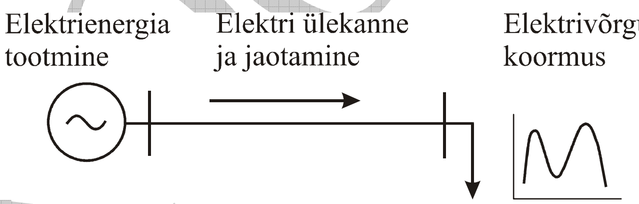
5 Elektrivõrgu koormus

Elektrivõrgu koormuseks nimetatakse elektritarbimise intensiivsust teatud piirkonnas. Koormus kujuneb suure hulga elektritarvitite ühismõjuna. Enamasti on tegemist summaarse koormusega, mis on madalama taseme üksikkoormuste ja võrgukadude summa.

5.1 Koormuse käsitlemise põhimõtted

Elektrivõrgu talitluse iseloom sõltub koormusest. Koormus muutub regulaarselt ajas, sõltub ilmastikust ja on stohhastilise iseloomuga. Kuna elektrisüsteemis peab igal ajahetkel valitsema tarbitava ja genereeritava võimsuse tasakaal, toimub nii elektrienergia tootmine kui ülekanne ja jaotamine koormuse poolt määratud mahus ja taktis (joonis 5.1). Tõsi, aktiivvõimsuse tasakaalu nõue on süsteemikohane, mistõttu on võimalik üksikute generaatorite võimsustega kombineerida majanduslikel kaalutlustel või töökindluse tõstmiseks. Reaktiivvõimsuse tasakaal peab olema tagatud ka lokaalselt võrgu üksikute piirkondade ja suuremate sõlmede kaupa, sest vastasel juhul kannataks elektri kvaliteet ja seataks ohtu talitluse stabiilsus. Koormust võib mõningal määral juhtida ära kasutades muutuvaid tariife või koormuse sõltuvust talitlusparameetritest (pinge, sagedus). Need võimalused on siiski sekundaarsed, talitluse iseloomu täpsustavad. Primaarseks jääb koormuse käitumine, selle muutumise seaduspärasused.



Joonis 5.1 Elektrisüsteemi skeem

5.1.1 Koormusmudelid ja prognoosimudelid

Elektrivõrgu käidu- ja plaanimisülesannete lahendamisel käsitletakse koormusi nii elektrisüsteemi kohta summaarselt kui ka võrgu üksikute sõlmede ja elektritarbijate kaupa. Koormusi on vaja prognoosida lühema või pikema ennetusajaga (mõnest tunnist aastani ja enam), aga ka analüüsida ja imiteerida. Vajalike koormusandmete laad sõltub rakendusest. Peaaegu alati on vajalik matemaatiline ootus koormuse pikaajalise prognoosi või mõne muu nimetuse all. Olenevalt ülesandest vastab matemaatiline ootus antud ajahetke võimsuse või voolu keskväärtusele või energiale teatud ajavahemikus (tund, ööpäev, nädal, aasta). Sageli vajatakse ka koormuse tinglikku matemaatilist ootust lühiajalise prognoosi näol. Lühiajalisse prognoosi kuulub enamasti koormuse temperatuurisõltuvus. Pikaajalise prognoosi ja koormuse analüüsi korral võib temperatuurisõltuvust imiteerida. Koormuse juhuslikkust kirjeldavad ruuthälve ja jaotusseadus. Rakendustes võib vaja minna veel muidki suurusi ehk koormusnäitajaid, mis kirjeldavad koormust mitme vaatenurga alt.

Levinud on lähenemisviis, kus vajalik koormusnäitaja (enamasti koormuse lühiajaline prognoos) leitakse formaalsete meetoditega otseselt koormusandmete alusel, mis on antud aegridade kujul. Kasutusel on suur hulk meetodeid, mis põhinevad regressioonanalüüsil, aegridade mudelitel, neurovõrkudel jm. Meetodi valik sõltub nii lähteandmete iseloomust (andmete hulk) kui vajalikust tulemusest (prognoosi ennetusaeg). Iseloomulik on, et põhitähelepanu pööratakse mingi formaalmatemaatilise meetodi rakendamisele olemasolevate lähteandmete ja vajaliku tulemuse kohaselt. Koormuse füüsikalisi omadusi võetakse arvesse vaid pinnapealselt.

Kuigi traditsiooniline lähenemine koormuse käsitlemisele võib anda kasutuskõlblikke tulemusi, saab koormusnäitajaid leida tunduvalt täpsemalt ja mitmekülgsemalt, kui koostada **koormuse matemaatiline mudel**. Mudeli koostamisel selgitatakse välja koormuse füüsikalised omadused ja esitatakse need kvantitatiivselt. Niisiis kirjeldatakse mudelis otseselt koormust, mitte olemasolevaid koormusandmeid (aegridu) nagu traditsioonilise lähenemisviisi korral. Koormust vaadeldakse modelleerimisel kui iseseisvat objekti. Aktiiv- ja reaktiivvõimsus või vool on vaid atribuudid, koormuse erinevad ilmingud.

Koormusmudeliga võrreldes võib prognoosimudeleid lugeda triviaalseteks sõltumata kasutatavast matemaatilisest meetodist. Tõepoolest, lühikese perioodi (tavaliselt nädal või paar) andmed, millele prognoosimeetodid tuginevad, ei kajasta kaugeltki koormuse muutumise kõiki seaduspärasusi. Koormust tuleks jälgida vähemalt mõne aasta vältel, et selle omadused tuleksid esile. Ka statistiliselt võttes, arvestades koormuse stohhastilisust, pole sellised andmed piisavad. Nii koormuse tase kui koormusgraafiku kuju võivad olla prognoosile eelnenud perioodil erandlikud. Eriti kontrastne on olukord ilmastikuoludega arvestamisel. Nii võib õhutemperatuur talvel olla küllaltki pikka aega normaalsest kõrgem. Kui on aga ette näha temperatuuri tunduvat langust ja koormuse tõusu, ei võimalda senised andmed tõusu ulatust õigesti hinnata. Formaalseid prognoosimudeleid püütakse küll parandada erandpäevade arvestamisega ja temperatuuri mõjutegurite sissetoomisega, kuid need on vaid esimesed sammud teel füüsikaliselt põhjendatud koormusmudeli poole.

Koormusmudeli olulised eelised prognoosimudelite ees tulevad selgelt esile, kui vaadelda mudeli rakendusi. Sel ajal kui prognoosimudelid on ette nähtud vaid koormuse lühiajaliseks prognoosimiseks, võimaldab koormusmudel palju enam. Prognoosimise kõrval on võimalik koormust analüüsida ja imiteerida. Nii võib uurida prognoosivigade tekkepõhjusi, välja selgitada, milline oleks koormus olnud normaaltemperatuuril või erandlikes ilmastikuoludes ja palju muud. Ka ei ole prognoosi ennetusaeg arvutuslikult mingil määral piiratud. Pikaajalise prognoosi tõepärasuse tagab ühelt poolt see, et mudel kirjeldab koormust kogu ulatuses, arvestab nii koormuse taseme kui koormusgraafikute kuju sesoonseid muutusi, trendi jm. Teisalt saab pikaajalisel prognoosil arvesse võtta koormuse kujunemise majanduslikke ja tehnilisi tingimusi. Ka pika ajavahemiku kohta on koormust võimalik imiteerida ilmastikuolusid ja koormuse kasvuvariante varieerides.

Niisiis on koormus- ja prognoosimudelitel vähe ühist. Pigem võib koormusmudeliks lugeda tüüpgraafikuid, mida mõningates rakendusprogrammides kasutatakse. Kui graafikutele on lisatud ka valem temperatuurisõltuvuse hindamiseks, võib rääkida koormuse lihtsustatud ehk primitiivmudelist. Nii primitiiv- kui triviaalmudelid võivad ette tulla erandlikes olukordades ka koormusmudelit rakendades. Kui mudeli parameetrite estimeerimiseks on lähteandmeid vaadeldava koormuse kohta vähe (näiteks vaid aasta keskmine koormus), siis tuleb lähtuda mõne sarnase iseloomuga koormuse mudelist ja tulemus on tüüpgraafikute tasemel. Triviaalmudelile sarnane olukord tekib, kui koormuse iseloom on sedavõrd ebaregulaarne, et selle muutumise seaduspärasused ei tule esile.

Koormusmudel ei ole siiski järjekordne võlumeetod, mis iseenesest lahendab kõik ettetulevad probleemid, vaid töövahend asjatundjatele. Primaarseks jäävad elektrivõrgu käidu- ja plaanimisülesandeid lahendavate inseneride oskused ja kogemused. Koormusmudel võimaldab sellekohaste rakendusprogrammide vahendusel inseneride nägemusi tõhusalt rakendada.

5.1.2 Koormuse modelleerimise põhimõtted

Koormuse matemaatilise modelleerimise ideest tuleneb, et

- mudeli struktuur ei sõltu koormuse kohta olemasolevatest andmetest. Modelleeritakse koormust, mitte andmeid;
- mudeli struktuur ei sõltu otseselt võimalikest rakendustest. Pole tähtis, kas mudelit kasutatakse pika- või lühiajaliseks prognoosimiseks või prognoosimiseks üldse;
- mudeli keerukus tuleneb koormuse käsitusest. See, kuidas koormust määratletakse ja mida koormuse muutustega seoses põhimõtteliselt arvestada tahetakse, määrab mudeli struktuuri.

Matemaatilise mudeli koostamisel seatakse eesmärgiks koormusele omaste seaduspärasuste väljaselgitamine ja kvantitatiivne kirjeldamine. Modelleerimisel ei pöörata tähelepanu koormusandmete omadustele (nt diskreetimissagedusele) ja mahtudele. Tõepoolest ei sõltu ju koormuse omadused sellest, mil viisil seda mõõdetakse. Ka koormuse vajalikud näitajad (lühi- või pikaajaline prognoos jms) jäävad esialgu tagaplaanile. Silmas peetakse vaid koormusmudelite rakendusvaldkonda ja sellest tulenevaid üldisi nõudeid.

Mudelis arvestatakse selliseid koormuse muutuste seaduspärasusi nagu

- *regulaarsed muutused*, milleks on ööpäeva-, nädala- ja aastasisesed perioodilisused, trend ning koormuse iseloom erandpäevadel;
- *temperatuurisõltuvus*, mille osakaal on näiteks elekterkütte korral küllaltki suur. Mudelis arvestatakse temperatuurisõltuvuse inertsi, mittelineaarsust ja ajalisi muutusi;
- *sõltuvus talitlusparameetritest*, mis avaldub koormuse pinge ja sagedustundlikkusena;
- *juhuslikkus*, mis on eriti märgatav väikestes, jaotusvõrgu koormustes. Selliste koormuste ruuthälbe suhe matemaatilisse ootusesse on suhteliselt suur. Ka võib väikestes koormustes esineda suuremaid kõrvalekaldeid, mis ei sobi kokku normaaljaotusega;
- *juhitavus*. Koormust juhitakse enamasti kaudselt elektritariifide abil. Esineb ka otsest juhtimist elektrivõrgu operatiivpersonali poolt. Juhitavuseks võib lugeda põhivõrgu sõlmekoormuste muutusi, mis on tingitud ümberlülitustest jaotusvõrgus.

Modelleerimisel vaadeldakse koormust kui iseseisvat objekti, millel on nimi, liitumispunkt, iseloomulik tarbijate koosseis ja muud atribuudid. Kvantitatiivselt iseloomustab koormust aktiiv- ja reaktiivvõimsus ning vool. Koormusandmed võivad olla nii regulaarsed (aegread) kui üksiksuurused (nt aastaenergia).

Mudeli põhiosiseks on koormuse matemaatiline ootus. Matemaatiline ootus kirjeldab koormuse regulaarseid muutusi standardtingimustes, s.t normaaltemperatuuril ning nimisagedusel ja pingel. Matemaatiline ootus on põhimõtteliselt mittejuhuslik. Koormuse juhuslikkuse mõõt on ruuthälve, mida samuti vaadeldakse ajas muutuvana.

Elekterkütte ja muude ilmastikutundlike elektritarvitite olemasolul võib koormuse temperatuurisõltuvuse osakaal olla suur. Temperatuurisõltuvus on koormuse hälve, mida on tingib välisõhu temperatuuri kõrvalekalle normaaltemperatuurist. Normaaltemperatuuriks (temperatuuri matemaatiliseks ootuseks) loetakse välisõhu 30 aasta keskmist temperatuuri aastasisese aja mingil hetkel. Koormuse temperatuurisõltuvusele on muuhulgas iseloomulik hilistumine umbes 24 tunni võrra. Kui tegelik temperatuur vastab hilistumist arvestades normaaltemperatuurile, siis temperatuuri mõju puudub. Võimalik on muudegi ilmastikutegurite, nagu päikese radiatsiooni (pilvisuse), tuulekiiruse, õhuniiskuse jm arvestamine. Tuleb siiski rõhutada, et praktiline tähendus on vaid sellistel ilmastikuteguritel, mida käsitletakse (sh prognoositakse) meteoroloogiateenistuste poolt kvantitatiivsel kujul.

Sõltuvus talitlusparameetritest võetakse arvesse pinge ja sageduse staatiliste karakteristikute kujul. Sagedustundlikkus on iseloomulik aktiivkoormustele. Selle arvestamine on muuhulgas vajalik elektrisüsteemi talitluse balansi kindlustamiseks vajaliku elektrienergia ostmisel elektriturult. Pinge, mis mõjutab enam reaktiivvõimsusi, on oluline elektrivõrgu sõlmekoormuste käsitlemisel.

Juhusliku komponendi matemaatiline esitus arvestab koormushälvete järelmõju (autokorrelatsiooni), mis muuhulgas on oluline koormuse lühiajalise prognoosi leidmisel. Lisaks vaadeldakse koormuse suuri hälbeid kirjeldavat piikkomponenti. Aeg-ajalt esinevad suured hälbed, mis on eriti iseloomulikud jaotusvõrgu koormustele, on üheks põhjuseks, miks koormus enamasti ei allu normaalsele jaotusseadusele.

Mudeli koostisosad, nagu matemaatiline ootus, temperatuurisõltuvus jt, kirjeldavad koormuse muutusi küllaltki hästi. Leidub siiski koormusi, mille muutused on sedavõrd ebaregulaarsed, et neid ei ole võimalik täpselt kirjeldada. Sellisel juhul esitatakse koormuse matemaatiline ootus ja ruuthälve konstantsena ja määravaks jääb juhuslik komponent. Ütleme, et sel juhul on tegemist koormuse **triviaalmudeliga**. Juhusliku komponendi mudeli alusel võib triviaalmudeliga esitatud koormust nii analüüsida kui prognoosida, kuigi täpsus jääb madalamaks, kui normaalmudeli korral. Triviaalmudeli mõiste selline määratlus sobib hästi kokku ülaltoodud aruteluga koormuse prognoosimudelite triviaalsusest.

5.1.3 Koormusmudeli rakendamine

Mudeli struktuur on kõigile koormustele sama. Selleks et mudelit oleks võimalik rakendada, tuleb selle parameetrid estimeerida. Estimeerimisel kasutatakse ära nii regulaarsed koormusandmed (aegread) kui ka muu kvantitatiivne ja kvalitatiivne teave. Kui olemasolevatest andmetest ei piisa mudeli kõigi parameetrite hindamiseks, võib kasutada tüüpmudeleid, s.o mudeli parameetrite tüüpilisi komplekte. Sel juhul leitakse vaadeldava koormuse andmetel statistilistel või muudel kaalutlustel sobiv arv parameetreid ning ülejäänud kantakse üle tüüpmudelist. Tulemuseks on samalaadne mudel kõigile koormustele sõltumata estimeerimisviisist ja kasutatud andmete hulgast. Kui estimeerimisel kasutatud andmeid oli rohkem, on tulemus vaid täpsem – mudel kirjeldab paremini vaadeldava koormuse omadusi ja võimaldab leida täpsemad koormusnäitajad.

Matemaatiline mudel kirjeldab koormuse muutumise seaduspärasusi. Mudel ei väljenda otseselt praktiliselt vajalikke suurusi, näiteks koormuse prognoosi. Neid suurusi, koormusnäitajaid, on aga võimalik mudeli alusel leida. Mudelist tulenevad otseselt koormuse matemaatiline ootus, ruuthälve, temperatuuri mõju koormusele ning muud nn esmased koormusnäitajad. Nende alusel võib leida koormuse lühi- ja pikaajalise prognoosi ning analüüsida ja imiteerida koormust mitmesuguste etteantud tingimuste kohaselt.

Elektrivõrgu koormus pakub harva iseseisvat huvi. Enamasti vajatakse koormusnäitajaid lähteandmetena elektrivõrgu talitlusega seotud ülesannete lahendamisel. Vaja on koormuse lühi- ja pikaajalist prognoosi ning analüüsimise ja imiteerimise tulemusi mitmesugustel etteantud tingimustel. Põhilised koormuse rakendusviisid on järgmised:

- summaarse koormuse lühi- ja pikaajaline prognoosimine
- summaarse koormuse analüüsimine ja imiteerimine
- elektrivõrgu sõlmekoormuste lühiajaline prognoosimine
- elektrivõrgu sõlmekoormuste analüüsimine ja imiteerimine
- elektritarbijate koormuste käsitlemine.

Kõige tuntumaks koormusega seotud ülesandeks on elektrisüsteemi või selle regiooni summaarse koormuse lühiajaline prognoosimine. Eesmärgiks on kas elektrisüsteemi talitluse plaanimine, sealhulgas tegutsemine elektriturul. Kuigi lühiajaline prognoos on leitav ka prognoosimudelitega, annab koormusmudelite rakendamine täpsemaid ja mitmekülgsemaid tulemusi.

Elektrisüsteemi talitlust vaadeldakse ka pikemas (nt aastases) perspektiivis. Vaja on plaanida kütuseressursse ning sõlmida elektri ostu-müügilepinguid. Kuna koormusmudeli korral prognoosi ennetusaega ei piirata, siis ei teki arvutuslikke probleeme. Pikaajalisel plaanimisel omandab erilise tähtsuse koormuse imiteerimine. Vaja on leida koormuse väärtusi mitmesugustes ilmastikuoludes ning vaadelda koormuse kasvu (trendi) variante. Koormuse pikaajalise prognoosi korral võivad asjatundjad arvesse võtta ka regiooni majandusliku arengu perspektiive ja oodatavaid tehnilisi muutusi elektrivõrgus.

Sõlmekoormused on peamisteks lähteandmeteks elektrivõrgu talitluse arvutamisel. Lühikeses ajavahemikus (mõni ööpäev ette) on vaja optimeerida võrgu talitlust, tagada vajalik töökindlus ning elektri kvaliteet. Sõlmekoormuste väärtusi on küll võimalik leida ka prognoosimudelitega, kuid suhteliselt suure juhuslikkuse tõttu pole tulemused usaldatavad. Seetõttu on kasutusel küllaltki ligikaudsed meetodid, kus näiteks prognoositud summaarne koormus jaotatakse sõlmede vahel etteantud tegurite alusel. Koormusmudelid võimaldavad käsitleda ka väikesi koormusi. Tõsi, koormuste juhuslikkust vältida ei saa. Kuna aga mudel kirjeldab usaldusväärselt koormuse matemaatilist ootust, ruuthälvet, temperatuurisõltuvust ja muid omadusi, võib juhuslikkust teatud määral kompenseerida, kui leida prognoosi usaldusvahemikud.

Elektrivõrgu talitluse pikaajalisel plaanimisel tuleb koormuse väärtuste leidmisel arvestada välisõhu madalat või kõrget temperatuuri, koormuse võimalikke hälbeid, uute elektritarbijate lisandumise aega ja kohta. Oluline tähtsus elektrivõrgu talitluse käsitlemisel on koormusjuhtumitel ja stsenaariumitel, mis johtuvad ümberlülitustest madalama taseme võrgus, reaktiivenergiaallikate kommutatsioonist, elektritarbijate arenguvariantidest ja muust.

Vaba elektrituru korral peavad kõik turuosalejad tagama oma elektribilansi. Selleks tuleb elektri tarbimist prognoosida ja sõlmida hankelepingud. Hiljem tehakse bilansiselgitus, kus selgitatakse välja koormuse ebabilansid, mille eest tarbijad tasuvad kõrgendatud tariifide alusel. Elektrituru efektiivsuse tõstmiseks on Põhjamaades võetud suund kõikide elektritarbijate koormuste kaugmõõtmiseks. Andmed tarbijate tegelike koormuste kohta võimaldavad teha õiglase bilansiselgituse. Kaugmõõtesüsteemide arendamine on kavas ka Eestis. Neid andmeid võib ära kasutada koormuste modelleerimiseks. Elektritarbijate suur arv pole siin takistuseks.

Niisiis võimaldab matemaatiline mudel leida vajalikud koormuse väärtused nii lühikese kui pika ajavahemiku kohta. Modelleerimisel kasutatakse ära kõik olemasolevad andmed koormustest, mitte vaid andmete jooksvad aegread, nii nagu traditsiooniliste meetodite korral. Tulemuseks on usaldusväärne teave koormuste kohta, mis võimaldab õigesti plaanida kütuseressursse ning elektrivõrgu vajalikku läbilaskevõimet ja saavutada säästu, mis johtub investeeringute õigeaegsusest (nt võimalusest investeeringuid edasi lükata) ja võrgu talitluse töökindluse tõstmisest (ülekoormuste vältimine, pinge stabiilsuse tagamine, releekaitse õige toime minimaal- ja maksimaalkoormustel jm). Koormuse täpsem prognoos lühikese ajavahemiku kohta võimaldab tõsta elektri kvaliteeti ning saavutada majanduslikku efekti, mis tuleb eriti selgelt esile elektriturul.

Koormusmudeli rakendamine nõuab prognoosimudelite ja muude traditsiooniliste koormuse käsitlemise meetoditega võrreldes lisapanustamist. Ennekõike on vaja aru saada võimalustest, mida koormusmudel pakub. Mudelite esmakordsel rakendamisel on vaja asjatundjatelt tellida koormusuuringud. Igapäevasel käidul tuleb jälgida elektrivõrgu koormuste kujunemist ja vajaduse korral koormusmudeleid redigeerida. Vaja on rakendusprogramme, kuhu kuuluvad koormusmudelid. Kõik toimingud tehakse siiski insenerlikul tasemel ega nõua erilisi lisakulutusi. Kasu, mis koormusmudelite rakendamist saadakse, võib see-eest olla märgatav.

5.2 Koormuse matemaatiline mudel

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. Nii talitletakse ka käesolevas raamatus, kusjuures 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.

5.2.1 Mudeli üldkuju

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

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

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. Võimaldamaks erineva tasemega koormuste temperatuurisõltuvuse võrdlemist, komponent $\Gamma(t)$ normeeritakse

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

kus *R(t)* – koormuse temperatuurisõltuvuse norm
$\gamma(t)$ – 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 mürast) $\xi(t)$. Arvestada tuleb veel piikhälvet $\pi(t)$, mis vastab koormuse suurtele positiivsetele või negatiivsetele hälvetele, mis ei allu normaaljaotusele. Ka stohhastilist komponenti on otstarbekas normeerida. Normiks sobib koormuse ruuthälve *S*(*t*). Kokku võttes

$$\Theta(t) = S(t)\left[\zeta(t) + \xi(t) + \pi(t)\right]$$

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

$$\mathrm{E}_\tau[P] = E(t) + R(t)\gamma_\tau(t) + S(t)\zeta_\tau(t)$$

kus τ on ennetusaeg.

Seega saab koormuse matemaatiline mudel kuju

$$P(t) = E(t) + R(t)\gamma(t) + S(t)[\zeta(t) + \xi(t) + \pi(t)]$$

Selle mudeli kohaselt on *E(t)* koormuse matemaatiliseks ootuseks

$$\mathrm{E}[P(t)] = E(t)$$

tingimusel, et juhuslike hälvete kõrval puudub ka koormuse temperatuurisõltuvus. *S(t)* on taas koormuse ruuthälve

$$\sigma[P(t)] = S(t)$$

kui temperatuurisõltuvus on teada ja kuulub matemaatilise ootuse juurde

$$\mathrm{E}[P(t)] = E(t) + R(t)\gamma(t)$$

Rõhutagem, et ennekõike on *E(t)* ja *S(t)* mudeli komponendid. Milliseks kujunevad koormuse matemaatiline ootus ja ruuthälve, see sõltub konkreetsetest tingimustest.

5.2.2 Koormuse matemaatiline ootus ja ruuthälve

Koormuse matemaatilist ootust, ruuthälvet ja temperatuurisõltuvuse normi ning ühtlasi kogu koormust on matemaatilise modelleerimise käigus otstarbekas vaadelda aastasisese (üldise) aja *t*, ööpäevasisese aja *h* ning päevatüübi *l* funktsioonina[1]

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

Matemaatiline ootus, ruuthälve ja temperatuurisõltuvuse norm on esitatav kujul

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

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

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

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

$$\mathbf{M}(h) = \begin{bmatrix} \mu_0(h) \\ \mu_1(h) \\ \cdots \\ \mu_{MDC}(h) \end{bmatrix}, \qquad \mathbf{N}(t) = \begin{bmatrix} \nu_0(t) \\ \nu_1(t) \\ \cdots \\ \nu_{NAC}(t) \end{bmatrix}$$

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

[1] 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*).

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

kus k = 0...*MDC* ja s = 0...*NAC*. Indeksile 0 vastavad vektorfunktsiooni komponendid on triviaalsed

$$\mu_0(h) \equiv 1, \ \nu_0(t) \equiv 1$$

Mittetriviaalsete komponentide arv *MDC* ja *NAC* on näiteks 4, kuigi võib sellest ka erineda.

Maatriksid $\mathbf{G}_E(l)$, $\mathbf{G}_S(l)$ ja $\mathbf{G}_R(l)$ võib arendada ritta

$$\mathbf{G}_{El} \cong a_{l0}\mathbf{G}_0 + a_{l1}\mathbf{G}_1 + a_{l2}\mathbf{G}_2 + \ldots + a_{l,NSC}\mathbf{G}_{NSC}$$

$$\mathbf{G}_{Sl} \cong b_{l0}\mathbf{G}_0 + b_{l1}\mathbf{G}_1 + b_{l2}\mathbf{G}_2 + \ldots + b_{l,NSC}\mathbf{G}_{NSC}$$

$$\mathbf{G}_{Rl} \cong c_{l0}\mathbf{G}_0 + c_{l1}\mathbf{G}_1 + c_{l2}\mathbf{G}_2 + \ldots + c_{l,NSC}\mathbf{G}_{NSC}$$

kus $\mathbf{G}_0 = \|1\|$. Tulemuseks on

$$E(t,h,l) = \mathbf{M}^T(h)\sum_r \left(a_{lr}\mathbf{G}_r\right)\mathbf{N}(t)$$

$$S(t,h,l) = \mathbf{M}^T(h)\sum_r \left(b_{lr}\mathbf{G}_r\right)\mathbf{N}(t)$$

$$R(t,h,l) = \mathbf{M}^T(h)\sum_r \left(c_{lr}\mathbf{G}_r\right)\mathbf{N}(t)$$

kus r = 0...*NSC*. Rea aste *NSC* = 10...12.

Päevatüübid l = 1...*NTP* vastavad ennekõike tavalistele nädalapäevadele (l = 1...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. Lihtsaimal juhul vaadeldakse erandpäeva kui mõnda sarnast nädalapäeva (pühad – pühapäev (l = 7), pühade-eelne tööpäev – reede (l = 5) jne). Päevatüüpide arv on sel juhul 7.

Mudeli parameetreid a_{lr}, b_{lr} ja c_{lr} võib normeerida matemaatilise ootuse, ruuthälbe ja mudeli normi arvutusliku keskväärtuse alusel

$$a = \frac{1}{7}\sum_{l,r} a_{lr} g_{r00}, \quad b = \frac{1}{7}\sum_{l,r} b_{lr} g_{r00}, \quad c = \frac{1}{7}\sum_{l,r} c_{lr} g_{r00}$$

kus g_{r00} on maatriksi G_r element indeksiga 00. Summeerimine toimub tavaliste nädalapäevade l = 1...7 ulatuses (erandpäevi ei arvestata). Mudelis asendatakse kõnealused parameetrid järgmiselt: $c_{lr} \Rightarrow c \cdot c_{lr}$. Normeerida ei ole võimalik, kui arvutuslik keskmine on liiga väike (null), mis võib esineda reaktiivvõimsuste ja voolude korral. Sellisel juhul $a = b = c = 1$.

Koormuse tase ja iseloom võib muutuda. Kiireid muutusi saab arvesse võtta mudeli tegurite hüppelise kasvuga. Koormuse juurdekasv pika aja vältel esitatakse mudeli lisakomponendi, trendiga, mida vaadeldakse ruutsõltuvusena

$$A(t) = a\left[1 + \alpha_1 (t - t_0) + \alpha_2 (t - t_0)^2\right]$$

kus α_1 ja α_2 on tegurid ning t_0 ajamoment, millest trendi arvestamine algab. Trend kuulub matemaatilise ootuse kõrval ka ruuthälbe ja temperatuurisõltuvuse normi juurde kujul

$$B(t) = b\left[1 + \alpha_1 (t - t_0) + \alpha_2 (t - t_0)^2\right]$$

$$C(t) = c\left[1 + \alpha_1 (t - t_0) + \alpha_2 (t - t_0)^2\right]$$

Tegurid α_1 ja α_2 ning t_0 on siin praktilistel kaalutlustel samad, mis matemaatilise ootusegi korral.

Koormuse pinge ja sagedustundlikkus avalduvad ruutsõltuvustena

$$U(u) = 1 + \mu_1 u + \mu_2 u^2, \text{ kus } u = U_V / U_N - 1$$

$$F(f) = 1 + \nu_1 f + \nu_2 f^2, \text{ kus } f = F_V / F_N - 1$$

Siin on $\mu_1, \mu_2, \nu_1, \nu_2$ tegurid ning U_V ja U_N ning F_V ja F_N vastavalt pinge ja sageduse vaadeldavad ja nimiväärtused. Pinge- ja sagedustundlikkust vaadeldakse vaid seonduvalt matemaatilise ootusega. Seega

$$E(t,h,l) = A(t)U(u)F(f)\mathbf{M}^T(h)\sum_r \left(a_{lr}\mathbf{G}_r\right)\mathbf{N}(t)$$

$$S(t,h,l) = B(t)\mathbf{M}^T(h)\sum_r \left(b_{lr}\mathbf{G}_r\right)\mathbf{N}(t)$$

$$R(t,h,l) = C(t)\mathbf{M}^T(h)\sum_r \left(c_{lr}\mathbf{G}_r\right)\mathbf{N}(t)$$

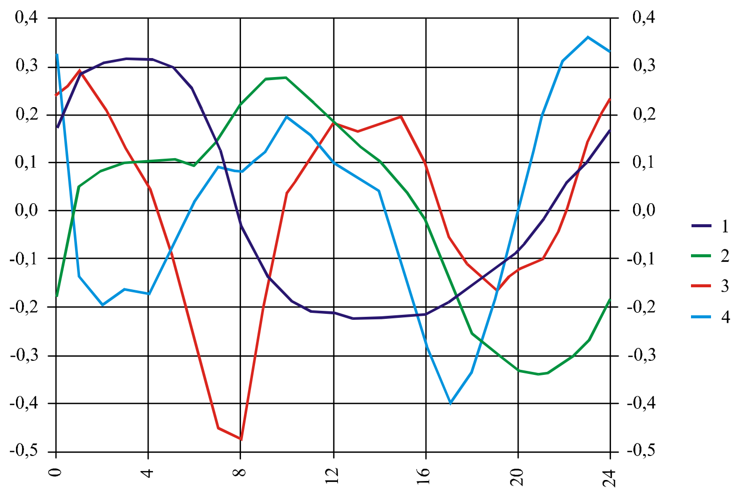
Vektorfunktsiooni $\mathbf{M}(h)$ komponendid $\mu_i(h)$ (i = 1...MDC) esitatakse punktide kaupa (tabeli kujul). Punktide arv sõltub koormusandmete diskreetimissagedusest, mis võib olla kord tunnis või enam. Kuna perioodi pikkus on üks ööpäev, siis on komponendi kohta punkte vähemalt 24. Aastasisesele muutlikkusele vastavad komponendid $\nu_j(t)$ (j = 1...NAC) aproksimeeritakse Fourier' reaga

$$\nu_j(t) = \sum_{k=1}^{MB}\left[a'_{jk}\sin\left(\frac{2\pi}{T}kt\right) + a''_{jk}\cos\left(\frac{2\pi}{T}kt\right)\right]$$

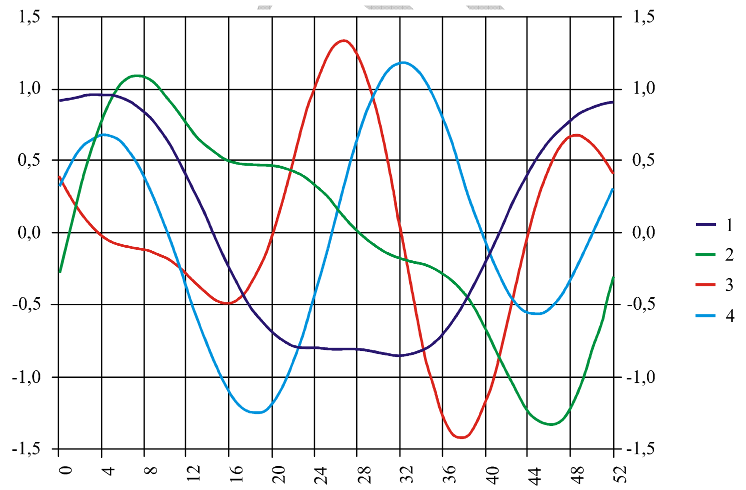
Rea aste MB on tavaliselt 4 või 5. Seega on parameetrite arv vektorfunktsiooni $\mathbf{N}(t)$ ühe komponendi kohta 6 või 8. Joonistel 5.2 ja 5.3 on näiteid vektorfunktsioonide komponentidest. Neid vektorfunktsioone nimetatakse ka mudeli **koordinaatfunktsioonideks**.

Koormuse kõrval on vaja modelleerida temperatuuri regulaarseid muutusi – normaaltemperatuuri. Kuna temperatuurile ei ole vaja eristada päevatüüpe, siis puudub vajadus parameetrite maatriksite rittaarendamiseks. Seetõttu on temperatuurimudelis vaid üks $\mathbf{G}_E$- ja $\mathbf{G}_S$-tüüpi maatriks, mis koos koordinaatfunktsioonidega määravadki temperatuuri T matemaatilise ootuse ja ruuthälbe

$$E_T(t,h) = \mathrm{E}[T(t,h)] = \mathbf{M}_T^T(h)\mathbf{G}_{TE}\mathbf{N}_T(t)$$
$$S_T(t,h) = \sigma[T(t,h)] = \mathbf{M}_T^T(h)\mathbf{G}_{TS}\mathbf{N}_T(t)$$

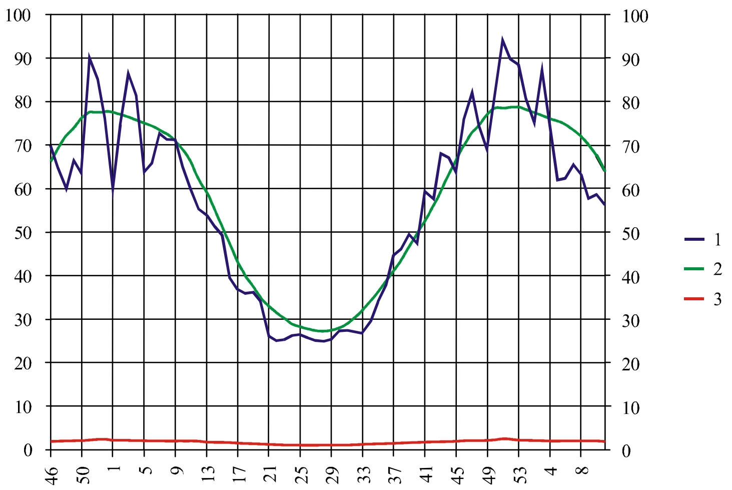


Joonis 5.2 Vektorfunktsiooni M(h) komponendid

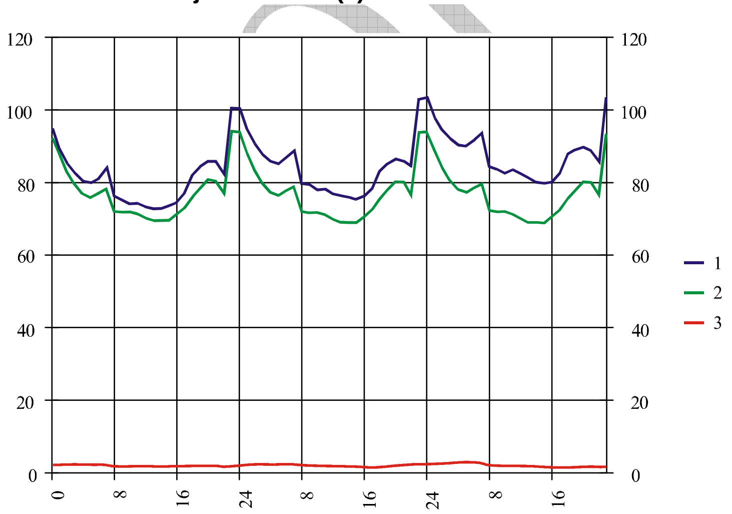


Joonis 5.3 Vektorfunktsiooni N(t) komponendid

Matemaatiline ootus kirjeldab koormuse tõenäoseid väärtusi standardtingimustes. Koormuse võimalikud hälbed on tingitud ilmastiku (temperatuuri) mõjust või on seletatavad juhuslike põhjustega. Joonistel 5.4 ja 5.5 on matemaatilist ootust võrreldud koormuse tegelike väärtustega. Koormuse hälve tuleneb siin peamiselt temperatuuri mõjust. Kui temperatuuri mõju elimineerida, s.t vaadelda koormuse normaliseeritud väärtusi $P(t) - R(t)\gamma(t)$, siis on olukord teine (joonised 5.6 ja 5.7). Olgu mainitud, et matemaatiline ootus estimeeritakse koormuse normaliseeritud väärtuste alusel.

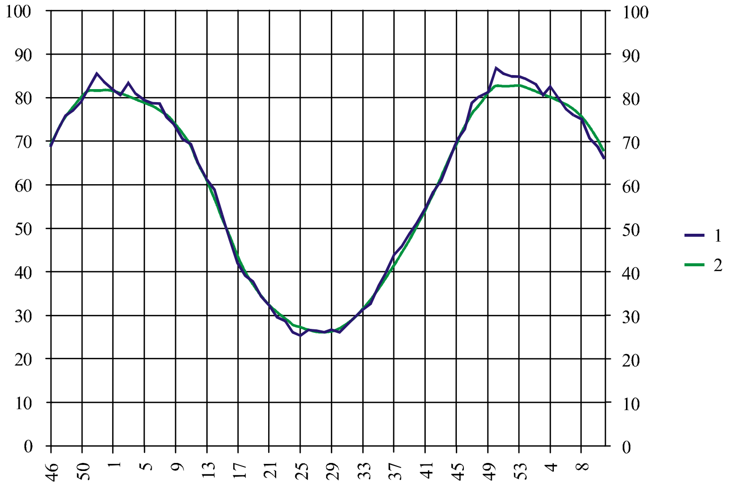


Joonis 5.4 Koormuse tegelik väärtus (1), matemaatiline ootus (2) ja ruuthälve (3) nädalatasemel

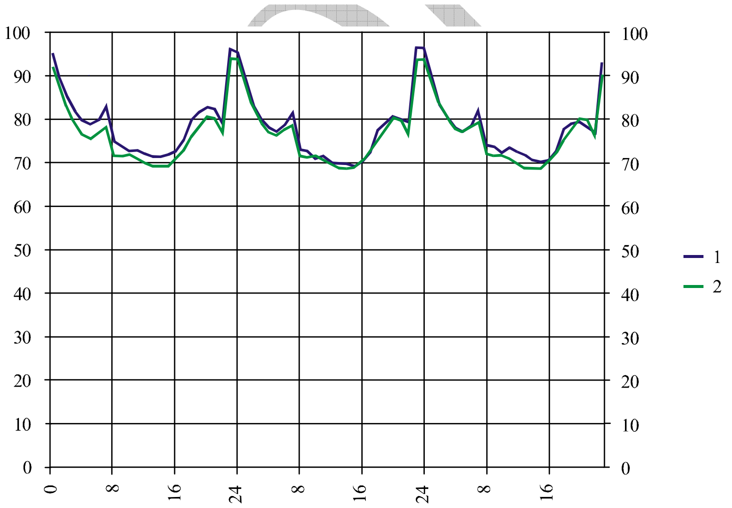


Joonis 5.5 Koormuse tegelik väärtus (1), matemaatiline ootus (2) ja ruuthälve (3) tunnitasemel

Vaadeldud näidetes oli koormus mõnekümne megavati suurusjärgus ja ruuthälve vaid mõni protsent matemaatilisest ootusest nagu sellistele koormustele iseloomulik. Kui vaadelda väiksemaid koormusi, siis on koormuse juhuslikkus ja ühtlasi ruuthälve tunduvalt suuremad. Joonistel 5.8 ja 5.9 on näide elekterküttega eramaja koormusest mõõtühikuna kilovatt. Ka siin on temperatuuri mõju suur (joonisel 5.8 kajastub vaadeldava aasta külm talv), ruuthälve ulatub aga 50% matemaatilisest ootusest ja enamgi.



Joonis 5.6 Normaliseeritud koormus (1) ja matemaatiline ootus (2) nädalatasemel



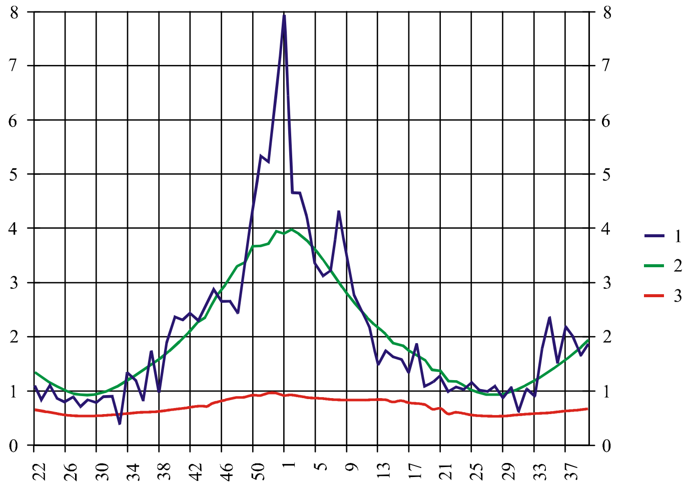
Joonis 5.7 Normaliseeritud koormus (1) ja matemaatiline ootus (2) tunnitasemel

Mõnikord on koormuse muutused sedavõrd ebamäärased, et neid ei ole võimalik regulaarsete funktsioonidega kirjeldada. Sellisel juhul võib koormuse matemaatilise ootuse ja ruuthälbe esitada konstantsena

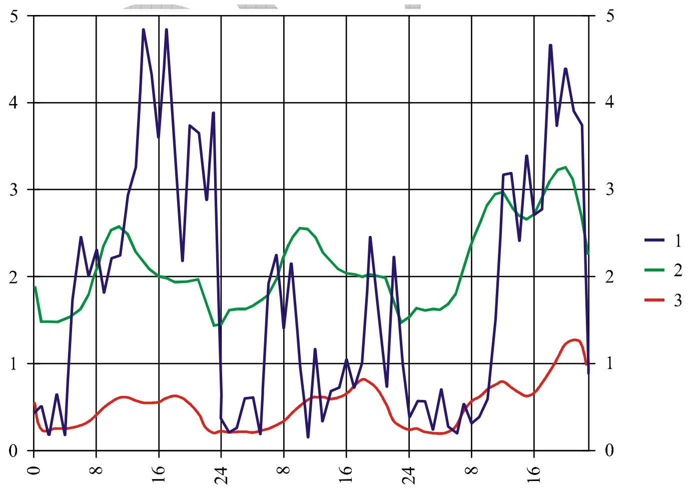
$$\mathrm{E}[P(t)] = a$$

$$\sigma[P(t)] = b$$

Sellise **triviaalmudeli** korral temperatuurisõltuvust tavaliselt ei vaadelda, küll aga võib koormuse väärtuse ja matemaatilise ootuse vahet käsitleda kui juhuslikku komponenti ja leida deviatsioon, jääkhälve ning piikhälve. Ka trendi on triviaalmudeli korral võimalik arvestada. Seega võib triviaalmudeliga esitatud koormust nii analüüsida kui prognoosida.



Joonis 5.8 Eramaja koormus (1), matemaatiline ootus (2) ja ruuthälve(3) nädalatasemel



Joonis 5.9 Eramaja koormus (1), matemaatiline ootus (2) ja ruuthälve(3) tunnitasemel

5.2.3 Koormuse temperatuurisõltuvus

Elektrivõrgu koormus sõltub temperatuuri kõrval veel muudestki ilmastikuteguritest, nagu päikese radiatsioon (pilvisus), tuulekiirus, õhuniiskus jm. Vältimaks mudeli ülemäärast keerukust ja sellest tulenevaid estimeerimisraskusi, piirdume põhilise teguri, välisõhu temperatuuri arvestamisega. Tuleb rõhutada, et praktiline tähendus on vaid selliste ilmastikutegurite arvestamisel, mida käsitletakse (sh prognoositakse) meteoroloogiateenistuste poolt kvantitatiivsel kujul. Põhimõtteliselt võib muid ilmastikutegureid arvesse võtta temperatuuri teisendatud väärtuse, efektiivse temperatuuri kaudu. Loomulikult peavad ka seda suurust käsitlema meteoroloogiateenistused.

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.

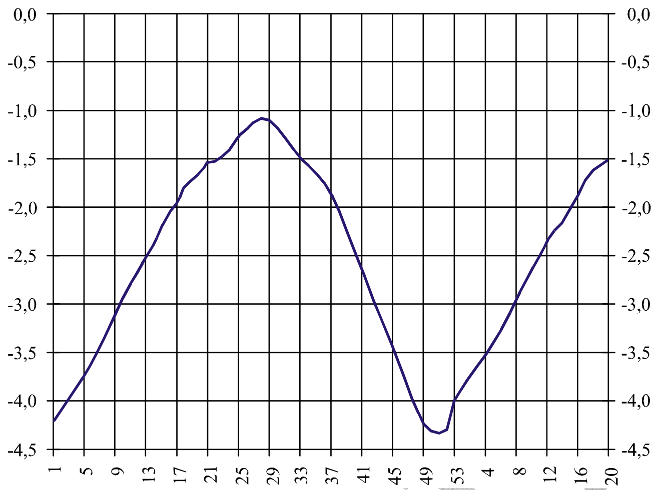
Koormuse temperatuurisõltuvuskomponenti vaadeldakse normeerituna

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

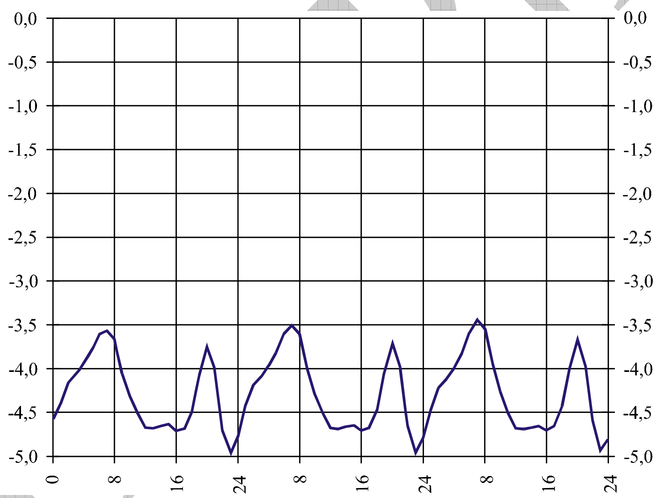
Temperatuurisõltuvuse normiks $R(t)$ sobib koormuse temperatuuritundlikkus – koormuse juurdekasv temperatuuri tõusmisel 1 ºC võrra. Norm määrab temperatuurisõltuvuse taseme igale üksikule koormusele ning toetab selle ajalise muutlikkuse arvestamist. Temperatuuritundlikkus on muutuv nii sesoonselt, päevasiseselt kui päevatüüpide kaupa. Joonistel 5.10 ja 5.11 näeb temperatuuritundlikkuse muutumist nädala- ja tunnitasemel. Temperatuuritundlikkus, mille mõõtühikuks on antud juhul MW/ºC, on näites negatiivne – temperatuuri tõus põhjustab koormuse langust ja vastupidi. Temperatuuri mõju on kõige suurem talvel. Ööpäevasisene temperatuuritundlikkuse piik kell 23.00 on ilmselt tingitud elektritariifi muutusest tulenevast kütteseadmete sisselülitamisest sellel kellajal.

Normeeritud temperatuurisõltuvuskomponent $\gamma(t)$ on sisuliselt temperatuuri hälve ühikuna °C. Esimeses lähenduses võib temperatuuri hälbe leida normaaltemperatuuri suhtes $\Delta T(t) = T(t) - \mathrm{E}[T(t)]$. Seega $\gamma(t) = \Delta T(t)$. Enamasti on siiski vajalik komponendi $\gamma(t)$ täiuslikum esitus, mis võimaldab arvestada koormuse temperatuurisõltuvuse üksikasju, ennekõike temperatuuri mõju hilistumist (inertsi). Selleks on komponendi $\gamma(t)$ kirjeldamisel otstarbekas rakendada aegridade *ARIMA*-mudelit, mida ka Boxi-Jenkinsi mudeliks nimetatakse, kujul

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



Joonis 5.10 Koormuse temperatuuritundlikkus nädalatasemel



Joonis 5.11 Koormuse temperatuuritundlikkus tunnitasemel

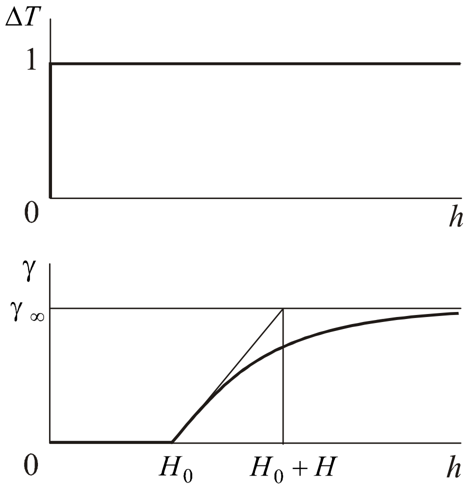
Siin on operaatorid $\Phi_T(B)$ ja $\Psi_T(B)$ nihkeoperaatori B $(B x_t = x_{t-1})$ polünoomid. Kui operaatorid $\Phi_T(B)$ ja $\Psi_T(B)$ esitada kujul

$$\Phi_T(B) = 1 - \varphi B$$

$$\Psi_T(B) = \psi B^m$$

kus φ, ψ ja m on tegurid, siis vastab komponendi $\gamma(t)$ mudel joonisel 5.12 näidatud ülekandefunktsioonile parameetritega

$$H_0 = m, \quad H = \frac{\varphi}{1-\varphi}, \quad \gamma_\infty = \frac{\psi}{1-\varphi}$$



Joonis 5.12 Temperatuurisõltuvuse ülekandefunktsioon

Selle ülekandefunktsiooni kohaselt hakkab temperatuurimuutuse mõju koormusele ilmnema H_0 tunni möödumisel ning H on temperatuuri mõju ajakonstant. Kui $H_0 = 5$ ja $H = 10$, siis avaldub temperatuurimuutuse mõju täielikult umbes $H_0 + 2H = 25$ 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. Kuna need nähtused on temperatuuri matemaatilise ootuse asemel seotud kõrvalekaldega temperatuuri mingist kindlast väärtusest, siis tuleb nende arvestamiseks mudelisse lisada nn marginaalkomponendid, mis aktiveeruvad, kui temperatuur jääb alla või ületab künnisväärtusi T_1 või T_2. Nüüd tuleb matemaatilises mudelis suurust $\gamma(t)$ vaadelda koosnevana kolmest komponendist

$$\gamma_t = \gamma_{0t} + \gamma_{1t} + \gamma_{2t}$$

kus

$$\Phi_{T0}(B)\gamma_{0t} = \Psi_{T0}(B)(T_t - T_{0t})$$

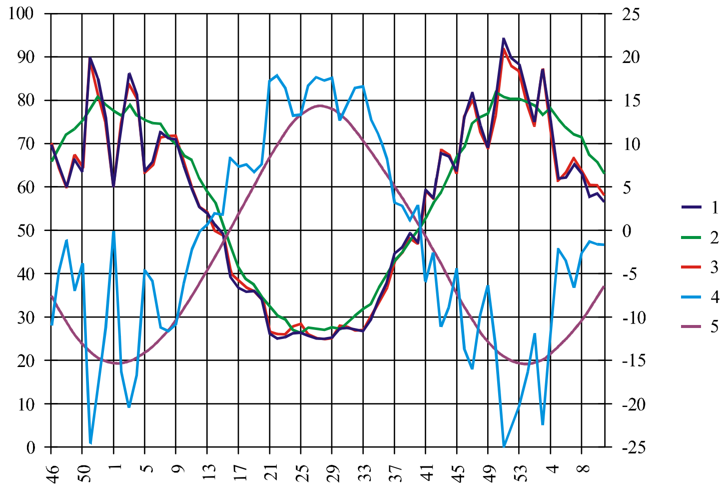
$$\Phi_{T1}(B)\gamma_{1t} = \begin{cases} \Psi_{T1}(B)(T_t - T_1), & kui\ T_t < T_1 \\ 0, & kui\ T_t \ge T_1 \end{cases}$$

$$\Phi_{T2}(B)\gamma_{2t} = \begin{cases} \Psi_{T2}(B)(T_t - T_2), & kui\ T_t > T_2 \\ 0, & kui\ T_t \le T_2 \end{cases}$$

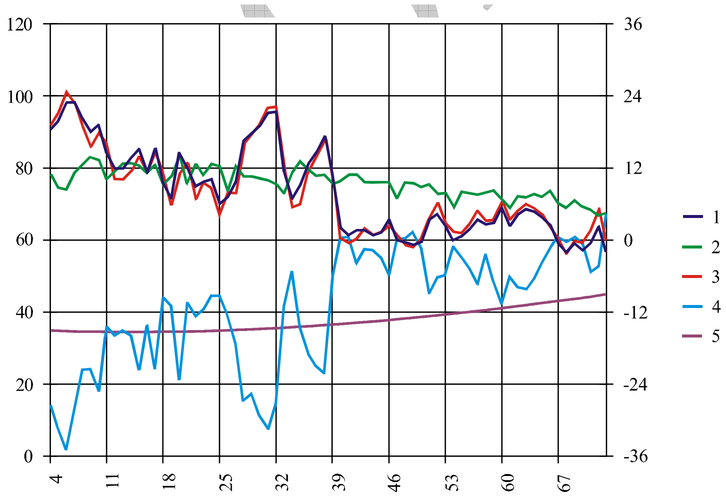
Siin on $T_{0t} = \mathrm{E}[T_t]$ temperatuuri matemaatiline ootus.

Kui marginaalkomponentide korral hilistumine on sama kui põhikomponendilgi, kujuneb temperatuuri hälbe mudel järgmiseks:

$$\gamma_t = \varphi B\gamma_t + \psi_0 B^m (T_t - T_{0t}) + \psi_{T1} B^m (T_t - T_1)\Big|_{T_t<T_1} + \psi_{T2} B^m (T_t - T_2)\Big|_{T_t>T_2}$$



Joonis 5.13 Koormuse tegelik väärtus (1), matemaatiline ootus (2) ja pikaajaline prognoos (3) ning temperatuuri väärtus (4) ja normaaltemperatuur (5) nädalatasemel



Joonis 5.14 Koormuse tegelik väärtus (1), matemaatiline ootus (2) ja pikaajaline prognoos (3) ning temperatuuri väärtus (4) ja normaaltemperatuur (5) päevatasemel

Joonistel 5.13 ja 5.14 on näited koormuse temperatuurisõltuvusest nädala ja päevatasemel. Võrdlusena on esitatud ka temperatuur ning selle matemaatiline ootus (skaleerituna parempoolsele teljele). Siin on koormuse pikaajaliseks prognoosiks nimetatud suurust $E(t)+R(t)\,\gamma(t)$, mis saadakse, kui matemaatilisele ootusele lisada temperatuurisõltuvus. Kuna viimane on arvutatud temperatuuri tegelike andmete alusel, siis on väljend "prognoos" mõneti tinglik.

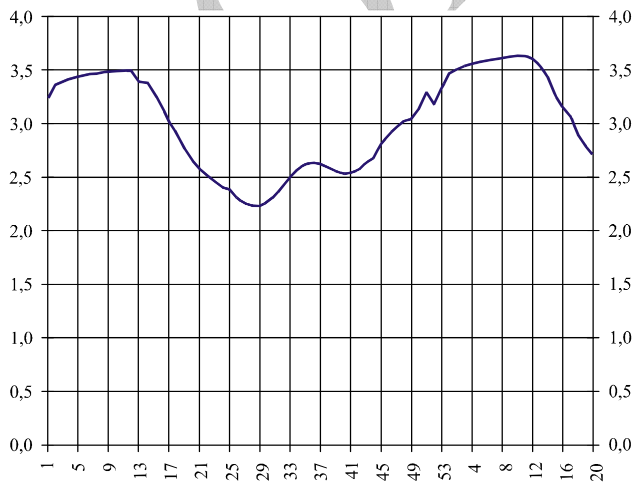
Olenevalt modelleerimise vajalikust täpsusest võib vaadelda muidki koormuse temperatuurisõltuvuse üksikasju. Nii ei pruugi koormus langeda tavalisel moel, kui temperatuur peale pikka külma perioodi (nädal või enam) tõuseb normaalsele tasemele. Probleemiks on ka, kuidas esitada akumuleeriva elekterküttega koormuse temperatuurisõltuvust. Sel juhul ei sõltu temperatuurist niivõrd kütteseadmete võimsus kui nende sisselülitamise kestus.

5.2.4 Koormuse juhuslikkus

Koormuse juhuslikkust arvestab stohhastiline komponent

$$\Theta(t)=S(t)\left[\zeta(t)+\xi(t)+\pi(t)\right]$$

Juhuslikkuse taset väljendab koormuse ruuthälve $S(t)$, mis on ajas muutuv. Joonistel 5.15 ja 5.16 on näitena koormuse ruuthälve nädala- ja tunnitasemel. Näidetest selgub, et ruuthälbe muutused sarnanevad koormuse (matemaatilise ootuse) muutustega, olles suuremad talvel ja õhtuti, väiksemad suvel ja öösiti. Lähem uurimine näitab siiski, et ruuthälbe muutumise seaduspärasused ei pruugi kokku langeda matemaatilise ootuse muutustega.

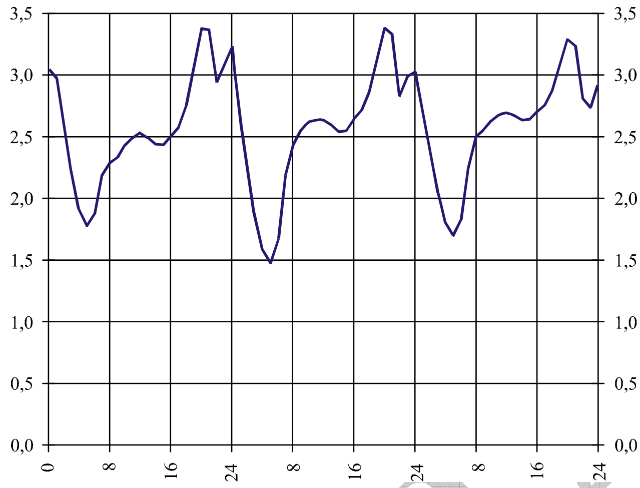


Joonis 5.15 Koormuse ruuthälve nädalatasemel

Koormuse juhuslik hälve

$$\vartheta(t)=\frac{1}{S(t)}\left[P(t)-E(t)-\Gamma(t)\right]$$

on kirjeldatav *ARIMA*-mudeliga kujul



Joonis 5.16 Koormuse ruuthälve tunnitasemel

$$\vartheta_t = \frac{\Psi(B)}{\Phi(B)}\xi_t$$

kus ϑ_t – juhusliku hälbe väärtus ajaintervallis
$\Phi(B)$ ja $\Psi(B)$ – lineaarsed operaatorid
ξ_t – mittekorreleeritud aegrida – koormuse jääkhälve.

Võib vaadelda ka ülekandefunktsiooni

$$\mathrm{F}(B) = \frac{\Psi(B)}{\Phi(B)}$$

nii et

$$\vartheta_t = \mathrm{F}(B)\xi_t$$

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

$$\Phi(B) = (1-\varphi_1 B - ... - \varphi_{MF} B^{MF})(1-\varphi_M B^M)(1-\varphi_N B^N)$$
$$\Psi(B) = (1-\psi_1 B - ... - \psi_{MP} B^{MP})(1-\psi_M B^M)(1-\psi_N B^N)$$

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 piirides 1...2 ning kui diskreetimissagedus on kord tunnis, siis M = 24 ja N = 168. Koormushälvete mudelis on siis kaheksa parameetrit $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_{24}, \varphi_{168}, \psi_1, \psi_2, \psi_{24}$ ja ψ_{168}.

Koormuse suured kõrvalekalded jääkhälbesse ei kuulu, mistõttu neid tuleb vältida. Kriteeriumiks sobib

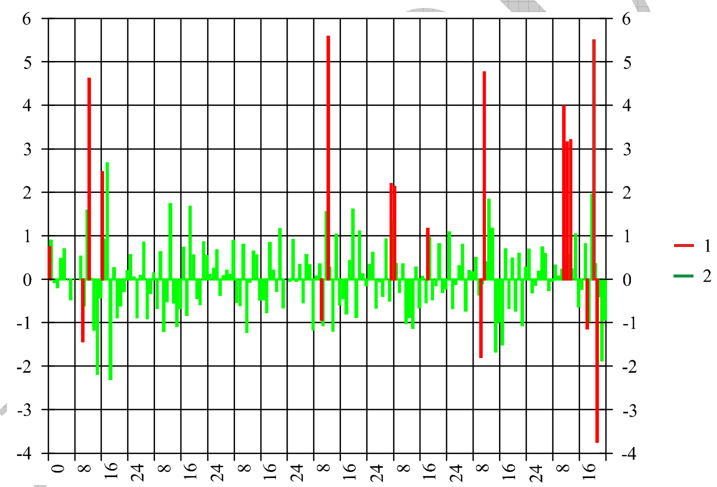
$$|\xi_t| < c_S \sigma_\xi$$

kus c_S on usaldustegur (näiteks 2,7) ja σ_ξ jääkhälbe ruuthälve. Võimalikud suured hälbed kuuluvad koormuse piikkomponenti π_t.

Praktikas käsitletakse koormuse juhuslikku hälvet rekursiivselt. Iga ajaintervalli (tund või selle osa) kohta leitakse Boxi-Jenkinsi mudeli alusel deviatsiooni ζ_t väärtus. Kui vahe $\vartheta_t - \zeta_t$ sobib eeltoodud kriteeriumi järgi jääkhälbele, siis $\vartheta_t - \zeta_t = \xi_t$ ja piikkomponendi väärtus $\pi_t = 0$. Muidu on piikkomponendi väärtus nullist erinev ja $\vartheta_t - \zeta_t = \xi_t + \pi_t$. Komponentide ξ_t ja π_t eraldamiseks imiteeritakse jääkhälbe ξ_t väärtus normaaljaotuse $\xi'_t = N(0, \sigma_\xi)$ alusel. Seega

$$\begin{cases} \xi_t = \vartheta_t - \zeta_t, \quad \pi_t = 0, \quad kui \ |\vartheta_t - \zeta_t| < c_S \sigma_\xi \\ \xi_t = \xi'_t, \quad \pi_t = \vartheta_t - \zeta_t - \xi'_t, \quad kui \ |\vartheta_t - \zeta_t| >= c_S \sigma_\xi \end{cases}$$

Juhusliku hälbe ϑ_t käsitlemise tulemusi illustreerib joonis 5.17. Jääkhälbe ξ_t väärtus on võimalik leida iga vaadeldava ajaintervalli (tunni) kohta, piikhälbe π_t väärtused tulevad aga esile aeg-ajalt.



Joonis 5.17 Koormuse piikhälve (1) ja jääkhälve (2)

Jääk- ja piikkomponent seonduvad koormuse jaotusseadusega, mis on vajalik koormuse minimaal- ja maksimaalväärtuste hindamiseks. Võimalikke hälbeid hinnatakse seosega

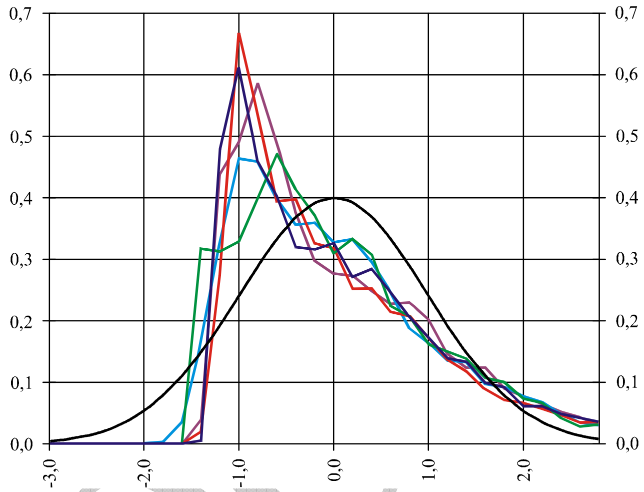
$$\Delta P = c_s \sigma$$

kus σ on koormuse ruuthälve ja c_s usaldustegur. Usaldusteguri väärtus tuleneb etteantud tõenäosusest α ja koormuse jaotusseadusest

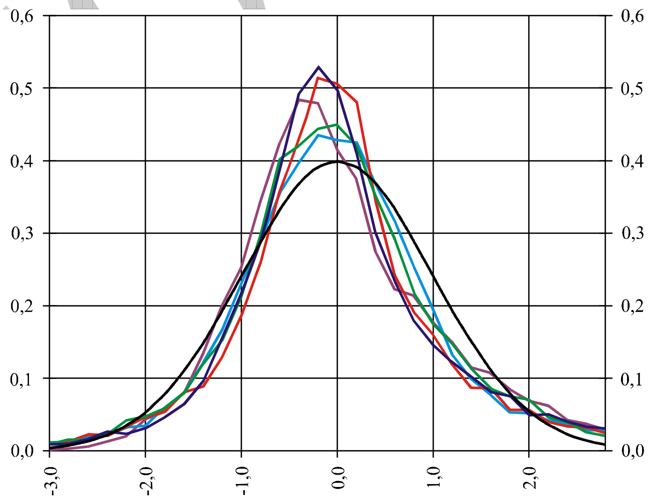
$$\int_{-\infty}^{c_S} f(p)dp = \alpha$$

kus f tähistab jaotustihedust ja $p = \Delta P / \sigma$ on koormuse suhteline hälve.

Sageli lähtutakse normaalsest jaotusseadusest, mis aga elektrivõrgu koormuste korral enamasti ei kehti. Ka sõltub jaotusseaduse kuju sellest, kuidas koormuse hälve ΔP on määratud. Enamasti pakub huvi koormuse võimalik kõrvalekalle tema matemaatilisest ootusest, mis leitakse koormusmudeli abil ajas muutuvana. Kui sellist mudelit ei kasutata, leitakse hälve koormuse keskväärtuse suhtes, mis on leitud pikema ajavahemiku (nt aasta) kohta. Võib vaadelda ka lühiajalise prognoosi hälvet koormuse tingliku matemaatilise ootuse suhtes, mis arvestab nii koormuse tegelikku kulgu lähiminevikus kui ka temperatuuri mõju.

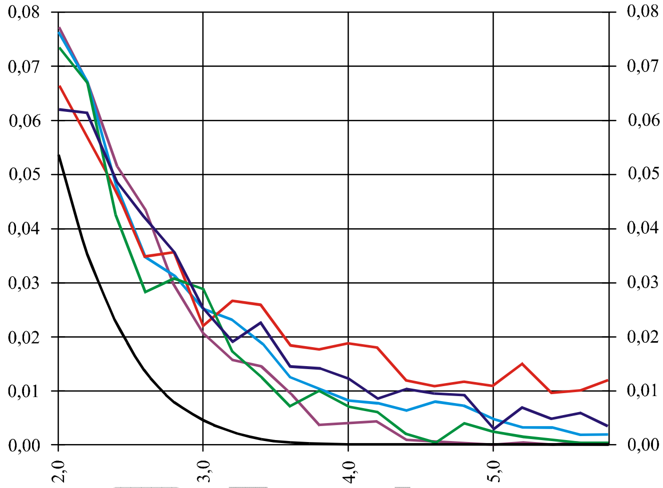


Joonis 5.18 Koormuste histogrammid esimesel juhtumil



Joonis 5.19 Koormuste histogrammid teisel juhtumil

Joonistel 5.18 ja 5.19 on hälvete histogrammid, mis on leitud koormuse konstantse keskväärtuse (esimene juhtum) ja ajas muutuva matemaatilise ootuse (teine juhtum) suhtes. Võrdluseks on kujutatud ka normaalne jaotusseadus. Maksimaalkoormuse hindamisel pakub huvi histogrammide sabaosa, mis on joonisel 5.20 välja toodud suurendatuna, olles mõlemal juhul samalaadne. Näeme, et koormustel esineb arvestatava tõenäosusega küllaltki suuri hälbeid, mis normaaljaotuse korral oleksid võimatud. Erinevused on seda märgatavamad, mida suurem on etteantud tõenäosus.



Joonis 5.20 Histogrammide fragment

Tabelis 5.1 esitatud usaldusteguri väärtused on leitud keskmistele (suurusjärgus 10 MW) koormustele. Väiksemate koormuste puhul on olukord veelgi kontrastsem.

Tabel 5.1 Usaldusteguri sõltuvus etteantud tõenäosusest

Tõenäosus α	0,9	0,99	0,999
Normaaljaotusele vastav usaldustegur c_{sn}	1,28	2,33	3,10
Tegelik usaldustegur c_s	1,30	4...6	10...15

Normaaljaotusega jääkhälve koos piikhälbega moodustavad koormuse nn piiknormaalse jaotuse. Ütleme, et juhuslikul suurusel X on piiknormaaljaotus, kui selle põhiliselt normaalse jaotusega väärtustes esineb aeg-ajalt kõrvalekaldeid, piike, mis ei sobi ühte normaaljaotusega. Positiivsete ja negatiivsete piikide sagedused võivad olla erinevad (kaasa arvatud null). Seega koosneb piiknormaalse jaotusega suurus X normaalkomponendist X_0 ja piikkomponendist X_Π. Piikkomponent koosneb omakorda positiivsest X_1, negatiivsest X_2 ja nullkomponendist Q

$$X = X_0 + X_P$$
$$X_\Pi = X_1 + X_2 + Q$$

Normaalkomponendi jaotustihedus on teatavasti

$$f_0(x_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_0} e^{-\frac{(x_0-\mu_0)^2}{2\sigma_0^2}}$$

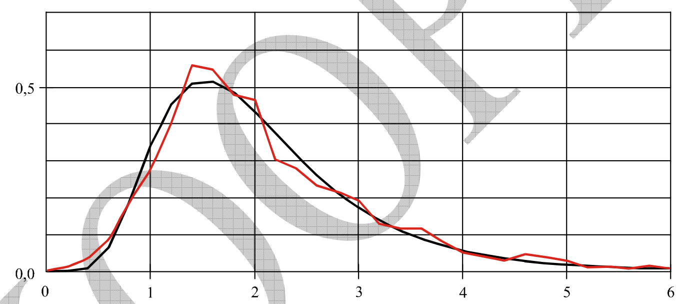
Kui piikkomponendi positiivsete ja negatiivsete hälvete sagedus on vastavalt λ_1 ja λ_2, siis arvestades, et need hälbed on üksteist välistavad, saab

$$f_\Pi(x_\Pi) = \lambda_1 f_1(x_1) + \lambda_2 f_2(x_2) + \lambda_0$$

Siin $\lambda_0 = 1 - \lambda_1 - \lambda_2$. Eeldades, et hälvete jaotus on lognormaalne, võib kirjutada

$$f_k(x_k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_k |x_k|} e^{-\frac{(\ln|x_k|-\mu_k)^2}{2\sigma_k^2}}, \qquad (k = 1, 2)$$

Siin on silmas peetud, et suurus X_2 on negatiivne.



Joonis 5.21 Positiivse piikkomponendi histogramm ja jaotus

Niisiis on piiknormaaljaotusel 8 parameetrit: $\mu_0, \sigma_0, \mu_1, \sigma_1, \lambda_1, \mu_2, \sigma_2, \lambda_2$ ja ta sisaldab normaaljaotust, lognormaaljaotust ning Poissoni jaotust. Viimased kaks on asendatavad ka mõne muu sobiva jaotusega. Joonisel 5.21 on näide positiivse piikkomponendi histogrammist ja seda aproksimeerivast lognormaalsest jaotusest.

Suuruse X, milleks antud juhul on koormus, jaotustihedus on leitav konvolutsioonina

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f_0(x_0) f_\Pi(x - x_0) dx_0$$

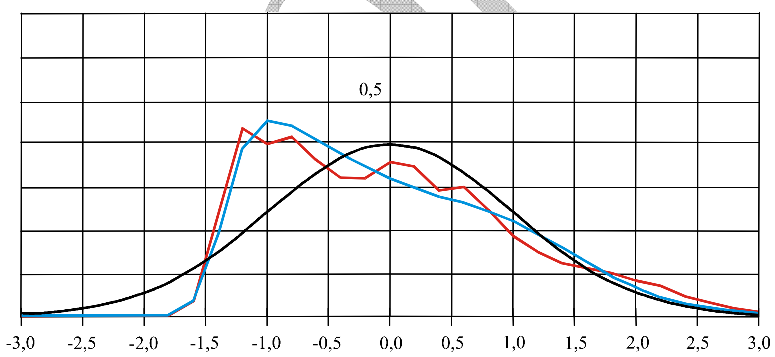
Siin tähistab f_Π piikkomponendi jaotustihedust. Suuruse X_0 olemus sõltub sellest, kuidas koormushälve ΔP on määratletud. Vaadeldes koormushälvet kas keskväärtuse $\overline{E}$, matemaatilise ootuse või pika- ja lühiajalise prognoosi suhtes, avaldub koormushälve järgmiselt

1. $\Delta P(t) = E(t) + R(t)\gamma(t) + S(t)[\zeta(t) + \xi(t) + \pi(t)] - \overline{E}$
2. $\Delta P(t) = R(t)\gamma(t) + S(t)[\zeta(t) + \xi(t) + \pi(t)]$
3. $\Delta P(t) = S(t)[\zeta(t) + \xi(t) + \pi(t)]$
4. $\Delta P(t) = S(t)[\xi(t) + \pi(t)]$

Kuna suurused $\gamma(t)$, $\zeta(t)$ ja $\xi(t)$ on normaaljaotusega, siis tähendab nurksulgudes esitatud avaldis kõikidel juhtudel normaaljaotuse konvolutsiooni piikkomponendi jaotusega. Koormuse jaotuse lõplik kuju saadakse lineaarse teisendusega, mis võtab arvesse deterministlikud funktsioonid *E(t)* ja *S(t)*

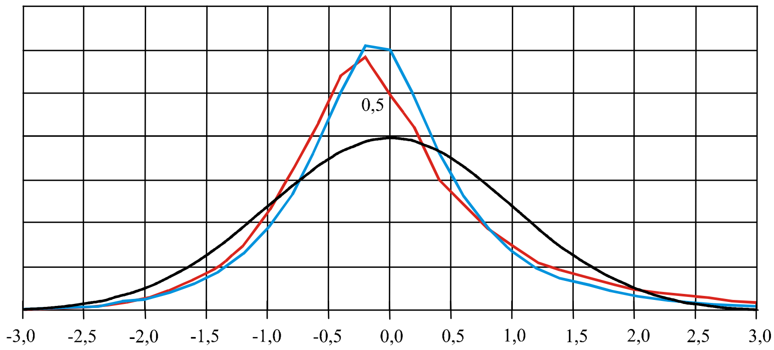
$$f_P(P) = \frac{1}{t_2 - t_1}\int_{t_1}^{t_2} f\left(\frac{P(t) - E(t) - R(t)\gamma(t)}{S(t)}\right)\cdot\frac{1}{S(t)}dt$$

kus (t_1, t_2) on vaadeldav ajavahemik. Siin kuuluvad funktsioonid *E(t)* ja *R(t)* vaid esimesse ja teise koormushälbe määratlusse, ülejäänud juhtumitel see puudub. Nii jaotusseaduste konvolutsioon kui lineaarteisendus on teostatavad vaid numbriliselt. Joonistel 5.22 ja 5.23 on näited koormuse jaotusseaduse kohta, kusjuures koormushälve on leitud esimese ja teise määratluse alusel. Võrdlusena on toodud normaalne jaotustihedus.



Joonis 5.22 Koormuse histogramm ja piiknormaaljaotus esimesel juhtumil

Koormuste summeerimisel normaalselt jaotunud komponentide summa jaotus on samuti normaalne. Konvolutsiooni tagajärjel piikkomponendi osakaal väheneb, kuni lõpuks kaob. Seega on suure arvu koormuste liitmisel tulemuseks normaaljaotus, nii nagu tõenäosusteooria tsentraalne piirteoreem ette näebki. Liidetavaid peab siiski olema küllaltki palju (kümneid ja sadu). Praktikas võib normaalselt jaotunuks lugeda vaid põhivõrgu sõlmekoormusi. Öeldu kehtib siiski vaid koormuse suhteliste hälvete kohta, mis eespool on esitatud nurksulgudes. Kui joatus leitakse pika ajavahemiku kohta, siis jääb ruuthälbe, temperatuurisõltuvuse normi ja eriti matemaatilise ootuse muutuste tõttu jaotus asümmeetriliseks. Kui koormushälvet vaadeldakse keskväärtuse suhtes, jääb



Joonis 5.23 Koormuse histogramm ja piiknormaaljaotus teisel juhtumil

koormuse jaotus liidetavate koormuste arvust sõltumatult joonisel 5.18 kujutatu sarnaseks. Tõsi sellisel jaotuse on saba tunduvalt lühem kui piikkomponendi olemasolul, mistõttu maksimaalkoormuse hindamine normaaljaotuse alusel ei põhjusta suurt viga.

5.3 Matemaatilise mudeli realiseerimine

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

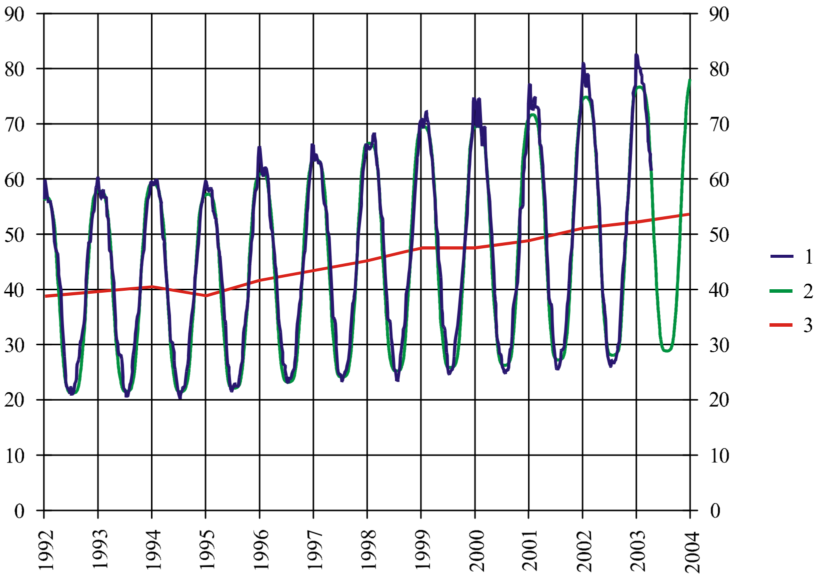
5.3.1 Koormuse trend

Koormuse taseme määrab matemaatilises mudelis ruutsõltuvuse kujul esitatud trend Trendi selline esitusviis on vastuvõetav, kui vaadeldav ajavahemik ei ületa 2...3 aastat. Pikema ajavahemiku korral võivad tekkida ülemäära suured hälbed. Nii sõltub summaarne koormus vastava regiooni majanduse kasvutempost, mis võib vahelduda aastate lõikes, elektrivõrgu sõlmekoormused on sõltuvad suurte ettevõtete töökorraldusest jms.

Pika ajavahemiku korral annab paremaid tulemusi trendi kujutamine murd-lineaarsena üksikute ajaperioodide kaupa. Sel juhul koosneb trend lineaarsetest lõikudest

$$A(t) = a_0\left[1 + \alpha(t - t_0)\right]$$

kus a_0 on trendi väärtus ajavahemiku algushetkel t_0 ning α on kasvutegur. Ajavahemikuks sobib üks aasta, mis võib ühtida kalendriaastaga. Joonisel 5.24 on regiooni summaarse koormuse temperatuuri järgi normaliseeritud väärtused, matemaatiline ootus ja trend 12 aasta jooksul.

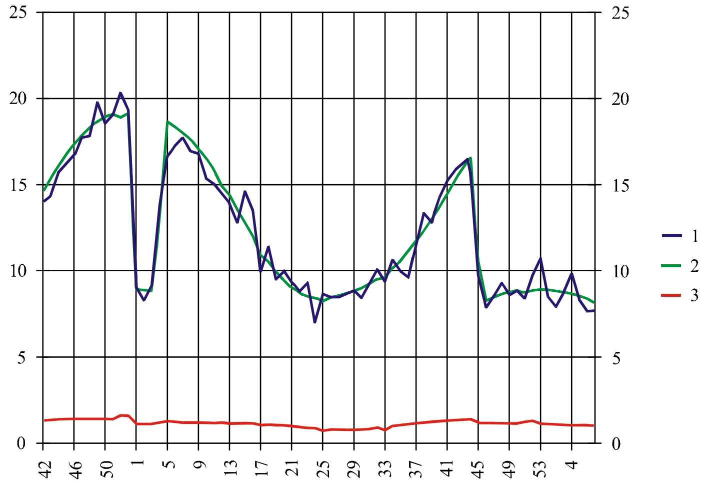


Joonis 5.24 Koormuse normaliseeritud andmed (1), matemaatiline ootus (2) ja trend (3)

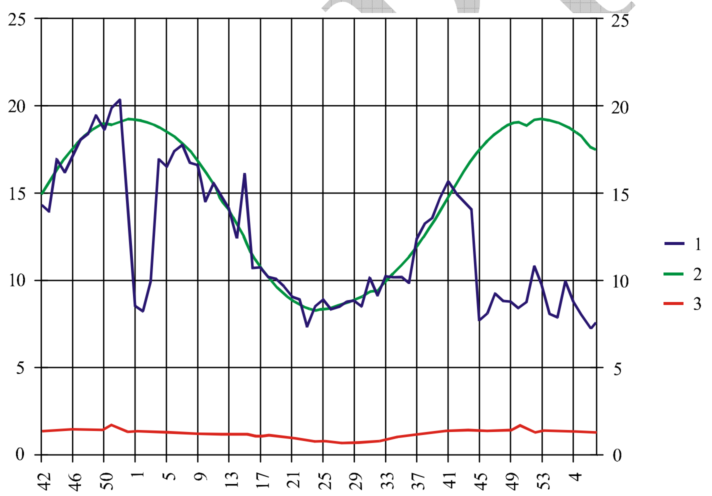
5.3.2 Koormusjuhtumid ja -stsenaariumid

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 jne.

Kirjeldatud hüppelisi muutusi võib vaadelda **koormusjuhtumitena**, millele vastavad matemaatilise mudeli erinevad parameetrid. Joonisel 5.25 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 5.26 ja 5.27). 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.

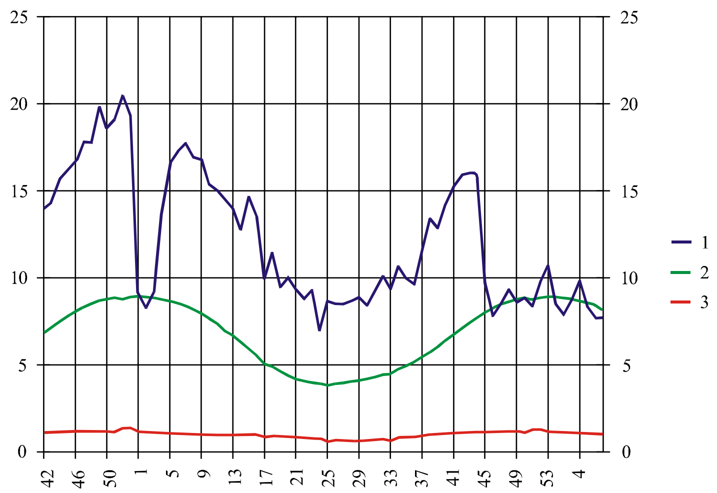


Joonis 5.25 Elektrivõrgu sõlmekoormus (1), matemaatiline ootus (2) ja ruuthälve (3) nädalatasemel



Joonis 5.26 Elektrivõrgu sõlmekoormus (1) ning matemaatilise ootuse (2) ja ruuthälbe (3). Esimene juhtum

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.



Joonis 5.27 Elektrivõrgu sõlmekoormus (1) ning matemaatilise ootuse (2) ja ruuthälbe (3). Teine juhtum

5.3.3 Koormuse temperatuurisõltuvuse ja stohhastika muutused

Koormuse temperatuurisõltuvust ja stohhastikat kirjeldavate alammudelite esitamisel on probleemiks ajaliste muutuste arvestamine. Temperatuurisõltuvuse tase ja iseloom muutuvad sesoonselt, aga ka nädala- ja ööpäevasiseselt. Mudeli muutusi tuleb arvestada vajalikul määral. Elekterküttega kommunaalkoormuse korral, kus temperatuuri mõju on suur, tuleb temperatuurisõltuvust üksikasjalikumalt käsitleda. Seevastu tööstuskoormustele piisab ka lihtsamast esitusviisist.

Matemaatilises mudelis on koormuse temperatuurisõltuvuse ajaliste muutuste arvestamiseks ette nähtud norm $R(t)$.

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

Normi abil saab siiski kirjeldada vaid koormuse temperatuurisõltuvuse taseme muutusi. Temperatuuri mõju hilistumise ja ebalineaarsuse muutuste arvestamiseks tuleb vaadelda komponendi $\gamma(t)$ parameetrite erinevaid komplekte, mis vastavad teatud ajavahemikule.

Komponendi $\gamma(t)$ mudelis on seitse parameetrit (p 5.2.3) $m, \varphi, \psi_0, \psi_1, \psi_2$, T_1 ja T_2. Kui aasta jagada 4 perioodiks (kevad, suvi, sügis ja talv), nädal 3 perioodiks (tööpäev, laupäev ja pühapäev) ning ööpäev 4 perioodiks (hommik, päev, öö esimesed tunnid ja ülejäänud öö), on komponendi $\gamma(t)$ ajaliste muutuste kirjeldamiseks vaja 48 parameetrite komplekti. Muutuste sujuvuse võib saavutada mudeli rakendamisel parameetrite ajalise interpoleerimise teel.

Koormuse stohhastikamudel koosneb jääk- ja piikkomponendist (p 5.2.4). Kummagi komponendi mudelis on kaheksa parameetrit $\varphi_1,\varphi_2,\psi_1,\psi_2,\psi_{24}$, $\varphi_{24},\varphi_{168}$ ja ψ_{168} ning $\mu_0,\sigma_0,\mu_1,\sigma_1,\lambda_1,\mu_2,\sigma_2$ ja λ_2. Piikkomponendi ajalisi muutusi ei pruugi vaadelda. Jääkkomponendi, mis väljendab stohhastilist järelmõju (autokorrelatsiooni), kirjeldamisel ei ole probleemiks niivõrd ajalised muutused üldiselt, vaid eristada tuleb päevatüüpide võimalikke kombinatsioone, s.t vaadeldavale päevale eelnenud päevade tüüpe. On ilmne, et koormuse hälbed tööpäevadel ei ole tingimata korreleeritud kõrvalekalletega nädalavahetusel ja vastupidi. Koormushälvete järelmõju ja ühtlasi mudeli parameetrite optimaalsed väärtused sõltuvad sellest, milline oli vaadeldava päevaga võrreldes päeva tüüp ööpäev ja nädal tagasi. Tabelis 5.2 on päevatüüpide võimalikud kombinatsioonid. Siin osutab 1 ja töö- 2 ja puhkepäevale, 0 näitab, et sellekohast päevatüüpi ei kontrollita, ning tühik tähendab, et selliseid andmeid ei kasutata (mudelis on vastav parameeter null). Seega rakendatakse tunnuse IDay = 1 kohaseid parameetreid, kui tegemist on tööpäevaga ning eelmine ja eelmise nädala vastav päev oli samuti tööpäevad. Mõistetav on ka ülejäänud kombinatsioonide kasutamine. Tunnusega IDay = 0 tähistatud parameetrid on keskmised. Neid võib kasutada siis, kui päevatüüpe ei eristata.

Tabel 5.2 Päevatüüpide kombinatsioonid

IDay	Jooksev päev	Eelmine päev	Eelmine nädal
0	0	0	0
1	1	1	1
2	1	1	
3	1		1
4	1		
5	2	2	2
6	2	2	
7	2		2
8	2		

5.3.4 Erandpäevad

Erandpäevad (pühad, pühade-eelsed ja -järgsed päevad jms) võivad moodustada aasta päevade hulgast 10% ja enamgi. Kuna koormus erandpäevadel võib oluliselt erineda tavalise nädalapäeva koormusest, tuleb erandpäevade arvestamisele matemaatilises mudelis pöörata asjakohast tähelepanu.

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 tüübitegurid (p 5.4.1) ja arvutused jätkuvad tavalises korras.

Erandpäevakohaste tüübitegurite estimeerimisel seatakse iga erandpäevaga esmalt vastavusse nn baaspäev, s.o tavaline nädalapäev, mis kõige enam sarnaneb vaadeldava erandpäevaga: pühad – pühapäev, pühade-eelne tööpäev –

reede jne. Seejärel leitakse iga erandpäevatüübile vastavate koormusandmete ja baaspäevakohase matemaatilise ootuse suhtefunktsiooni $\lambda_l(h)$ keskväärtus

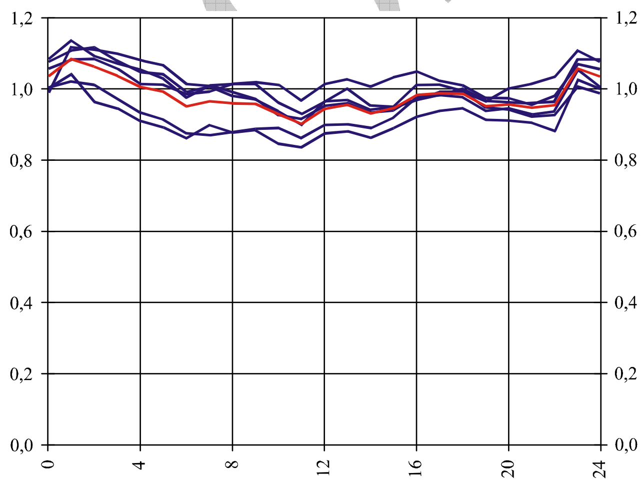
$$P(t,h,l) \approx \lambda_l(h)E(t,h,l_B)$$

kus l_B on baaspäeva tüübinumber (l_B = 1...7). Järgneb tüübitegurite a_{lr} aproksimeerimine nii, et

$$E(t,h,l) \cong \lambda_l(h)E(t,h,l_B)$$

Koormuse ruuthälbele ja normile vastavatele tüübiteguritele b_{lr} ja c_{lr} omistatakse baaspäeva väärtused.

Suhtefunktsiooni $\lambda_l(h)$ estimeerimist raskendab erandpäevatüüpide suur arv, mis on muuhulgas tingitud sellest, et kindla kuupäevaga erandpäevad (nt jõulud) võivad eri aastatel langeda erinevatele nädalapäevadele. Seetõttu erinevad mõningal määral pühade, eriti aga pühade-eelsete ja -järgsete päevade suhtefunktsioonid. Mudelis tuleb selliseid päevi vaadelda omaette tüüpidena. Kuna antud tüüpi erandpäevi esineb olemasolevates lähteandmetes vähe (kui üldse), leitakse suhtefunktsioonid interaktiivselt – asjatundja otsustab, kas tulemus on usaldatav või mitte. Kui estimeerimistulemust ei saa usaldada või vaadeldav erandpäevatüüp puudub lähteandmetes hoopiski, võetakse $\lambda_l(h) \equiv 1$, s.t erandpäeva tüübiteguritele omistatakse baaspäevakohased väärtused. Joonisel 5.28 on näide uusaastapäevale vastavatest suhtekõveratest ühele koormusele 6 aasta jooksul.



Joonis 5.28 Erandpäeva suhtekõverad

Kokku võttes võib matemaatilise mudeli alusel käsitleda erandpäevi samal viisil kui tavalisi nädalapäevi. Arvutatavate koormusnäitajate täpsus sõltub sellest, kui palju mingit erandpäevatüüpi on kasutada olevates koormusandmetes esinenud. Baaspäevadest lähtudes võib arvestatava täpsuse saavutada isegi siis, kui vaadeldavat päevatüüpi pole varem ette tulnud. Kuna erandpäevade kalendri võib koostada juba aastakümneteks ette, tuleb koormuse seiresüsteemi lõppkasutajal vahele segada vaid juhul, kui erandpäevade loetelu või asetus muutub.

5.4 Koormusmudeli rakendused

Selleks et matemaatilise mudeli seosed kirjeldaksid mingit koormust kvantitatiivselt, on mudeli parameetreid vaja estimeerida selle koormuse andmetel. Tulemuseks on mudel, mis vastab vaadeldavale koormuse tasemele ja muutumise seaduspärasustele. Elektrivõrgu talitluse plaanimiseks ja juhtimiseks vajalikke suurusi mudel otseselt ei väljenda. Vajalikke suurusi, koormusnäitajaid on aga mudeli alusel võimalik leida.

5.4.1 Koormusmudeli estimeerimine

Koormuse matemaatilisse mudelisse kuulub suur hulk (suurusjärgus 1000) parameetrit. Modelleerimise põhimõtteks on, et kõik need parameetrid on igale vaadeldavale koormusele nii või teisiti määratud. Koormusandmete puudumisest tingitud lihtsustatud mudeleid ei vaadelda.

Mudeli parameetrid võib estimeerida iga koormuse kohta eraldi. Sageli on otstarbekas leida osa parameetritest ühistena teatud hulga koormuste kohta. Jaotusvõrgus, kus koormuste arv on suur ja juhuslikkus oluline, võib sel teel tõsta parameetrite usaldatavust. Omaette probleem on lähteandmete vähesus, mis võib olla tingitud vajalike mõõteandmete puudumisest, aga ka sellest, et koormuse iseloom on muutunud ja varasemad andmed mittekasutatavad. Kui lähteandmed ei võimalda estimeerida mudeli kõiki parameetreid, leitakse otseselt vaid olemasolevate andmetega kokkusobiv arv parameetreid. Ülejäänud parameetrid kantakse üle **tüüpmudelist** – mõne varem estimeeritud koormuse mudelist, mis oma iseloomult sobib vaadeldava koormusega.

Mudeli parameetreid on võimalik rühmitada järgmise hierarhia kohaselt:
koormusrühm – vektorfunktsioonid $\mathbf{M}(h)$ ja $\mathbf{N}(t)$ – koordinaatfunktsioonid

- koormusklass – maatriksid $\mathbf{G}_r$ – kujukoordinaadid
- tüüpkoormus – parameetrid a_{lr}, b_{lr}, ja c_{lr} – kujutegurid
- üksikkoormus – parameetrid a, b ja c – nivootegurid.

Koordinaatfunktsioone ja kujukoordinaate võib lühidalt nimetada ka mudeli koordinaatideks ning kuju- ja nivootegureid mudeli teguriteks.

Mudeli parameetrite hierarhilist struktuuri saab kasutada mitmeti. Mudeli estimeerimisel vaadeldava elektrivõrgu koormused klassifitseeritakse ning mudeli koordinaatfunktsioonid, kujukoordinaadid ja -tegurid estimeeritakse koormusrühmade, -klasside ja -tüüpide kaupa. Käsitletakse vaid neid koormusi, mille kohta on piisavalt lähteandmeid ja mille muutumise seaduspärasused on regulaarsed (tüüpilised). Seejärel seatakse iga koormusega vastavusse tüüpmudel ja leitakse koormusekohased nivootegurid. Minimaalselt on selleks vaja ainult üks lähtesuurus, näiteks aastaenergia. Kui usaldusväärseid andmeid on piisavalt, võib üksikkoormusele estimeerida ka tüübitegurid, aga ka kuju-koordinaadid ja koordinaatfunktsioonid, s.t kõik mudeli parameetrid. Parameetrite hierarhia ei nõua tüüpmudelite rakendamist, küll aga toetab seda.

Tüüpmudeli mõiste erineb põhimõtteliselt traditsioonilisest koormuse tüüpgraafiku mõistest. Kui muuta mudeli kujutegureid, võib samade koordinaatide põhjal saada kõige erinevamaid koormusgraafiku kujusid. Kui muuta vaid nivootegureid, eriti tegurit a, sarnaneb olukord tüüpgraafikute rakendamisega. Kujutegurite väärtuste muutmisele lisaks on täiendavaks võimaluseks vektorfunktsioonide nihutamine. See võimaldab muuhulgas ööpäevase graafiku maksimumi nihutamist varasemale või hilisemale kellaajale samu koordinaatfunktsioone kasutades. Tüüpmudeli kasutamise erinevus tüüpgraafikute rakendamisest seisneb veel selles, et lisaks koormuse matemaatilisele ootusele, määravad mudeli tegurid ka ruuthälbe ja temperatuurisõltuvuse normi, mis tähendab, et koormusgraafiku taseme ja kuju muutustega kaasnevad ka koormuse temperatuurisõltuvuse ja hajuvuse muutused.

Estimeerimise põhietapp, esmane estimeerimine, toimub koormusuuringute käigus, kus käsitletakse näiteks teatud elektrivõrgu koormusi. Tulemuseks on elektrivõrgu koormuste tüüpmudelid. Järgnevalt kinnistatakse igale üksik-koormusele sobiv tüüpmudel ja estimeeritakse selle koormuse andmetel täiendav arv parameetreid, mis kujundavad mudeli lõplikult. Seda estimeerimise etappi nimetatakse mudelite redigeerimiseks. Kui andmeid on piisavalt võib igale koormusele estimeerida ka oma unikaalse mudeli. Mudeli struktuur on koostatud nii, et mudeli komponendid, kuhu kuulub enamik parameetreid, on suhteliselt stabiilsed. Seetõttu ei pruugi neid hiljem uuendada, kui koormused aja jooksul muutuvadki. Mudeli tegureid võib seevastu täpsustada (redigeerida) värskete koormusandmete alusel. Teatud piirides võib redigeerimist mudeli adapteerimise näol ka automatiseerida.

5.4.2 Koormusnäitajad

Matemaatiline mudel kirjeldab koormust, kuid ei määra otseselt kindlaks vajalikke suurusi, näiteks koormuse prognoosi. Nimetatud suurusi, koormus-näitajaid**,** on aga võimalik mudeli alusel leida.

Koormusnäitajad võib jagada esmasteks ja tuletatuteks. Esmased näitajad saadakse matemaatilisest mudelist või koormusandmetest otse. Esmasteks on näiteks 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 5.3). Mõnikord on esmaste näitajate leidmiseks vaja lisaparameetreid, mis koormuse matemaatilisse mudelisse ei kuulu. Temperatuuri imiteerimisel tuleb näiteks lisada imiteerimis-tingimused.

Tabel 5.3 Esmased koormusnäitajad

Tähis tekstis	Tähis valemis	Nimetus	Lisapara-meetrid
A[P]	$P(t)$	Tegelik koormus	
AR[P]	$P_{\mathrm{RE}}(t)$	Ennistatud koormus	IPRE, CS
E[P]	$E(t)$	Koormuse matemaatiline ootus	
S[P]	$S(t)$	Koormuse ruuthälve	
R[P]	$R(t)$	Koormuse temperatuurisõltuvuse norm	
TP[P]	$A(t)$	Koormuse trend	
D[P]	$\theta(t)$	Koormuse normeeritud hälve	
C[P]	$S(t)\zeta(t)$	Koormuse deviatsioon	
X[P]	$S(t)\xi(t)$	Koormuse jääkhälve	
P[P]	$S(t)\pi(t)$	Koormuse piikhälve	
I[T,P]	$R(t)\gamma(t)$	Temperatuuri mõju	
I[Z[T],P]		Imiteeritud temperatuuri mõju	ISIM
DP[P]	$\Delta P(t)$	Kaovõimsus	C_0, C_1, C_S
A[T]	$T(t)$	Tegelik temperatuur	
Z[T]		Imiteeritud temperatuur	ISIM
E[T]		Temperatuuri matemaatiline ootus	
S[T]		Temperatuuri ruuthälve	
D[T]		Temperatuuri hälve	

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

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

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

Selle tingimuse kohaselt asendatakse puuduvad koormusandmed lühiajalise prognoosiga, millele on lisatud koormuse jääkhälbe imiteeritud väärtus $\xi(t)$. Ennistatud koormusandmed on käsitletavad standardsete statistiliste meetodi-tega. 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*. Kui *CS* = 0, siis asendatakse vaid puuduvad koormusandmed. Kui *CS* = 2...10, siis asendatakse ka koormuse väärtused, mille hälve on liiga suur, s.t

$$[P(t) - E(t) - R(t)\gamma(t) - S(t)\zeta(t)]/S(t) > CS$$

Ennistatud koormus väljastatakse koormusnäitajana AR[P] või, kui tunnus *IPRE* > 0, siis näitajana A[P], s.t tegelike koormusandmete kohal.

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

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

Ka koormuse deviatsioon C[P], jääkhälve X[P], piikhälve P[P] ja temperatuuri mõju koormusele I[T,P] tulenevad matemaatilisest mudelist otse. Nende väärtused esitatakse nimiühikutes, s.o läbi korrutatuna koormuse ruuthälbega või normiga.

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 imiteerida kahel viisil. Kui tunnuse *ISIM* väärtus on vahemikus -30...30, siis loetakse see temperatuuri hälbeks. 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

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

Siin on $P(t)$ ja $P_{\max}$ 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 leitakse maksimaalkoormus vaadeldava ajavahemiku andmetest. Prognoosi korral rakendatakse valemit

$$P_{\max}^{CS} = \max\left[E(t) + c_S\, S(t)\right]$$

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

Tegelikke temperatuuriandmeid A[T] kasutatakse temperatuuri mõju arvutamisel. Tinglikult loetakse tegelikeks andmeteks ka temperatuuri meteoroloogilist prognoosi.

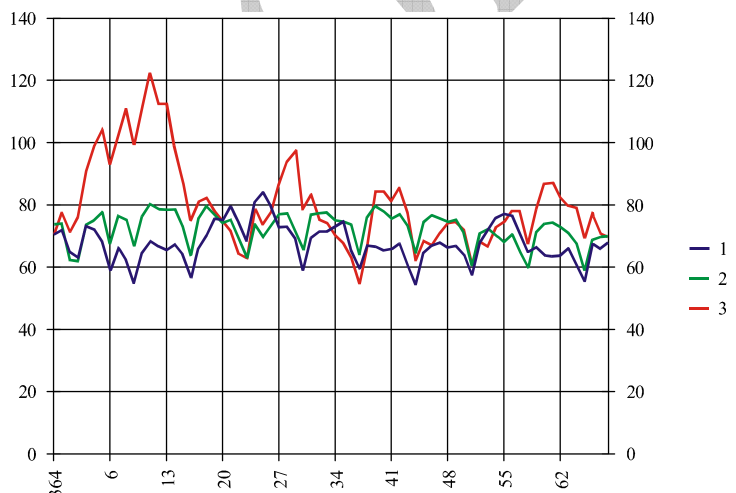
Temperatuuri matemaatiline ootus E[T] on sama mis normaaltemperatuur vaadeldavas paikkonnas (ilmajaamas). Analoogiliselt koormusega võib vaadelda ka temperatuuri ruuthälvet S[T] ja kõrvalekallet normaaltemperatuurist D[T].

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 sellega seotud põhitoiminguid.

Esmaseid näitajaid kasutatakse praktilistel eesmärkidel otse või tuletatakse vajalikud näitajad nende alusel. Nii võib matemaatilist ootust E[P] lugeda koormuse pikaajaliseks prognoosiks, mis vastab temperatuuri normile. Kuna matemaatiline ootus on leitav mis tahes ajahetke, ka möödunud aja kohta, siis saab seda kasutada koormuse analüüsimisel. Tuletatud näitajatest pakuvad huvi ennekõike järgmised:

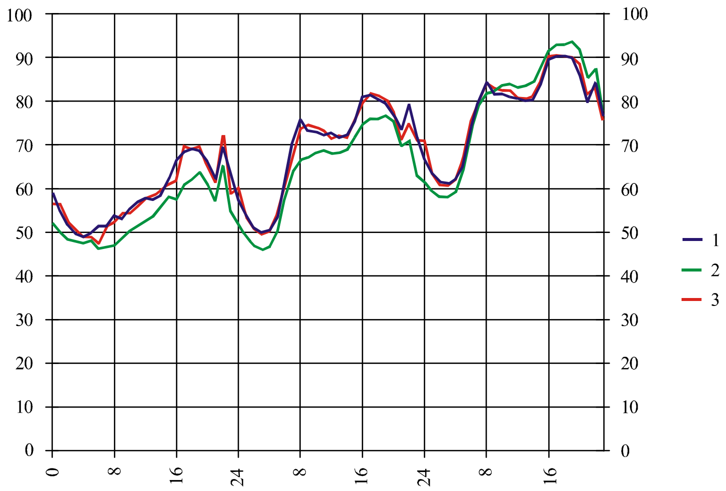
A[P] - I[T,P] – normaliseeritud koormus
A[P] - I[T,P] + I[Z[T],P] – imiteeritud koormus
E[P] + I[T,P] – pikaajaline prognoos
E[P] + I[Z[T],P] – imiteeritud prognoos
E[P] + I[T,P] + C[P] – lühiajaline prognoos.

Normaliseeritud koormus, kus tegelikest andmetest on eemaldatud temperatuuri mõju, vastab temperatuuri normile. Imiteeritud koormus on etteantud temperatuuri kohane. Joonisel 5.29 on tegelik, normaliseeritud ja imiteeritud koormus, mis vastab 1987. aasta temperatuurile (külm talv).

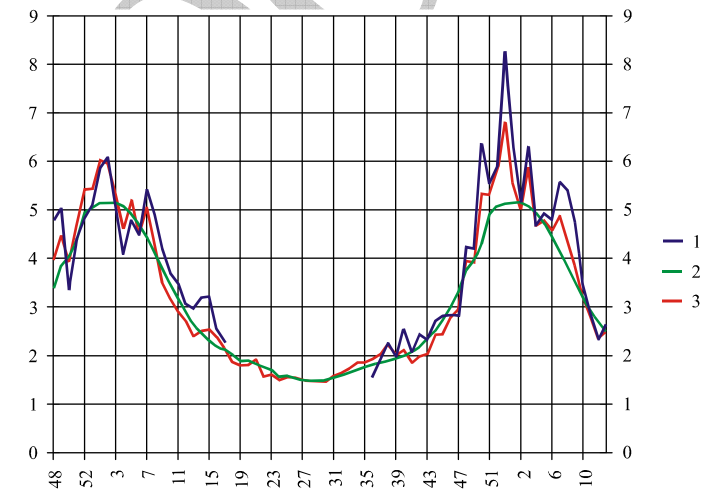


Joonis 5.29 Koormuse tegelik (1), normaliseeritud (2) ja imiteeritud (3) väärtus

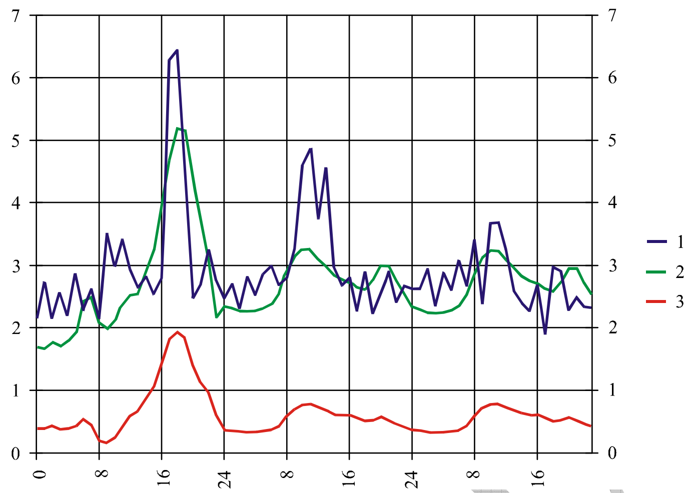
Näitajat E[P] + I[T,P], kus matemaatilisele ootusele on liidetud tegeliku temperatuuri mõju, võib kasutada koormuse analüüsimisel. Kuna pikaajaliselt temperatuuri prognoosida pole võimalik, võib selle asendada imiteeritud temperatuuriga. Koormuse lühiajalise (täpsustatud) prognoosi saab, kui matemaatilisele ootusele ja prognoositud temperatuuri mõjule liita veel deviatsioon C[P]. Kuna deviatsioon on arvutatav (erineb nullist) kõige enam nädal aega ette, siis ühtib täpsustatud prognoos pika ennetusaja korral pika-ajalise prognoosiga, täpsemalt koormuse matemaatilise ootusega, sest ka temperatuuri ei saa pika aja peale ennustada. Näide koormuse pika- ja lühi-ajalisest prognoosist on joonisel 5.30.



Joonis 5.30 Tegelik koormus (1), pikaajaline prognoos (2) ja lühiajaline prognoos (3)



Joonis 5.31 Koormuse väärtus (1), matemaatiline ootus (2) ja pikaajaline prognoos (3)



Joonis 5.32 Koormuse väärtus (1), matemaatiline ootus (2) ja ruuthälve (3)

Esitatud näidetes on koormused mõnekümne megavati suurused. Selliste koormuste hajuvus on väike ja nende muutumise seaduspärasused hästi jälgitavad. Vaadeldav koormusmudel sobib aga ka väiksemate koormuste kirjeldamiseks. Joonistel 5.31 ja 5.32 näidatud koormused on vaid mõni kilovatt. Joonisel 5.31, millel on esitatud nädala suurused, mõistetakse pikaajalise prognoosi all näitajat E[P] + I[T,P], kus matemaatilisele ootusele on liidetud tegelikult asetleidnud temperatuuri mõju. Kuna tegemist on elekterküttega eramuga, on temperatuuri mõju märgatav. Joonisel 5.32 on koormuse tunnisuurused. Siin langeb koormustipp ilmselt elektrikerise kasutamise tõttu laupäeva õhtupoolikule. Ruuthälbe piik samas ajavahemikus viitab kerise sisselülitamise ebaregulaarsusele.

5.4.3 Koormuse lihtsustatud mudelid

Traditsioonilistes elektrisüsteemi talitluse rakendusprogrammides käsitletakse jaotusvõrgu koormusi lihtsustatult tüüpgraafikute alusel. Tüüpgraafik on sisuliselt koormuse matemaatiline ootus päevatüüpide (tööpäev, laupäev ja pühapäev) kohta, mis esitatakse näiteks kuude kaupa. Kuna matemaatilise ootuse juurde antakse sageli ka ruuthälbe tüüpgraafikud ja lisatakse valem temperatuurisõltuvuse hindamiseks, on õige rääkida **koormuse lihtsustatud mudelist**. Eespool vaadeldud mudelit võib siis vastukaaluks nimetada **koormuse täppismudeliks**. Kui jaotusvõrgu koormustele on koostatud täppismudelid, siis on nende põhjal lihtsustatud mudeleid lihtne tuletada.

Koormuse temperatuurisõltuvust esitatakse lihtsustatud mudelis järgmise valemiga:

$$\Delta P(t) = c\left(\overline{T}(8) - \mathrm{E}[T(t)]\right)\mathrm{E}[P(t)]$$

Siin $\Delta P(t)$ – temperatuuri mõju koormusele

c – parameeter

$\overline{T}(8)$ – vaadeldava ja eelmise päeva hommikul kell 8.00 valitsenud temperatuuride keskväärtus

$\mathrm{E}[T(t)]$ – normaaltemperatuur (temperatuuri kuukeskväärtus)

$\mathrm{E}[P(t)]$ – koormuse matemaatiline ootus.

Näide normaaltemperatuuride kohta on tabelis 5.4.

Tabel 5.4 Normaaltemperatuurid

Kuu	1	2	3	4	5	6
Temp.	-8,7	-8,9	-5,4	1,3	8,1	13,5
Kuu	7	8	9	10	11	12
Temp.	16,8	14,8	9,6	3,8	-0,8	-0,4

Temperatuuri mõju arvutamise valemi alternatiiviks on

$$\Delta P(t) = c(\overline{T}(t) - \mathrm{E}[\overline{T}(t)])\,\mathrm{E}[P(t)]$$

kus $\overline{T}(t)$ on eelmise ööpäeva keskmine temperatuur ja $\mathrm{E}[\overline{T}(t)]$ selle matemaatiline ootus, mis võrdub piirkonna paljuaastase keskmise temperatuuriga (normiga).

Kui tüüpgraafikud antakse kuude kaupa, koosneb koormuse lihtsustatud mudel järgmistest massiividest:

- EP(1..24, 1..12, 1..3) ja SP(1..24, 1..12, 1..3) – koormuse matemaatiline ootus ja ruuthälve (24 tundi, 12 kuud, 3 päevatüüpi)
- CT(1..12, 1..3) – temperatuurisõltuvustegurid (12 kuud, 3 päevatüüpi)
- ET(1..12) või ET(1..365) – normaaltemperatuurid (12 kuud) või temperatuuride normid (aasta 365 päeva).

Elektrivõrgu infosüsteemis *Xpower* esitatakse mingi rühma keskmine koormus indeksridade (*index series*) abil

$$P_{ki} = \frac{\Delta E_k}{8736} \cdot \frac{Q_{ki}}{100} \cdot \frac{q_{ki}}{100}$$

kus ΔE_k on k-nda koormusrühma aasta keskmine energiatarve ning Q_{ki} ja q_{ki} on väline ja sisemine indeks i-ndas ajavahemikus. Väline indeks vastab koormuse sesoonsele muutusele kahenädalaste perioodide kaupa ja sisemine indeks ööpäevasisestele muutustele (24 tundi) eraldi iga kahenädalase perioodi ja päevatüübi (tööpäev, laupäev, pühapäev) kohta. Koormuse ruuthälve S_{ki} esitatakse sisemise indeksi r_{ki} kaudu, mis ülaltoodud valemis asendab indeksit q_{ki}. Temperatuuri mõju kohaldatakse välisele indeksile

$$Q'_{ki} = Q_{ki} + c_k(T_i - \overline{T}_i)$$

kus c_k on tegur ning T_i ja $\overline{T}_i$ keskmine temperatuur ja selle norm vaadeldava kahenädalase ajavahemiku kohta.

