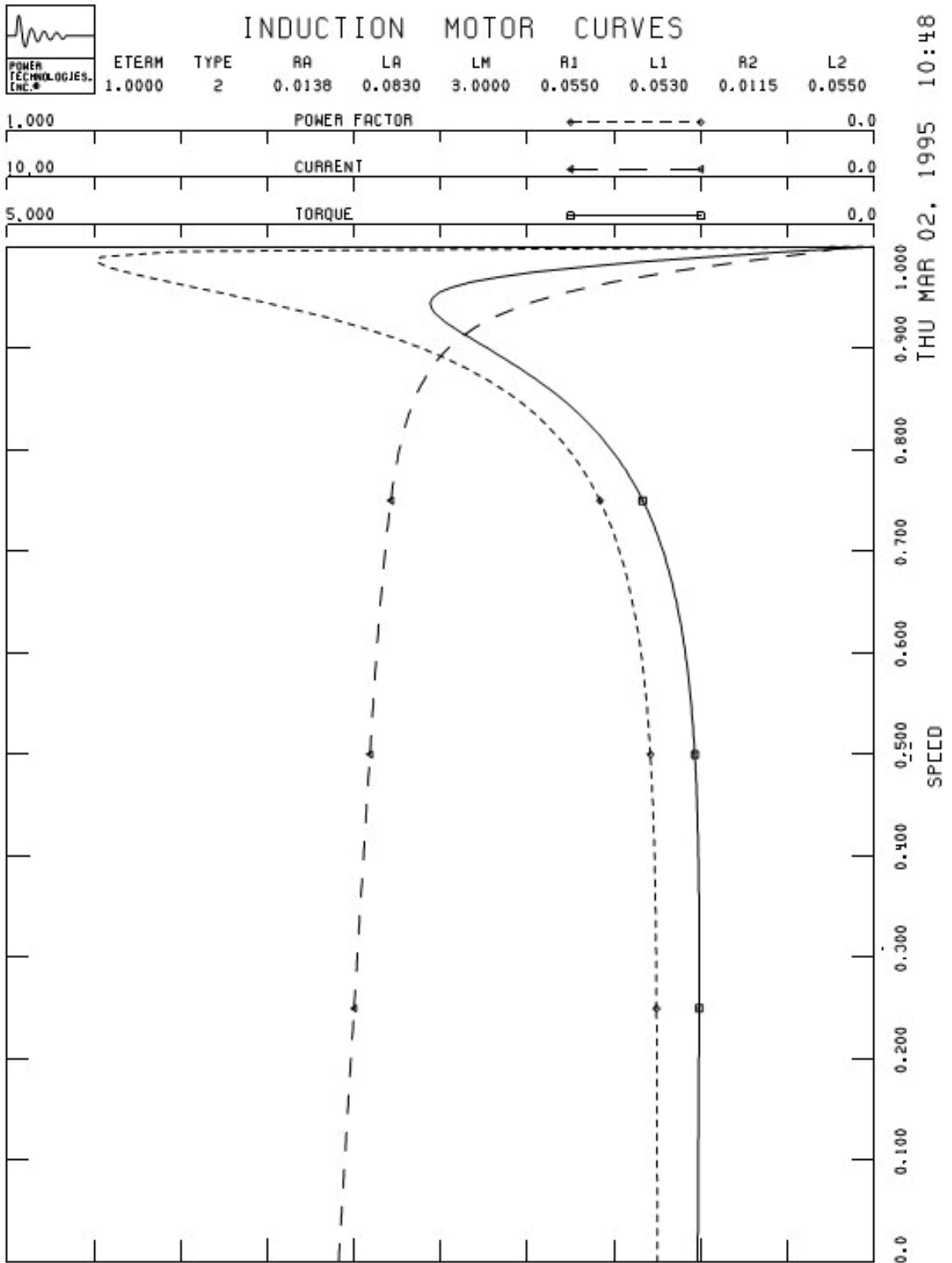
$R_a$	$X_a$	$X_m$	$R_1$	$X_1$	$R_2$	$X_2$	H s	Sumbuvustegur	Lähtelibistus
0.0138	0.083	3	0.055	0.053	0.0115	0.055	1	1	-0.00837

### Väikse mootori mudel

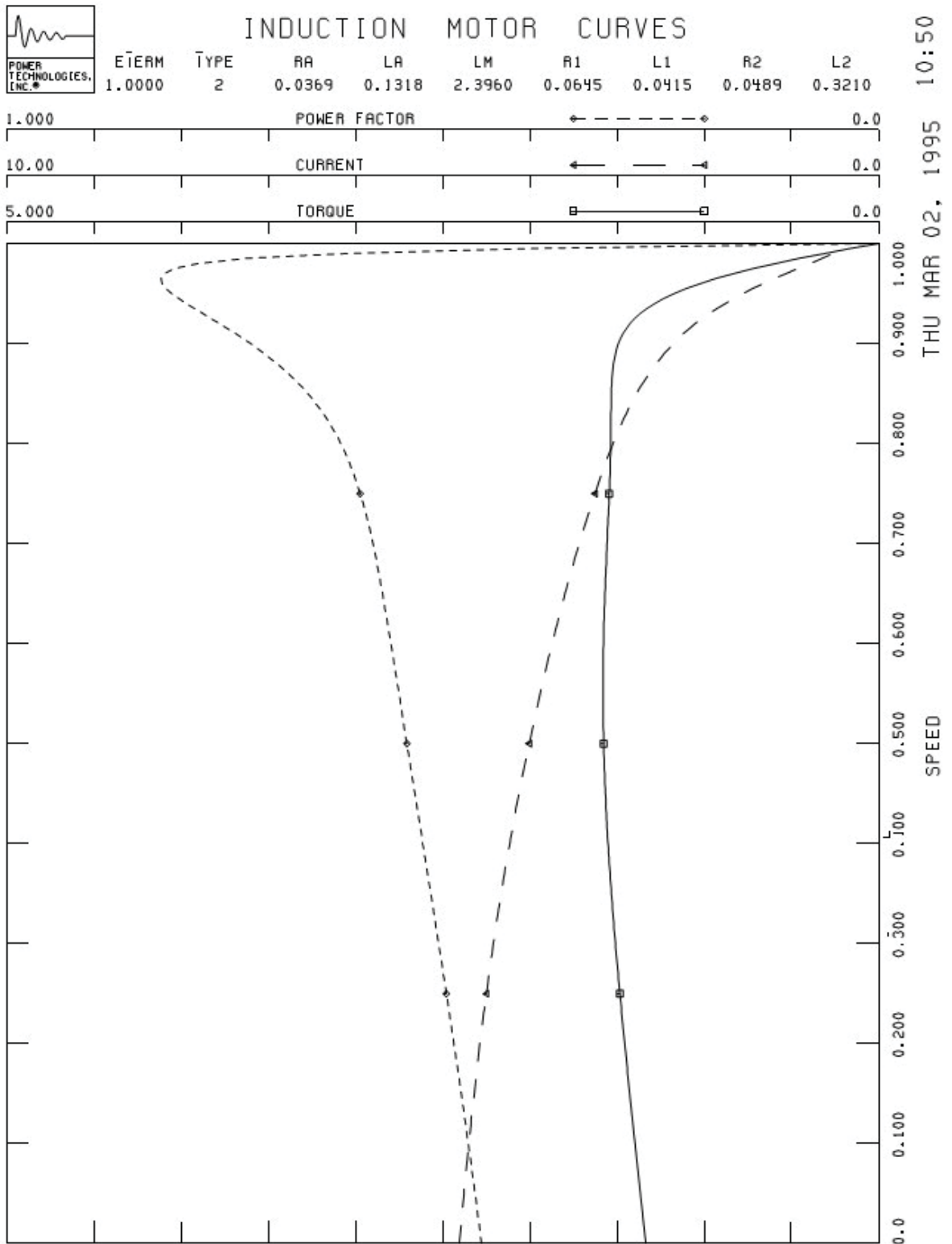
Väikest mootorit modelleeritakse kaksikuuretega asünkroonmootorina tuginedes tüüp 2 ekvivalentskeemile, mille parameetrid on antud tabelis 3.11 ning kiiruskarakteristikud joonisel 3.50.

Tabel 3.11. CLODBL väikse mootori parameetrid [6].

$R_a$	$X_a$	$X_m$	$R_1$	$X_1$	$R_2$	$X_2$	H s	Sumbuvustegu r	Lähtelibistu s
0.0369	0.131 8	2.3 96	0.064 5	0.041 5	0.048 9	0.32 1	0. 6	1	-0.02149



Joonis 3.49. CLODBL mudelis kasutatava suure mootori võimsusfaktori, voolu ja pöördemomendi kiirusarakteristikud [6].



Joonis 3.50. CLODBL mudelis kasutatava väikse mootori võimsusfaktori, voolu ja pöördemomendi kiiruskarakteristikud [6].

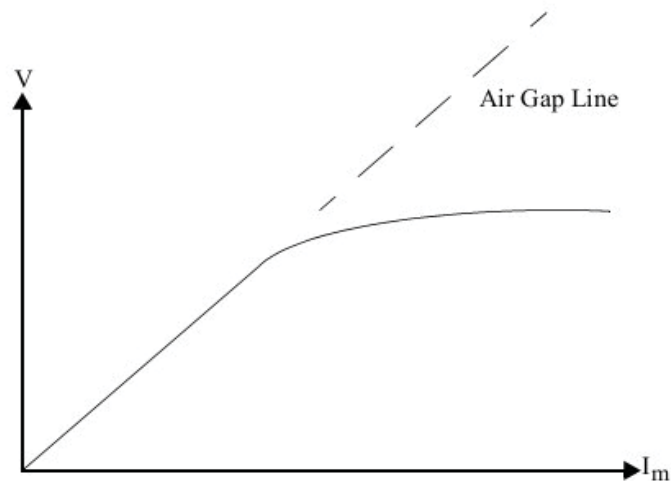
### **Lahenduslambid**

Lahenduslampide aktiivkoormust modelleeritakse konstantse vooluga koormusena. Reaktiivkoormust modelleeritakse eksponentsiaalse pingekarakteristikuga koormusena, mille pinge on astendatud astendajaga 4.5. Lähtestamisel eeldatakse võimsusfaktorit 0.9.

Pingetel vahemikus 0.65 kuni 0.75 suhtühikut kasutatakse eelnevalt kirjeldatud mudeleid, kuid võimsusi vähendatakse lineaarset kordajat kasutades. Pingetel alla 0.65 suhtühiku asendatakse lahenduslampide osa 0 koormusega, mis kujutab kustunud lampi.

### **Trafo küllastus**

Trafo magnetiseerimisvoolu osakaal peaks olema alla 10% kogukoormusest ning mudelina kasutatakse joonisel 3.51 kujutatud pingekarakteristikut.



Joonis 3.51. Pinge magnetiseerimisvoolu karakteristik [6].

### **Ülejäänud koormus**

Ülejäänud aktiivkoormusele rakendatakse eksponentsiaalset pingekarakteristikut vastavalt võrrandile 3.14 ning ülejäänud reaktiivkoormusele konstantse reaktiivtakistuse pingekarakteristikut, võrrand 3.15.

$$P = P_0 \left( \frac{U}{U_0} \right)^{K_p} \quad (3.14)$$

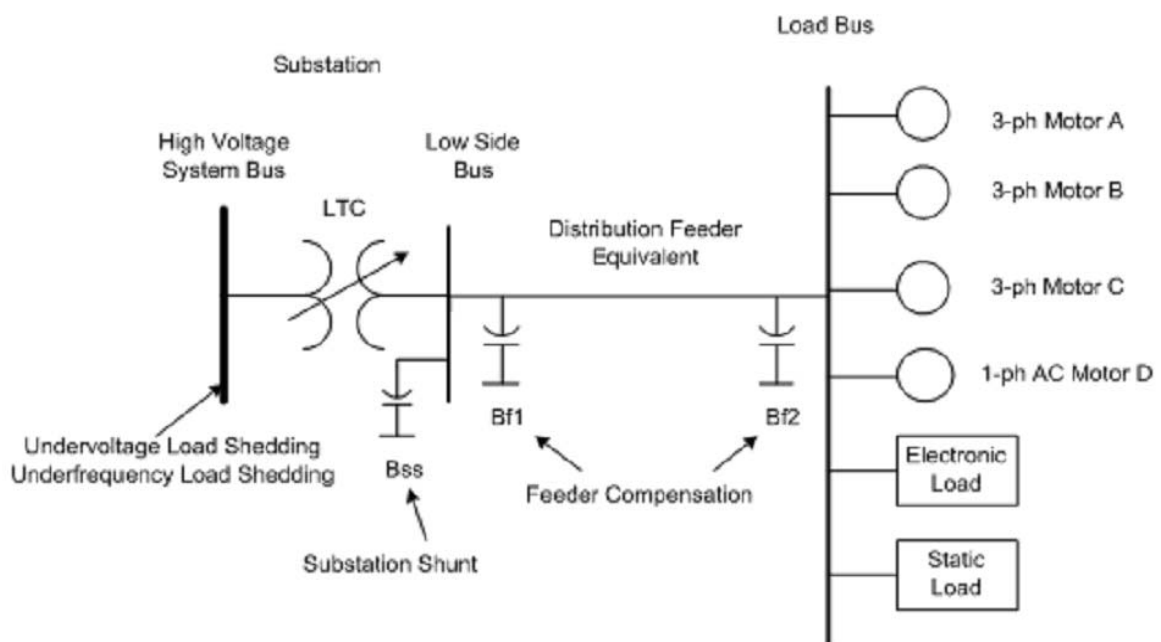
$$Q = Q_0 \left( \frac{U}{U_0} \right)^2 \quad (3.15)$$

## Komposiitmodell CMLDBL

CMLDBL põhineb WECC (Western Electricity Coordinating Council) poolt välja töötatud dünaamilise komposiitmodeli spetsifikatsioonil [10]. Mudel võimaldab koormussõlme modelleerimist kasutades joonisel 3.52 kujutatud skeemi. Antud komposiitmodelis sisalduvad järgmised alamkomponendid:

- alajaama trafo koos astmelülitiga;
- alajaama põikjuhtivus (reaktiivjuhtivus B);
- jaotusvõrgu fiider (esitatud näivtakistusega  $R_{fdr} + jX_{fdr}$  ning fiidrit kompenseeriva põikjuhtivuse osakaaluga  $Fb$ );
- kuni kolm asünkroonmootorit;
- üks ühefaasiline mootor;
- elektrooniline koormus;
- staatiline koormus;
- koormusvähenduskaits (alapinge ja alasageduse põhine).

Koormuste osakaalud väljendatakse protsentidena kogukoormusest. Mootor A osakaalu  $FmA$ , mootor B osakaalu  $FmB$ , mootor C osakaalu  $FmC$ , mootor D osakaalu  $FmD$ , elektroonilise koormuse osakaalu  $Fel$  ning staatilise koormuse osakaaluks on ülejääv osa  $Fs$ :  $Fs = 1 - FmA - FmB - FmC - FmD - Fel$ . [6].



Joonis 3.52. PSS/E komposiitmodell CMLDBL [6].

### ***Alajaama trafo koos astmelülitiga LTC***

Trafo mudelis kasutatakse trafo lühistakistuse reaktantsi  $X_{xf}$  mähiste ülekandeastet ( $T_{fixhs}$  ja  $T_{fixls}$ ) ja astmelülitit trafo sekundaarpoolel. Astmelülitit dünaamika modelleerimiseks saab aktiveerida PSS/E astmelülitit dünaamikamudeli OLTC1 (parameeter  $LTC=1$ ). OLTC1 mudeli aktiveerimisel hoiab astmelülitit trafo sekundaarpinget vahemikus  $V_{min}$  kuni  $V_{max}$ . Astmelülitit lülitused sammuga  $Step$  ning lülitusviitega  $TC$  (lülituskäsust kuni astmelülituse soorituseni) teostatakse pinge väljumisel piirvahemikust ( $V_{min}$  kuni  $V_{max}$ ) pärast ajaviite  $TD$  (astmelülitit ajaviide enne lülituskäsu andmist) möödumist. [6].

### ***Asünkroonmootorid A, B ja C***

Mudel võimaldab kolme erineva mehaanilise koormusega asünkroonmootori modelleerimist. Esiteks saab esitada konstantse mehaanilise koormusega mootoreid, näiteks tööstuslikes kompressorites ja külmutusseadmetes kasutatavaid mootoreid. Lisaks saab esitada suure mehaanilise inertsiga koormust käitavaid mootoreid, näiteks ventilaatoreid, mille koormusmoment on kiiruse ruutsõltuvuses. Samuti saab kasutatava mudeliga esitada madala inertsiga ajameid, mille koormusmoment on kiiruse ruutsõltuvuses, näiteks pumpi.

Mootorite A, B ja C mudelina kasutatakse mudeli CIM6BL modifitseeritud versiooni. Erinevalt tüüpmodelist CIM6BL kasutatakse mootori sisendandmetena staatori takistust  $R_a$  ning mootori ekvivalentskeemi induktiivsusi (sünkroonreaktantsi  $L_s$ , siirde reaktantsi  $L_p$  ja ülimööduvat reaktantsi  $L_{pp}$ ) ning ajakonstante (mööduvat ja ülimööduvat avatud ahela ajakonstanti  $T'o$  ja  $T''o$ ). Lisaks kasutatakse mootori tüüpi, võimsusfaktorit, staatori takistust, inertsikonstanti, momendi astendajat ning alapingerelee sätteid.

Samuti esitatakse koormusmomenti erinevalt mudelist CIM6BL valemiga 3.16 (CIM6BL tüüpmodelis koormusmoment esitav valemiga 3.12)

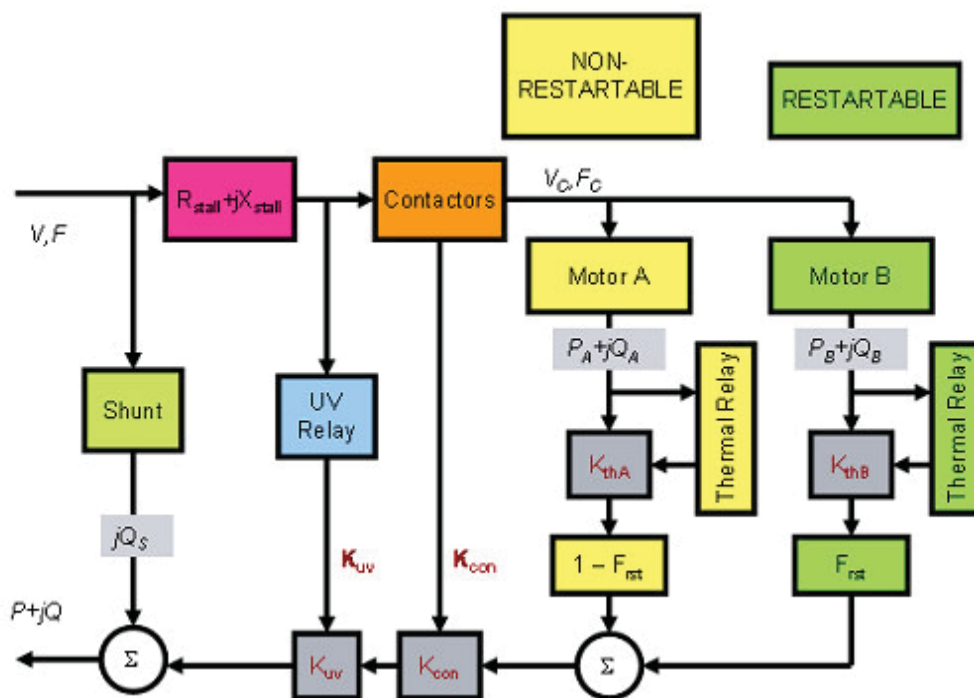
$$T = T_0(\omega)^{\text{etrqA}} \quad (3.16)$$

Sarnaselt tüüpmodelile CIM6BL saab kasutada mootorite mudelites alapingereleekaitset, mille parameetrid on mootoritele A, B ja C eraldi seadistatavad. [6].

### ***Ühefaasiline mootor***

Mootor D on skeemi lisatud ühefaasiliste õhukonditsioneeride modelleerimiseks. Antud tüüpi seadmed kasutavad alapingereleed – pinge langemisel alla kindla taseme toimub koormuse lahutamine ning pinge taastudes toimub osa koormuse sisselülitus. Mudelina kasutatakse PSS/E kasutaja defineeritud mudelit ACMTBL, mille loogika on esitatud joonisel 3.53.





Joonis 3.53. Õhukonditsioneeride mudel ACMTBL [6].

Mudeli põhiomadusena toimub koormuse seiskamine kui pinge langeb alla taseme  $V_{stall}$  ja püsib seal  $T_{stall}$  sekundit. Pinge tõusmisel üle taseme  $V_{rst}$  ning püsimisel üle  $Tr_{st}$  sekundi toimub kogukoormusest  $Fr_{st}$  osa taaskäivitus. Lisaks, kui pinge langeb alla taseme  $V_{tr1}$  ja püsib seal üle  $Tr1$  sekundi, toimub koormuse piiramine  $F_{uvr}$  osa võrra; sarnaselt piiratakse koormust pingetasemel  $V_{tr2}$  kestvusega  $Tr2$  ja piiratakse taas  $F_{uvr}$  võrra. Lisaks toimub koormuse lineaarne piiramine pingevahemikus  $V_{c1off}$  ja  $V_{c2off}$  ning taastumine vahemikus  $V_{c2on}$  ja  $V_{c1on}$ . Täiendavalt on kasutusel temperatuurirelee, mis piirab koormust lineaarselt vahemikus  $Th1t$  ja  $Th2t$ . [6].

### Elektrooniline koormus

Elektroonilise koormuse defineerimiseks kasutatakse pingetasemeid  $V_{d1}$  ning  $V_{d2}$ , võimsusfaktorit  $PF_{el}$  ja võimsusi  $P$  ning  $Q$ . Pingel üle  $V_{d1}$  käitub mudel konstantse võimsusena, pingel  $V_{d1}$  kuni  $V_{d2}$  toimub koormusvõimsuse  $P$  ja  $Q$  lineaarne vähendamine kuni nullini. [6].

### Staatiline koormus

Staatilise koormuse mudel sisaldab polünoomilist pingekarakteristikut ning lineaarset sageduskarakteristikut. Staatilise koormuse mudel on esitatav võrranditega 3.17 ja 3.18 [6].

$$P = P_0 \cdot (P1c \cdot (U/U_0)^{P1e} + P2c \cdot (U/U_0)^{P2e} + P3) \cdot (1 + Pfrq \cdot Df) \quad (3.17)$$

$$Q = Q_0 \cdot (Q1c \cdot (U/U_0)^{Q1e} + Q2c \cdot (U/U_0)^{Q2e} + Q3) \cdot (1 + Qfrq \cdot Df) \quad (3.18)$$

Kus

$$P_0 = Fs \cdot P_{CMLDBL}$$

$$Q_0 = P_0 \cdot \tan(\arccos(PFs))$$

$$P_3 = 1 - P1c - P2c$$

$$Q_3 = 1 - Q1c - Q2c$$

PFs – staatilise koormuse võimsusfaktor

### ***Koormusvähenduskaits***

Komposiitmodeli koormusvähenduskaits kasutab alapinge ja alasagedusreleekaitset, mille mõõtepunktiks on kõrgema pingestme latt. Koormuse vähendamine toimub vastavalt staatilise, elektroonilise ja mootorikoormuse karakteristikutele. Lisaks suurendab mudel fiidri induktiivtakistust pöördvõrdeliselt koormuse vähendamisega ning vähendab fiidri kompenseerimist, et modelleerida osa fiidri kaitselahutust alajaamast. Alajaama trafo ja põikjuhtivuse parameetreid ei muudeta. [6].

### ***CMLDB mudeli lähtestamine***

Komposiitmodelit saab püsitalitluse arvutuses esitada süsteemi kõrgepingelatil püsivõimsusega, vooluga või juhtivusega koormusena ehk PSS/E üldise koormusmodeliga (*Load*). Dünaamilise mudeli lähtestamisel asendatakse kogu konstantse võimsusega, vooluga ja juhtivusega koormus ühefaasilise mootori koormusega. Kui trafo või fiidri induktiivtakistus on liiga väiksed, jäetakse antud komponent komposiitmodellist välja. Lisaks, kui lähtestamisel arvatud koormuslatti pinge on alla 0.95 suhtühiku, vähendatakse fiidri näivtakistust, et viia pinge tasemele 0.95 suhtühikut. [6].

### **3.4 Kirjandus**

- [1] PSCAD X4 Online Help v4.5.2. Manitoba HVDC Research Centre, 2013.
- [2] Kundur, P. Power System Stability and Control. New York [etc.], McGraw-Hill, 1994, 1176 pp.
- [3] Palu, I., Sarnet, T., Kangro, T., Kilter, J., Landsberg, M. Elektertransport ja selle mõju elektrisüsteemi talitlusele. Tallinn, Elektroenergeetika Instituut, 2014, 214 lk.
- [4] PSSÆ 33.5 Program Operation Manual. Siemens Industry, Inc., 2013.
- [5] PSSÆ 33.5 Program Application Guide Volume 1. Siemens Industry, Inc., 2013.
- [6] PSSÆ 33.5 Program Application Guide Volume 2. Siemens Industry, Inc., 2013.
- [7] PSSÆ 33.5 Model Library. Siemens Industry, Inc., 2013.
- [8] Meldorf, M., Kilter, J., Elektrisüsteemi stabiilsus. Tallinn, TTÜ Kirjastus, 2011, 288-289 lk.
- [9] Treufeldt, Ü., Lühised elektrisüsteemides, Tallinn, TTÜ Kirjastus, 2002, 95 lk.
- [10] WECC Dynamic Composite Load Model (CMPLDW) Specifications. [Online] <https://www.wecc.biz/Reliability/WECC%20Composite%20Load%20Model%20Specifications%2001-27-2015.docx> (11.09.2015)

## 4 Koormussõlmede mõõteandmed

Põhivõrgu sõlmede koormuste ning koormuste staatiliste ja dünaamiliste karakteristikute modelleerimiseks on vaja suurt hulka erinevaid mõõteandmeid. Mõõteandmete koosseis, maht ja sisu sõltub kasutatavatest mudelitest. Eristada saab kolme liiki andmeid:

- andmed, mida vajatakse koormuse matemaatilise mudeli rakendamiseks koormussõlmedes;
- andmed, mida vajatakse koormuste staatiliste ja dünaamiliste karakteristikute komponentidepõhiseks modelleerimiseks;
- andmed, mida vajatakse koormuste staatiliste ja dünaamiliste karakteristikute katseliste mõõtmistulemuste põhjal modelleerimiseks.

Koormuste matemaatiliste mudelite koostamiseks ja rakendamiseks on kõikide vaadeldavate sõlmede kohta vajalikud järgmised tunniandmed kolmeaastasel perioodil:

- aktiivvõimsused;
- reaktiivvõimsused;
- temperatuurid;
- sõlmepinged;
- sagedused.

Koormuste staatiliste ja dünaamiliste karakteristikute leidmiseks koormuskomponentide alusel on vajalikud andmed iga vaadeldava sõlme koormuskoosseisu kohta:

- igas koormussõlmes esinevad peamised koormusklassid;
- koormusklasside koormuste osakaal sõlme kogukoormuses;
- koormusklassides sisalduvad peamised tarbimisseadmed;
- koormusklasside osakaalude ja võimalik, et ka koosseisu ajalised (ööpäevased, nädalased, sesoonsed) muutumised kõikides sõlmedes (hetkel on saadaval andmed ainult sesoonsete muutuste kohta).

Sõlmekoormuste staatiliste ja dünaamiliste karakteristikute modelleerimiseks mõõteandemete alusel on vaja teha erikatseid sarnaste koormuskoosseisudega sõlmede rühmi esindavates nn

tüüp- e esindussõlmedes. Sarnaste sõlmede rühmad ja nende esindussõlmed selgitatakse välja koormuskoosseisude analüüsi alusel. Katsetel muudetakse vatsavalt katseplaanile pinget (sageduse muutmise on vähetõenäoline, kuna eeldab mingi hajatootmiseseadme ümbrusesse saartalitluse tekitamist) ja mõõdetakse aktiiv- ja reaktiivvõimsust. Mõõtmiste samm sõltub nii pinge muutumiskiirusest ja tekkiva siirdeprotsessi kestusest kui ka koormuskarakteristiku modelleerimiseks kasutatavast mudelist ning on järskude muutuste korral mõõdetav millisekunditega.

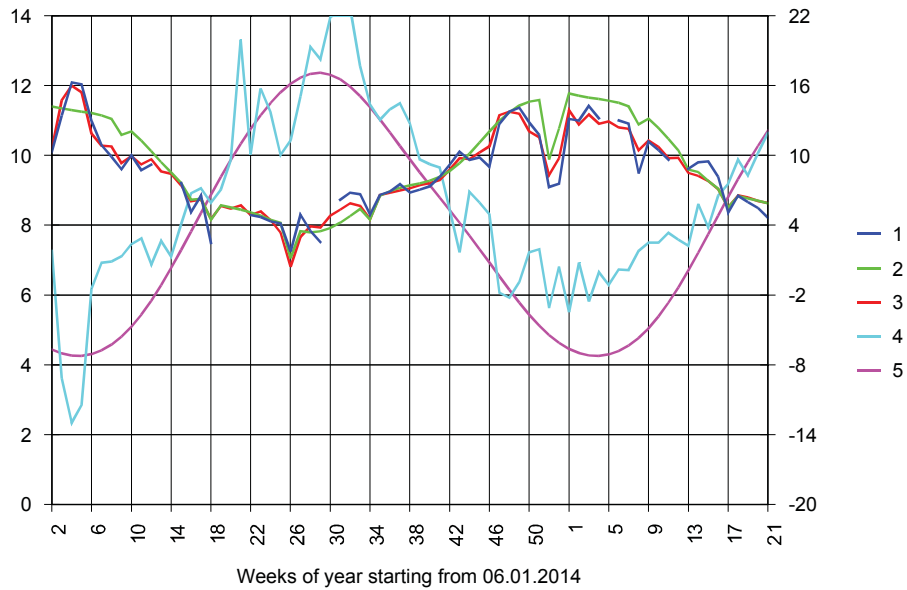
Tabelis 4.1 on andmed võimalike diskreetimissammude kohta.

*Tabel 4.1. Tüüpilised diskreetimissammud.*

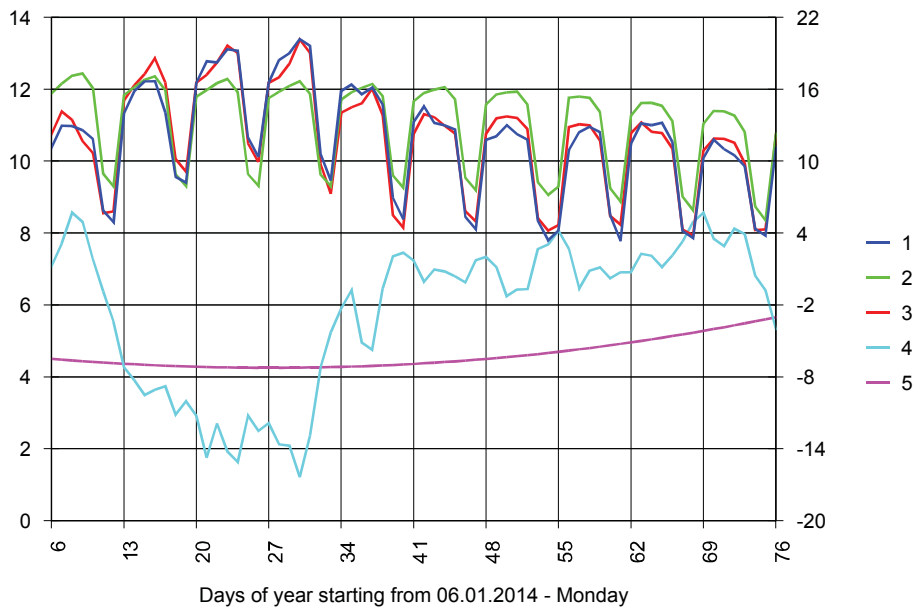
<b>Diskreerimissamm (maks.)</b>	<b>Koormusmudel</b>	<b>Usaldatavus</b>
1 ms	Dünaamiline/ZIP+as.mootor	Kõrge
	Harmooniline koormusmudel (ainult madalamad harmoonikud)	Keskmine/madal
10 ms	Dünaamiline/as.mootor	Keskmine
	Staatiline/ZIP	Kõrge
100 ms	Dünaamiline/as.mootor	Madal
	Staatiline/ZIP sagedus- ja pingepüsivus	Kõrge
	Staatiline/ZIP dünaamiline stabiilsus	Madal
1 s	Staatiline/ZIP sageduspüsivus	Keskmine
	Staatiline/ZIP pingepüsivus	Keskmine/kõrge
2s	Staatiline/ZIP sageduspüsivus	Madal
	Staatiline/ZIP pingepüsivus	Keskmine

Allpool on toodud mõned tulemused tunniste mõõteandemete põhjal estimeeritud koormuse matemaatilise mudeli rakendustest Jüri ja Abja alajaama näitel.

## Näiteid sõlmekoormuse matemaatilise mudeli rakendustest



Joonis 4.1. Jüri alajaama koormus nädalatasemel: 1 tegelik koormus, 2 matemaatiline ootus, 3 ooteväärtus. 4 temperatuur (parempoolne skaala), 5 temperatuuri norm



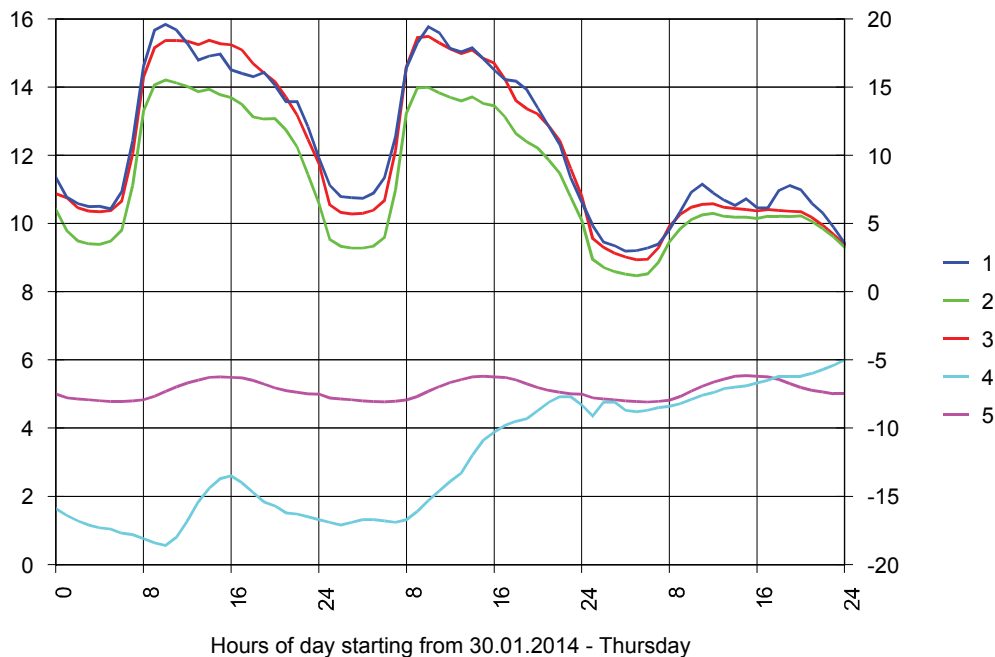
Joonis 4.2. Jüri alajaama koormus päevatasemel: 1 tegelik koormus, 2 matemaatiline ootus, 3 ooteväärtus. 4 temperatuur, 5 temperatuuri norm.

Peatükkides 1 ja 2 kirjeldatud koormusmudel toimib hästi nii suurte, gigavati suurusjärgus koormuste puhul, kuid sobib ka väiksematele, kilovati tasemel koormustele. Allpool on esitatud näiteid elektrivõrgu megavati suurusjärgus sõlmekoormustest.

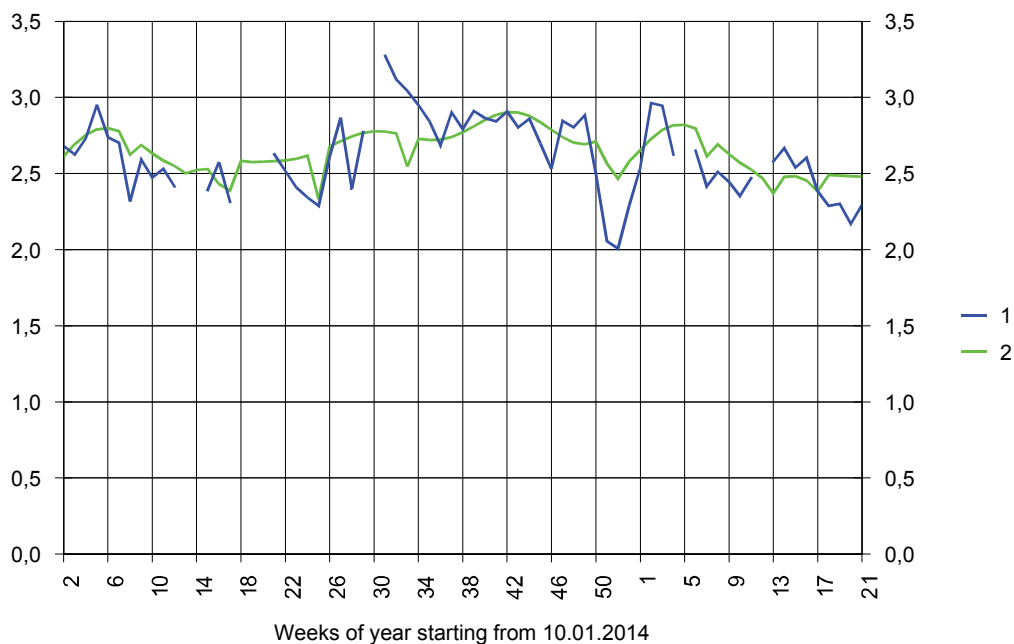
Ooteväärtuseks on matemaatilise ootuse ja temperatuuri mõju summa (temperatuur ja norm parempoolsel skaalal). Allpool sama koormuse näiteid päeva ja tunnitaseemel.

Näidetest selgub, et ooteväärtus sobib hästi kokku koormuse tegeliku väärtusega. Lühiajalisel prognoosimisel lisandub siia veel koormuse deviatsioon, mis koormuse hälvet veelgi vähendab. Pikaajaliseks prognoosimiseks ooteväärtus siiski ei sobi, sest temperatuuri mõju on leitud temperatuuri tegelike väärtuste (või lühiajalise prognoosi) alusel. Koormuse pikaajaliseks prognoosiks kõlbab ennekõike matemaatiline ootus, mille võib leida mistahes ennetusajaga. Temperatuuri mõju võib pikaajalisel prognoosimisel imiteerida (külm talv jms).

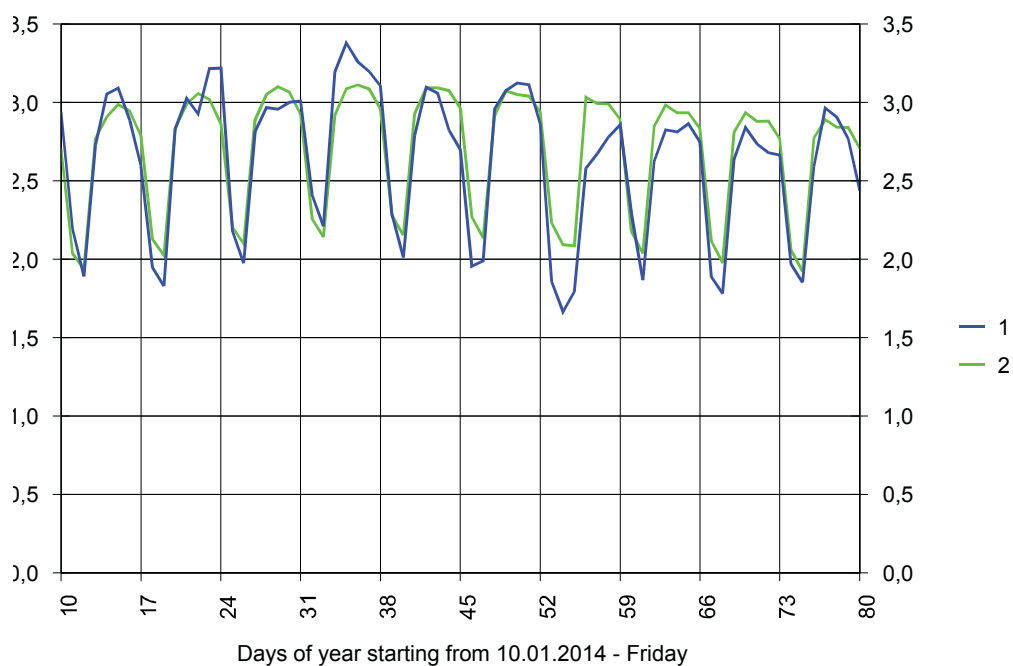
Esitatud näidetes on tegemist aktiivvõimsusega. Reaktiivvõimsustele (joonised 4.4...4.6) on temperatuuri mõju on tagasihoidlikum, mistõttu on näidetes vaid matemaatiline ootus.



Joonis 4.3. Jüri alajaama koormus tunnitaseemel: 1 tegelik koormus, 2 matemaatiline ootus, 3 ooteväärtus. 4 temperatuur, 5 temperatuuri norm.



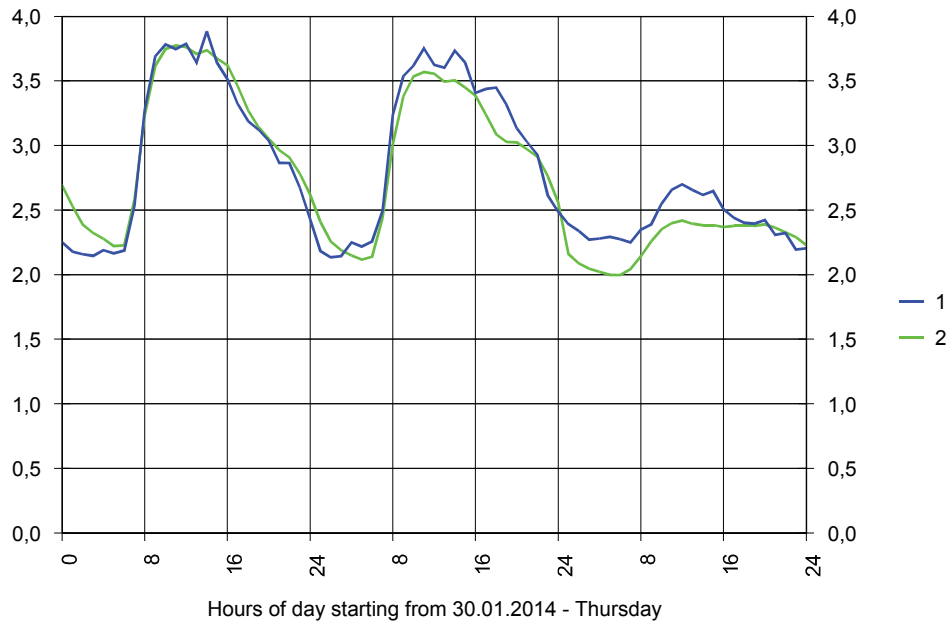
Joonis 4.4. Jüri alajaama reaktiivkoormus nädalatasemel: 1 tegelik koormus, 2 matemaatiline ootus.



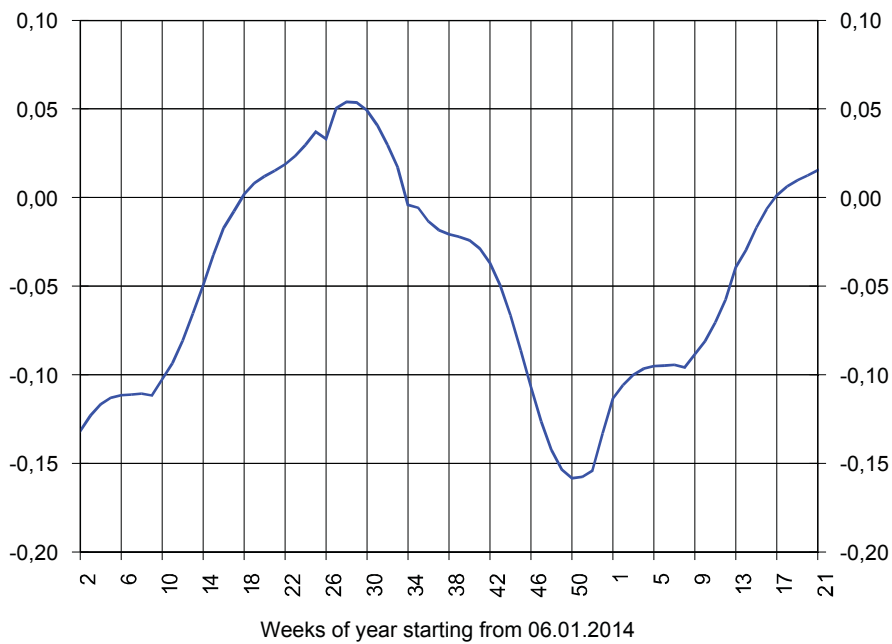
Joonis 4.5. Jüri alajaama reaktiivkoormus päevatasemel: 1 tegelik koormus, 2 matemaatiline ootus.

Koormuse näitajaid võib matemaatilise mudeli alusel välja tuua mitmesuguseid. Allpool on näitena aktiivkoormuse temperatuuritundlikkus ( $\text{MW}/^{\circ}\text{C}$ ). Muuhulgas võib tähele panna, et suveperioodil, kus temperatuuri mõju koormusele on enamasti väike, on Jüri näites see koguni positiivne. Põhjusena võib olla õhu konditsioneerimine, ventilatsioon vms.



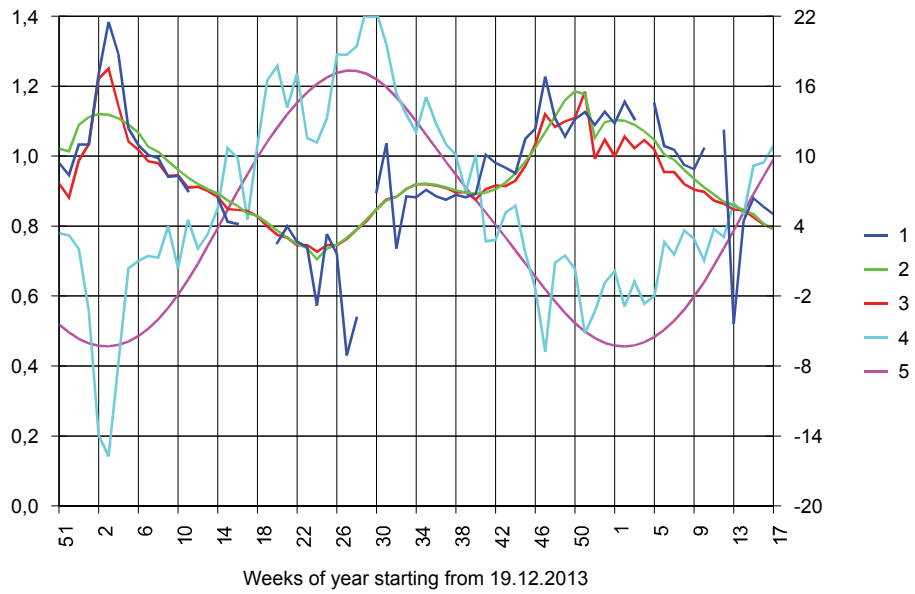


Joonis 4.6. Jüri alajaama reaktiivkoormus tunnitase mel: 1 tegelik koormus, 2 matemaatiline ootus.

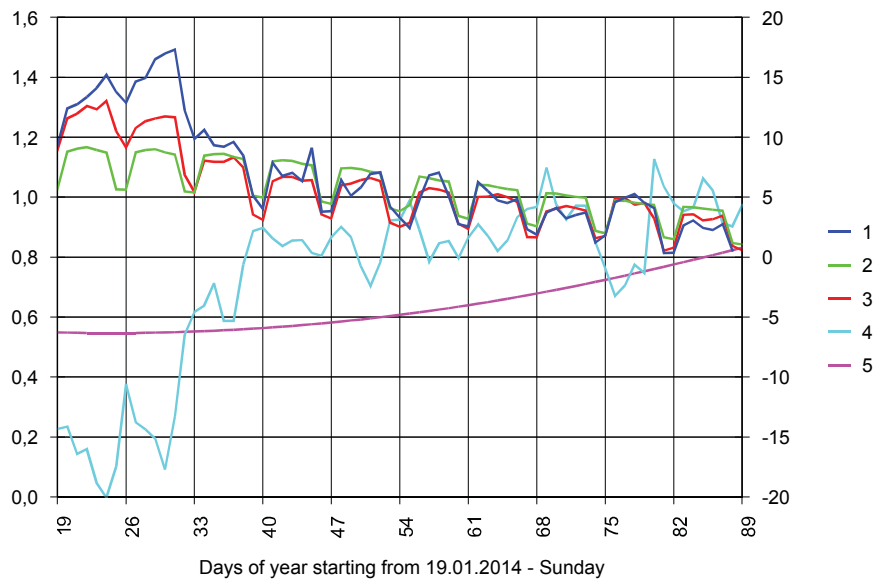


Joonis 4.7. Jüri alajaama koormuse temperatuuritundlikkus (MW/°C) nädalatasemel.

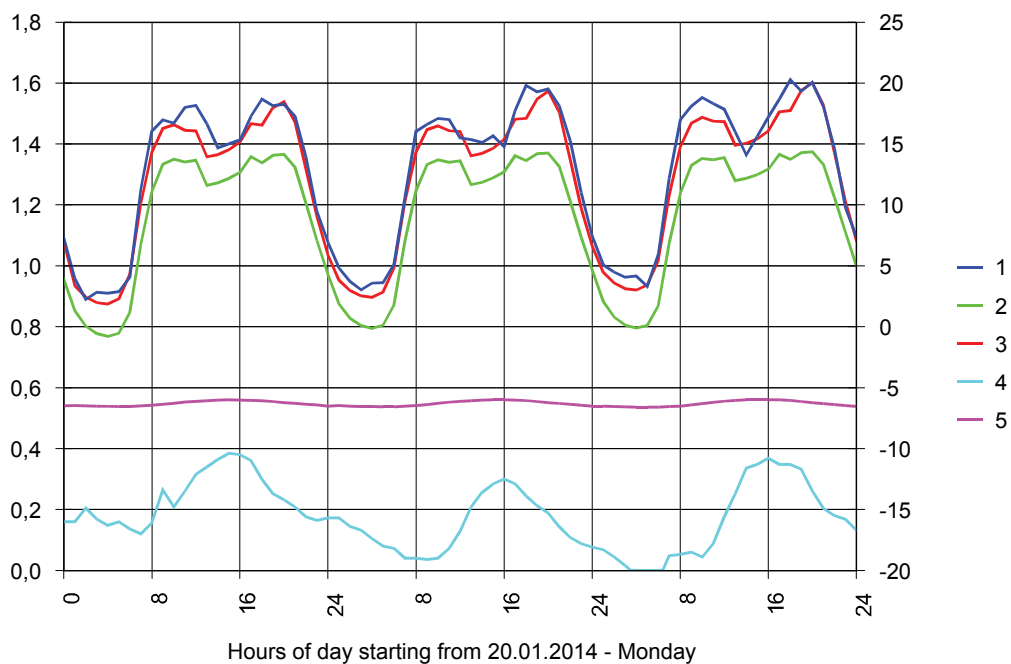
Vaatleme veel Jüri alajaama koormusest suurusjärgu võrra väiksemat Abja alajaama koormust. Joonistel 4.8...4.14 on eeltooduga sarnased sõltuvused.



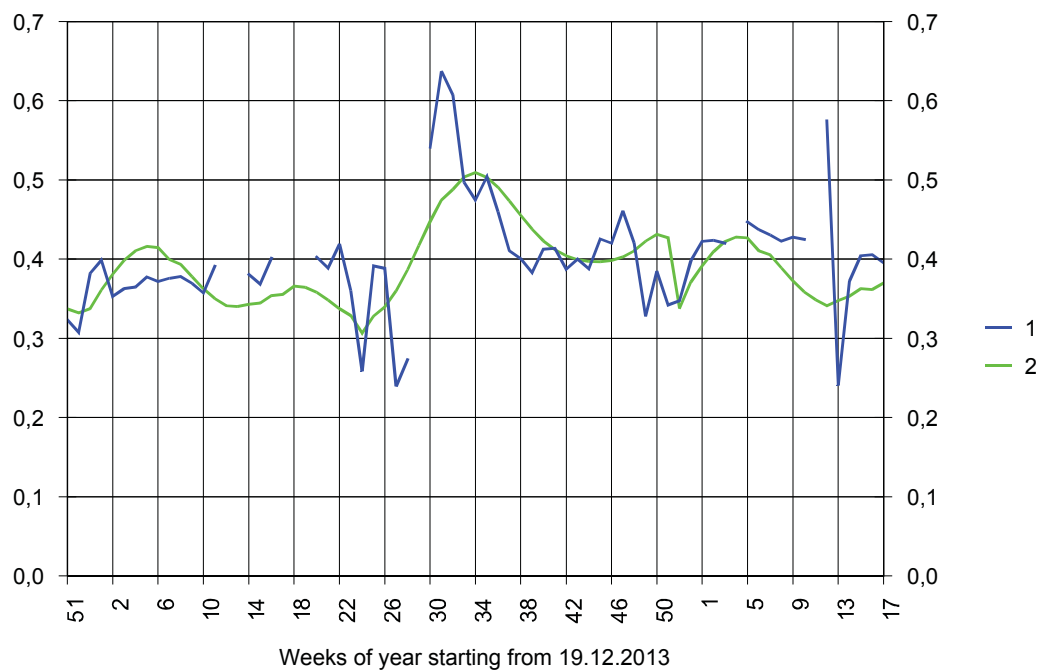
Joonis 4.8. Abja alajaama koormus nädalatasemel: 1 tegelik koormus, 2 matemaatiline ootus, 3 ooteväärtsus. 4 temperatuur (parempoolne skaala), 5 temperatuuri norm.



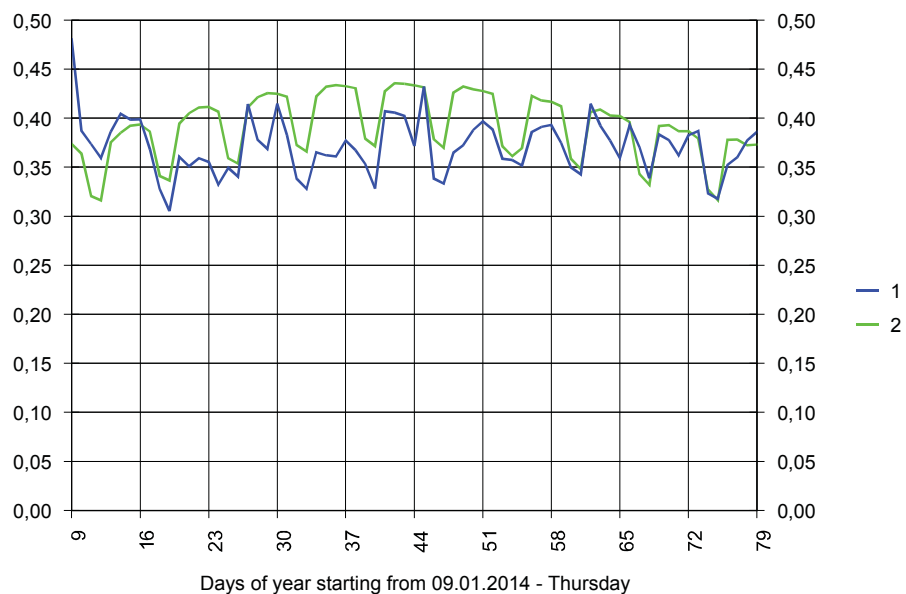
Joonis 4.9. Abja alajaama koormus päevatasemel: 1 tegelik koormus, 2 matemaatiline ootus, 3 ooteväärtsus. 4 temperatuur, 5 temperatuuri norm.



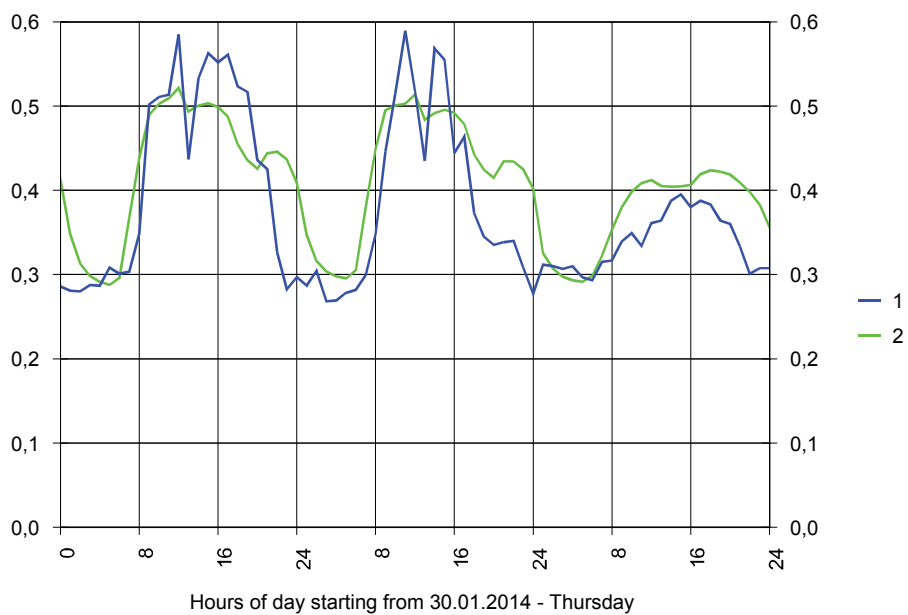
Joonis 4.10. Abja alajaama koormus tunnitase mel: 1 tegelik koormus, 2 matemaatiline ootus, 3 ooteväärtus. 4 temperatuur, 5 temperatuuri norm.



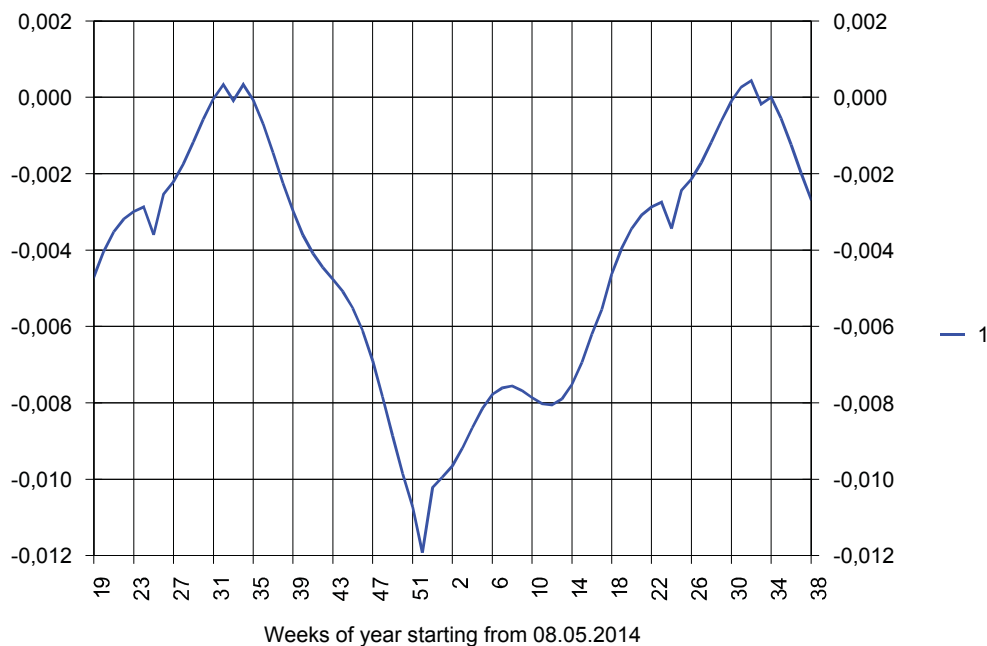
Joonis 4.11. Abja alajaama reaktiivkoormus nädalatasemel: 1 tegelik koormus, 2 matemaatiline ootus.



*Joonis 4.12. Abja alajaama reaktiivkoormus päevatasemel: 1 tegelik koormus, 2 matemaatiline ootus.*



*Joonis 4.13. Abja alajaama reaktiivkoormus tunnitaseemel: 1 tegelik koormus, 2 matemaatiline ootus.*



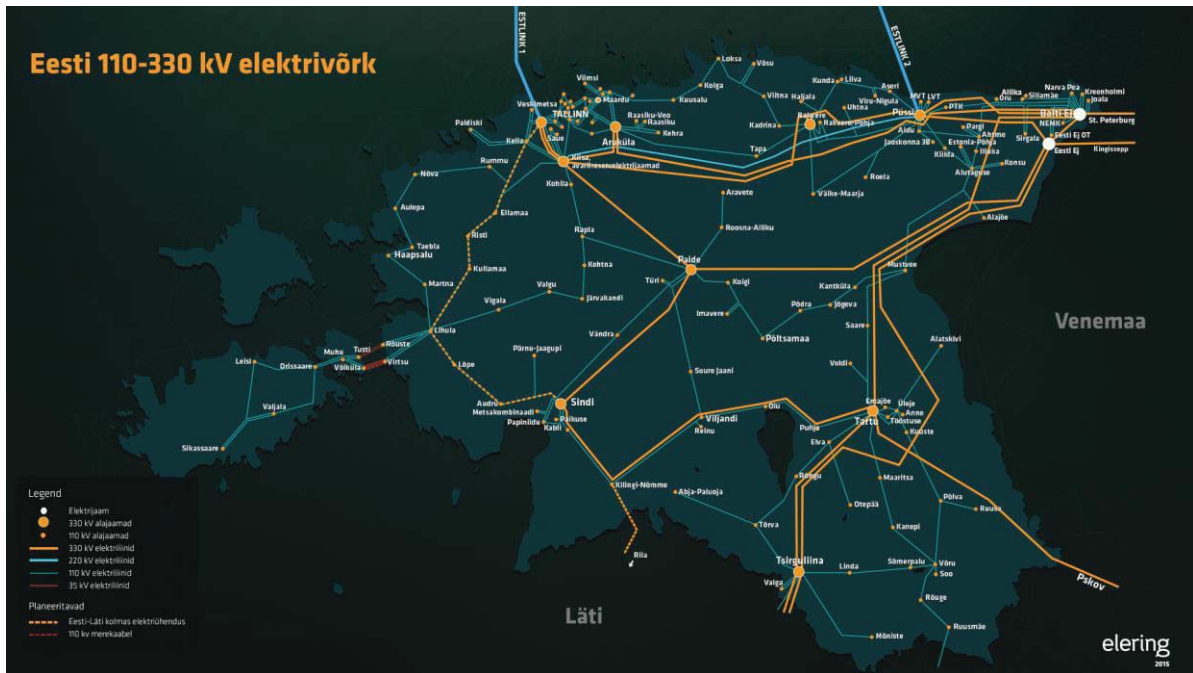
*Joonis 4.14. Abja alajaama koormuse temperatuuritundlikkus (MW/°C) nädalatasemel.*

Eeltoodust võib tõdeda, et matemaatiline mudel sobib sõlmekoormuste kirjeldamiseks hästi. Sõlmekoormusi võib analüüsida ning prognoosida ka pikema ennetusajaga. Tõsi, sõlmekoormustes võib esineda tarbijate koosseisu järske muutusi, mis võivad olla tingitud näiteks ümberlülitustest võrgus. Seetõttu tuleb koormusi pidevalt jälgida ning vajaduse korral mudelit muuta.

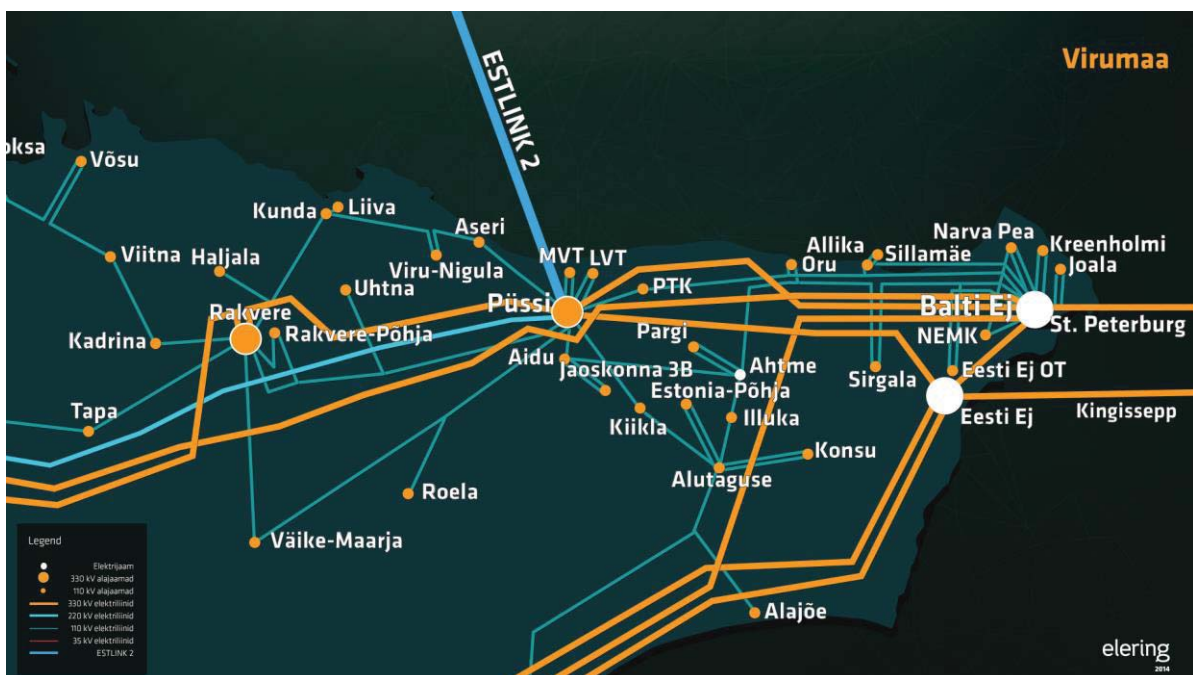
**Koormuskomponentide andmeid** analüüsitakse 5. peatükis.

## 5 Tarbijate tüüpgruppide osakaalud koormussõlmedes

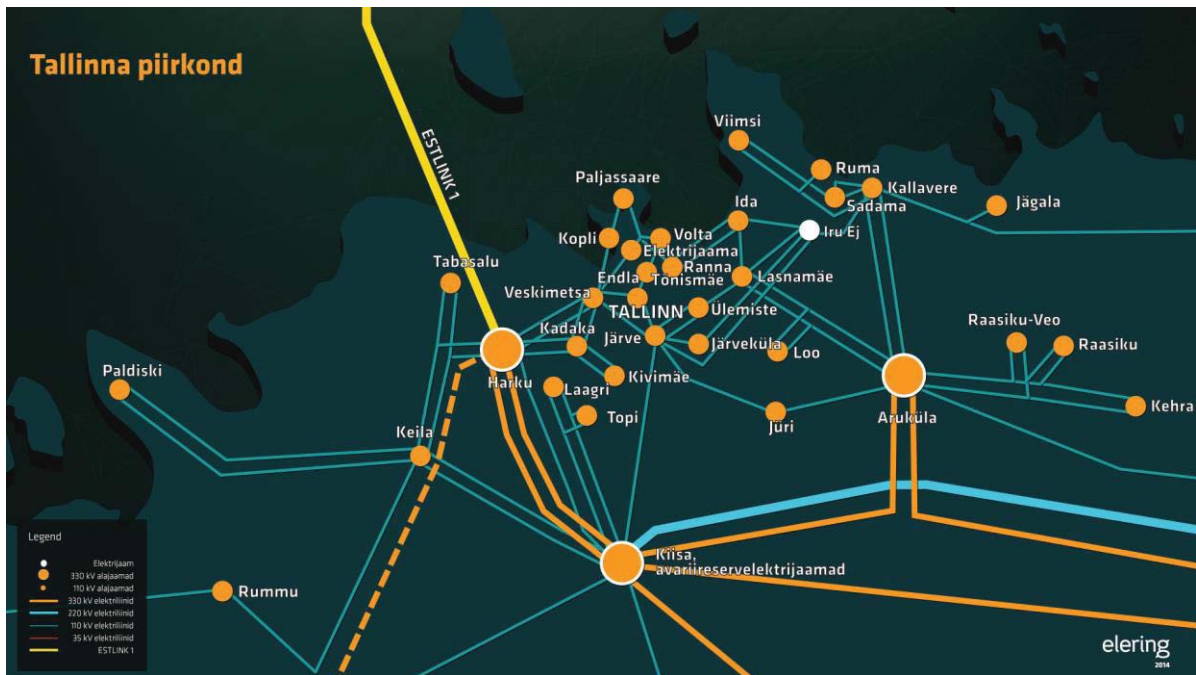
Eesti 110 kV elektrivõrgus on ligi 150 alajaama, mille asukohad on kujutatud joonisel 5.1. Selguse huvides on Virumaa ja Tallinna piirkond esitatud eraldi vastavalt joonisel 5.2 ja joonisel 5.3.



Joonis 5.1. Eesti 110-330 kV elektrivõrk [1].



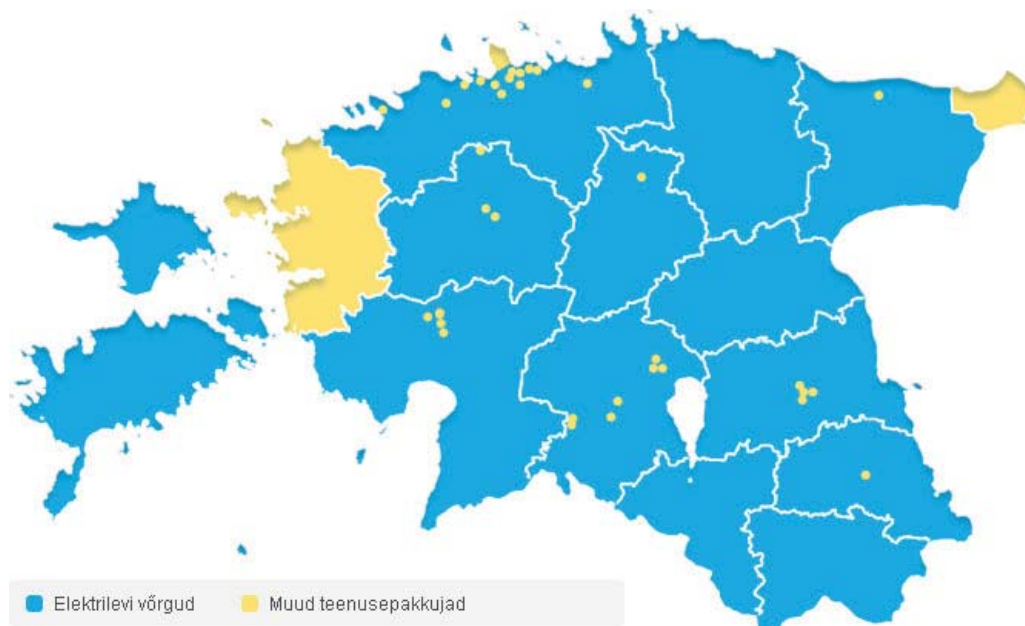
Joonis 5.2. Eesti 110-330 kV elektrivõrk: Virumaa piirkond [1].



Joonis 5.3. Eesti 110-330 kV elektrivõrk: Tallinna piirkond [1].

## 5.1 Eesti 110 kV elektrivõrgu kliendid

Eleringi 110 kV ülekandevõrgus on 150 analüüsitavaid koormusalajaama, mis toidavad 169 liitumispunkti. Klientide liitumispunktide loetelu on esitatud Lisas 2. Kokku 134 liitumispunktis on klientiks Elektrilevi, mis on Eesti suurim jaotusvõrgu operaator. Elektrilevi võrgud on kujutatud Joonisel 5.4 sinise värviga. Ülejäänud 35 liitumispunkti jagunevad 31 kliendi vahel, kellest enamik tegutseb ainult ühes liitumispunktis.



Joonis 5.4. Elektrilevi võrgud [2].

Lisas 2 esitatud kliendiandmete tabeli põhjal toidavad 13 alajaama mitut klienti. Jagatud 13 alajaamast, mille loetelu on esitatud tabelis 5.1, 12 toidavad ühe kliendina Elektrilevi, erandlikuks alajaamaks on Rõuste, kus Elektrilevi ei tegutse.

*Tabel 5.1. Mitme kliendiga 110 kV alajaamad.*

<b>Alajaam</b>	<b>Pinge (kV)</b>	<b>Klient</b>
Ahtme	35	Elektrilevi
	6	VKG Soojus
Allika	10	Elektrilevi
	6	VKG Soojus
Eesti EJ OT	6 ja 35	Elektrilevi
	110	EE Narva Elektriijaamad
Iru	110	Tallinna Elektriijaam
	110	Eesti Energia AS Iru elektriijaam
	10	Elektrilevi
Kallavere	10 ja 35	Elektrilevi
	110	OÜ TS Energia
Loksa	10	Elektrilevi
	10	Loksa Laevatehase AS
Loo	10	Elektrilevi
	35	Paekivitoodete Tehase OÜ
Lõpe	10	Elektrilevi
	110	Tuuleenergia OÜ
Metsakombinaadi	10	Elektrilevi
	110	Fortum Eesti AS
Paldiski	6	Elektrilevi
	110	Eesti Energia AS Paldiski tuuleelektriijaam
	35	Pakri Tuulepargid OÜ Pakri TP
	110	Pakri Tuulepargid OÜ Paldiski TP
Püssi	330	Raunistal AS
	110	OÜ Raisner
	330	OÜ Kindel Vara
	10	Elektrilevi
Rõuste	110	Tooma Tuulepark OÜ
	110	OÜ Roheline Ring Tuulepargid
	110	AS Skinest Energia
Virtsu	10 ja 35	Elektrilevi
	110	OÜ Roheline Ring Tuulepargid

Lähtuvalt Elektrilevi suurest osakaalust Eleringi 110kV võrgu klientide hulgas hangiti esmalt Elektrilevi kogutud tarbimisandmed, mida on kirjeldatud järgmistes alapeatükkides.



## 6 Koormusklasside koosseisu kuuluvad iseloomulikud tarbimisseadmed

Vastavalt Elektrilevi andmetele jaotatakse koormused viide põhiklassi.

- Kodutarbijad: eramud, korterelamud ja suvilad.
- Põllumajandus: karjakasvatus, taimekasvatus ja kalandus.
- Teenindus: kontorid, kaubandus, teenindus, tervishoid, muu.
- Tööstus: tööstus, transport, transpordibaasid.
- Avalik: ühiskondlikud hooned.

Iga koormusklass moodustub suurel hulgal erisugustest tarbimisseadmetest. Sõlmekoormuste reaktsioon pingele ja sageduse muutustele sõltub iga üksiku tarbimisseadme omadustest. Siiski võib tarbimisseadmeid rühmitada lähtudes nende funktsioonide sarnasusest ja eelkõige lähtudes nende pingele- ja sagedustundlikkuse sarnasusest iseloomulikesse gruppidesse. Olulisemad tüüpilised tarbimisseadmete rühmad koos näidetega.

- 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, juhitavad mootorid.
- Mootorid: kolmefaasilised asünkroonmootorid, ühefaasilised induktsioonmootorid, sünkroonmootorid.
- Tööstusseadmed, elektrienergia omatarbeseadmed: tööstusmasinad, aparaadid, pumbad, kompressorid, ventilaatorid, soojapuhurid, kolmefaasilised õhukonditsioneerid, kaarahjud jms.

Erinevates koormusklassides domineerivad teatud tarbimisseadmed. Paljud tarbimisseadmed võivad esineda erinevates koormusklassides. Konkreetsesse koormusklassi kuuluvate tarbimisseadmete osakaal võib eri koormussõlmedes olla erinev. Detailsed andmed tarbimisseadmete liigi ja jaotuse kohta mingis koormussõlmes praktiliselt puuduvad. Seega saab mingisse koormusklassi kuuluvaid tarbimisseadmeid hinnata üksnes ligikaudselt üldiste ettekujutuste või kirjandusallikate alusel.

Siiski lähtub komponentidepõhine koormuskarakteristikute modelleerimine konkreetsete tarbimisseadmete pinge- ja sagedustundlikkusest. Koormussõlme agregeeritud koormuse staatiliste ja dünaamiliste karakteristikute modelleerimise üldine skeem võiks olla järgmine:

- selgitada välja koormussõlmes esinevad peamised koormusklassid (vt p.5);
- määrata kindlaks koormusklasside jaoks iseloomulikud domineerivad tarbimisseadmed;
- leida igale tüüpilisele tarbimisseadmele sobivad pinge- ja sagedustundlikkuse mudelid (vt p.2.2);
- leitud tarbimisseadmete mudelite alusel koostada koormusklassi pinge- ja sagedustundlikkuse mudelid (vt p.2.2);
- arvestades koormussõlme kuuluvate koormusklasside osakaale, koostada koormussõlme staatiliste ja dünaamiliste karakteristikute mudelid;
- sobitada saadud mudelid PSCAD ja PSS/E koormusmudelitega.

Täpsemalt käsitletakse antud temaatikat uurimistöö järgmistes etappides.

## Kokkuvõte

Eesti põhivõrgu alajaamade koormuste staatiliste ja dünaamiliste karakteristikute uurimustöö käesoleva I etapi peamiseks eesmärgiks olid uurimistöö alustamiseks vajaliku ülevaate andmine, koormuse matemaatilise mudeli kirjeldamine, lähteandmete kogumine ja esialgne töötlemine, PSCAD ja PSS/E programmides kasutatavate koormuskarakteristikute mudelite uurimine ja analüüs ning koormussõlmede tarbijate tüüpgruppide kindlaksmääramine.

Töös on esitatud TTÜ elektroenergeetika instituudis väljatöötatud koormuse matemaatilist mudelit, näidatud selle mudeli omadusi ja selgitatud selle mudeli kasutusvõimalusi mitmesuguste koormuse omaduste ja näitajate esiletoomisel, sealhulgas ka koormuse staatiliste karakteristikute kindlakstegemisel. Selgitatud on, et mudeli parameetrite estimeerimiseks on vaja kõikide vaadeldavate sõlmede aktiivkoormuse, reaktiivkoormuse, pinge, sageduse ja temperatuuri tunniandmeid vähemalt kolmeaastasel perioodil.

Kirjanduse põhjal on antud ülevaade tänapäeval kasutatavatest koormuse staatiliste ja dünaamiliste karakteristikute mudelitest. On iseloomustatud nii mõõtmistel põhinevaid kui ka koormuskoosseisude analüüsil põhinevaid meetodeid. Välja on toodud nende meetodite põhieelised ja -puudused. Iseloomustatud on koormusklasse ja antud lühiülevaade tüüpilistest tarbimisseadmetest. Eraldi tähelepanu on pööratud asünkroonmootorite staatilistele ja dünaamilistele karakteristikutele. Töös on esitatud erinevate koormusmudelite võimalikud kasutusvaldkonnad ja tüüpilised parameetrid erinevate tarbijate ja koormusklasside jaoks.

Töös on antud PSS/E ja PSCAD tarkvarade koormusmudelite põhjalik ülevaade. Uuritud ja kirjeldatud on nende mudelite pingetundlikkuse ja sagedustundlikkuse omadusi. Tulemused näitasid, et koormuse pingetundlikkustegurid mõjutavad oluliselt koormuse talitlust simulatsioonides ning täpsete tulemuste saamiseks tuleks teostada mõõtmiste põhine tundlikkustegurite sobitamine. Seetõttu tuleks konkreetsete alajaamade sobilike pingetundlikkustegurite väärtuste määramiseks läbi viia katsemõõtmised Elering AS-i ülekandevõrgus. Mõõteinformatsiooni puudumisel on simulatsioonide tulemuste põhjal soovituslik kasutada mudeli seadistamisel pingetundlikkustegurite nullväärtusi, et saavutada korrektne koormusvoogude jagunemine ning sõlmepinged, mille põhjal seada täpsemad koormusmudeli nimiparameetrid.

Koormuskarakteristikute komponentidepõhiseks modelleerimiseks on Elektrilevist saadud kuuandmed koormussõlmedesse agregeeritud koormuste koormusklasside ja nende

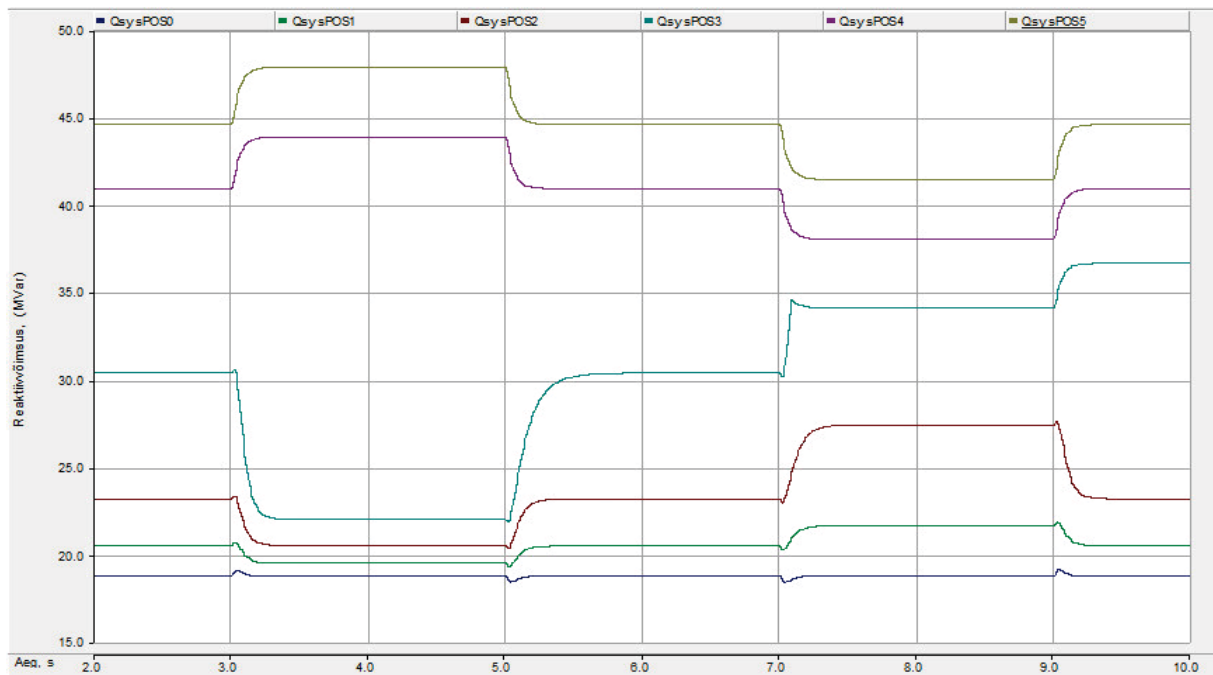
osakaalude kohta aastatel 2012 kuni 2015. Kuuandmete põhjal on koostatud koormussõlmede kohta koormusklasside osakaalu iseloomustavad graafikud. Uurimise käigus avastati ebakõlad 2012. aasta andmetes. Pärast 2012. aasta andmete eemaldamist arvutati tüüpgruppide osakaalud kõikides Elektrilevi liitumispunktides ning analüüsi lihtsustamiseks arvutati keskväärtuste põhjal ekvivalentaasta tarbimine. Ühe probleemina ilmned nn „jagatud koormussõlmed“: kaheteistkümnes Elektrilevi koormussõlmes ei esindanud esitatud andmed kõiki sõlme tarbijaid. Uurimistöö tulemusena on Elektrilevi koormussõlmed jagatud üheksasse iseloomulikku gruppi, mida edaspidi hakatakse koormuskarakteristikute leidmise eesmärgil eraldi analüüsima.

Järgmiste etappide tegevused on:

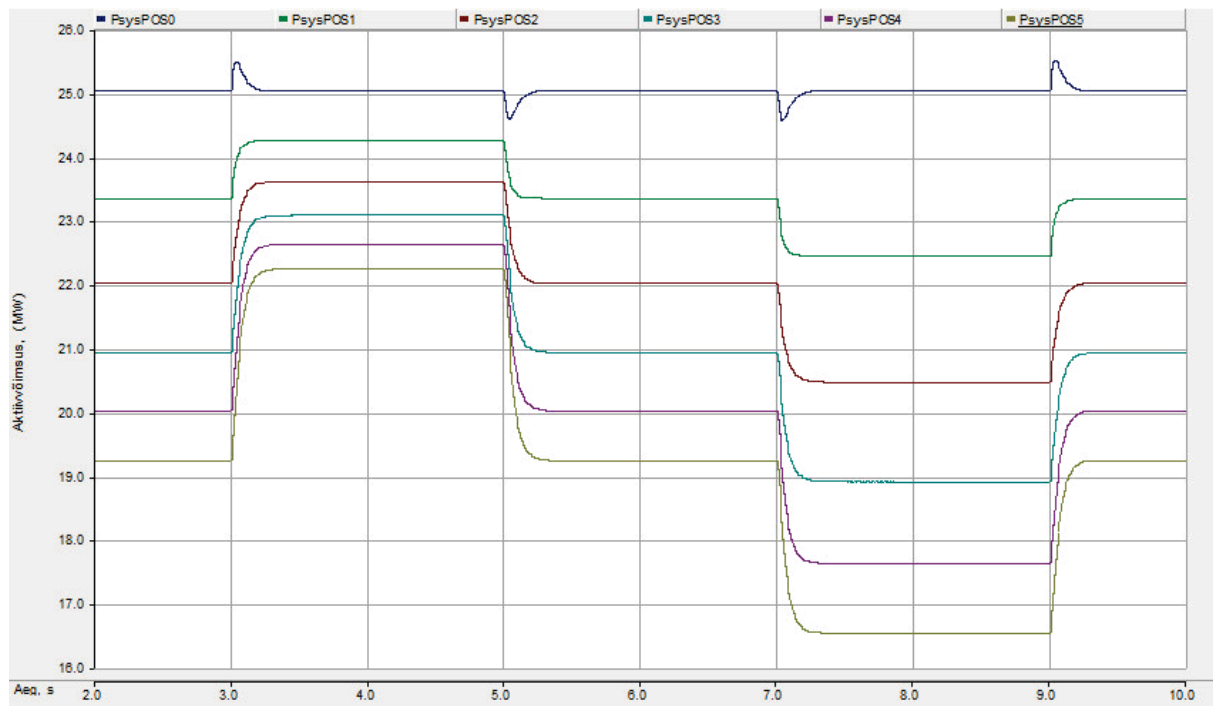
- PSS/E ja PSCAD tarkvarade koormusmodelite analüüsi jätkamine. PSS/E koormusmodelite seadistusparameetrite mõju uurimine. PSCAD mudeli ebarealistlike võnkumiste summutamise võimaluste uurimine.
- Uuritavate koormussõlmede kohta käivate mõõtmistulemuste täiendav hankimine: aktiiv- ja reaktiivkoormuse, pinge ning sageduse aegread. Elering AS-i andmebaaside läbitöötamine matemaatilise koormusmodeli estimeerimiseks. Täpsemate koormusandmete hankimine Elektrilevi AS ja teiste võrguettevõtete käest. Saadava informatsiooni töötlemine.
- Koormuse matemaatilise mudeli täiustamine koormuse staatiliste karakteristikute leidmiseks. Instituudis välja töötatud koormuse matemaatilise mudeli jaoks pinge ja sagedussõltuvuse moodulite loomine aktiiv- ja reaktiivkoormuse ning pinge ja sageduse aegridade põhjal.
- Pinge koormusest sõltuvuse uurimine ja arvestamine. Koormuse muutusest põhjustatud pingemuutuste eemaldamine.
- Uuritavate koormuste modelleerimine ja koormuste staatiliste karakteristikute leidmine koormuse matemaatilise mudeli alusel.
- Koormuskoosseisude ajalise (ööpäevane, nädalane, sesoonne) muutumise uurimine. Eesti elektrisüsteemi 110 kV alajaamade koormuste koosseisude muutlikkuse selgestegemine.
- Erinevate tarbimiseseadmete staatiliste ja dünaamiliste pinge- ja sagedussõltuvuste uurimine PSCAD mudelite abil. Tarbimiseseadmete alusel koormusklasside mudelite koostamine. Koormusklasside mudelite alusel agregeeritud sõlmekoormuste mudelite koostamine.

- Hajatootjate mõju uurimine agregeeritud koormuste staatilistele ja dünaamilistele karakteristikutele. Kirjanduse põhjal oluliste aspektide ja seaduspärasuste tuvastamine.
- Koormuskarakteristikute katselise määramise võimaluste uurimine. Võimalike katsesõlmede kindlakstegemine ja ajaperioodi ning diskreetimissageduse valik. Võimalike katsete plaanimine ja teostamine. Tulemuste analüüs ja kasutamine karakteristikute määramiseks.

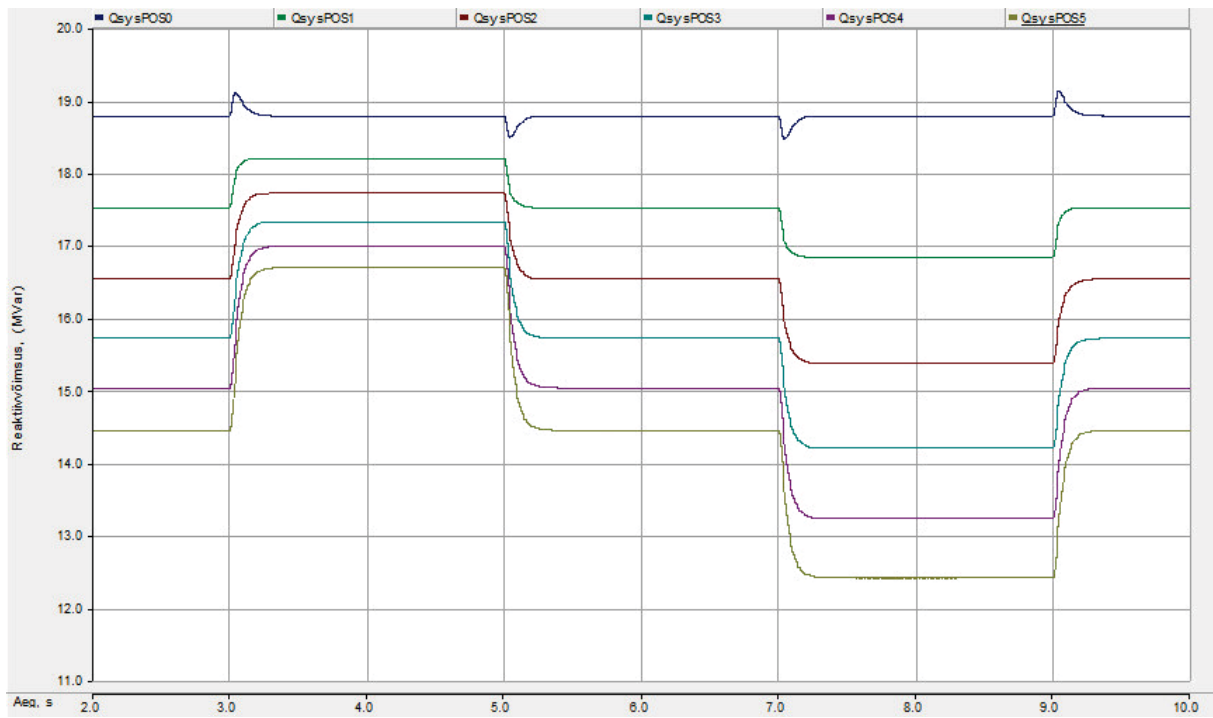
## Lisa 1 PSCAD eksponentsiaalse koormusmodeli simulatsiooni tulemused



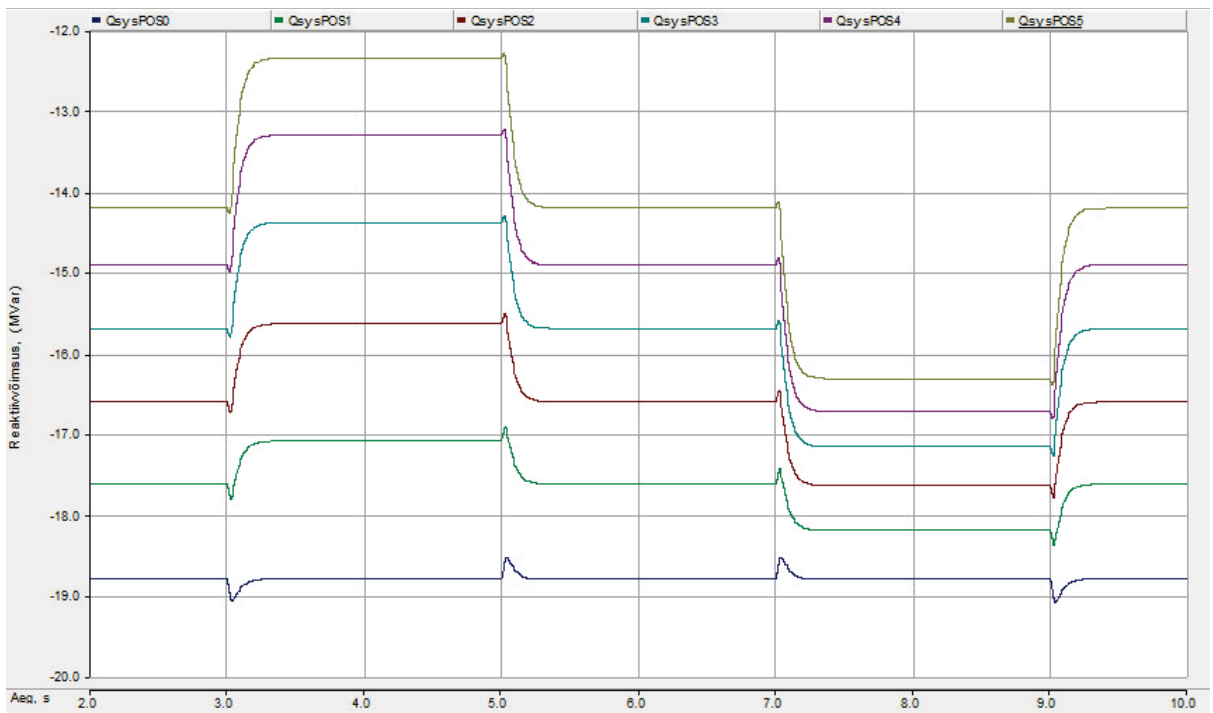
Joonis L1. Induktiivkoormuse pärijärgnevuskomponendi pingetundlikkus piirides -5 kuni 0 faasikoormusmudelil.



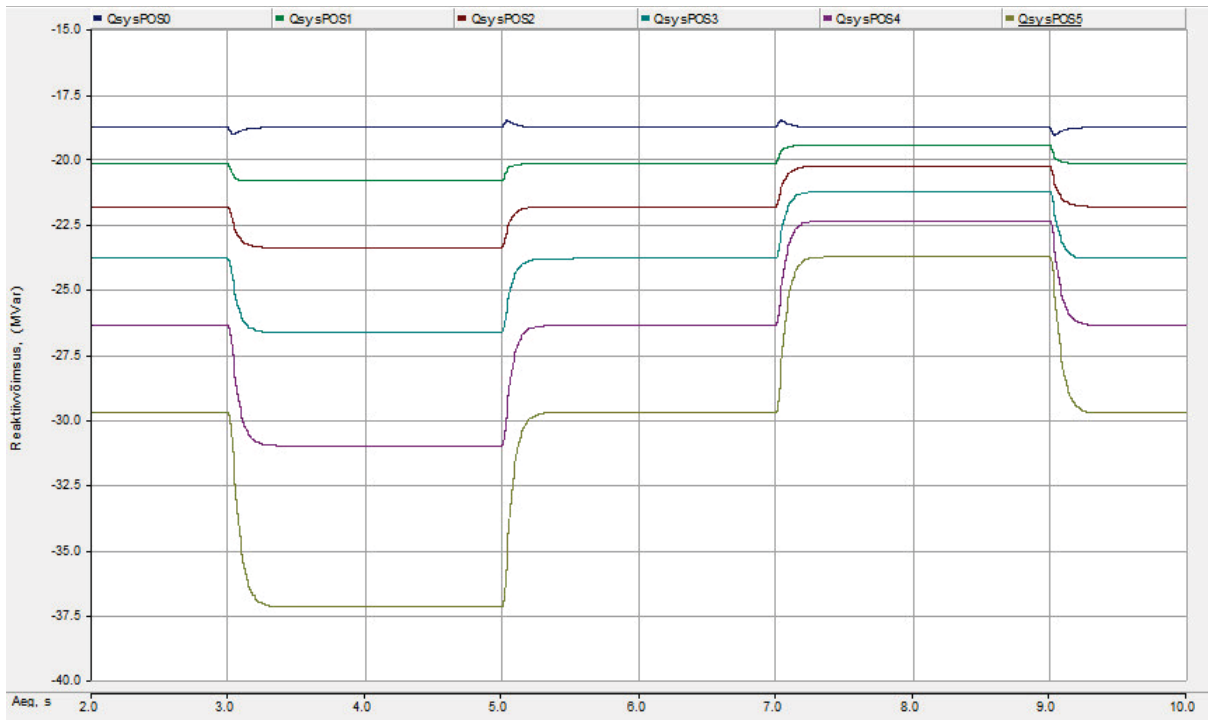
Joonis L2. Aktiivkoormuse pärijärgnevuskomponendi pingetundlikkus piirides 0 kuni 5 faasikoormusmudelil.



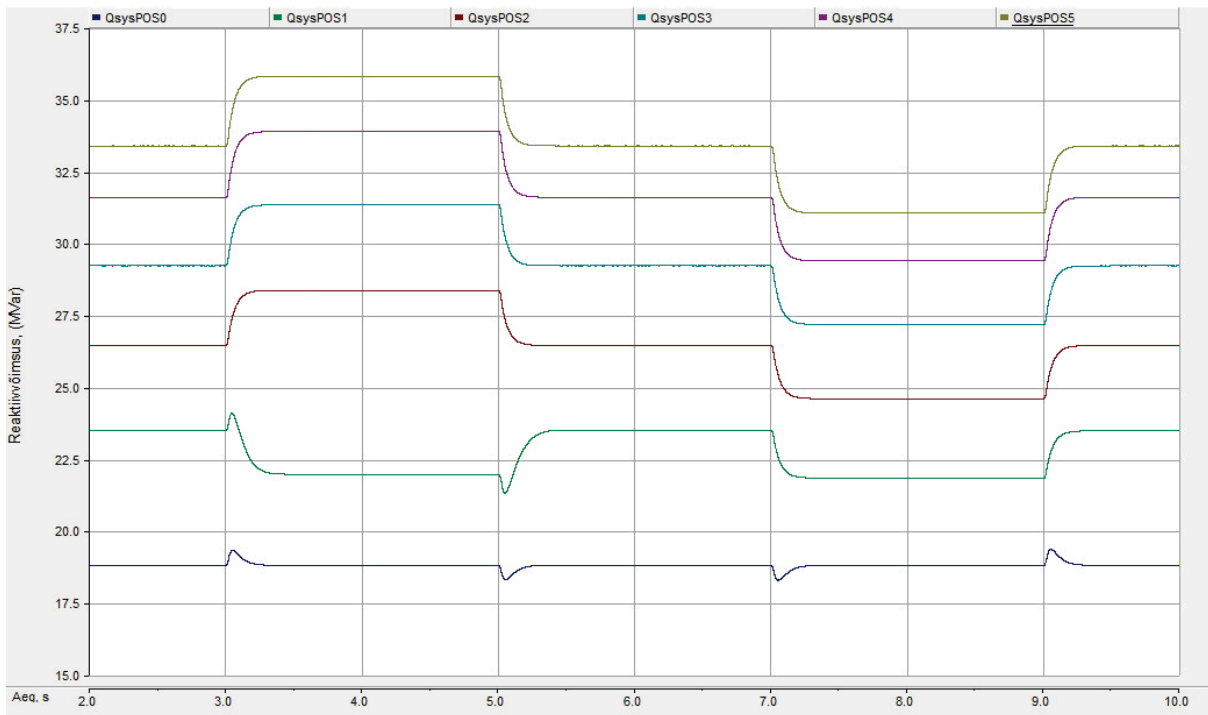
Joonis L3. Induktiivkoormuse pärijärgnevuskomponendi pingetundlikkus piirides 0 kuni 5 faasikoormusmudelil.



Joonis L4. Mahtuvusliku koormuse pärijärgnevuskomponendi pingetundlikkus piirides -5 kuni 0 faasikoormusmudelil.

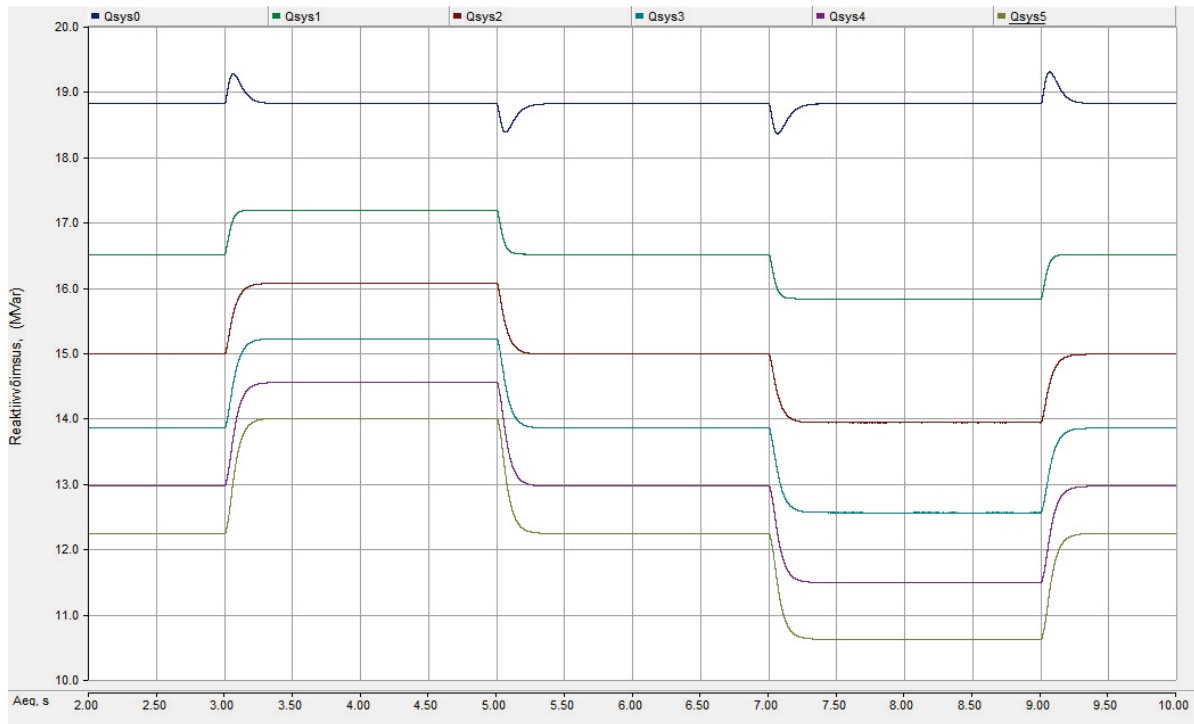


Joonis L5. Mahtuvusliku koormuse pärijärgnevuskomponendi pingetundlikkus piirides 0 kuni 5 faasikoormusmudelil.

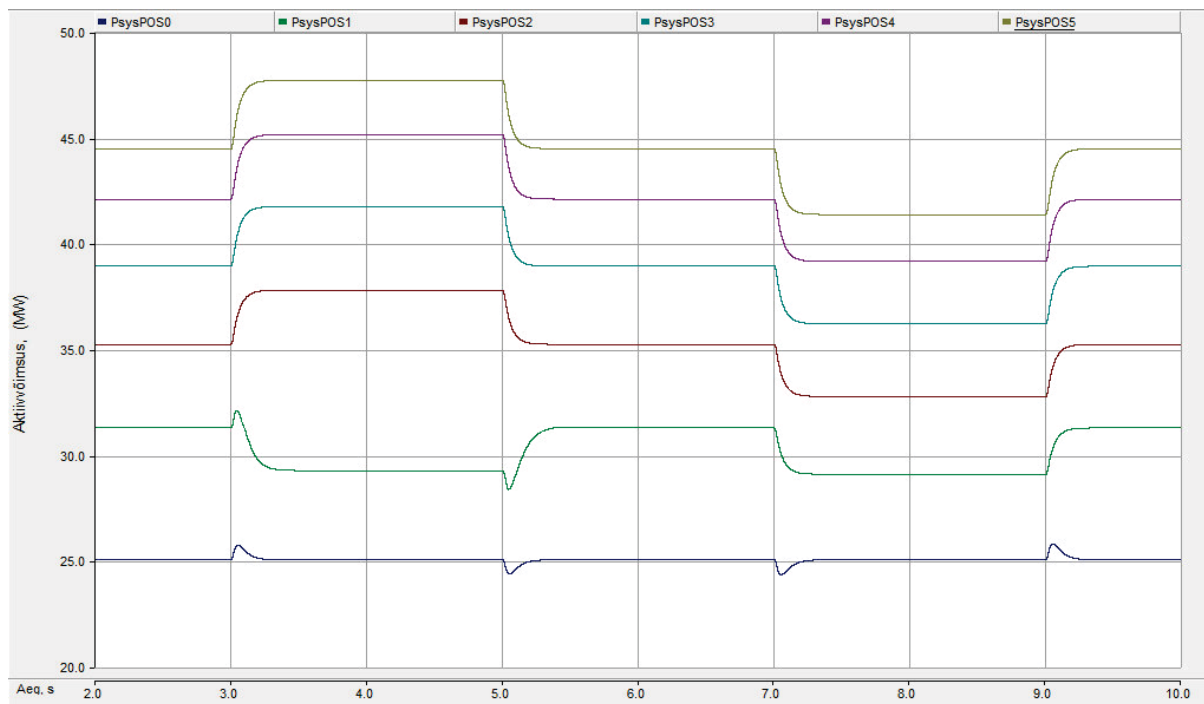


Joonis L6. Induktiivkoormuse pärijärgnevuskomponent pingetundlikkus piirides -5 kuni 0 liinikoormusmudelil.

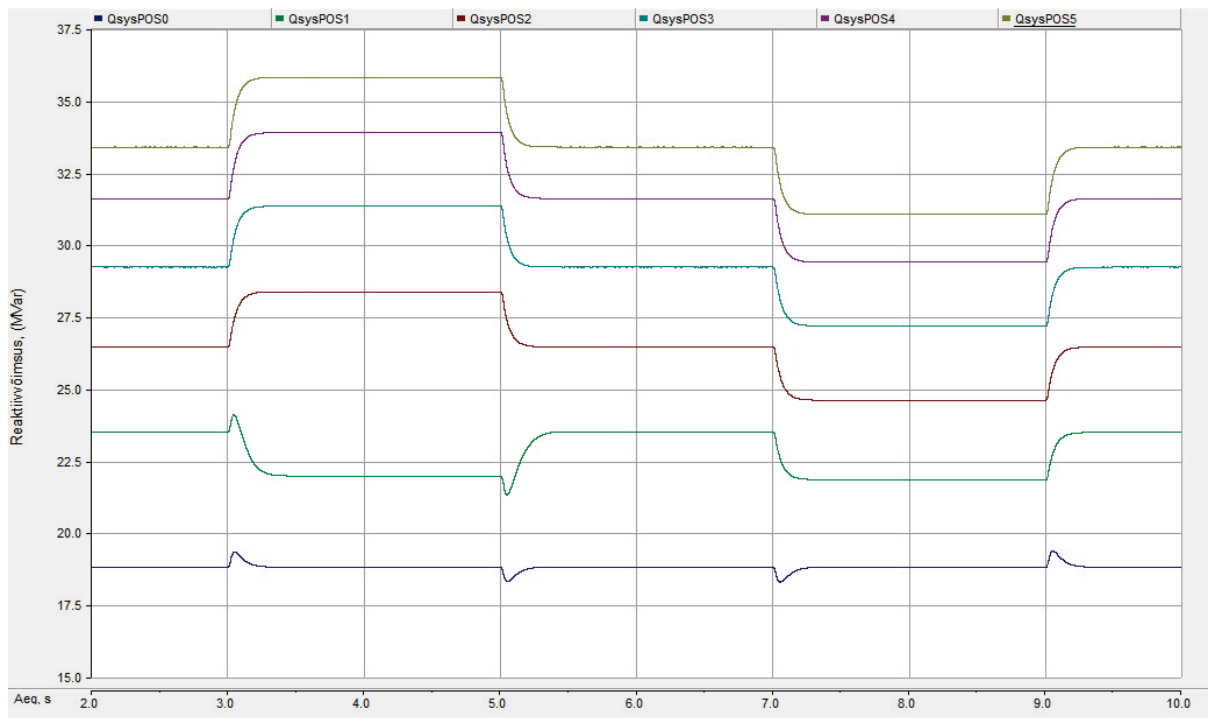




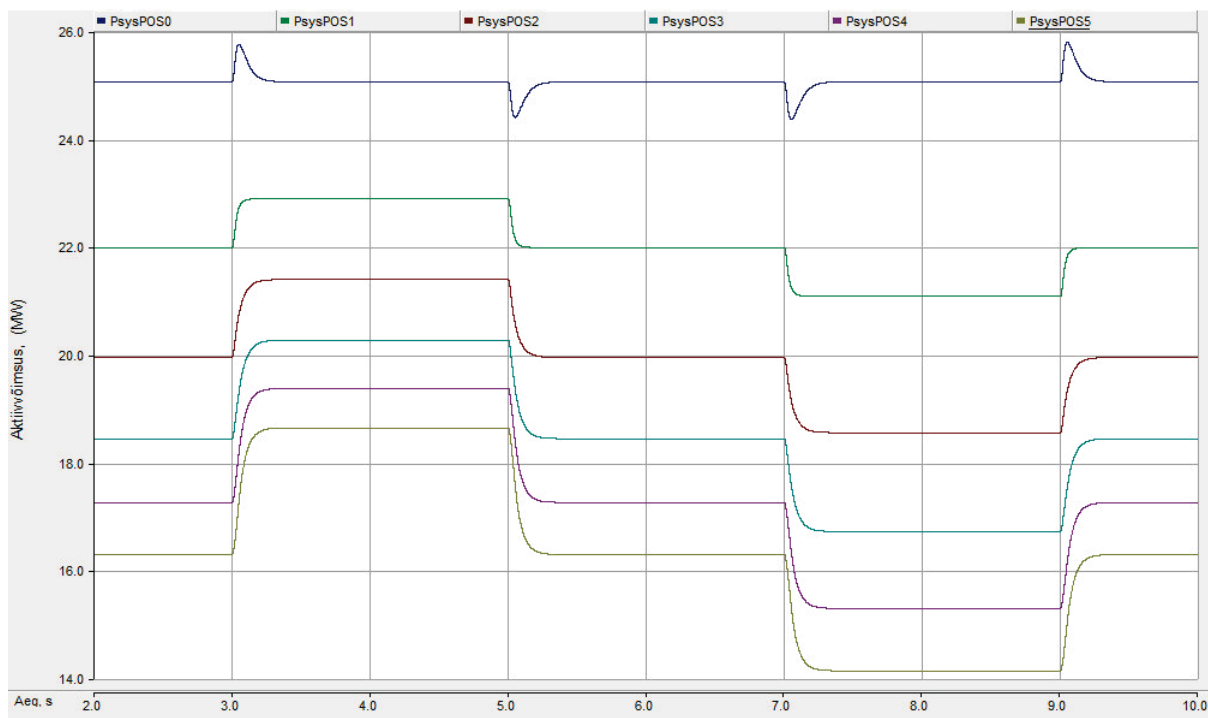
Joonis L7. Induktiivkoormuse pärijärgnevuskomponent pingetundlikkus piirides 0 kuni 5 liinikoormusmudelil.



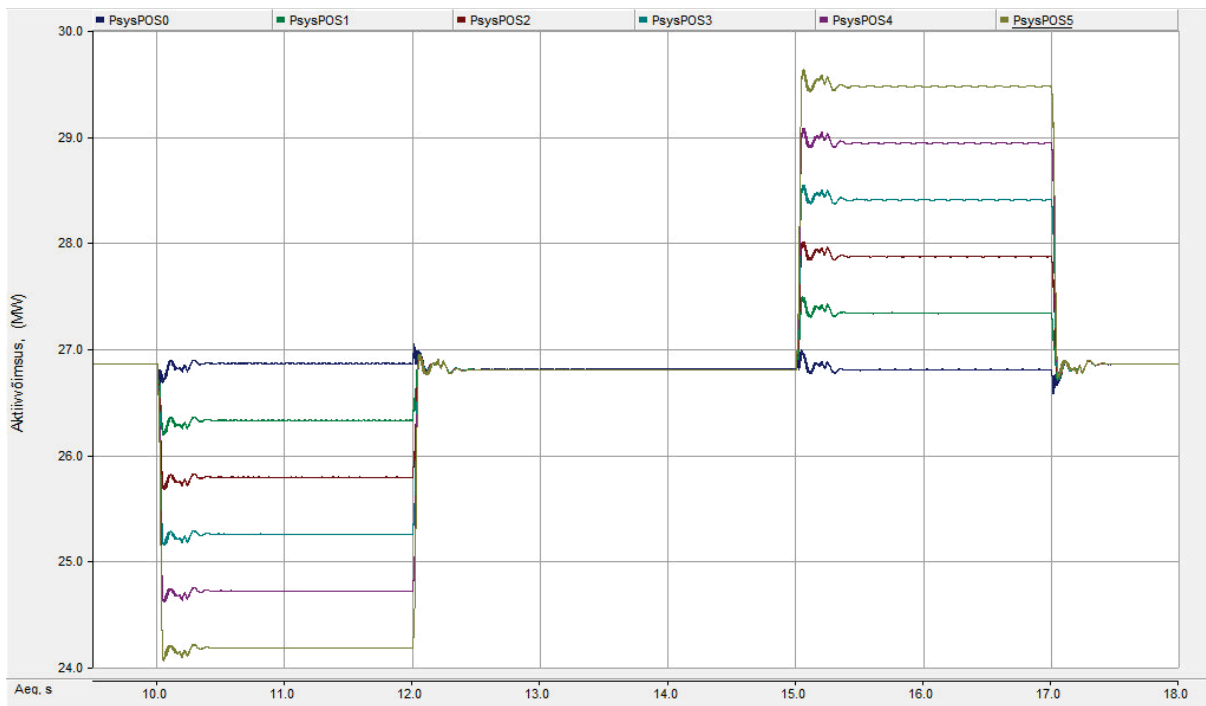
Joonis L8. Aktiivkoormuse pärijärgnevuskomponendi pingetundlikkus piirides -5 kuni 0 liinikoormusmudelil.



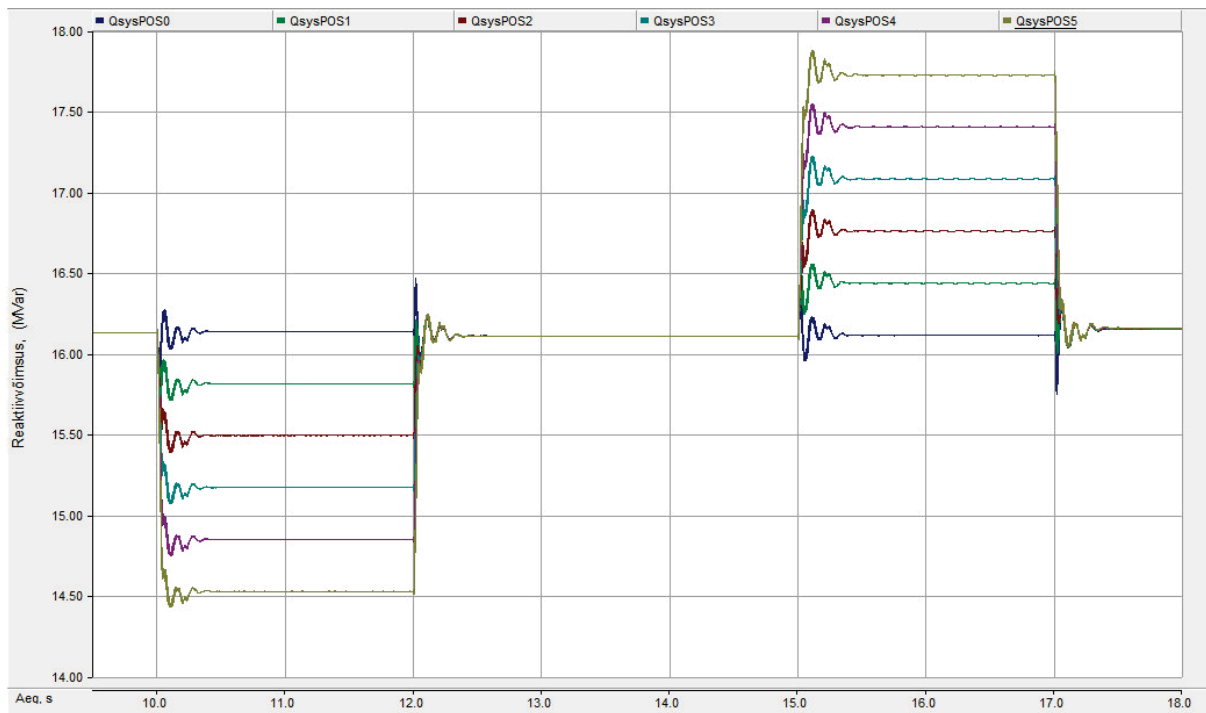
Joonis L9. Induktiivkoormuse pärijärgnevuskomponendi pingetundlikkus piirides -5 kuni 0 liinikoormusmudelil.



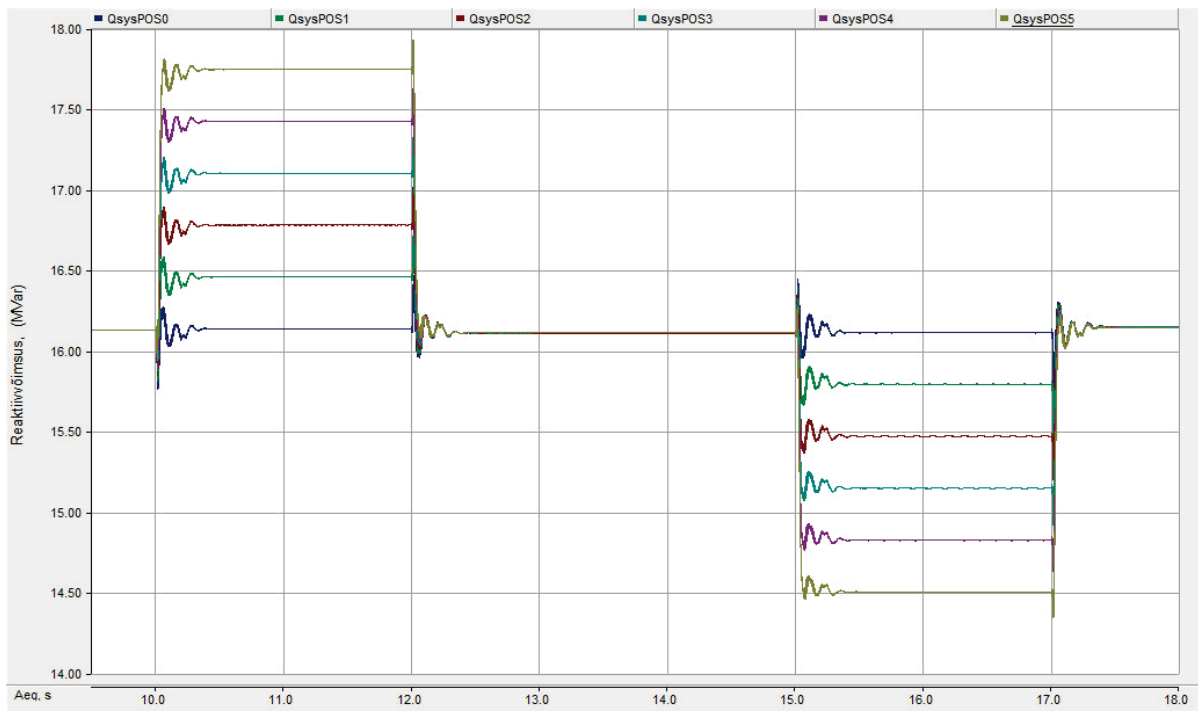
Joonis L10. Aktiivkoormuse pärijärgnevuskomponendi pingetundlikkus piirides 0 kuni 5 liinikoormusmudelil.



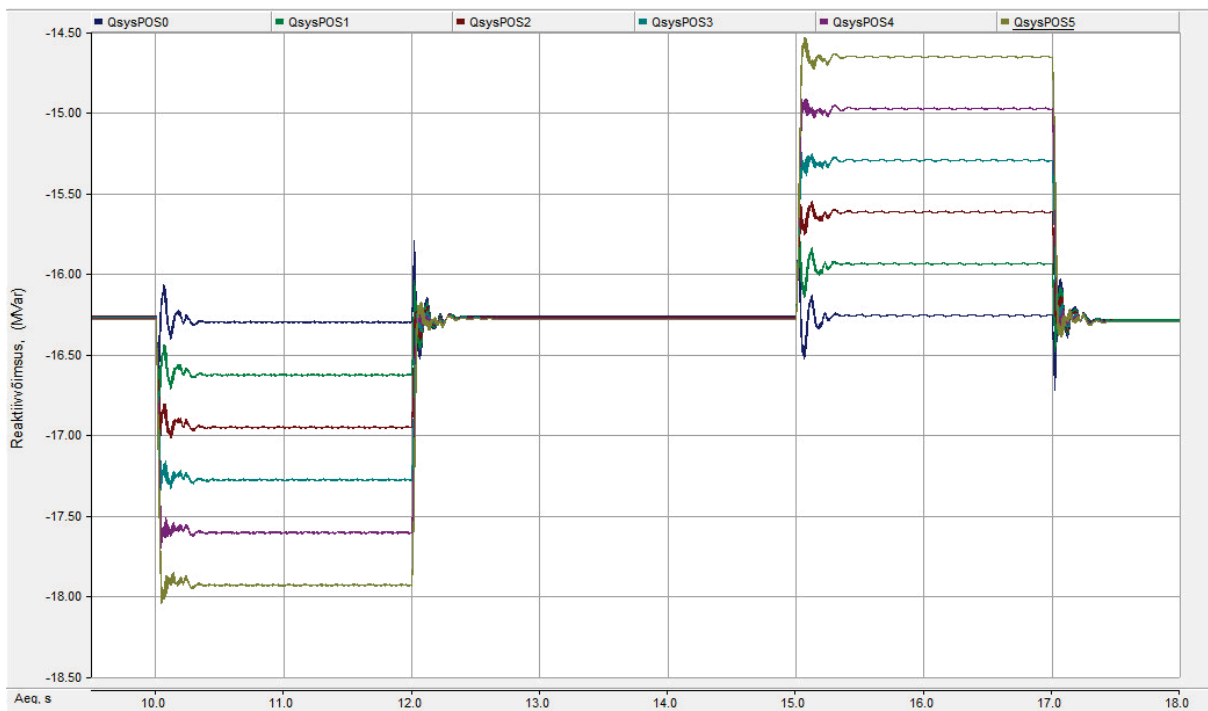
Joonis L11. Aktiivkoormuse pärijärgnevuskomponendi sagedustundlikkus piirides -5 kuni 0 faasikoormusmudelil.



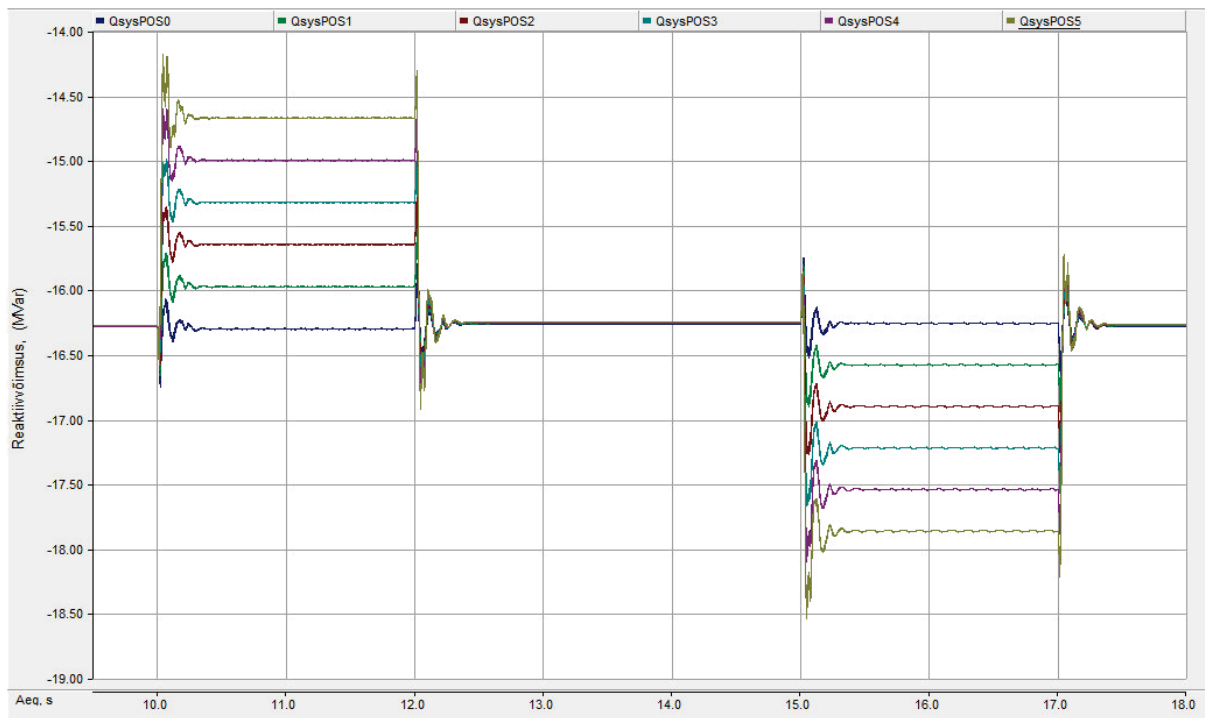
Joonis L12. Induktiivkoormuse pärijärgnevuskomponendi sagedustundlikkus piirides -5 kuni 0 faasikoormusmudelil.



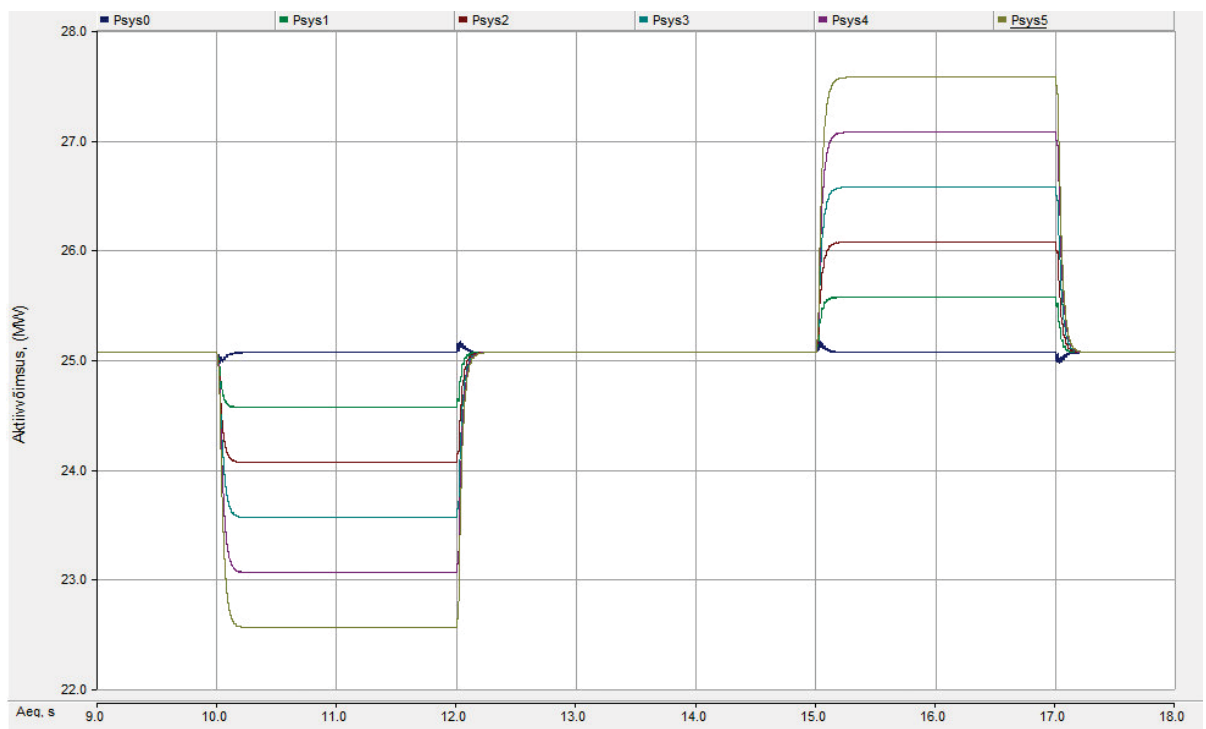
Joonis L13. Induktiivkoormuse pärijärgnevuskomponendi sagedustundlikkus piirides 0 kuni 5 faasikoormusmudelil.



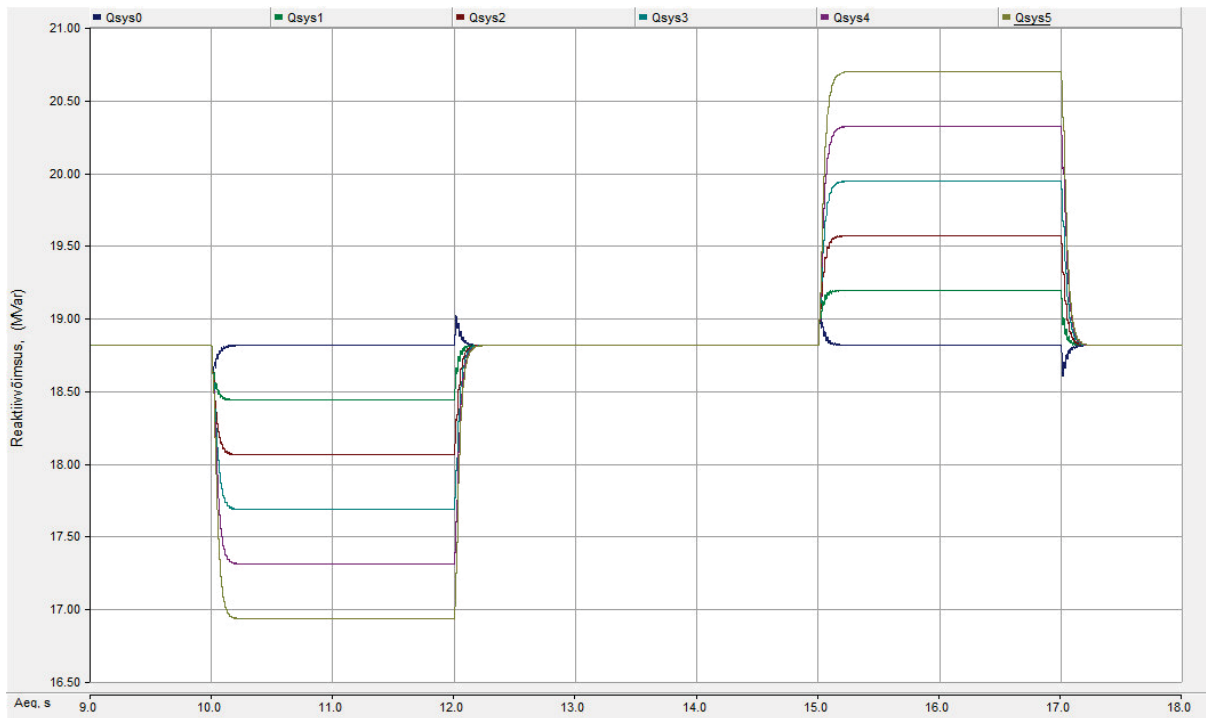
Joonis L14. Mahtuvusliku koormuse pärijärgnevuskomponendi sagedustundlikkus piirides 0 kuni 5 faasikoormusmudelil.



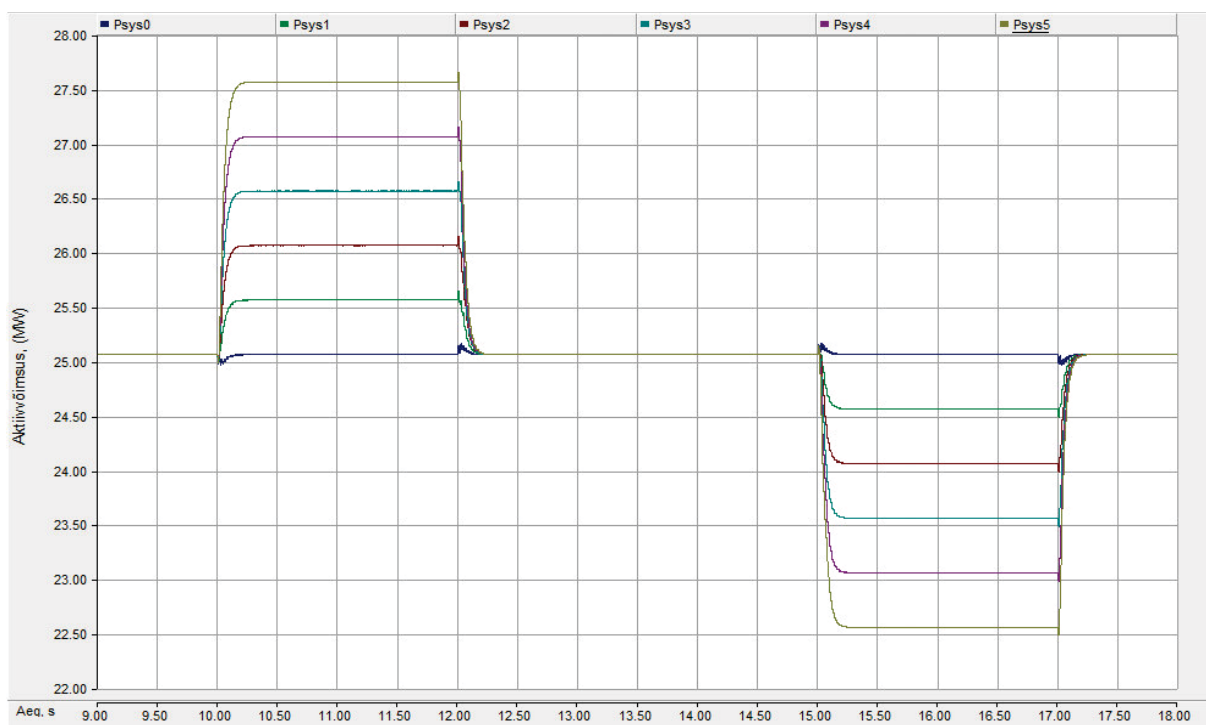
Joonis L15. Mahtuvusliku koormuse pärijärgnevuskomponendi sagedustundlikkus piirides -5 kuni 0 faasikoormusmudelil.



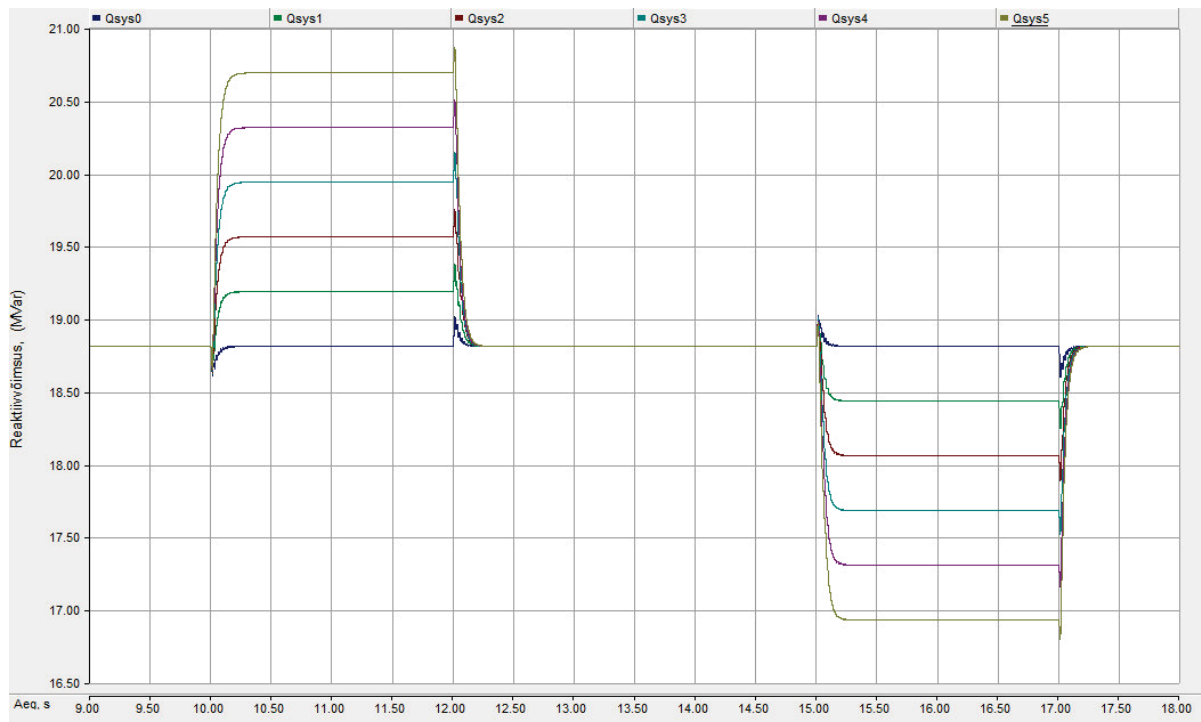
Joonis L16. Aktiivkoormuse sagedustundlikkus piirides -5 kuni 0 liinikoormusmudelil.



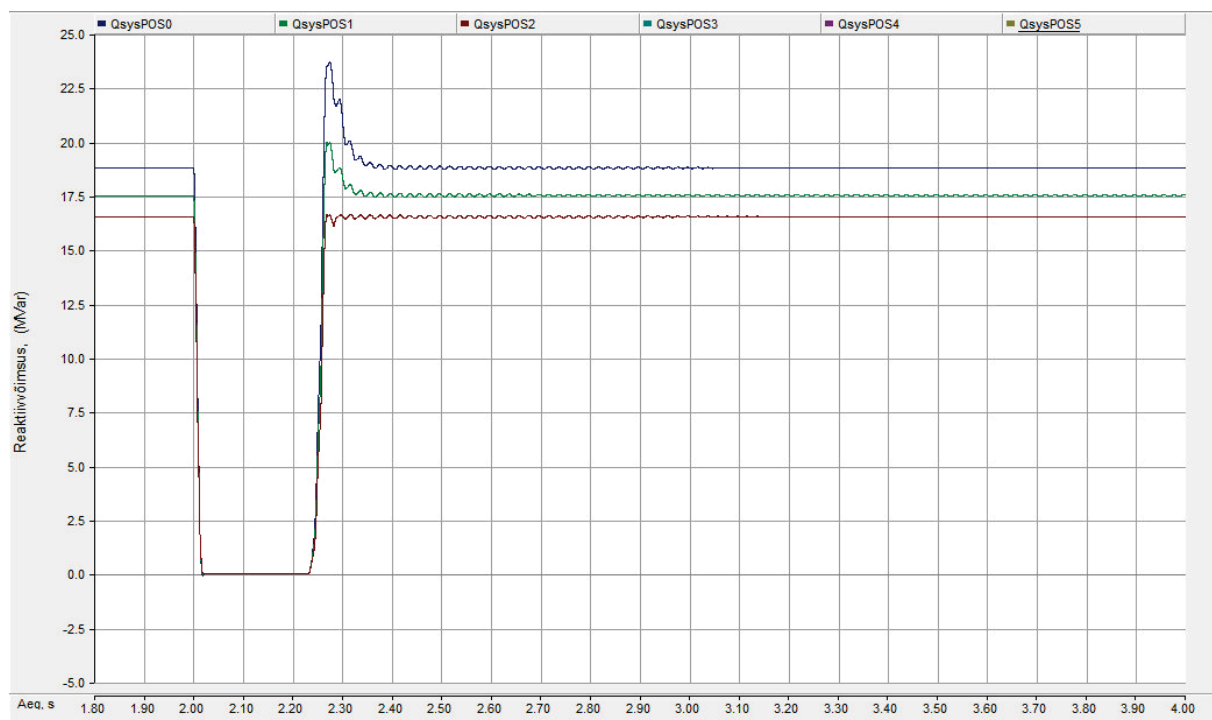
Joonis L17. Induktiivkoormuse sagedustundlikkus piirides -5 kuni 0 liinikoormusmudelil.



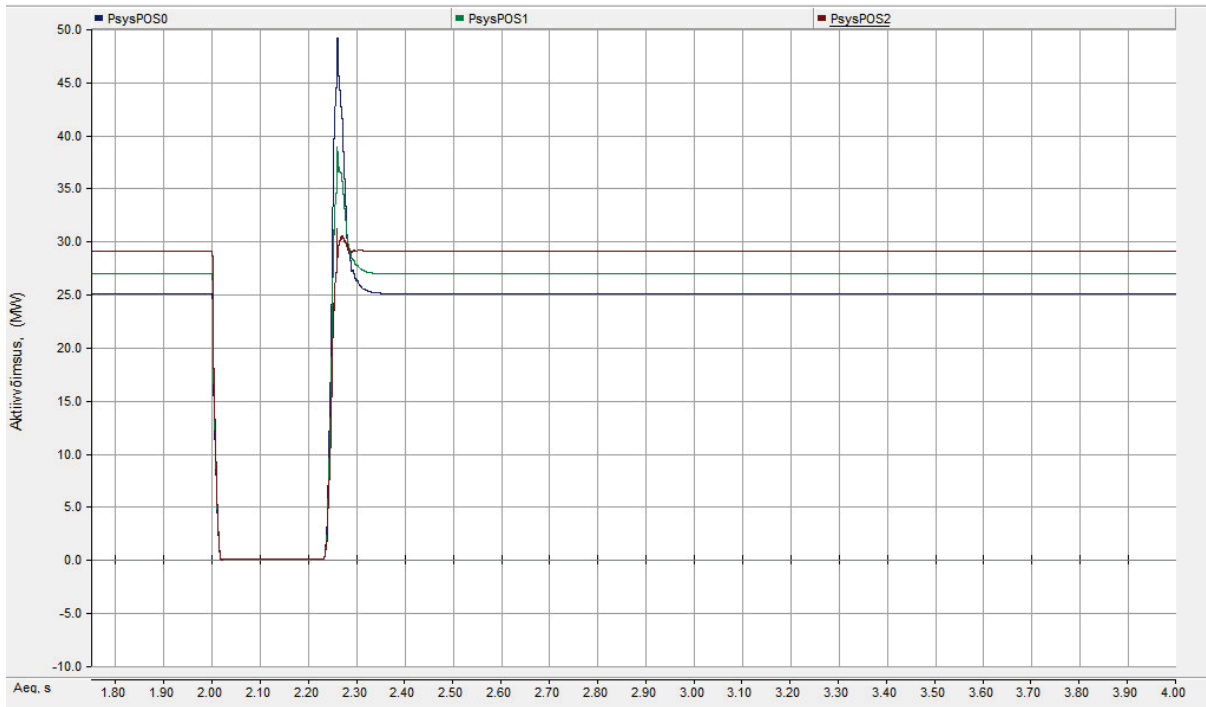
Joonis L18. Aktiivkoormuse sagedustundlikkus piirides 0 kuni 5 liinikoormusmudelil.



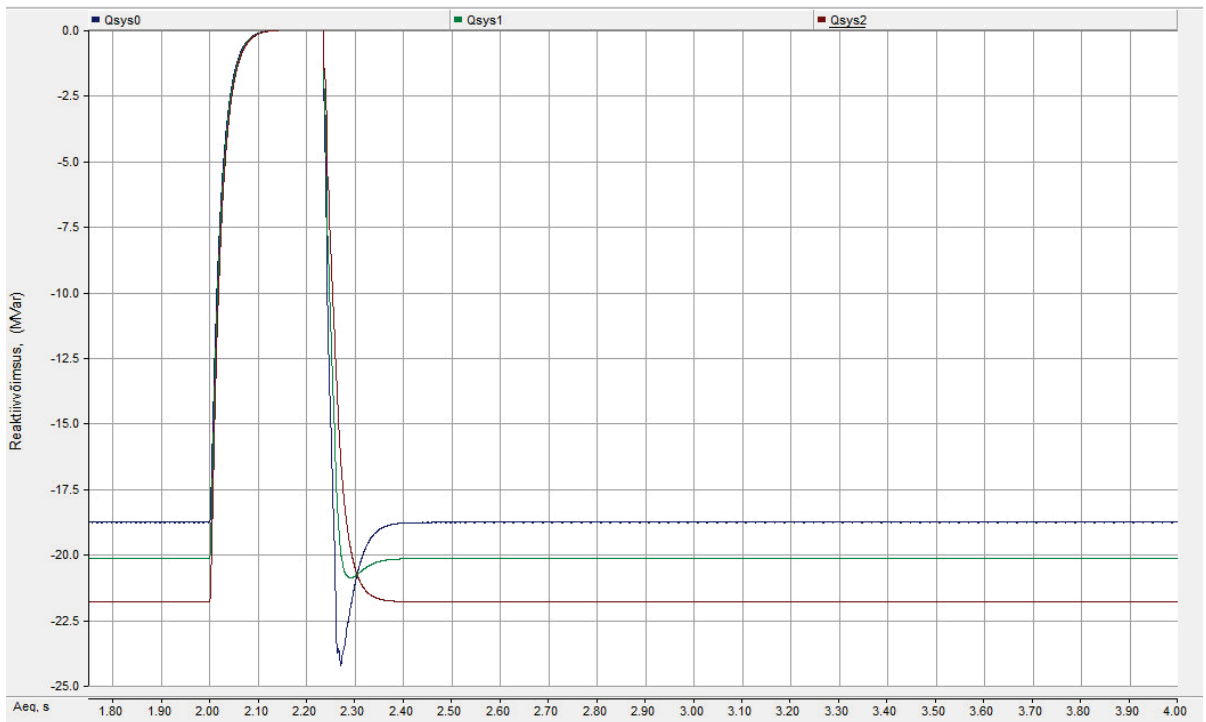
Joonis L19. Induktiivkoormuse sagedustundlikkus piirides 0 kuni 5 liinikoormusmudelil.



Joonis L20. Reaktiivvõimsuse pärijärgnevuskomponent induktiivsel koormusel lühise ajal faasikoormusmudelil.

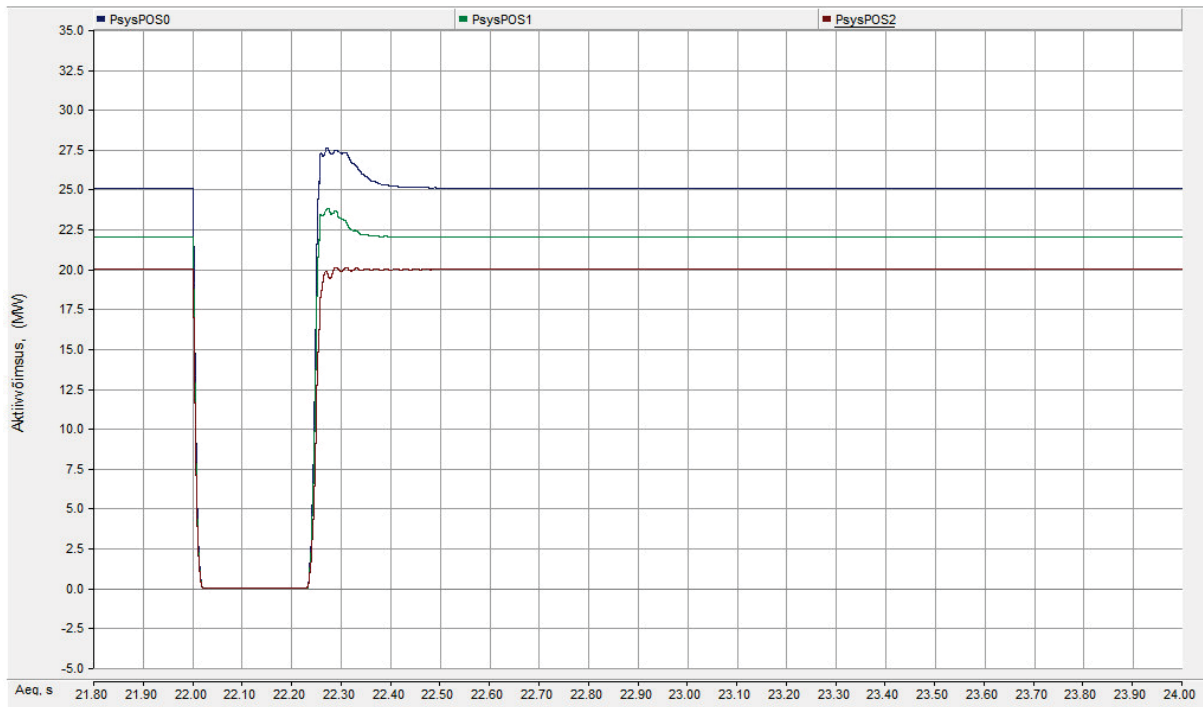


Joonis L21. Aktiivvõimsuse pärijärgnevuskomponent mahtuvuslikul koormusel lühise ajal faasikoormusmudelil.

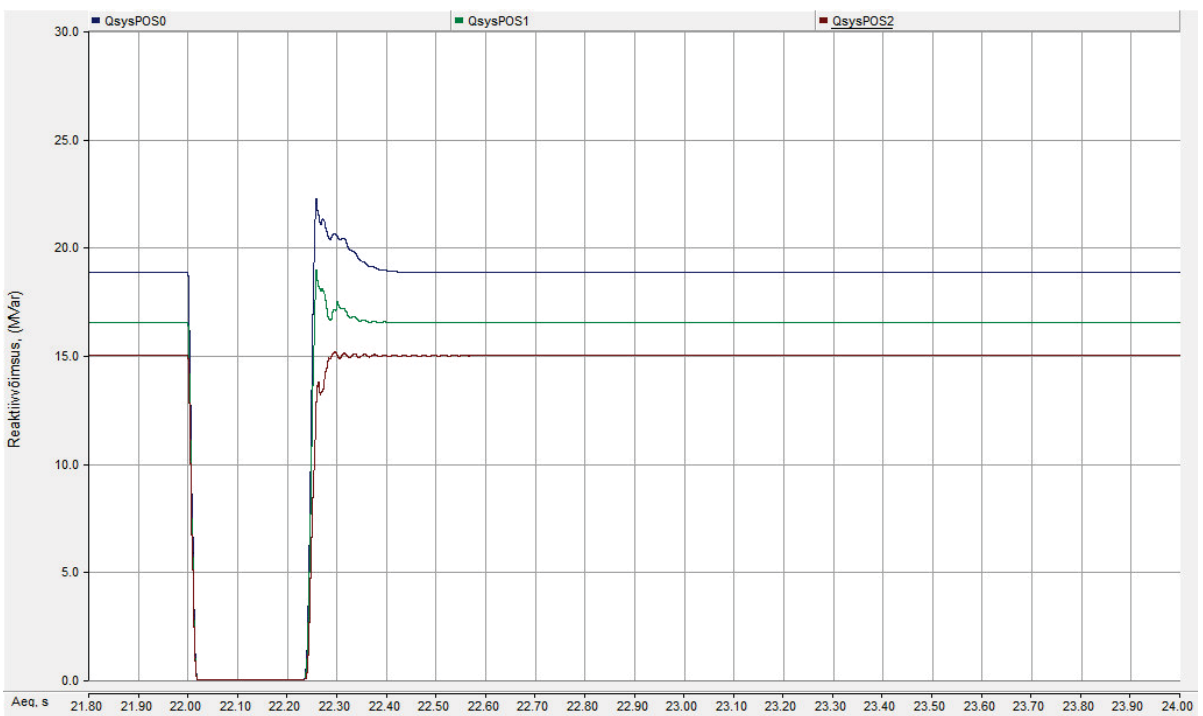


Joonis L22. Reaktiivvõimsuse pärijärgnevuskomponent mahtuvuslikul koormusel lühise ajal faasikoormusmudelil.





Joonis L23. Aktiivkoormuse pärijärgnevuskomponent lühise ajal liinikoormusmudelil.



Joonis L24. Reaktiivkoormuse pärijärgnevuskomponent lühise ajal liinikoormusmudelil.