

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ALDAS STANKEVIČIUS

VĖJO ELEKTRINIŲ INTEGRACIJOS Į
ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMĄ IR
GALIŲ BALANSAVIMO TYRIMAI

Daktaro disertacija
Technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija (06T)

Kaunas, 2016

UDK 621.311.245+621.311[(474.5)(043.3)]

Disertacija rengta 2009-2016 metais Kauno technologijos universiteto Elektros ir elektronikos fakultete, Elektros energetikos sistemų katedroje. Mokslinius tyrimus rėmė Lietuvos mokslo taryba.

Mokslinis vadovas:

Prof. dr. Rimantas Pranas DEKSNYS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija – 06T).

Interneto svetainės, kurioje skelbiama disertacija, adresas:

<http://ktu.edu>

Redagavo:

Dr. Virginija Stankevičienė

© A. Stankevičius, 2016

ISBN 978-609-02-1226-4

TURINYS

<u>SANTRUMPOS</u>	4
<u>SIMBOLIAI IR VIENETAI</u>	5
<u>IVADAS</u>	9
1. VĖJO ELEKTRINIŲ PARKŲ GALIOS BALANSAVIMO IR PROGNOZAVIMO APŽVALGA	11
1.1 Vėjo energetikos plėtros perspektyvos.....	11
1.2 Vėjo elektrinių galios ir energijos statistinių parametru įvertinimas.....	12
1.3 Vėjo elektrinių galių balansavimas elektros energetikos sistemoje.....	15
1.4 Vėjo elektrinių galios prognozavimo sistemos ir modeliai.....	27
1.5 Autoriaus indelis į nagrinėjamąją problematiką.....	32
2. VĖJO ELEKTRINIŲ PARKŲ ENERGIJOS IR GALIOS BALANSAVIMO IR PROGNOZAVIMO METODIKA	32
2.1 Vėjo elektrinių parametru nustatymas.....	32
2.2 Vėjo elektrinių energijos balansavimas.....	35
2.3 Vėjo elektrinių galios balansavimas.....	39
2.4 Statistinė regresinė vėjo elektrinių parko galios prognozavimo metodika.....	49
2.5 Pagrindiniai skyriaus rezultatai.....	62
3. VĖJO ELEKTRINIŲ PARKŲ ENERGIJOS IR GALIOS BALANSAVIMO IR PROGNOZAVIMO TYRIMAI	62
3.1 Vėjo elektrinių parkų galių kitimo statistinė analizė.....	62
3.2 Vėjo elektrinių energijos balansavimo tyrimai.....	70
3.3 Vėjo elektrinių galios balansavimo tyrimai.....	75
3.4 Statistinio regresinio vėjo elektrinių galių prognozavimo modelio tikslumo tyrimai.....	78
3.5 Pagrindiniai skyriaus rezultatai.....	83
IŠVADOS	84
LITERATŪROS SĄRAŠAS	85
AUTORIAUS PUBLIKACIJOS DISERTACIJOS TEMA	91

SANTRUMPOS

AEI – atsinaujinantieji energijos išteklių
AG – asinchroninis generatorius
AV – asinchroninis variklis
DFIG – dvigubo maitinimo asinchroninis generatorius
EES – elektros energetikos sistema
EEK – elektros energijos kaupiklis
HAE – hidroakumuliacinė elektrinė
HMT – hidrometeorologinė tarnyba
KCE – kombinuoto ciklo elektrinė
LHMT – Lietuvos hidrometeorologijos tarnyba
MEES – mažoji elektros energetikos sistema
MES – mažoji energetikos sistema
PI – pasiklovimo intervalas
PSO – perdavimo sistemos operatorius
s.v. – santykiniai vienetai
SB – srautinės baterijos
SEP – saulės elektrinių parkas
SOP – skaitmeninė orų prognozė
SOEK – suspausto oro energijos kaupikliai
SG – sinchroninis generatorius
SVP – santykinė vidutinė paklaida
SMEK – superlaidininkų magnetinės energijos kaupiklis
SVKP – santykinė vidutinė kvadratinė paklaida
ŠS – šilumos siurblys
ŠEK – šiluminės energijos kaupiklis
VE – vėjo elektrinė
VEP – vėjo elektrinių parkas

SIMBOLIAI IR VIENETAI

A – žadinimo valdymo sistemos IEEE modelio charakteringa matrica;
 a_h – Hellmann koeficientas;
 λ_{misc} – nuostolių koeficientas;
 a_S, b_S – statistiniai funkcijos parametrai;
 b – įvertinys;
 β – nežinomas tiriamos duomenų populiacijos regresijos funkcijos koeficientas;
 C – atitinkamos vėjo krypties koeficientas lygus dydžiui e^{b_0} ;
 C_{EEK} – superkondensatoriaus talpa, F;
 COP_{SS} – šilumos siurblio naudingumo koeficientas;
 c_p – vandens savitoji šiluma, 4,18 kJ/(kg °C);
 γ_s – modulio temperatūrinis naudingumo koeficientas;
 E – energija, Wh;
 $E_{\text{g.t.}}$ – KCE garo turbinos pagaminta elektros energija (Wh);
 $E_{\text{d.t.}}$ – KCE dujų turbinos pagaminta elektros energija (Wh);
 $E_{\text{s.}}$ – KCE pagaminta šiluminė energija, Wh;
 E_B – deginamo kuro išskiriama energija, Wh;
 E_{max} – didžiausias reikiamas akumuliuoti šilumos kiekis, Wh;
 $E_{i.\text{gam.}}$ – atskirų laikotarpių pagamintos šilumos kiekis, Wh;
 $E_{i.\text{por.}}$ – atskirų laikotarpių sunaudotos šilumos kiekis, Wh;
 E_{ex} – transformuota statoriaus galios grandinės įtampa, V;
 \bar{e}_d – galios grandinės elektrovaros vektoriaus projekcija į d ašį;
 \bar{e}_q – galios grandinės elektrovaros vektoriaus projekcija į q ašį;
 e – liekana;
 ε – atsitiktinė paklaida;
 ε_t – tūrio išnaudojimo koeficientas;
 φ_i – autoregresinio proceso parametrai;
 F – Fišerio kriterijus;
 Δf – sistemos dažnio pokytis, Hz;
 Δf_{MEEs} – dažnio pokytis mažoje elektros energetikos sistemoje, Hz;
 I_n – vardinė transformuota statoriaus galios grandinės srovė, A;
 I_s – saulės spinduliuotė patenkanti ant paviršiaus plokštumos, W/m²;
 I_{STC} – saulės spinduliuotė standartinėmis sąlygomis, 1000 W/m²;
 i_0 – žadinimo valdymo sistemos srovės kintamasis;
 J_s – mechaninis inercijos momentas, Nm;
 K – vėjo kryptis;
 K_p – proporcingumo koeficientas;
 K_I – integralumo koeficientas;
 k_d – dimensijų suvienodinimo koeficientas;
 L_l – sklaidos induktyvumas, H;
 L_r – rotorius galios grandinės induktyvumas, H;
 L_s – statoriaus galios grandinės induktyvumas, H;
 L_m – statoriaus ir rotorius galios grandinių tarpusavio induktyvumas, H;
 L_{ad} – oro tarpelio induktyvumo projekcija į d ašį;
 L_{aq} – oro tarpelio induktyvumo projekcija į q ašį;

l – laiko tarpas (prognozės periodas), s;
 \bar{l}_d – statoriaus galios grandinės srovės vektoriaus projekcija į d ašį;
 \bar{l}_{rd} – rotoriaus galios grandinės srovės vektoriaus projekcija į d ašį;
 \bar{l}_{fd} – žadinimo srovės vektoriaus projekcija į d ašį;
 \bar{l}_q – statoriaus galios grandinės srovės vektoriaus projekcija į q ašį;
 \bar{l}_{rq} – rotoriaus galios grandinės srovės vektoriaus projekcija į q ašį;
 \bar{l}_{1d} – sklaidos srovės vektoriaus projekcija į d ašį;
 \bar{l}_{1q} – sklaidos srovės vektoriaus projekcija į q ašį;
 $NOCT$ – nominali elemento darbinė temperatūra, °C;
 n – duomenų reikšmių skaičius;
 η_{KCE} – kombinuoto ciklo elektrinės veikimo naudingumo koeficientas;
 $\eta_{kryp.}$ – vėjo krypties įtakos paklaidos koeficientas;
 σ – generuojamos galios pokyčių standartinis nuokrypis, W;
 σ_K – generuojamos galios pokyčių standartinis nuokrypis įvertinus vėjo kryptį, W;
 σ^2 – paklaidų dispersija;
 ρ – vandens tankis, lygus 998 kg/m³;
 θ_i – slenkamųjų vidurkių proceso parametrai;
 Θ_r – elektrinis rotoriaus padėties kampas;
 P_C – VEP galia apskaičiuota pagal VE galios kreivę, W;
 P_{error} – galios paklaida, W;
 P_{eks} – elektros eksporto į EES galia, W;
 P_i – pasirinktos trukmės vidutinė galia, W;
 P_{i+1} – nustatytos gretimos galių vertės, W;
 $P_{i\ pr}$ – prognozuota galia, W;
 $P_{i\ fakt}$ – faktinė galia, W;
 P_{inst} – instaliuota galia, W;
 P_{imp} – elektros importo iš EES galia, W;
 $P_{hiš}$ – hidroelektrinės generuojama galia MW;
 P_K – katilinės šiluminė galia, W;
 $P_{K,i+1}$ – prie tos pačios vėjo krypties nustatytos gretimos galių vertės, W;
 $P_{poreik.}$ – elektros poreikio aktyvioji galia, W;
 P_{KCE} – kombinuoto ciklo elektrinės aktyvioji galia, W;
 P_{VEP} – vėjo elektrinių parko aktyvioji galia, W;
 P_{vid} – VE generavimo galios vidutinė vertė, W;
 P_{PI} – energijos kaupiklių įkrovimo lygiui palaikyti reikalinga galia W;
 P_{SEP} – saulės elektrinių parko galia, W;
 $P_{skirtumas}$ – skirtumas tarp faktinės ir prognozuotos vėjo elektrinių galių, W;
 P_{SEK} – šilumos energijos kaupiklio galia, W;
 $P_{Siš}$ – šiluminės elektrinės generuojama galia, W;
 $P_{š.poreik.}$ – šilumos poreikio galia, W;
 $P_{š\ KCE}$ – kombinuoto ciklo elektrinės šiluminė galia, W;
 $P_{šS}$ – šilumos siurblio aktyvioji galia, W;
 $P_{š\ šS}$ – šilumos siurblio šiluminė galia, W;
 P_{SEP} – saulės elektrinių parko generuojama galia, W;
 p – polių skaičius rotorijuje;
 p_o – oro slėgis, Pa;
 $P_V(U, f)$ – vartotojų vartojamos galios priklausomybė nuo įtampos U ir dažnio f ;
 $P_G(U, f)$ – elektrinių generuojamos galios priklausomybė nuo įtampos U ir dažnio f ;
 ΔP_{MEES} – MEES galios nebalansas, W;

$\sum P_{\Delta}$ – suminiai aktyviosios galios nuostoliai, W;
 Q_{VEP} – vėjo elektrinių parko reaktyvioji galia, var;
 Q_{KCE} – kombinuoto ciklo elektrinės reaktyvioji galia, var;
 Q_{EEK} – elektros energijos kaupiklio reaktyvioji galia, var;
 Q_{SS} – šilumos siurblio reaktyvioji galia, var;
 $Q_{poreik.}$ – vartotojo reaktyvioji galia, var;
 $\sum Q_{\Delta}$ – suminiai reaktyviosios galios nuostoliai, var;
 q_{term} – termofikacinio vandens srautas, m³/h;
 R – specifinė dujų konstanta orui, 287 JK⁻¹kg⁻¹;
 R_a – aktyvioji apkrovos varža, Ω ;
 R_r – rotoriaus galios grandinės aktyvioji varža, Ω ;
 R_s – statoriaus galios grandinės aktyvioji varža, Ω ;
 R_{st} – statizmo koeficientas;
 R_{1d} – sklaidos aktyviosios varžos projekcija į d ašį;
 R_{1q} – sklaidos aktyviosios varžos projekcija į q ašį;
 r_{12} – dviejų VEP galios pokyčių koreliacijos koeficientas;
 $r_{K,12}$ – dviejų VEP galios pokyčių koreliacijos koeficientas įvertinus vėjo kryptį;
 r^2 – daugialypės regresijos apibrėžtumo koeficientas;
 SS_B – bendroji nuokrypių kvadratų suma;
 SS_R – regresinė nuokrypių kvadratų suma;
 SS_e – liekanų kvadratų suma;
 SVP – santykinė vidutinė paklaida;
 $SVKP$ – santykinė vidutinė kvadratinė paklaida;
 s – operatorius;
 T – integravimo laiko pastovioji, s;
 $T_{\tilde{sil}}$ – filtro, esančio prieš šiluminę elektrinę, laiko pastovioji, s;
 T_h – filtro, esančio prieš hidroelektrinę, laiko pastovioji, s;
 T_m – mechaninis sukimo momentas, Nm;
 T_e – elektromagnetinis sukimo momentas, Nm;
 t_p – vėjo elektrinių galios vidurkinimo trukmė, s;
 τ_i – delsos laikas, s;
 U_{SC} – nominali superkondensatoriaus įtampa, V;
 ΔU – įtampos pokytis sistemoje, V;
 u_0 – žadinimo valdymo sistemos įtampos kintamasis, V;
 V_{akum} – šiluminės energijos kaupiklio akumuliacinė talpa, m³;
 v – vėjo greitis, m/s;
 $v_1(t)$ – vidutinis vėjo greitis (m/s), išmatuotas arba prognozuotas laiko intervale t ir matavimo aukštyje h_1 , m;
 $v_2(t)$ – vidutinis vėjo greitis VE vėjaračio ašies aukštyje, m/s;
 ω_r – rotoriaus kampinis dažnis;
 ω_s – statoriaus elektrinis kampinis dažnis;
 ω_{re} – rotoriaus elektrinis kampinis dažnis;
 ϑ – temperatūrų skirtumas, °C;
 ϑ_{at} – aplinkos temperatūra, °C;
 ϑ_{elem} – elemento darbinė temperatūra, °C;
 ϑ_{STC} – elemento darbinė temperatūra standartinėmis sąlygomis, 25 °C;
 ϑ_g – grįžtančio termofikacinio vandens temperatūra, °C;
 ϑ_p – paduodamo termofikacinio vandens temperatūra, °C;
 ϑ_{max} – aukščiausia šilumnešio temperatūra, °C;

ϑ_{\min} – žemiausia šilumnešio temperatūra, °C;
 $\bar{\Psi}_d$ – magnetinio srauto vektoriaus projekcija į d ašį;
 $\bar{\Psi}_q$ – magnetinio srauto vektoriaus projekcija į q ašį;
 $\bar{\Psi}_{rd}$ – rotoriaus galios grandinės magnetinio srauto vektoriaus projekcija į d ašį;
 $\bar{\Psi}_{rq}$ – rotoriaus galios grandinės magnetinio srauto vektoriaus projekcija į q ašį;
 $\bar{\Psi}_{sd}$ – statoriaus galios grandinės magnetinio srauto vektoriaus projekcija į d ašį;
 $\bar{\Psi}_{sq}$ – statoriaus galios grandinės magnetinio srauto vektoriaus projekcija į q ašį;
 $\bar{\Psi}_{fd}$ – žadinimo magnetinio srauto vektoriaus projekcija į d ašį;
 $\bar{\Psi}_{1d}$ – sklaidos magnetinio srauto vektoriaus projekcija į d ašį;
 $\bar{\Psi}_{1q}$ – sklaidos magnetinio srauto vektoriaus projekcija į q ašį;
 X – regresijos funkcijos nepriklausomas kintamasis;
 X_t – t -osios laiko akimirkos parametro reikšmė;
 x_{SG} – sinchroninio generatoriaus žadinimo valdymo sistemos funkcija;
 x_0 – žadinimo valdymo sistemos žadintuvo srovės kintamasis;
 Y – stebėta vertė;
 \hat{Y} – pagal regresijos lygtį apskaičiuota vidutinė vertė;
 Y_t – laiko eilutės stebėjimai;
 y_0 – žadinimo valdymo sistemos žadintuvo įtampos kintamasis, V.

ĮVADAS

Darbo aktualumas

Sparti vėjo elektrinių (toliau – VE) plėtra Lietuvoje ir pasaulyje lemia naujus iššūkius elektros energetikos sistemos darbo režimų valdymui ir reguliavimui. Atsiranda poreikis tiksliau prognozuoti VE galias, turėti didesnius galios rezervus VE kintančiai galiai balansuoti, didinti elektros tinklų galios srautų pralaidumą ir visos elektros energetikos sistemos patikimumą ir saugumą. Atsinaujinančiųjų vėjo energijos išteklių efektyvaus panaudojimo įvertinimui nėra nustatyta patikimų vėjo elektrinių galios parametrų ir charakteristikų priklausomybių, kurios leistų maksimaliai integruoti šias elektrines į energetikos sistemą ir išplėsti įvairias jų galios panaudojimo galimybes, įvertinant ir vietines. Todėl yra svarbu sukurti vėjo elektrinių parkų energijos ir galios lokalaus balansavimo modelius, leidžiančius užtikrinti vietinių vartotojų šilumos ir elektros poreikių tenkinimą ir nustatyti subalansuojamas vietinių kogeneracinių, vėjo ir saulės elektrinių galias, katilinių ar šilumos siurblių galias ir energijos kaupiklių talpas. Taip sukurtos mažosios energetikos sistemos (toliau – MES) leistų vykdyti vietinį energijos ir galios balansavimą, mažinti elektros tinklų galios srautus ir didinti elektros energetikos sistemos darbo patikimumą ir saugumą. Mažosios energetikos sistemos darbo režimams planuoti ir organizuoti būtina, kiek įmanoma tiksliau, prognozuoti vėjo elektrinių parko galias. Todėl svarbu tobulinti vėjo elektrinių parko generuojamos galios prognozės modelius, kurie leistų sėkmingiau planuoti vėjo elektrinių darbą, žymiai sumažintų elektros energetikos sistemos galių balansavimo rezervus bei pagerintų vėjo elektrinių parkų dalyvavimo elektros rinkoje sąlygas.

Darbo tikslas

Sukurti kintančia galia dirbančių elektrinių energijos ir galios balansavimo modelius, įvertinančius vietinių vartotojų elektros ir šilumos energijų poreikį ir nustatančius mažosios energetikos sistemos įrenginių parametrus.

Darbo uždaviniai

1. Patikslinti kintančia galia dirbančių elektrinių statistinių parametrų analizės metodiką ir nustatyti galios kitimo parametrus bei įvertinti vėjo krypties ir parko elektrinių geografinio išsidėstymo įtaką VE parko generuojamai galiai.
2. Sukurti mažosios energetikos sistemos vėjo elektrinių parkų energijos ir galios balansavimo metodiką ir modelius.
3. Sukurti statistinį regresinį vėjo elektrinių parko galios prognozavimo modelį ir iširti jo tikslumą.

Darbo metodika ir įrankiai

VEP galios kitimo statistinė analizė, energijos ir galios balansavimo tyrimai atlikti panaudojant vėjo elektrinių parkų ir apkrovų galių kitimo bei vėjo ir atmosferos prognozių kiekybinius ir kokybinius duomenis su laiko žymomis. Vėjo

elektrinių energijos ir galios balansavimo modelių sudarymas ir tyrimai pagal elektros ir šilumos poreikį atlikti *Energy PRO* programų paketu ir *PowerFactory 14* programa. Prognozės modelio nežinomų imties regresijos lygties koeficientų įverčių nustatymai atlikti statistikos programų paketu *SPSS*.

Mokslinis naujumas

1. Sukurta saugios ir savarankiškai dirbančios mažosios energetikos sistemos sudarymo metodika vėjo elektrinių parkų energijai ir galiai balansuoti pagal vietinių vartotojų elektros ir šilumos poreikius, nesumažinant elektros perdavimo tinklo pralaidumo.
2. Statistinė regresinė vėjo elektrinių parko generuojamos galios prognozavimo metodika papildyta matematiniais modeliais, leidžiančiais išsamiau įvertinti vėjo elektrinių parko generuojamą galią sąlygojančius veiksnius ir padidinti prognozavimo tikslumą.

Praktinė darbo vertė

1. Atliktas mokslinis tyrimas parodė, kad pasiūlyta metodika ir modeliai leidžia nustatyti balansuojamų vėjo elektrinių parkų galias, kurias galima papildomai integruoti į elektros energetikos sistemą ir nustatyti naujai atsirandančių generuojančių jėgainių galias.
2. Pasiūlytas statistinis regresinis vėjo elektrinių parko galios prognozės modelis tiksliau prognozuoja vėjo elektrinių parkų galią.

Ginamieji disertacijos teiginiai

1. Sukurta vėjo elektrinių parko galios kitimo tyrimo metodika leidžia tiksliau nustatyti energijos ir galios balansavimui, valdymui ir reguliavimui reikalingus parametrus.
2. Sukurta vėjo elektrinių parkų energijos ir galios balansavimo metodika ir modeliai mažojoje energetikos sistemoje leidžia nustatyti vėjo elektrinių galių balansavimo galimybes.
3. Sukurtas statistinis regresinis galios prognozavimo modelis leidžia tiksliau prognozuoti vėjo elektrinių parko generuojamas galias.

Darbo apibavimas

Disertacijoje pateikiama medžiaga yra paskelbta 5 mokslinėse publikacijose (straipsniuose) išspausdintose Tarptautinėse duomenų bazėse esančiuose mokslo leidiniuose. Iš jų 2 straipsniai išspausdinti „Thomson Reuters Web of Science“ leidinyje, turinčiame citavimo indeksą ir 3 straipsniai kitų tarptautinių duomenų bazių leidiniuose. Vienas straipsnis yra priimtas spausdinti moksliniame žurnale, turinčiame citavimo indeksą. Disertacijos medžiaga buvo paskelbta 3 mokslinėse tarptautinėse konferencijose, iš kurių 1 organizuota užsienyje.

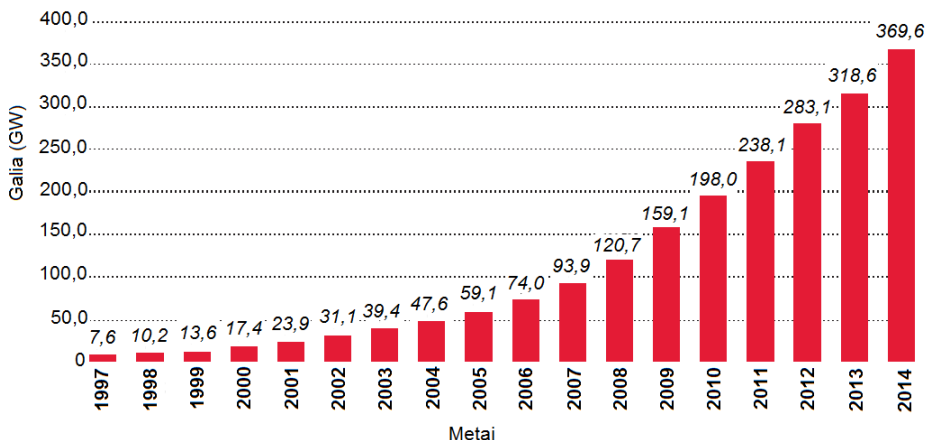
Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, 3 skyriai, pagrindinės išvados ir naudotos literatūros sąrašas. Darbo apimtis – 92 puslapiai, įskaitant 61 paveikslą, 10 lentelių, 74 pavadinimų literatūros sąrašą.

1. VĖJO ELEKTRINIŲ PARKŲ GALIOS BALANSAVIMO IR PROGNOZAVIMO APŽVALGA

1.1. Vėjo energetikos plėtros perspektyvos

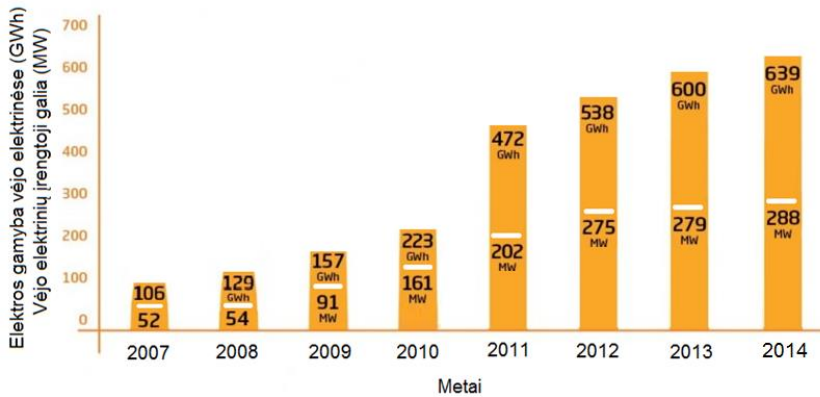
Atsinaujinančiųjų energijos išteklių (toliau – AEI) naudojimas ir plėtra pasaulyje ir Europos Sąjungoje (toliau – ES), prasidėjęs praėjusio šimtmečio pabaigoje, sparčiai augo ir pasiekė dideles galias. Jau 2009 metų ES Direktyvoje 2009/28/EB buvo numatyta, kad AEI dalis bendrame galutiniame energijos suvartojime, 2020 m. sudarytų ne mažiau kaip 23 %, o elektros energijos dalis siektų 21 % (Europos Parlamento ir tarybos direktyva [EPTD], 2009/28/EB) Europos Komisijos iškeltas tikslas iki 2050 m. sumažinti išmetamųjų šiltnamio dujų kiekį 80–95 %, lyginant su 1990 m. išmetamųjų šiltnamio dujų kiekiu, verčia didinti AEI naudojimo tempus (European Commission Directorate – General for Energy...[ECDGE], 2010). Pagal Europos Komisijos 2013 m. atnaujintą „Reference“ projektą, Europos Sąjungos AEI elektrinės 2030 m. turėtų gaminti 45 % visos elektros energijos (European Commission, Reference scenario 2013). AEI elektrinių sudėtyje svarią dalį (iki 50 %) sudaro vėjo elektrinės, kurių technologijų ir pasaulinė plėtra yra sparti (žr. 1.1 pav.) (Global Wind Energy Council [GWEC], 2014) ir iki 2016 metų VE bendra galia pasaulyje gali padidėti iki 510 GW.



1.1 pav. Vėjo elektrinių įrengtos galios augimas pasaulyje (GWEC, 2014)

Lietuvoje 2013 metais elektros energijos iš atsinaujinančiųjų išteklių buvo pagaminta 1525 GWh. Vėjo elektrinės pagamino daugiau nei 40 %, hidroelektrinės pagamino apie 36 %, o likusią dalį elektros energijos pagamino biokuro, saulės ir biodujų elektrinės. Bendra elektros energijos gamyba iš atsinaujinančiųjų išteklių sudarė apie 16 % viso suvartojamo elektros kiekio (Lietuvos statistikos departamentas [LSD], 2015).

Lietuvos VE bendra įrengtoji galia nuolat didėjo ir 2013 metais siekė 279 MW, o bendrai jos pagamino 600 GWh elektros energijos (žr. 1.2 pav.).

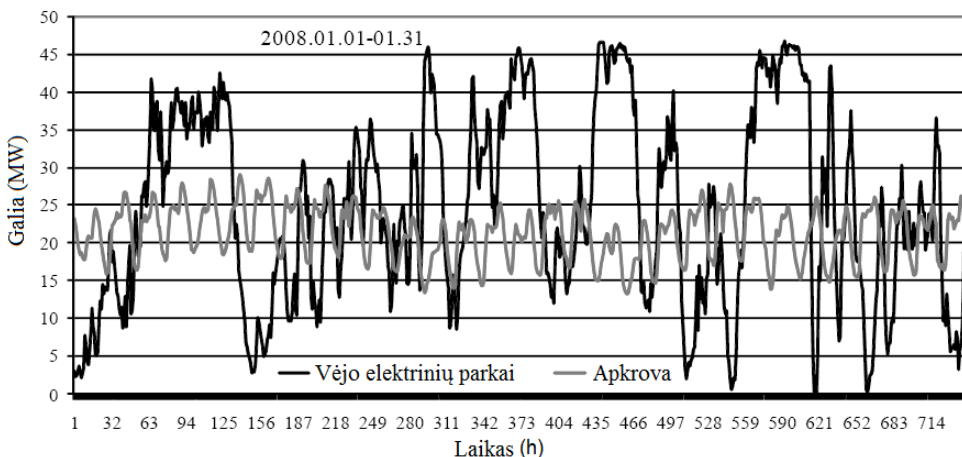


1.2 pav. Lietuvos vėjo elektrinių įrengtoji galia ir metinė energijos gamyba (LSD, 2015)

Sparčiai tobulėjant VE technologijoms ir didėjant jų galios panaudojimui mažėja VE gaminama elektros energijos kaina, kuri gali tapti konkurencinga ir priartėti prie rinkos kainos. Tai sudarys dar didesnes galimybes VE plėtrai. Pagal išduotus vėjo parkų plėtros leidimus ir įstatymų nuostatas, iki 2020 m. Lietuvoje įrengus iki 500 MW galios VE, vien jų galios prognozavimo paklaidoms subalansuoti reikės 170 MW papildomo galios reguliavimo rezervo. Nusprendus iki 2030 m įrengti 840 MW bendrą VE galią, reguliavimo galios rezervas sudarytų apie 240 MW (Jonaitis, 2014).

1.2. Vėjo elektrinių galios ir energijos statistinių parametru įvertinimas

Esant sparčiai VE plėtrai yra svarbu nustatyti ir įvertinti VE generuojamos galios kitimo parametrus. VE generuojama, kintanti ir nuo vėjo greičio stochastinio kitimo priklausanti galia nesiderina su elektros energetikos sistemos apkrovos kitimu (žr. 1.3 pav.).



1.3 pav. Vėjo elektrinių Benaičių parko ir vietinės apkrovos valandiniai galios pokyčiai (Deksnyis, Staniulis, 2009)

VE generavimo galios vidutines vertes galima nustatyti tokia formule:

$$P_{vid} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i, \quad (1.1)$$

kur P_i – pasirinktos trukmės vidutinė galia; n – nustatytų galios verčių skaičius.
Galios pokyčiai gali būti nustatyti taip:

$$\Delta P_i = P_{i+1} - P_i, \quad (1.2)$$

kur P_i ir P_{i+1} – nustatytos gretimos galių vertės.

Dviejų VEP galios pokyčių koreliacijos koeficientams nustatyti taikoma formulė (Ernst, 2005):

$$r_{12} = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta P_{1,i})(\Delta P_{2,i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta P_{1,i})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta P_{2,i})^2}}, \quad (1.3)$$

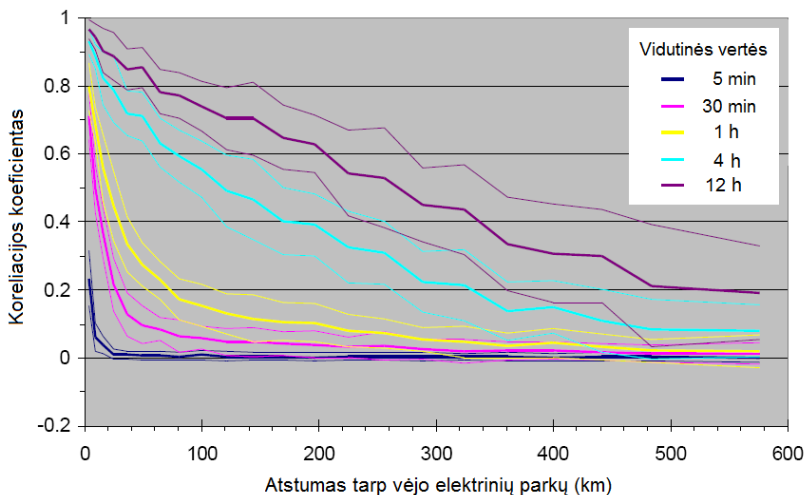
kur ΔP_{1i} ir ΔP_{2i} – pirmo parko ir antro parko i -ieji galios pokyčiai.

Generuojamos galios pokyčių standartiniai nuokrypiai gali būti nustatomi tokia formule:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{1}{n-1} (\Delta P_i - \overline{\Delta P})^2}, \quad (1.4)$$

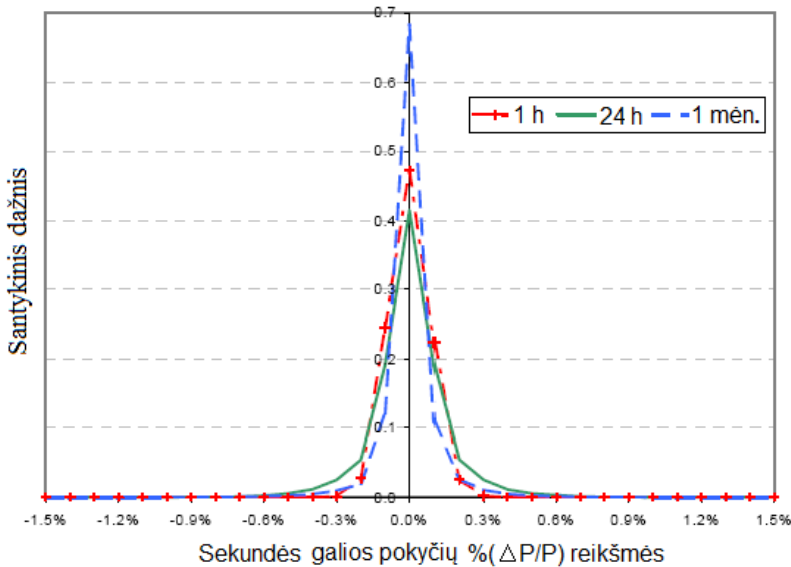
kur n – galios matavimo skaičius; $\overline{\Delta P}$ – galios pokyčių vidutinė vertė.

Atliktos vėjo elektrinių parkų galios kitimo statistinių duomenų analizės rodo, kad didėjant atstumui tarp VE parkų jų generuojamos galios koreliacija mažėja, o ilgėjant galios kitimo intervalo vidutinėms vertėms koreliacija didėja (žr. 1.4 pav.).

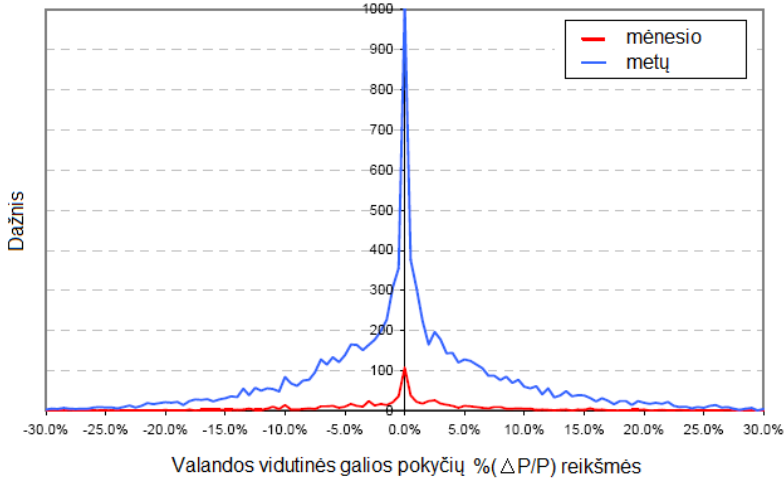


1.4 pav. Vėjo elektrinių parkų galios koreliacijos kitimo priklausomybės (Ernst, 2005)

VEP skirtingų vidurkinimo laiko intervalų galios pokyčių santykinų reikšmių skirstiniai (žr. 1.5 pav.) ir (žr. 1.6 pav.) rodo, kad vidutiniai valandiniai VE galios pokyčiai yra didesni nei sekundiniai.



1.5 pav. Vėjo elektrinių parkų sekundės galios pokyčių skirstinys (Wan, 2009)



1.6 pav. Vėjo elektrinių parkų valandos vidutinės galios pokyčių skirstinys (Wan, 2009)

Nagrinėti galios pokyčių intervalai parodo bendrą VEP galios pokyčių didėjimo tendenciją, tačiau, atsižvelgiant į pirminio ir antrinio galios reguliavimo rezervų aktyvavimo reikalavimus, 30 s ir 15 min trukmių vidutinių galių pokyčiai būtų aktualesni.

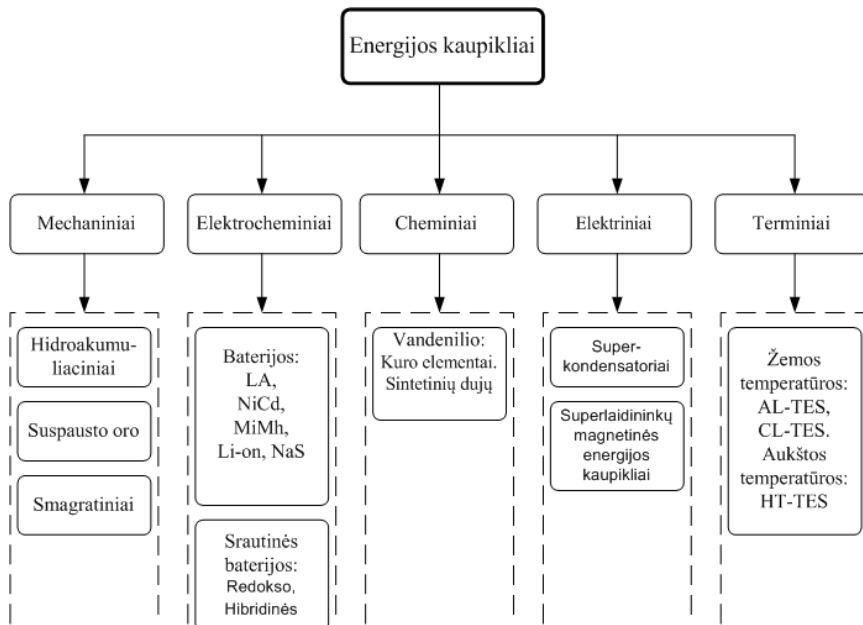
Iš pateiktos informacijos matyti, kad vėjo elektrinių parkų generuojamos galios kitimo parametrai priklauso nuo galios pokyčių, jų vidurkio nustatymo laiko trukmių

ir VE išdėstymo. Statybos ir eksploatacijos kaštai mažėja, kai VE išdėstomos netoli viena kitos, sudarydamos VEP. Tokių parkų suminė generuojama galia ribojama tiek žemės įsigijimo galimybėmis, tiek esamo elektros tinklo pralaidumu. Lietuvoje VEP statomi kuo arčiau pajūrio, stipresnių vėjų zonoje, kelių dešimčių kilometrų atstumu vienas nuo kito (Andriuškevičius ir *et al.*, 2004). Toks VE parkų išdėstymas didina jų bendrus generuojamos galios pokyčius, todėl siekiant nustatyti jų įtaką Lietuvos elektros energetikos sistemai reikalinga išsamesnė VE generuojamos galios duomenų analizė ir galimai tikslesnis galios kitimo įvertinimas.

Paminėtina tai, kad literatūroje pateikti vėjo elektrinių parkų galios kitimo parametrų tyrimai buvo atlikti neįvertinant vyraujančių vėjo krypčių ir jų galimos įtakos VEP galios kitimui.

1.3. Vėjo elektrinių galių balansavimas elektros energetikos sistemoje

Elektros energijos kaupimo sistemos ir jų tinkamumas vėjo elektrinių galios balansavimui. Sparti vėjo elektrinių plėtra sukuria elektros energijos kaupiklių poreikį. 2014 metais bendra viso pasaulio elektros energijos kaupiklių galia buvo 140 GW, iš kurių apie 99 % sudarė hidroakumuliacinės elektrinės (Zhao *et al.*, 2015). Kiti didelės galios elektros energijos kaupikliai yra tobulinimo etape ir elektros energetikos sistemose dar mažai naudojami. Energijos kaupimo sistemos, remiantis technologija skirstomos į mechanines, elektrochemines, chemines, elektrines ir šilumines (žr. 1.7 pav.).



1.7 pav. Elektros energijos saugojimo sistemų technologijos (Zhao *et al.*, 2015)

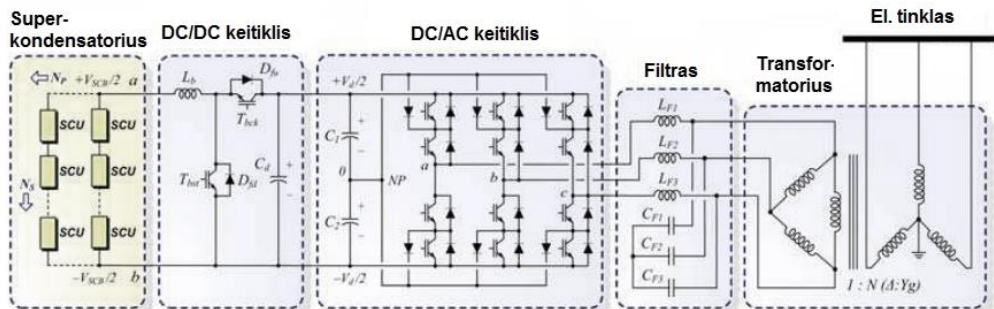
Elektrocheminėms technologijoms priskiriamos akumuliatorių baterijos (žr. 1.7 pav.). Šiuo metu energetikoje naudojamos ličio-jonų (Li-on), natrio-sieros (NaS), nikelio-kadmio (NiCd), nikelio-metalų hidridų (NiMh) ir kitos akumuliatorių

baterijos. Kaupiklių ciklo efektyvumas siekia 80–90 %. Didelės įkrovos ir galios bateriniai kaupikliai energetikoje naudojami apkrovai išlyginti, energijos perdavimo stabilumui palaikyti ir atsinaujinančiuosius energijos išteklius naudojančių elektrinių kintančioms galioms balansuoti (Adomavičius, 2011). Šių kaupiklių pagrindiniu trūkumu galima laikyti jų santykinę brangumą.

Viena iš perspektyvių energijos kaupimo ir technologijų yra srautinės baterijos (toliau – SB), kurios sudarytos iš elektrocheminių celių, skirtų elektrolitams įkrauti ir iškrauti, dviejų didelio tūrio talpų teigiamai ir neigiamai įkraunamiems elektrolitams laikyti ir dviejų siurblių elektrolitams varinėti. Žinomiausios yra cinko bromido, vanadžio redokso ir natrio bromido srautinės baterijos (Zhao *et al.*, 2015; Adomavičius, 2011). Šiuo metu technologija yra dar tebetobulinama.

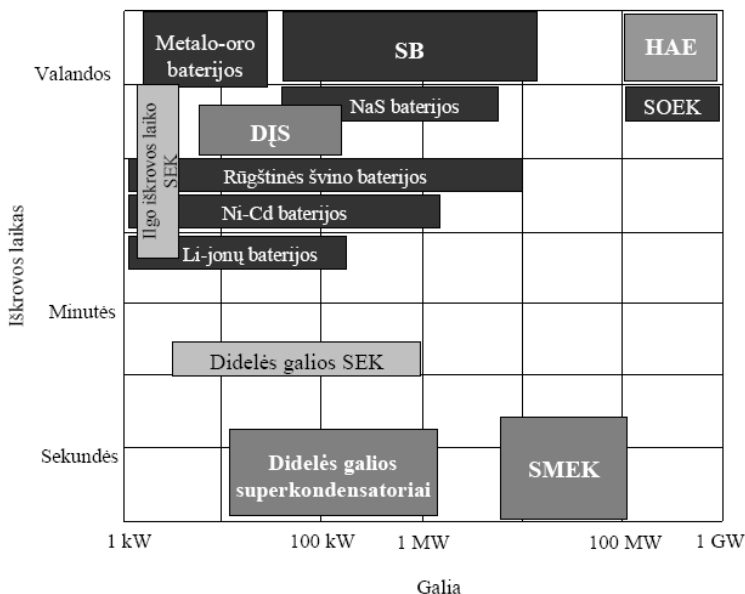
Vandenilio kaupikliai perteklinę elektros energiją naudoja vandeniliui gaminti (Zhao *et al.*, 2015). Pagamintas vandenilis kaupiamas ir vėliau gali būti naudojamas elektros energijai gaminti. Šios cheminės energijos kaupimo technologijos yra naujos, brangios ir dėl mažo viso ciklo naudingumo koeficiento yra tobulinamos.

Superkondensatoriai pasižymi labai didele talpa, siekiančia iki 5000 faradų. Jie yra vieni iš efektyviausių energijos kaupiklių. Jų naudingo veikimo koeficientas didesnis nei 95 % (Evans *et al.*, 2012). Jie turi ir didžiausią galios tankį iš visų elektros energijos kaupiklių – nuo 1 iki 10 kW/kg. Superkondensatoriaus modelį sudaro transformatorius, filtras, kintamos-nuolatinės srovės keitiklis, nuolatinės-nuolatinės srovės keitiklis ir superkondensatorius (žr. 1.8 pav.). Mokslinėje literatūroje yra nagrinėjamas ir superkondensatoriaus EEK modelis, kuris jungiamas prie asinchroninio generatoriaus su faziniu rotoriumi AC/DC keitiklių nuolatinės srovės grandinės (Abbey, 2007; Qu, 2011).



1.8 pav. Superkondensatoriaus modelio schema (Molina, 2010)

Šiuolaikiniuose superkondensatoriuose sukauptos energijos tankis yra nedidelis, o iškrovos trukmė maža (žr. 1.9 pav.). Todėl elektros energetikos sistemose jie nėra plačiai taikomi (Zhao *et al.*, 2015).



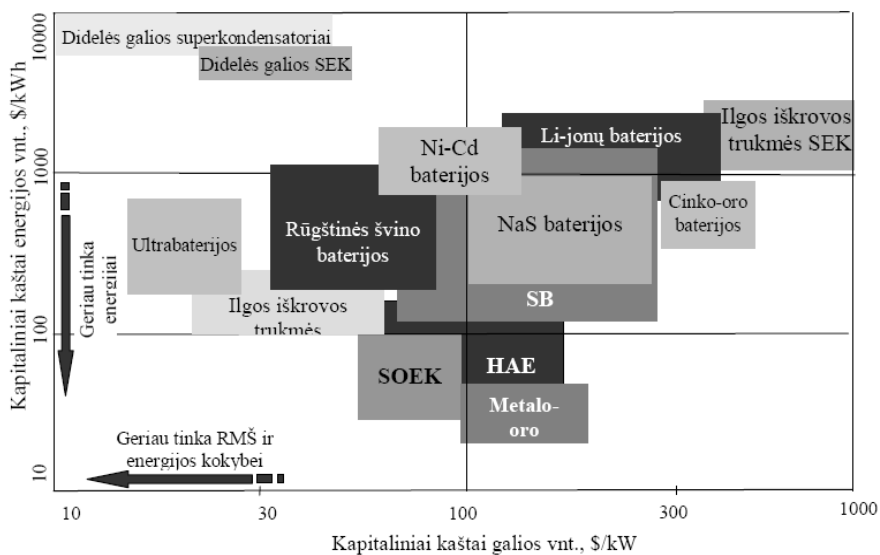
1.9 pav. Kaupiklių iškrovos laiko ir jų galios priklausomybių palyginimas (ESA, 2012)

Superlaidininkų magnetinės energijos kaupikliuose (toliau – SMEK) energija yra sukaupiama didelėse magnetinėse ritėse, per kurias paleidžiama nuolatinė srovė. Magnetinė ritė yra atšaldoma skystu heliu arba azotu iki superlaidumo, todėl nuostolių ritėje praktiškai nėra. Nedideli nuostoliai gaunami lygintuve ir inverteryje, kuris įsijungia, kai elektros energiją reikia grąžinti į kintamosios srovės tinklą. Gaunamas labai aukštas, iki 95 % bendras viso ciklo naudingo veikimo koeficientas (Zhao *et al.*, 2015). Manoma, kad padidinus talpą, SMEK ateityje gali įgauti platų panaudojimą energetikos sistemose vėjo elektrinių kintančiai galiai balansuoti. Kol kas jų platesnį panaudojimą riboja didelės gamybos kainos (Evans *et al.*, 2012).

Terminės technologijos įrenginiai skirstomi į žemos AL–TES ir CL–TES ir aukštos temperatūros HT–TES kaupiklius. Šios abi energijos kaupimo technologijos yra naujos, tačiau turi žemą, naudingojo veikimo koeficientą, ne didesnę kaip 40 – 50 % (Evans *et al.*, 2012), todėl elektros energetikos sistemose nėra plačiai taikomos.

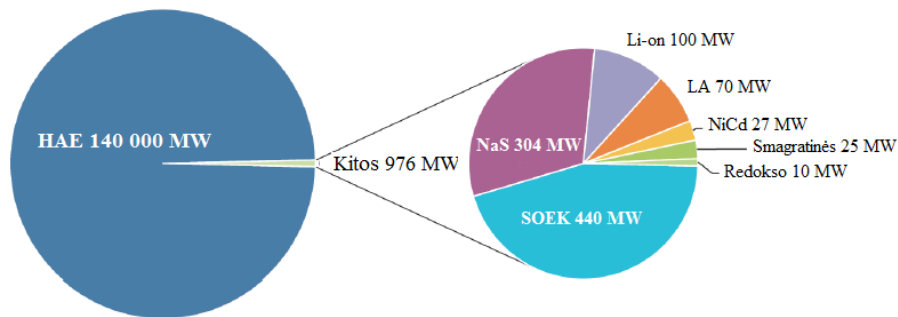
VE parkų galios balansavimui labai svarbūs parametrai yra kaupiklių energijos ilgas iškrovos laikas ir didelė jų galia. Įvairių energijos kaupiklių energijos iškrovos laikai ir jų galių ribinės reikšmės yra pateiktos 1.9 paveikslyje. Šiuo atžvilgiu tinkamiausi energijos kaupikliai yra tokie: HAE, SOEK ir SB.

Energijos kaupimo technologijų praktinį pritaikymą lemia kaupiklių kaina (žr. 1.10 pav.). Iš paveikslo matyti, kad mažiausius kapitalinius kaštus sukauptos ir regeneruotos energijos vienetai turi SOEK, HAE, metalo-oro baterijos, ilgus iškrovos trukmės superkondensatoriai ir SB.



1.10 pav. Energijos kaupimo technologijų palyginimas pagal kapitalinius kaštus galios vienetui ir sukauptos energijos vienetui (ESA, 2012)

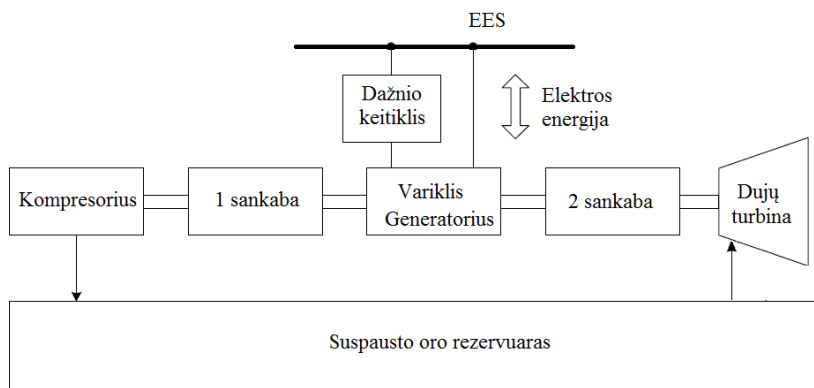
Apžvelgus eksploatuojamas elektros energijos kaupimo sistemas galima teigti, jog dabartiniu metu didžioji dalis technologijų yra mechaninės ir sukcentruotos į hidroakumuliacines sistemas, suspausto oro ir smagratines. Kitos naudojamos technologijos yra elektrocheminės, pagrįstos tiesioginių elektros energijos saugojimu baterijose (žr. 1.11 pav.).



1.11 pav. Elektros energijos kaupimo sistemų integracija (IEC, 2012)

Galiai elektros energijos perdavimo tinkle balansuoti šiuo metu geriausiai tinka ilgalaikės energijos iškvos priemonės: HAE, suspausto oro energijos kaupyklos ir NaS akumuliatorių baterijos. Ateityje gali būti naudojami ir paskirstytieji elektros energijos kaupikliai: superkondensatoriai (per skirstomąjį elektros tinklą) ir vandenilio kaupikliai (Adomavičius, 2011).

Suspausto oro energijos kaupimo sistemos (*angl.* CAES) naudojamos energetikoje būna didelės talpos. Dažniausiai tai natūralūs rezervuarai (užsandarintos uolų ertmės) (žr. 1.12 pav.).



1.12 pav. Suspausto oro energijos kaupimo sistema (Adomavičius, 2011)

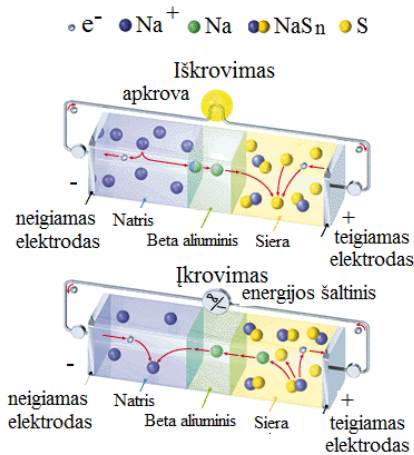
Suspausto oro energijos kaupimo (toliau – SOEK) sistemos veikimo principas yra panašus į dujų turbinų elektrinės. Esant elektros energijos pertekliui elektros mašina dirba variklio režimu ir kompresoriumi slegia orą oro rezervuare. Esant elektros energijos poreikiui suslėgtas oras iš rezervuaro ir gamtinės dujos tiekiami į degimo kamerą, ten degimo produktas suka dujų turbiną, kuri per 2 sankabą suka generatorių ir tiekia elektrą į elektros sistemą. Kintant perteklinei galiai sistemoje, išcentriniam kompresoriui valdyti gali būti panaudotas įtekančio oro ribojimas, kai priklausomai nuo slėgio pokyčių ribojamas įtekantis oras keičiant įleidimo vožtuvo atidarymo laiką. Klasikinėse dujų turbinų elektrinėse, apie 2/3 sugeneruotos energijos panaudojama orui suslėgti prieš deginimą, todėl suspausto oro kaupimo sistemos leidžia sunaudoti nuo 40 iki 75 % mažiau kuro tam pačiam energijos kiekiui gauti (Zhao *et al.*, 2015; International Electrotechnical Commission [IEC], 2012) Suspausto oro energijos kaupimo sistemos gali būti įrengiamos šalia tinkamų geologinių ar dirbtinių darinių, t. y. kasyklų, išnaudotų dujų gręžinių ar druskingų uolų. Dažniausiai tipinė jų galia būna apie 110–290 MW, o elektros energiją sistemai gali tiekti iki 10 valandų. Juose 1 m³ galima sukaupti apie 5 kWh energijos, esant minimaliam slėgiui 8274 kPa (Evans *et al.*, 2012).

Šių kaupimo sistemų pagrindinis privalumas yra didelė energijos talpa. Trūkumams galima priskirti tai, kad instaliavimui reikalingos ypatingos geologinės sąlygos (oro ertmės druskinguose uolienose ar senos, apleistos šachtos, išnaudoti dujų gręžiniai) sąlyginai lėtas atsako laikas ir palyginus mažas efektyvumas (IEC, 2012; Adomavičius, 2011).

Natrio sieros baterijos (toliau – NaS), priešingai nei įprasti švininiai akumuliatoriai, susideda iš dviejų skystų elektrodų (išlydyto metalinio natrio ir sieros) ir kieto elektrolito-membranos. Dažniausiai ji gaminama iš natrio-β-aliuminio keramikos (žr. 1.13 pav.). Norint pagerinti sieros elektrodo elektrinį laidumą į sierą dažniausiai primaišoma specialiai apdoroto grafito. Baterijos suminė išsikrovimo reakcijos lygtis (Evans *et al.*, 2012):



Įtampa tarp normaliai veikiančios NaS baterijos elektrodų 2,1 V, veikimo temperatūra 300–350°C. Eksploatacijos ilgaamžiškumas 2500 ciklų su naudingumo koeficientu 87 %. Įprastinė baterijos galia 25–250 kW.



1.13 pav. NaS baterijos veikimo schema (IEC, 2012)

Natrio sieros baterijos 1960 m. sukurtos „Ford Motor“ automobilių gamintojų kaip akumuliatoriai elektromobiliams. Dėl savo gerų techninių charakteristikų NaS baterijos daugiausiai eksploatuojamos elektros energetikos sistemose galių balansavimui. Šių baterijų Pasulyje yra instaliuota 304 MW galios (IEC, 2012).

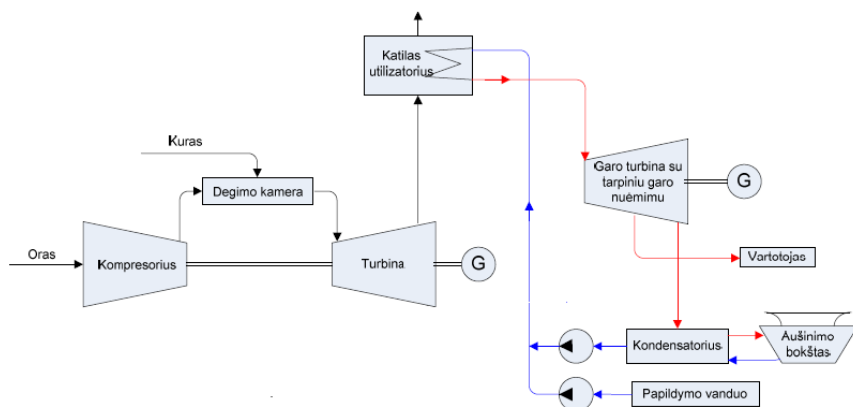
NaS baterijų privalumai yra kompaktiškumas, didelė talpa ir efektyvumas (85%) bei ilga tarnavimo trukmė. Šių baterijų ekologinis privalumas yra tai, kad jas galima perdirbti. Brangi gamyba (žr. 1.10 pav.) ir pavojinga saugumui eksploatacija yra NaS baterijų pagrindiniai trūkumai (IEC, 2012).

Hydroakumuliacinės elektrinės yra viena iš labiausiai išsivysčiusių, energijos kaupimo ir galios reguliavimo technologijų. Šiuo metu Pasulyje yra apie 200 hidroakumuliacinių elektrinių (toliau – HAE), kurių bendra galia sudaro 140 GW (IEC, 2012). Ypač greitomis ir didelės galios reguliavimo diapazono charakteristikomis pasižymi apsynchronizuoti hidroagregatai, gerai tinkantys vėjo elektrinių galiai balansuoti. Tačiau šių elektrinių paskirstytą statybą riboja didelės investicijos, mažesnių galių įrengimo galimybės ir patirties stoka bei nepakankamas bendras siurbimo ir generavimo naudingojo veikimo koeficientas. Tipinis hidroakumuliacinių energijos kaupiklių ciklo veikimo naudingumo koeficientas yra 70–80 % (Zhao *et al.*, 2015). Pagrindiniai HAE privalumai yra ypač didelė energijos talpa ir ilga eksploatavimo trukmė, o asinchronizuotų hidroagregatų dar ir greitas galios reguliavimas. Trūkumams galima priskirti aukštus investicinio kapitalo kaštus ir pakankamai žemą kintamojo režimo ir galių balansavimo naudingojo veikimo koeficientą.

Kombinuoto ciklo elektrinių tinkamumas VE galioms balansuoti. Dėl savo gerų charakteristikų – didelio elektrinio efektyvumo, siekiančio 60 % ir bendro – 92,5 % bei geros dujų turbinės dinamikos, kombinuoto ciklo elektrinės (toliau –

KCE) yra naudojamos modeliuose VE galiai balansuoti. Tačiau, kad tokio tipo elektrinių darbas būtų efektyvus, būtina derinti šiluminius ir elektrinius režimus.

Pagrindinę kombinuoto ciklo dujų turbinos su šilumos atgavimo sistema įrangą sudaro dujų turbina, garo turbina, šilumos atgavimo įrenginys – garo generatorius arba katilas-utilizatorius, elektros generatoriai. Tipinės kogeneracinės elektrinės su dviejų velenų kombinuoto ciklo dujų turbinos technologija pagrindinė schema pateikta 1.14 paveiksle.



1.14 pav. Kombinuoto ciklo elektrinės su dujų turbina schema (Čičinskas, 2007)

Kad vyktų kombinuotas ciklas, dujų turbina komplektuojama su kondensacine garo turbina (kondensacinis darbo režimas) su tarpine garo nuėmimo sistema ar be jos arba su prieš slėgine garo turbina (termofikacinis darbo režimas), kuri taip pat gali turėti keletą tarpinių garo nuėmimo sistemų (Čičinskas, 2007).

KCE, kaip ir kitos kogeneracinės elektrinės, įprastai dirba pagal šiluminės apkrovos grafiką, todėl elektros generavimas priklauso nuo šilumos poreikio. Norint balansuoti vėjo elektrinių generuojamą galią reikia keisti šių elektrinių darbą ir dirbti pagal elektros galios poreikį. Šiuo atveju, siekiant efektyvaus ir ekonomišką elektrinės darbo, gali tecti papildomai įrengti šiluminės energijos kaupiklius ir katilines.

Vėjo elektrinių galios balansavimo modeliai. Autorių (Suwannarat *et al.*, 2007) 1.15 paveiksle pateiktas balansavimo galių valdymo dinaminis modelis sudarytas elektros perdavimo sistemų operatorių centriniam galių reguliavimui. Modelis susideda iš VEP ir balansuojančių tradicinių šiluminių garo ir dujų turbinų elektrinių.

Pagrindinis balansavimo galių modelio automatinio generavimo valdymo (toliau – AGV) sistemos tikslas – palaikyti nekintančią, nustatytą elektros energetikos sistemos dažnio vertę paskirstant generatorinių agregatų, dalyvaujančių šios sistemos veikime generuojamas galias įvertinant nustatytas generavimo valdymo paklaidas (toliau – GVP).

Šis uždavinys yra užrašomas taip:

$$GVP = -\Delta P_{\text{Gen}} - \frac{\Delta f}{R}, \quad (1.6)$$

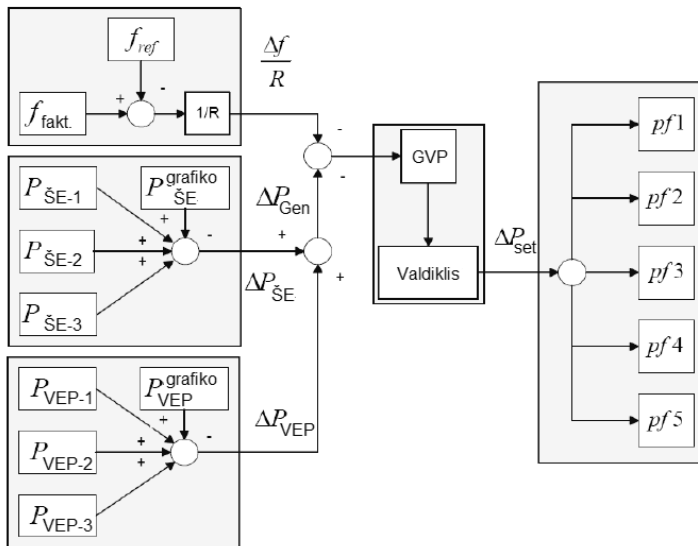
$$\Delta P_{\text{Gen}} = \Delta P_{\text{SE}} - \Delta P_{\text{VEP}}, \quad (1.7)$$

$$\Delta P_{\text{SE}} = \sum_{i=1}^n P_{\text{SE}} - \Delta P_{\text{SE}}^{\text{grafiko}}, \quad (1.8)$$

$$\Delta P_{\text{VEP}} = \sum_{i=1}^n P_{\text{VEP}} - \Delta P_{\text{VEP}}^{\text{grafiko}}, \quad (1.9)$$

$$\Delta P_{\text{set}} = K_p * GVP + \frac{1}{T} \int GVP, \quad (1.10)$$

kur ΔP_{SE} – šiluminių elektrinių galios pokytis tarp faktinės ir planinės; ΔP_{VEP} – vėjo elektrinių parkų galios pokytis tarp faktinės ir planinės; ΔP_{Gen} – bendras generuojamos galios skirtumas; ΔP_{set} – nustatytasis galios pokytis; Δf sistemos dažnio pokytis; T – integravimo laiko pastovioji; K_p – proporcingumo koeficientas.



1.15 pav. Balansuojamos sistemos AGV modelis (Suwannarat *et al.*, 2007)

Autoriai nurodo, kad sudarytu balansavimo modeliu yra geriau atliekamas VE galių balansavimas, o tai sumažina perdavimo linijų srautus ir gali būti tiksliau nustatomos vėjo energijos plėtros galimybės.

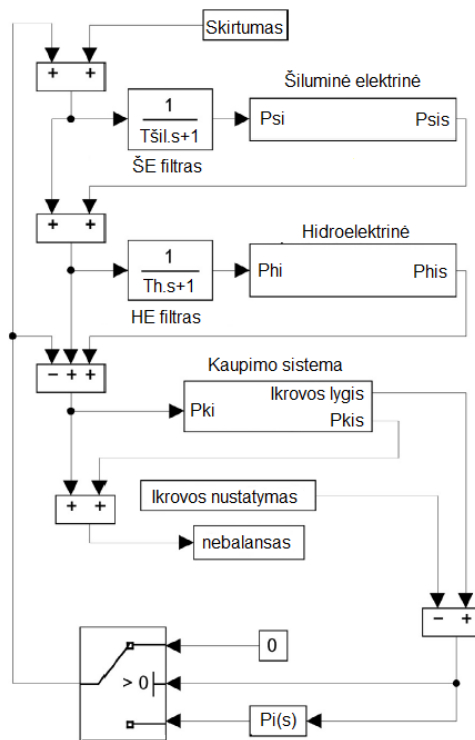
Aurių Gelažansko ir kt. (2015) darbe pateiktas balansavimo galių valdymo dinaminis modelis apima tokius pagrindinius generuojančius šaltinius – šiluminės ir hidroelektrinės, galinčias balansuoti elektros energetikos sistemas (atsinaujinančius energijos išteklius naudojančių elektrinių generuojamas galias ir apkrovų galių kitimus), ir energijos kaupimo sistemą. Balansavimo šaltiniai – šiluminė elektrinė,

hidroelektrinė ir energijos kaupimo sistema yra valdomi panaudojus skirtingus pradinio signalo (skirtumo tarp faktinių ir prognozuotų vėjo elektrinių galių ar apkrovų galių) kitimo greičio dedamąsias. Tam tikslui modelyje naudojami filtrai, esantys prieš šiluminių elektrinių ir hidroelektrinių dalis – „ŠE filtras“ ir „HE filtras“. Balansavimo galių valdymo dinaminio modelio struktūra pateikta 1.16 paveiksle.

Balansuojamos sistemos modelyje skirtumai tarp faktinių ir prognozuotų vėjo elektrinių galių, sistemos apkrovos ar sistemos saldo, yra balansuojami šiluminės elektrinės, hidroelektrinės ir energijos kaupimo sistemos.

$$P_{\text{error}} = P_{\text{fakt.}} - P_f, \quad (1.11)$$

kur P_{error} – galios paklaida (skirtumas); $P_{\text{fakt.}}$ – faktinė galia; P_f – prognozuota galia.



1.16 pav. Balansuojamos sistemos modelis (Gelažanskas *et al.* 2015)

Nesubalansuotos galios fiksuojamos dalyje „nebalansas“. Jei elektrinių ir energijos kaupimo sistemos bei filtrų parametrai parinkti teisingai, o reguliavimo rezervų galios pakankamos, modelio gaunamas galių skirtumas yra lygus nuliui.

Proporcinis integralinis valdiklis „PI(s)“ modelyje naudojamas palaikyti tinkamam energijos kaupimo sistemos įkrovimo lygiui.

Šiluminės elektrinės dinaminio modelio valdymo signalas:

$$P_{\text{Ši}} = (P_{\text{skirtumas}} + P_{\text{Pl}}) \cdot \frac{1}{T_{\text{Ši}}s + 1}, \quad (1.12)$$

kur $P_{\text{skirtumas}}$ – skirtumo galia tarp faktinės ir prognozuotos vėjo elektrinių galių (MW); P_{Pl} – energijos kaupiklių įkrovimo lygiui palaikyti reikalinga galia (MW); $T_{\text{Ši}}$ – filtro, esančio prieš šiluminę elektrinę, laiko pastovioji (s).

Hidroelektinės dinaminio modelio valdymo signalas (užduotis):

$$P_{\text{hi}} = (P_{\text{skirtumas}} + P_{\text{Pl}} - P_{\text{Šis}}) \cdot \frac{1}{T_{\text{h}}s + 1}, \quad (1.13)$$

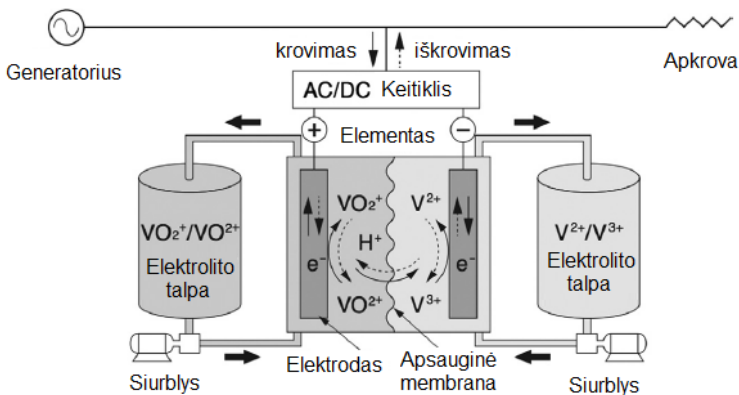
kur $P_{\text{Šis}}$ – šiluminės elektrinės generuojama galia (MW); T_{h} – filtro, esančio prieš hidroelektinę, laiko pastovioji (s).

Energijos kaupimo sistemos dinaminio modelio valdymo signalas (užduotis):

$$P_{\text{ki}} = P_{\text{skirtumas}} - P_{\text{Šis}} - P_{\text{his}} - P_{\text{Pl}}, \quad (1.14)$$

kur P_{his} – hidroelektinės generuojama galia (MW).

Modeliuojamą energijos kaupimo sistemą sudaro srauto baterijos (žr. 1.17 pav.).



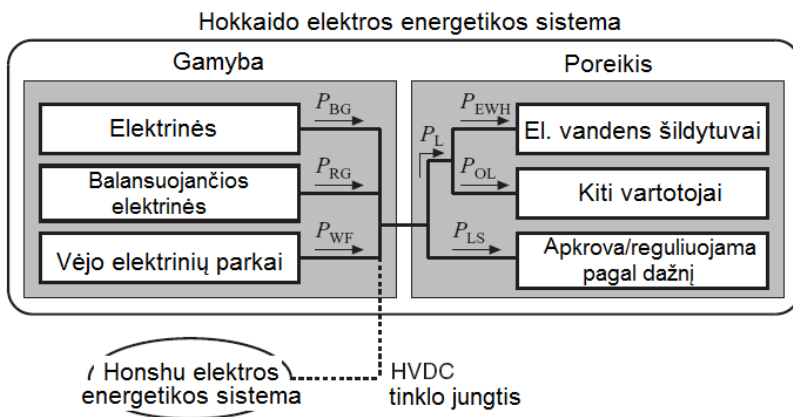
1.17 pav. Srauto baterijos struktūra (Gelažanskas *et al.*, 2015)

Autorių Gelažansko ir kitų (2015) sudarytu balansuojamos sistemos modeliu, nustatyta energijos kaupimo sistemos įrengtoji galia tiriamojo laikotarpio vėjo elektrinių galių balanso užtikrinimui sudaro 24,8 % nuo įrengtosios vėjo elektrinių galios, EES dirbant „salos“ režimu ir 6,3 % nuo įrengtosios vėjo elektrinių galios, dirbant bendrai visoje sistemoje.

Iš pateiktų modelių schemų (žr. 1.15 pav., 1.16 pav.) matyti, kad vėjo elektrinių galios balansavimo modeliai gali būti sudaryti iš tradicinių šiluminių elektrinių arba elektrinių ir energijos kaupiklių bei elektros perdavimo sistemų operatorių naudojami centriniam galių reguliavimui (Gelažanskas *et al.*, 2015; Suwannarat *et al.*, 2007). Nors šie modeliai ir leidžia sumažinti VEP galių kitimų sukeltą problemas, tokias kaip galios srautų reguliavimo ir mažo pralaidumo elektros tinkluose, tačiau iki galo jų neišsprendžia.

Dažnai literatūroje yra aprašomi paskirstytos generacijos VE galios balansavimo modeliai, naudojantys energijos kaupiklius tiesioginiam elektros energijos balansavimui (Zhao *et al.*, 2015). Nors mokslininkai intensyviai tiria vėjo elektrinių galių balansavimą panaudojant elektros energijos kaupimo sistemas, jų pasiūlyti modeliai dėl mažo naudingumo, netobulų technologijų yra pritaikyti tik atskirų vėjo elektrinių ar mažų, izoliuotų elektros energetikos sistemų galių balansavimui (IEC, 2012; Zhao *et al.*, 2015).

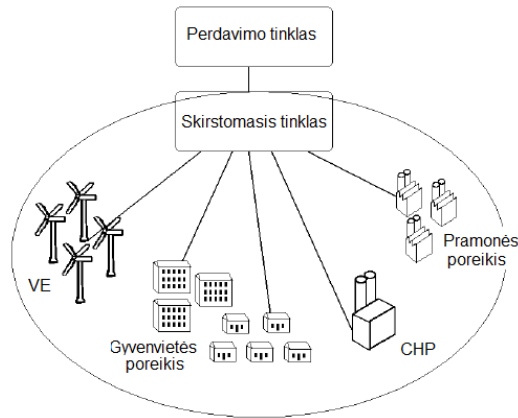
Japonų mokslininko (Kondoh, 2009) 1.18 paveiksle pateiktas Hokkaido salos elektros energetikos sistemos VEP generuojamos galios balansavimo modelis panaudojant elektrinius vandens šildytuvus vietoje jiems įprastų elektros energijos kaupiklių – akumuliatorių baterijų.



1.18 pav. Balansuojamos Hokkaido elektros energetikos sistemos modelis (Kondoh, 2009)

Mokslininko (Kondoh, 2009) nustatyta, kad galios balansavimas naudojant elektrinius vandens šildytuvus galėtų padidinti VEP galią nuo 250 MW iki 675 MW ir leistų stipriai sumažinti galios kitimo balansavimui reikalingas išlaidas lyginant su įprastinėmis akumuliatorių baterijomis.

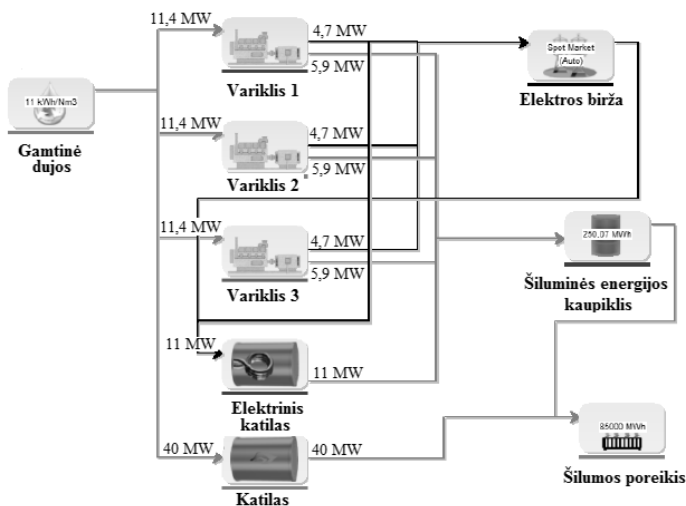
Norint panaudoti kogeneracines elektrines VE energijai balansuoti, reikia suderinti elektros ir šilumos gamybos režimus. Problema gali būti sprendžiama panaudojus šilumos energijos kaupiklius (Yang *et al.*, 2015; Kuhl–Thalfeldt 2009; Lund *et al.*, 2012; Sorknæs *et al.*, 2013). Vėjo elektrinių energijos balansavimo pagal šilumos ir elektros energijos poreikį galimybių nustatymui panaudojant realiai esamus įrengimus, estų mokslininko Kuhl-Thalfeldt'o buvo sudarytas energetikos sistemos modelis, susidedantis iš 18,4 MW galios vėjo elektrinių parko, 3 MW_{el.} galios kogeneracinės elektrinės kūrenamos gamtinėmis dujomis, 10 MW galios katilinės ir 50 m³ šilumos akumuliacinės talpos (žr. 1.19 pav.).



1.19 pav. Vėjo elektrinių galių balansavimo pagal elektros ir šilumos poreikį modelio schema (Kuhi-Thalfeldt, 2009)

Tyrimo metu autorių buvo nustatyta, kad dėl mažos kogeneracinės elektrinės galios galima subalansuoti tik iki 20 % VEP energijos nebalanso nuo prognozuotų galių. Apskaičiuota, kad esant 27.5 GWh šilumos poreikiui, pagal prognozuojamas galias visiškai subalansuoti VEP energiją reikėtų 18,5 MW galios kogeneracinės elektrinės.

Siekiant nustatyti VE plėtros galimybes Danijos elektros energetikos sistemoje, autorių (Sorknæs *et al.*, 2014) buvo sudarytas galių balansavimo pagal elektros ir šilumos poreikį modelis ir atlikti esamos padėties ir ateities scenarijaus tyrimai. Remiantis 1.20 paveiksle pateikta modelio schema, *Energy PRO* programa buvo modeliuojamas kogeneracinių elektrinių, dujinių ir elektrinių katilinių darbo režimų derinimas dirbant pagal elektros biržos nustatytą kintamą elektros energijos kainą, nurodant ir papildomą funkciją, t. y. galimybę dalyvauti elektros balansavimo rinkoje.



1.20 pav. Galių balansavimo pagal elektros ir šilumos poreikį

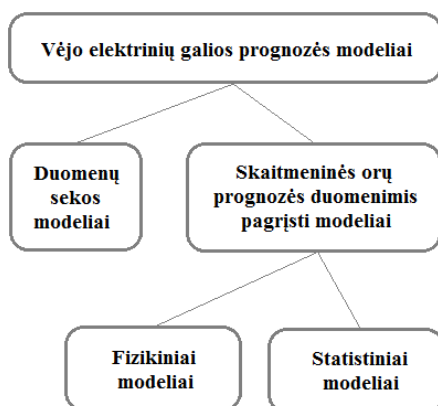
modelio schema (Sorknæs *et al.*, 2014)

Pateiktame modelyje buvo numatytos ir gamtinių dujų pakeitimo biodujomis, šilumos siurblių, elektromobilių įkrovimo stotelių bei vandenilio panaudojimo galimybės balansuojant atsinaujinančiuosius energijos išteklius naudojančias elektrines. Pabrėžiama, kad šilumos siurblių panaudojimas AEI naudojančių elektrinių galių balansavimui pagal individualių namų ūkių (Hedegaard *et al.*, 2012) ar centralizuotų šildymo sistemų šilumos poreikius (Chen *et al.*, 2015) padidina VE galios balansavimo galimybes. Visuose pateiktuose darbuose buvo tiriamas energijos balansavimas būnant bendros energetikos sistemos dalimi, t. y. nesukuriant mažųjų energetikos sistemų, kurios, elektros sistemos avarijos atveju atsijungtų ir veiktų savarankiškai, taip padidindamos elektros energijos tiekimo patikimumą vartotojams (Lu *et al.*, 2006; Hammons 2007).

1.4. Vėjo elektrinių galios prognozavimo sistemos ir modeliai

Vėjo elektrinių generuojamos galios prognozė yra aktuali VE išankstinių darbo grafikų planavimui bei sudarymui. VE galios prognozė leidžia sėkmingiau planuoti VE darbą ir labai sumažinti elektros energetikos sistemos galių balansavimo rezervus bei sudaro galimybę VE parkams dalyvauti elektros rinkoje. VE galios prognozavimui yra naudojami *eWind Prediktor*; *WPPT*; *Zephyr*; *Previento*; *LocalPred*; *Sipreolico* ir kiti modeliai (Foley *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2011) bei kuriami universalūs, galimai tikslesni, nauji modeliai.

VE galios prognozės modeliai pagal naudojamus pradinis duomenis skirstomi į duomenų sekas (angl. *time series*) modelius ir skaitmeninės orų prognozės (toliau – SOP) (angl. *numerical weather prediction*) duomenis naudojančius modelius (žr. 1.21 pav.). Duomenų sekos modeliuose naudojami tiesioginiai vėjo greičio arba VE galios matavimo duomenys, kuriuos analizuojant duomenų sekos analizės metodais sudaromos VE galios prognozės kelioms valandoms į priekį. Ilgesnio periodo prognozėms sudaryti naudojami SOP duomenis naudojantys modeliai, kurie savo tikslumu yra pranašesni už duomenų sekos modelius.



1.21 pav. Vėjo elektrinių galios prognozės modelių tipai (Marčiukaitis, 2007)

Duomenų sekos modeliai yra žinomi kaip paprasčiausi VE galios prognozės modeliai. Jie remiasi pastarųjų kelių valandų vėjo greičio ar VE galios matavimo duomenimis. Paprasčiausias šio tipo modelis žinomas kaip „išsilaikymo“ (angl. *persistence*) modelis. Pagal šį modelį prognozuojamo parametro (vėjo greičio arba VE galios) reikšmė yra lygi paskutinio matavimo reikšmei (Foley *et al.*, 2012):

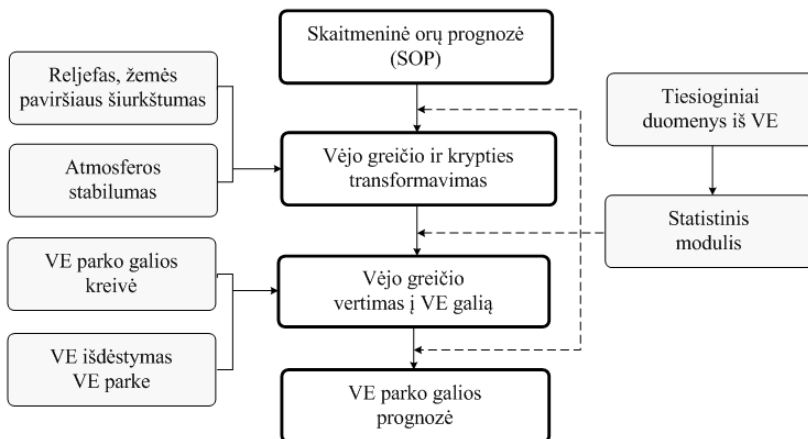
$$X_{t+l} = X_t, \quad (1.15)$$

kur X_t – t -osios laiko akimirkos parametro reikšmė; l – laiko tarpas (prognozės periodas).

Šis modelis yra paprastas, mažiems laiko tarpams (kelioms minutėms ar valandoms) prognozės paklaida gali būti ir nedidelė, t. y. neviršyti keliolikos procentų, nes atmosferoje procesai vyksta lėtai. Ilgesniems periodams tikslumas sparčiai mažėja ir paklaidos gali siekti kelias dešimtis procentų. Tačiau pagal išsilaikymo modelio rezultatus gana dažnai vertinamas kitų vėjo elektrinių galios prognozių tikslumas (Gomes, Castro, 2012).

Skaitmeninės orų prognozės duomenis naudojančios modeliai skirstomi į fizikinius bei statistinius modelius (žr. 1.22 pav.). Fizikiniuose modeliuose pagal SOP duomenis įvertinamas vietinis vėjo greitis VE parko teritorijoje ir perskaičiuojamas į prognozuojamą VE galią. Statistiniai modeliai skaičiuoja prognozuojamą VE galią pagal SOP ir VE galios matavimo duomenis (Marčiukaitis, 2007; Foley *et al.*, 2012).

Fizikiniai modeliai dažniausiai naudojami VE galios ilgesnės trukmės prognozei (žr. 1.22 pav.). Fizikinių galios prognozės modelių pradiniai duomenys yra bendros atmosferos cirkuliacijos hidrostatiškos SOP modelių rezultatai. Atmosferoje vykstančių procesų skaitmeniniu modeliavimu siekiama nustatyti būsimą atmosferos būklę pagal pradinės būklės matavimą meteorologijos stotyse arba naudojant palydovų duomenis. Pradinių duomenų tikslumas sąlygoja modelio prognozių kokybę (Stathopoulos *et al.*, 2013).



1.22 pav. Tipinis vėjo elektrinių galios prognozės fizikinis modelis (Marčiukaitis, 2007)

SOP modelių pagrindas yra daugiasluoksnis skaitmeninis tinklelis, kurio kiekvienam mazgui priskiriamos atmosferos būklę aprašančių kintamųjų reikšmės. Modelį sudaro netiesinių diferencialinių lygčių su dalinėmis išvestinėmis sistema, neturinti analitinių sprendinių. Todėl remiantis matavimų duomenimis apskaičiuojami skaitmeniniai sprendiniai kiekviename tinklelio mazge. VE parko prognozei naudojami arčiausiai esančio SOP modelio tinklelio mazgo duomenys arba gali būti atliekama duomenų horizontali interpoliacija iš aplink VE parką esančių SOP modelio tinklelio mazgų. Vėjo greičio transformavimas atliekamas specialiomis programomis. Europoje šiam tikslui plačiai naudojama programa *WASP* (Wind Atlas Analysis and Application Program), sukurta Risoe nacionalinėje laboratorijoje (Gasset *et al.*, 2012). Galutiniame etape panaudojant VE parko galios kreivę ir atsižvelgiant į VE išsidėstymą parke gautas prognozuojamas vėjo greitis vėjaračio aukštyje perskaičiuojamas į prognozuojamą VE parko galią.

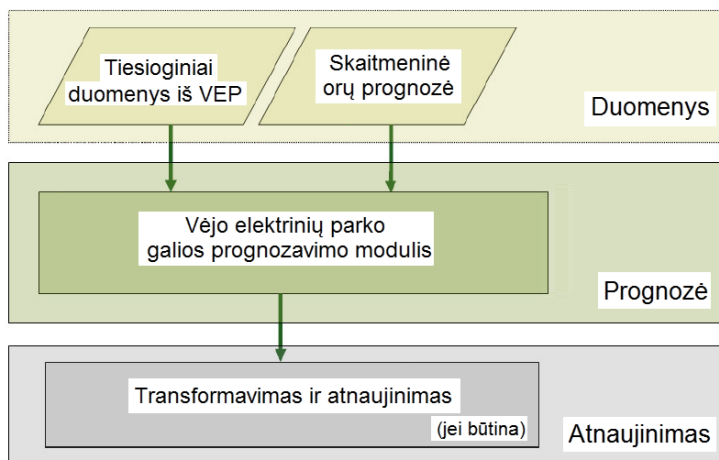
Fizikinių modelių galios prognozavimas VE parkui nėra tikslus, nes sudėtinga apskaičiuoti vėjo greitį kiekvienos elektrinės vėjaračio ašies aukštyje arba vidutinį vėjo greitį viso parko elektrinėms. Nustatyta, kad VE parke vėjo greičiai kiekvienai vėjo jėgainei gali gerokai skirtis. Todėl fizikinių modelių sistemingsioms paklaidoms mažinti ir galios prognozės tikslumui didinti jau yra įvertinama vėjo kryptis.

Statistiniai modeliai yra pagrįsti VE parkų generuojamos galios matavimo duomenų ir atitinkamų SOP modelio vėjo parametrų prognozės duomenų nustatyta tarpusavyo ryšiu (žr. 1.23 pav.). Šio ryšio parametrai keičiasi laikui bėgant dėl besikeičiančių oro sąlygų, vėjo svyravimo sezoniskumo, VE charakteristikų kitimo, taip pat dėl VE parkų aplinkoje besikeičiančios augalijos ir dirbtinių kliūčių. Todėl statistiniai ryšio parametrai yra nuolat perskaičiuojami. Statistiniuose modeliuose skaitmeninės orų prognozės ir vėjo elektrinių galių matavimo duomenų ryšys gali būti nustatomas regresiniais adaptyviais arba dirbtiniais neuroninių tinklų statistiniais metodais (Costa *et al.*, 2008; Gomes, Castro, 2012; Sideratos, Hatzigargyriou, 2007). Regresiniais adaptyviais statistiniais metodais yra nustatomi statistiniai tam tikro laikotarpio skaitmeninės orų prognozės ir vėjo elektrinių galių kitimo duomenų ryšiai. Šis metodas dažniausiai naudojamas statistiniuose VE parkų galios kitimo prognozės modeliuose (Costa *et al.*, 2008).

Statistinei vėjo greičio bei VEP galios prognozei dažniausiai naudojami ARX, ARMAX, ARMA, (angl. *Autoregressive Moving Average*) autoregresiniai modeliai (Chang, 2012; Gomes, Castro, 2012). Prognozės sudaromos panaudojus nagrinėjamo reiškinio pradinius duomenis ir modelio paklaidų pokyčių ypatumus. ARMA modelis susideda iš autoregresinio AR (p) ir slenkamųjų vidurkių procesų MA (q) (Gomes, Castro, 2012):

$$Y_t = \sum_{i=1}^p \varphi_i Y_{t-i} + \varepsilon_t + \sum_{i=1}^q \theta_i \varepsilon_{t-i}, \quad (1.16)$$

kur Y_t – laiko eilutės stebėjimai; φ_i – autoregresinio proceso parametrai; θ_i – slenkamųjų vidurkių proceso parametrai; ε_t – atsitiktinės paklaidos.



1.23 pav. Tipinis statistinis galios prognozės modelis

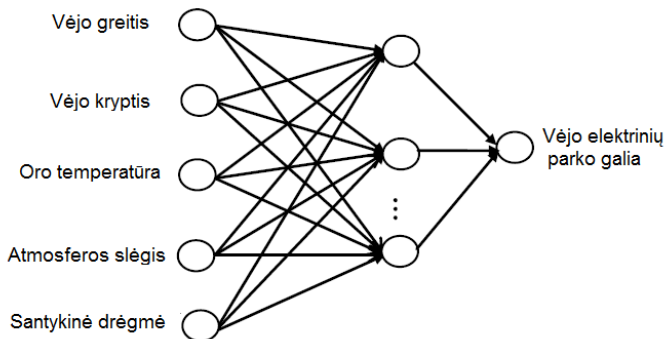
Modelio autoregresinis procesas aiškina laiko eilutės stebėjimus ankstesniaisiais stebėjimais, o slenkamųjų vidurkių procesas – stebėjimus Y_t modelio paklaidomis. ARMA modelių tinkamumas yra tikrinamas Box – Jenkins procedūra.

Statistinių galios prognozės modelių parametų ryšiai gali būti nustatomi ir dirbtinių neuroninių tinklų metodu. Tam reikia vykdyti netiesinį statistinį duomenų modeliavimą naudojant sudėtingus įvairius duomenų ryšius ir tuo pačiu apmokyti neuroninių tinklų struktūras (žr. 1.24 pav.). Tačiau dėl modelio gaunamų didesnių prognozės paklaidų (Gomes, Castro, 2012) ir ilgos tinklo struktūrų mokymo trukmės, šis metodas praktikoje dar nėra plačiai taikomas (Nielsen *et al.*, 2014).

Statistiniai modeliai turi vieną akivaizdų pranašumą prieš fizikinius modelius, nes reljefo, kliūčių, atmosferos stabilumo ir kitų veiksnių poveikis yra nuolat tikslinamas ir yra įvertinamas statistiniuose ryšio parametruose. Statistinių modelių vėjo prognozės yra susietos su konkrečia VE parko vietoje ir sistemingosios paklaidos automatiškai sumažėja. Be to, statistiniai modeliai analizuoja praeities duomenis ir taip leidžia išvengti galimų klaidų. Pagrindinis trūkumas yra tai, kad statistinių modelių sureguliuojimui ir regresijos koeficientų apskaičiavimui reikalingi pakankamai ilgo laikotarpio matavimo duomenys, todėl naujai pastatytam VE parkui modelis negali būti iš karto taikomas.

Prognozės modeliai yra vertinami pagal galios prognozės tikslumą. Daugelyje vėjo prognozės srities mokslinių tyrimų prognozės tikslumas įvertinamas suskaičiuojant santykinę vidutinę paklaidą (toliau – SVP) ir santykinę vidutinę kvadratinę paklaidą (toliau – SVKP) vėjo elektrinės įrengtosios galios atžvilgiu (Gomes, Castro, 2012; Gasset *et al.*, 2012). Fizikinių ir statistinių vėjo prognozės modelių tikslumui turi įtaką SOP modelio rezultatų tikslumas. Ilgesnėms kaip 3–5 h trukmėms, visi fizikiniai ir dauguma statistinių modelių yra pranašesni už išsilaikymo modelį (Chang, 2012; Junga, Broadwater, 2014). Tipinės VE galios prognozės modelių santykinė vidutinė paklaida siekia 8–12 % instaliuotos galios 36 h periodui. Modelių paklaidos priklauso nuo prognozių trukmių. *LocalPred*

(statistinis, *CENER*, Ispanija) modelio santykinė vidutinė paklaida 24 h trukmei lygi apie 8 %, o 48 h trukmei – apie 16 % instaliuotos galios. Panašūs rezultatai gaunami ir *Prediktor* (fizikinis, *RISOE*, *DTU* ir *Eltra*, Danija) bei *Zephyr* (fizikinis – statistinis, *RISOE*, Danija) prognozės modelių (Costa *et al.*, 2008).



1.24 pav. Dirbtinių neuroninių tinklų struktūra (Han *et al.*, 2011)

Prediktor modeliu prognozuojant vieno VEP galią gaunama SVP 24 h trukmei yra pakankamai didelė ir kinta ribose nuo 14,2 % iki 22,3 %. Panašios paklaidos gaunamos ir kitais prognozės modeliais (Junga, Broadwater, 2014). JAV nuo 2010 metų VEP galios prognozei pradėjus taikyti fizikinio ir statistinio modelių sistemą (angl. *Xcel Energy wind forecasting system NREL, NCAR*) prognozės tikslumas VEP pagerėjo 14,7–20 %, o paklaidos sumažėjo iki 12,2–14,3 % (Parks *et al.*, 2011). Tais pačiais metais, Japonijos mokslininkai (Yamaguchi ir Ishihara, 2010) atliko sukurtų fizikinių ir statistinių prognozės modelių tyrimus ir nustatė, kad fizikiniai modeliai yra mažesnio tikslumo negu statistiniai modeliai ir pasiūlė fizikinius modelius naudoti tik VEP eksploatavimo pradžioje, o vėliau surinkus pakankamą kiekį galios matavimo duomenų, VEP galią prognozuoti statistiniais prognozės modeliais.

Lietuvos elektros energetikos sistemos visų VEP generuojamos galios išankstinę prognozę 24 h trukmei nuo 2012 m. atlieka Švedijos *VITEC* kompanija sukurtu *AIOLOS* fizikiniu programiniu modeliu (Baranauskas, Ažubalis, 2014). A. Baranausko atlikti tyrimai parodė, kad VEP galios išankstinės prognozės valandos SVP neviršija 11 % vidutinės vėjo elektrinių generuojamos galios. Tai rodo gana aukštą fizikinio modelio *AIOLOS* tikslumą, nes paklaida apskaičiuota ne įrengtosios, bet vidutinės generuojamos galios atžvilgiu. Tačiau paminėtina, kad dideliame regione išsidėsčiusių VEP generuojamos galios prognozės mažesnės paklaidos susidaro dėl vadinamo erdvinio išlyginimo efekto ir paklaidų autokoreliacijos, lyginant su atskyrų VEP galių prognozių paklaidomis (Birgiolas, Katinas, 2006; Gasset *et al.*, 2012).

VE galios prognozės modeliai turi savų privalumų ir trūkumų, tačiau jų tikslumas dar nėra aukštas. Todėl, norint gauti geriausią rezultatą, tenka naudoti prognozės metodų derinius.

1.5. Autoriaus indėlis į nagrinėjamą problematiką

Vėjo elektrinių galių kitimo keliamų problemų sprendimui buvo sudaryta VE parametrų tyrimų metodika, leidžianti tiksliau nustatyti vėjo elektrinių parkų kintančios galios įvairių trukmių vidutines vertes, vidutinių galių pokyčių standartinių nuokrypių ir jų koreliacijos koeficientų vertes, įvertinant ne tik vėjo greitį, bet ir vėjo kryptį, elektrinių geografinį išsidėstymą parke. VEP energijos balansavimui pagal vietinių vartotojų elektros ir šilumos poreikį buvo sudaryti modeliai, kuriais nustatytos mažosios energetikos sistemos vėjo elektrinių parkų integruojamos galios ir balansavimui reikalingų kogeneracinių elektrinių, katilinių arba šilumos siurblių galios, šiluminės energijos kaupiklių talpos ir saulės elektrinių parkų subalansuojamos galios. Sukurtu galios balansavimo modeliu ištirtos trumpalaikių galios nuokrypių ir dažnio kitimo suvaldymo mažojoje elektros energetikos sistemoje galimybės. Moksliniais tyrimais buvo įrodyta, kad galima integruoti į elektros energetikos sistemą papildomas VE galias, nesumažinant elektros perdavimo tinklo galios pralaidumo ir padidinti sistemos energetinį saugumą.

Siekiant padidinti galių prognozavimo tikslumą ir palengvinti elektros energetikos sistemos darbo režimų valdymą buvo pasiūlytas statistinis regresinis VEP galios prognozavimo modelis, įvertinantis vėjo greitį ir jo kryptis, atmosferos slėgį ir temperatūrą, vėjo ir atmosferos prognozių sistemingąsias paklaidas, elektrinių išdėstymą parko teritorijoje, natūralias ir dirbtinas kliūtis, žemės paviršiaus šiurkštumą ir nuolatinį jų kitimą.

2. VĖJO ELEKTRINIŲ PARKŲ ENERGIJOS IR GALIOS BALANSAVIMO IR PROGNOZAVIMO METODIKA

Šiame disertacijos skyriuje pristatoma kintančia galia veikiančių elektrinių generuojamos galios stochastinių parametrų tyrimo, jų galios balansavimo ir prognozavimo patobulintos metodikos. Tam analizuojama pasirinktų laikotarpių VEP galia ir energija įvairiomis laiko trukmėmis ir nustatomos vidutinės vertės, nuokrypiai ir koreliacijos koeficientai žinomomis statistinės analizės išraiškomis. Galių balansavimo galimybėms išplėsti sudaromos mažosios energetikos sistemos, kuriose VEP galia, elektros apkrova ir šiluma balansuojama vietinėmis kogeneracinėmis elektrinėmis, katilinėmis ar šilumos siurbliais, panaudojant šilumos kaupiklius. Siekiant sumažinti balansuojamos galios nuokrypius siūloma VEP galios prognozavimo metodologija ir tikslesnis prognozavimo modelis.

2.1. Vėjo elektrinių parametrų nustatymas

Vėjo elektrinių skverbties tempai verčia rūpintis patikimu ir saugiu elektros energetikos sistemos veikimu. Labiausiai vėjo elektrinių generuojama galia priklauso nuo vėjo greičio, kuriam įtaką daro vietovės paviršiaus šiurkštumas ir aukštis virš žemės paviršiaus. Jeigu hidrometeorologinių stočių pateikto vėjo greičio aukštis neatitinka VE vėjaračio aukščio, tai šis greitis gali būti perskaičiuotas pagal formulę:

$$v_2(t) = v_1(t) \cdot \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^{a_h}, \quad (2.1)$$

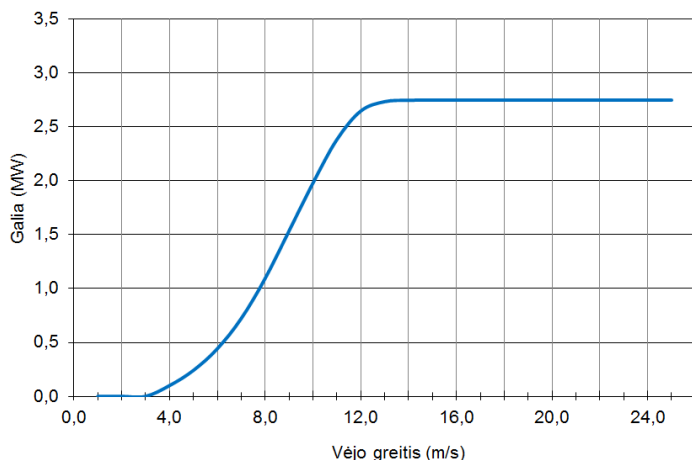
kur $v_2(t)$ – vidutinis vėjo greitis m/s VE vėjaračio ašies aukštyje h_2 (m); $v_1(t)$ – vidutinis vėjo greitis m/s, išmatuotas arba prognozuotas laiko intervale t ir matavimo aukštyje h_1 (m); a_h – Hellmann koeficientas.

Hellmann koeficientas leidžia įvertinti vietovės paviršiaus šiurkštumą perskaičiuojant vėjo greitį į vėjaračio ašies aukštį (žr. 2.1 lent.).

2.1 lentelė. Hellmann koeficientas, įvertinantis vietovės paviršių (EMD International A/S)

Paviršiaus tipas	Paviršiaus šiurkštumo klasė	Hellmann koeficientas (a_h)
Vandens paviršius	0	0,06
Visiškai atvira vietovė su lygiu paviršiumi, pvz.: keliai, aerodromai, ganyklos ir t. t.	0,5	0,10
Atvira, retomis kalvomis apsupta žemės ūkio vietovė, be tvorų ir medžių, su retai pasitaikančiais pastatais	1	0,11
Tarp laukų įsiterpusi kaimo vietovė su namais ir sodais, užimanti maždaug 0,125 km ²	1,5	0,14
Tarp laukų įsiterpusi kaimo vietovė su namais ir sodais, užimanti maždaug 0,25 km ²	2	0,16
Tarp laukų įsiterpusi kaimo vietovė su namais ir sodais, užimanti maždaug 1 km ²	2,5	0,27
Kaimo gyvenvietė, nedideli miesteliai, sodai ir miškai	3	0,34
Dideli miestai su aukštais pastatais	3,5	0,40
Labai dideli miestai su aukštais pastatais ir dangoraižiais	4	0,60

Perskaičiavus vėjo greitį, vėjo elektrinių generuojama galia nustatoma pagal gamintojo pateiktą VE galios kreivę, kuri kiekvienam modeliui nustatoma eksperimentiškai. Vėjo elektrinės Vestas V100 – 2,75 MW galios kreivė pateikta 2.1 paveiksle.



2.1 pav. VE modelio V100 – 2,75 MW galios kreivė (Vestas. *Technical description*)

Vėjo elektrinių parko generuojama galia apskaičiuojama įvertinus vėjo krypties įtaką:

$$P_{VEP}(t) = P_C(v_2(t)) \cdot n_{VE} \cdot \eta_{kryp}, \quad (2.2)$$

kur $P_{VEP}(t)$ – VE galia laiko akimirka t , (MW); P_C – VE galia rasta pagal galios kreivę (MW), kai $v_2(t)$ – vidutinis vėjo greitis VE vėjaračio ašies aukštyje (m/s); n_{VE} – vėjo elektrinių skaičius parke; η_{kryp} – vėjo krypties įtakos paklaidos koeficientas.

Siekiant ir galimai efektyviau išnaudoti vėjo energiją, reikia turėti patikimus vėjo elektrinių darbo rodiklius ir charakteristikas, kurie leistų maksimaliai tiksliai įvertinti šių elektrinių generuojamą galią ir tiksliau sudaryti VEP galių perspektyvinius grafikus. Tam VEP galios pokyčiai ir jų standartiniai nuokrypiai apskaičiuojami prie trijų skirtingų vidurkinimo trukmių (30 s, 15 min ir 1 h). Šie pagrindiniai analizuojami parametrai leidžia įvertinti generuojamos galios kitimus, o tokios pasirinktos vidurkinimo trukmės yra aktualios aktyviosios galios reguliavimui ir elektros sistemos balansavimui.

Rezultatų analizei ir pasikliautinumo intervalui nustatyti sudaromi galios pokyčių skirstiniai.

Siekiant dar tiksliau įvertinti VEP galios kitimus, nustatoma galios kitimo priklausomybė nuo vėjo krypties ir greičio. Todėl galios pokyčiai ir kiti analizuojami parametrai turi būti apskaičiuojami pagal vėjo kryptį – K :

$$K \in \{N, NNE, NE, ENE, E, ESE, SE, SSE, S, SSW, SW, WSW, W, WNW, NW, NNW\}.$$

Tada galios pokyčiai, įvertinus vėjo kryptį, gali būti nustatomi taip:

$$\Delta P_{K,i} = P_{K,i+1} - P_{K,i}, \quad (2.3)$$

kur $P_{K,i}$ ir $P_{K,i+1}$ – prie tos pačios vėjo krypties nustatytos gretimos galių vertės.

Pasirinktos vėjo krypties VEP galios pokyčių vidutinę vertę galima nustatyti tokia formule:

$$\overline{\Delta P_K} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta P_{K,i}, \quad (2.4)$$

kur $\Delta P_{K,i}$ – galios pokyčiai įvertinus vėjo kryptį; n – nustatytų galios pokyčių verčių skaičius.

Generuojamos galios pokyčių standartiniai nuokrypiai įvertinus vėjo kryptį gali būti nustatomi šia formule:

$$\sigma_K = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{1}{n-1} (\Delta P_{K,i} - \overline{\Delta P_K})^2}. \quad (2.5)$$

Dviejų VEP galios pokyčių koreliacijos koeficientai, įvertinus vėjo kryptis, gali būti nustatomi pagal tokią formulę:

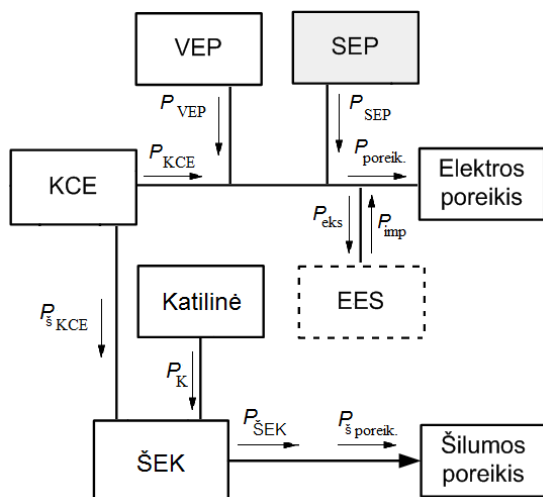
$$r_{K,12} = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta P_{K,1,i})(\Delta P_{K,2,i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta P_{K,1,i})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta P_{K,2,i})^2}}, \quad (2.6)$$

kur $\Delta P_{K,1i}$ ir $\Delta P_{K,2i}$ – pirmo parko ir antro parko i -ieji galios pokyčiai.

Vėjo krypties įtakos nustatymui VEP galios kitimui, turi būti sudaromi vidutinės galios pokyčių masyvai pagal vėjo kryptis.

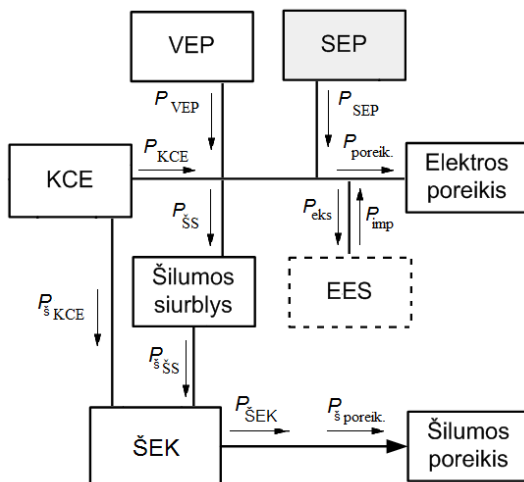
2.2. Vėjo elektrinių energijos balansavimas

Vėjo elektrinių parko energijos balansavimo modelis. Vėjo elektrinių generuojamos energijos balansavimo pagal vartotojų šilumos ir elektros poreikį galimybių tyrimui, balansuojančių įrengimų galių ir kitų techninių charakteristikų nustatymui bei darbo režimų energetikos sistemoje analizei sudaryti du, mažosios energetikos sistemos modeliai. Modeliai susideda iš vėjo elektrinių parko (VEP), gamtinėmis dujomis arba biodujomis kūrenamos kombinuoto ciklo elektrinės (KCE), šiluminės energijos kaupiklio (ŠEK) ir katilinės (žr. 2.2 pav.) arba šilumos siurblio (ŠS) su šilumos paėmimu iš žemės gelmių (žr. 2.3 pav.). Tolimesniais tyrimais nustatyta, kad šiltojo sezono metu, sumažėjus šilumos poreikiui ir dėl to pasikeitus kogeneracinės KCE darbo režimui, MES atsiranda elektros energijos trūkumas. Šiam energijos trūkumui sumažinti, naudoti elektros energijos kaupiklius yra netikslinga ir neefektyvu, todėl modeliai papildyti saulės elektrinių parkais (SEP). Pasiūlytuose modeliuose (žr. 2.2 pav. ir 2.3 pav.) vėjo elektrinių energiją balansuojanti KCE dirba pagal elektros apkrovos grafiką, todėl šilumą gamina nepriklausomai nuo jos poreikio. Jeigu pagaminama perteklinė šiluminė energija, tai ji kaupiama šiluminės energijos kaupiklyje, o vėliau, esant gaminamos šilumos deficitui, ji tiekama vartotojui pagal šilumos poreikį.



2.2 pav. Vėjo elektrinių parko energijos balansavimo modelio su KCE ir katiline struktūrinė schema

Ilgą laiką MES esant nedideliame elektros energijos poreikiui KCE tiekiamos šiluminės energijos gali neužtekti, tuomet šilumą sistemai tiekia katilinė (žr. 2.2 pav.).



2.3 pav. Vėjo elektrinių parko energijos balansavimo modelio su KCE ir šilumos siurbliu struktūrinė schema

Antrame modelyje (žr. 2.3 pav.) papildomai šiluminei energijai gaminti numatyti šilumos siurbliai vietoje katilinės. Esant perteklinei VEP generuojamai galiai ir mažam elektros poreikiui, šilumos siurbliai gamina šilumą ir ją tiekia vartotojams, o jos perteklių atiduoda šiluminės energijos kaupikliui. Šiluminės energijos kaupiklyje sukaupta šiluma vėliau pagal šiluminės energijos poreikį yra tiekiamą vartotojui. Išaugus elektros vartotojų poreikiui, šilumos siurblio apkrova

yra mažinama arba stabdoma, o šilumos poreikį užtikrina dirbanti kombinuoto ciklo elektrinė.

Remiantis aprašytais sąlygomis ir pateiktomis VEP energijos balansavimo schemomis (žr. 2.2 pav. ir 2.3 pav.) sudaromos MES valandinių vidutinių galių balanso lygtys, charakterizuojančios valandinę energiją. VEP energijos balansavimo modelio su KCE ir katiline valandinių galių balansai:

$$P_{\text{poreik.}} + P_{\text{eks}} = P_{\text{VEP}} + P_{\text{SEP}} + P_{\text{KCE}} + P_{\text{imp}}, \quad (2.7)$$

$$P_{\text{§ poreik.}} = P_{\text{§ KCE}} + P_{\text{K}} + P_{\text{§ EK}}. \quad (2.8)$$

VEP energijos balansavimo modelio su KCE ir šilumos siurbliu valandinių galių balansai:

$$P_{\text{poreik.}} + P_{\text{eks}} + P_{\text{§§}} = P_{\text{VEP}} + P_{\text{SEP}} + P_{\text{KCE}} + P_{\text{imp}}, \quad (2.9)$$

$$P_{\text{§ poreik.}} = P_{\text{§ KCE}} + P_{\text{§ §§}} + P_{\text{§ EK}}. \quad (2.10)$$

Abiem atvejais yra sprendžiamas tikslo funkcijos (angl. *Objective Function*) minimizavimo uždavinys:

$$\min (P_{\text{eks}}, P_{\text{imp}}), \quad (2.11)$$

kur $P_{\text{poreik.}}$ – elektros poreikio valandinė vidutinė galia; P_{eks} – elektros eksporto į EES valandinė vidutinė galia; P_{VEP} – vėjo elektrinių parko valandinė vidutinė galia; P_{SEP} – saulės elektrinių parko valandinė vidutinė galia; P_{KCE} – kombinuoto ciklo elektrinės valandinė vidutinė elektros galia; P_{imp} – elektros importo iš EES valandinė vidutinė galia; $P_{\text{§ poreik.}}$ – šilumos poreikio valandinė vidutinė galia; $P_{\text{§ KCE}}$ – kombinuoto ciklo elektrinės valandinė vidutinė šiluminė galia; P_{K} – katilinės valandinė vidutinė šiluminė galia; $P_{\text{§ EK}}$ – šiluminės energijos kaupiklio valandinė vidutinė šiluminė galia; $P_{\text{§§}}$ – šilumos siurblio valandinė vidutinė elektros galia; $P_{\text{§ §§}}$ – šilumos siurblio valandinė vidutinė šiluminė galia.

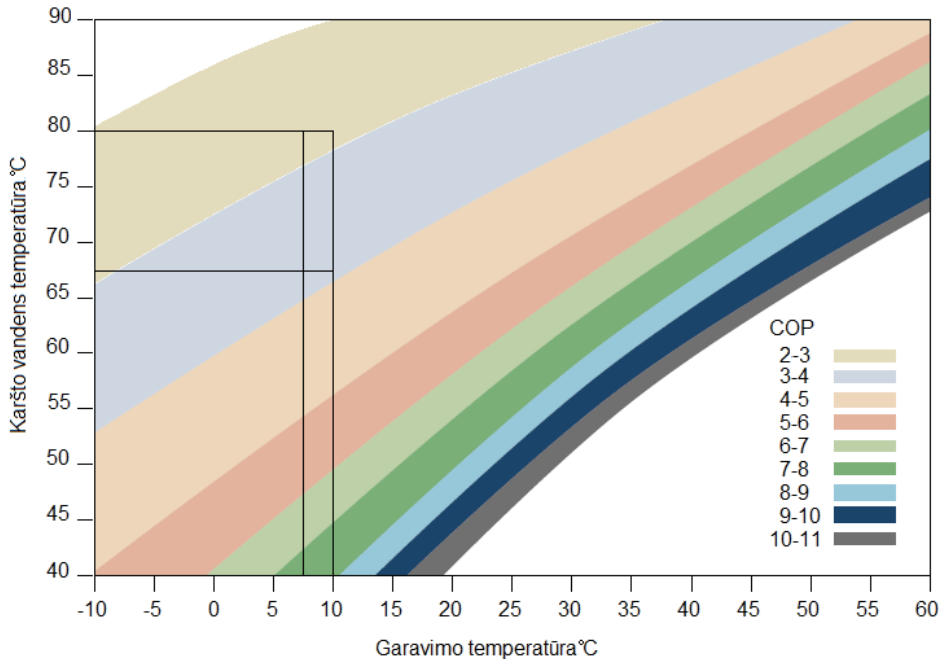
Naudojant sudarytus balansavimo modelius ir žinant elektros ir šilumos vartotojų realius vienerių metų valandinius grafikus bei meteorologinius vėjo greičio ir krypties, oro temperatūros, saulės spinduliuotės to pačio laikotarpio pateiktus duomenis, gali būti balansuojama VEP energija. Tam reikia nustatyti sudarytų modelių visų elementų charakteristikas.

Šilumos siurblys. Šilumos siurblio energijos keitimo galimybės nustatomos tokia formule:

$$P_{\text{§§§}} = P_{\text{§§}} \cdot COP_{\text{§§}}, \quad (2.12)$$

kur $P_{\text{§§§}}$ – šilumos siurblio išgaunama šiluminė galia (kW); $P_{\text{§§}}$ – siurblio vartojama elektrinė galia (kW); $COP_{\text{§§}}$ – šilumos siurblio naudingumo koeficientas (angl. *Coefficient of Performance*).

Šilumos siurblio naudingumo koeficiento reikšmė kinta priklausomai nuo išgarinimo, kondensacijos ir išeinančio vandens temperatūros. Aukštatemperatūri amoniakinio šilumos siurblio naudingumo koeficiento charakteristika su darbe skaičiavimams taikoma koeficiento kitimo zona, pateikta 2.4 paveiksle.



2.4 pav. Šilumos siurblio naudingumo koeficiento priklausomybė nuo garavimo ir karšto vandens temperatūrų (Emerson Climate Technologies, 2012)

Kombinuoto ciklo elektrinė. Kombinuoto ciklo elektrinės veikimo naudingumo koeficientas gali būti nustatomas tiesioginiu metodu pagal tokią formulę:

$$\eta_{\text{KCE}} = \frac{E_{\text{d.t.}} + E_{\text{g.t.}} + E_{\text{š.}}}{E_{\text{B}}} \cdot k_{\text{d}}, \quad (2.13)$$

kur $E_{\text{d.t.}}$ – KCE dujų turbinos pagaminta elektros energija (kWh); $E_{\text{g.t.}}$ – KCE garo turbinos pagaminta elektros energija (kWh); $E_{\text{š.}}$ – KCE pagaminta šiluminė energija, (kWh); E_{B} – deginamo kuro išskiriama energija (kWh); k_{d} – dimensijų suvienodinimo koeficientas. Literatūroje (CHP technologies, 2016) nurodoma, kad įprastai KCE dujų turbinos elektrinė galia sudaro iki 67 % nuo bendros įrengtos elektrinės galios, o apie 33 % sudaro garo turbinos elektrinė galia.

Į šildymo sistemą KCE atiduodamą šiluminę galią $P_{\text{šKCE}}$ (kW) galima rasti iš tokios formulės:

$$P_{\text{šKCE}} = q_{\text{term}} \cdot 1,163 \cdot (\vartheta_{\text{p}} - \vartheta_{\text{g}}), \quad (2.14)$$

kur q_{term} – termofikacinio vandens srautas (m^3/h); ϑ_{p} – paduodamo termofikacinio vandens temperatūra ($^{\circ}\text{C}$); ϑ_{g} – grįžtančio termofikacinio vandens temperatūra ($^{\circ}\text{C}$).

Šiluminės energijos kaupiklis. Šiluminės energijos kaupiklio akumuluojama vidutinė valandinė šiluminė galia (Martinaitis, Šiupšinskas ir Narbutis, 2004) yra lygi:

$$P_{\text{SEK}} = \frac{V_{\text{akum}} \cdot \rho \cdot c_p \cdot \vartheta}{3600} \cdot \varepsilon_t, \quad (2.15)$$

kur V_{akum} – šiluminės energijos kaupiklio akumuliacinė talpa, (m^3); ρ – vandens tankis, lygus 998 kg/m^3 ; c_p – vandens savitoji šiluma, $4,18 \text{ kJ/(kg } ^\circ\text{C)}$; ϑ – temperatūrų skirtumas, ($^\circ\text{C}$); ε_t – tūrio išnaudojimo koeficientas, kuris gerai suprojektuotoms talpoms siekia iki 90 %.

Šilumos gamybos įrenginiui dirbant nevienodu režimu ir žinant poreikio ir gamybos apkrovų reikšmes, didžiausias, reikiamas akumuliuoti šilumos kiekis E_{max} (kWh) gali būti nustatomas taip (Martinaitis, Šiupšinskas ir Narbutis, 2004):

$$E_{\text{max}} = \left(\sum_{i=1}^{\tau} E_{i,\text{gam.}} - \sum_{i=1}^{\tau} E_{i,\text{por.}} \right) \rightarrow \max, \quad (2.16)$$

kur $E_{i,\text{gam.}}$ – atskirų laikotarpių pagamintos šilumos kiekis (kWh); $E_{i,\text{por.}}$ – atskirų laikotarpių sunaudotos šilumos kiekis (kWh).

Nustačius šiluminės energijos kaupiklio akumuliuojamą šilumą ir įvertinus energijos kitimą kaupiklio talpoje nuo E_{max} iki E_{min} galima apskaičiuoti jos tūrį. Šilumai akumuliuojant, esant pastoviam vandens tūriui ir keičiant šilumnešio temperatūras, akumulatoriaus tūris V_{akum} apskaičiuojamas tokia formule:

$$V_{\text{akum}} = \frac{3600 \cdot (E_{\text{max}} - E_{\text{min}})}{\rho \cdot c_p \cdot (\vartheta_{\text{max}} - \vartheta_{\text{min}})}, \quad (2.17)$$

kur ϑ_{max} , ϑ_{min} – atitinkamai aukščiausia ir žemiausia šilumnešio temperatūra nagrinėjamu laikotarpiu ($^\circ\text{C}$).

Akumuliacinės talpos optimalus tūris yra svarbus VEP galias balansuojančių įrenginių darbo režimams.

Saulės elektrinių parkas. Saulės elektrinių parko generuojama galia ir pagaminamos elektros energijos kiekis priklauso nuo saulės spinduliuotės, patenkančios ant modulių paviršiaus bei energijos konversijos nuostolių. Šie dydžiai gali būti apskaičiuojami pagal pateiktas formules.

SE modulių generuojama galia P_{pv} išreiškiama pagal formulę:

$$P_{\text{PV}} = P_{\text{inst}} \cdot \frac{I_s}{I_{\text{STC}}} \cdot ((1 - \gamma_s) \cdot (\vartheta_{\text{elem}} - \vartheta_{\text{STC}})), \quad (2.18)$$

kur P_{inst} – saulės modulių instaliuota galia, (W); I_s – saulės spinduliuotė patenkanti ant paviršiaus plokštumos, (W/m^2); I_{STC} – saulės spinduliuotė standartinėmis sąlygomis (1000 W/m^2); γ_s – modulio temperatūrinis naudingumo koeficientas; ϑ_{elem} – elemento darbinė temperatūra; ϑ_{STC} – elemento darbinė temperatūra standartinėmis sąlygomis, ($25 \text{ } ^\circ\text{C}$).

Elemento darbinė temperatūra apskaičiuojama tokia formule (EMD International A/S):

$$g_{\text{elem1}} = g_{\text{at}} + I_S \cdot \left(\frac{NOCT - 20^\circ \text{C}}{800 \text{W/m}^2} \right), \quad (2.19)$$

kur g_{at} – aplinkos temperatūra ($^\circ\text{C}$); $NOCT$ – nominali elemento darbinė temperatūra (angl. *Nominal Operating Cell Temperature*).

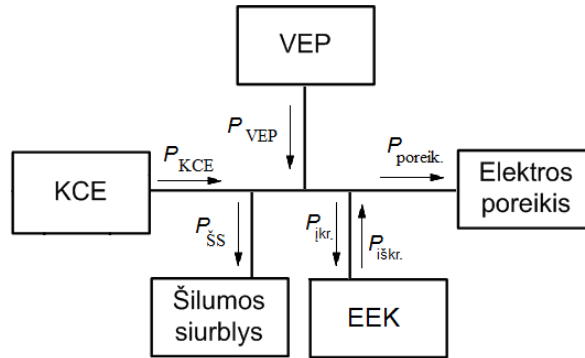
Saulės elektrinių parko generuojama galia apskaičiuojama įvertinus energijos konversijos nuostolius:

$$P_{\text{SEP}} = P_{\text{pv}} \cdot 1000 \cdot (1 - \lambda_{\text{misc}}), \quad (2.20)$$

kur P_{SEP} – saulės elektrinių parko generuojama galia (kW); λ_{misc} – nuostolių koeficientas.

2.3. Vėjo elektrinių galios balansavimas

Vėjo elektrinių parko galios balansavimo modelis. Vėjo elektrinių kintančių galių balansavimo galimybėms nustatyti sudarytas mažosios elektros energetikos sistemos (toliau – MEES) matematinis modelis. Modelis susideda iš vėjo elektrinių parko, kombinuoto ciklo elektrinės, šilumos siurblio, elektros energijos kaupiklio (toliau – EEK) ir elektros vartotojų (žr. 2.5 pav.). Smulkių saulės elektrinių operatyvus galios valdymas yra sudėtingas ir brangus, dėl to jos į galios balansavimo modelį nėra įtrauktos.



2.5 pav. Vėjo elektrinių parko galios balansavimo modelio struktūrinė schema

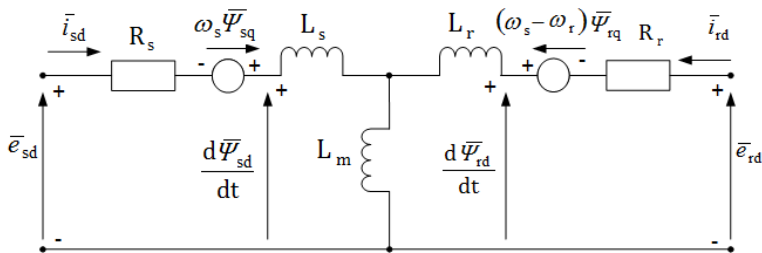
MEES balansuojamos galios matematinis modelis yra suformuojamas iš atskirų sistemos elementų, elektrinių galios grandinių ekvivalentinių schemų ir valdymo modulių, kurie aprašomi algebrinėmis ir diferencialinėmis lygtimis. MEES matematinių modelių funkcinis suderinamumas bei kintamųjų pradinės sąlygos nustatomos galių balansų lygtimis įvertinant ir susidariusius aktyviųjų ir reaktyviųjų galių nuostolius:

$$\begin{cases} P_{\text{VEP}} + P_{\text{KCE}} \pm P_{\text{EEK}} - P_{\text{ŠS}} - P_{\text{poreik.}} - \Sigma P_{\Delta} = 0 \\ Q_{\text{VEP}} \pm Q_{\text{KCE}} \pm Q_{\text{EEK}} - Q_{\text{ŠS}} - Q_{\text{poreik.}} - \Sigma Q_{\Delta} = 0 \end{cases} \quad (2.21)$$

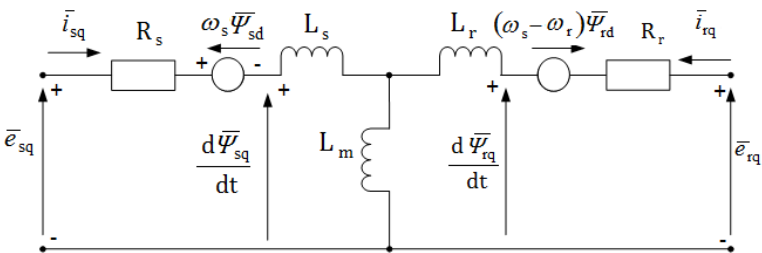
kur P_{VEP} , Q_{VEP} – vėjo elektrinių parko aktyvioji ir reaktyvioji galios; P_{KCE} , Q_{KCE} – kombinuoto ciklo elektrinės aktyvioji ir reaktyvioji galios; P_{EEK} , Q_{EEK} – elektros energijos kaupiklio aktyvioji ir reaktyvioji galios; $P_{\dot{s}s}$, $Q_{\dot{s}s}$ – šilumos siurblio aktyvioji ir reaktyvioji galios; $P_{\text{poreik.}}$, $Q_{\text{poreik.}}$ – vartotojo aktyvioji ir reaktyvioji galios; ΣP_{Δ} , ΣQ_{Δ} – suminiai aktyviosios ir reaktyviosios galios nuostoliai.

Vėjo elektrinių generuojamos ir vartotojo apkrovos aktyviosios galios balanso palaikymui parenkami ir sudaromi šilumos siurblio asinchroninio variklio (toliau – AV), dujų turbinos sinchroninio generatoriaus (toliau – SG) ir elektros energijos kaupiklio matematiniai modeliai galiai valdyti.

Šilumos siurblio asinchroninio variklio su faziniu rotoriumi matematinis modelis sudaromas remiantis teorinės elektrotechnikos dėsniais pagal 2.6 paveiksle pateiktą standartinės asinchroninės mašinos su faziniu rotoriumi ekvivalentinė schema ir aprašomas algebrinėmis bei diferencialinėmis lygtimis Parko koordinatėjų sistemoje.



d - koordinatės ekvivalentinė schema



q - koordinatės ekvivalentinė schema

2.6 pav. Asinchroninio variklio su faziniu rotoriumi galios grandinės ekvivalentinė schema (Kundur, 1994)

Šilumos siurblio AV modeliu analizuojami aktyviosios ir reaktyviosios galios srautai asinchroninio variklio statoriaus ir rotoriaus galios grandinėse. AV matematiniam modelyje neįvertinama statoriaus grandinės asimetrija, aukštesnio laipsnio harmonikos, temperatūrų kitimai nuo išorinių sąlygų ir nelineinės įmagnetinimo charakteristikos. Statoriaus ir rotoriaus galios grandinių aktyviųjų ir reaktyviųjų galių vyksmai analizuojami taikant integruojamą laiko intervalo metodą.

Šilumos siurblio AV statoriaus galios grandinės elektrovarai galioja diferencialinės lygtys:

$$\begin{cases} \bar{e}_{sd} = \bar{i}_{sd} R_s + \frac{d \bar{\Psi}_{sd}}{dt} + j \omega_s \bar{\Psi}_{sq} \\ \bar{e}_{sq} = \bar{i}_{sq} R_s + \frac{d \bar{\Psi}_{sq}}{dt} + j \omega_s \bar{\Psi}_{sd} \end{cases}, \quad (2.22)$$

kur $\bar{e}_{sd}, \bar{e}_{sq}$ – statoriaus galios grandinės elektrovaros vektoriaus dedamosios d-q koordinačių sistemoje; $\bar{\Psi}_{sd}, \bar{\Psi}_{sq}$ – statoriaus galios grandinės magnetinio srauto vektoriaus dedamosios d-q koordinačių sistemoje; R_s – statoriaus galios grandinės aktyvioji varža; $\bar{i}_{sd}, \bar{i}_{sq}$ – statoriaus galios grandinės srovės vektoriaus dedamosios d-q koordinačių sistemoje; ω_s – statoriaus elektrinis kampinis dažnis.

Šilumos siurblio AV rotoriaus galios grandinės elektrovaros diferencialines lygtis galima užrašyti:

$$\begin{cases} \bar{e}_{rd} = \bar{i}_{rd} R_r + \frac{d \bar{\Psi}_{rd}}{dt} - j(\omega_s - \omega_r) \bar{\Psi}_{rq} \\ \bar{e}_{rq} = \bar{i}_{rq} R_r + \frac{d \bar{\Psi}_{rq}}{dt} - j(\omega_s - \omega_r) \bar{\Psi}_{rd} \end{cases}, \quad (2.23)$$

kur $\bar{e}_{rd}, \bar{e}_{rq}$ – rotoriaus galios grandinės elektrovaros vektoriaus dedamosios d-q koordinačių sistemoje; $\bar{\Psi}_{rd}, \bar{\Psi}_{rq}$ – rotoriaus galios grandinės magnetinio srauto vektoriaus dedamosios d-q koordinačių sistemoje; R_r – rotoriaus galios grandinės aktyvioji varža; $\bar{i}_{rd}, \bar{i}_{rq}$ – rotoriaus galios grandinės srovės vektoriaus dedamosios d-q koordinačių sistemoje; ω_r – rotoriaus elektrinis kampinis dažnis.

AV statoriaus galios grandinės magnetiniai srautai aprašomi tokiomis algebrinėmis lygtimis:

$$\begin{cases} \bar{\Psi}_{sd} = \bar{i}_{sd} L_s + \bar{i}_{rd} L_m \\ \bar{\Psi}_{sq} = \bar{i}_{sq} L_s + \bar{i}_{rq} L_m \end{cases}, \quad (2.24)$$

kur L_s – statoriaus galios grandinės induktyvumas; L_m – statoriaus ir rotoriaus galios grandinių tarpusavio induktyvumas.

AV rotoriaus galios grandinės magnetiniai srautai aprašomi tokiomis algebrinėmis lygtimis:

$$\begin{cases} \bar{\Psi}_{rd} = \bar{i}_{sd} L_r + \bar{i}_{rd} L_m \\ \bar{\Psi}_{rq} = \bar{i}_{sq} L_r + \bar{i}_{rq} L_m \end{cases}, \quad (2.25)$$

kur L_r – rotoriaus galios grandinės induktyvumas.

Gautas asinchroninio variklio statoriaus ir rotoriaus galios grandinių diferencialines lygtis galima transformuoti į matricinę formą:

$$\begin{bmatrix} \bar{e}_{sd} \\ \bar{e}_{sq} \\ \bar{e}_{rd} \\ \bar{e}_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + \frac{d}{dt} L_s & -\omega_s L_s & pL_m & -\omega_s L_m \\ \omega_s L_s & R_s + \frac{d}{dt} L_s & \omega_s L_m & pL_m \\ pL_s & (\omega_s - \omega_r) L_m & R_r + \frac{d}{dt} L_r & (-\omega_s - \omega_r) L_r \\ (\omega_s - \omega_r) L_m & pL_m & (\omega_s - \omega_r) L_r & R_r + \frac{d}{dt} L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_{sd} \\ \bar{i}_{sq} \\ \bar{i}_{rd} \\ \bar{i}_{rq} \end{bmatrix}, \quad (2.26)$$

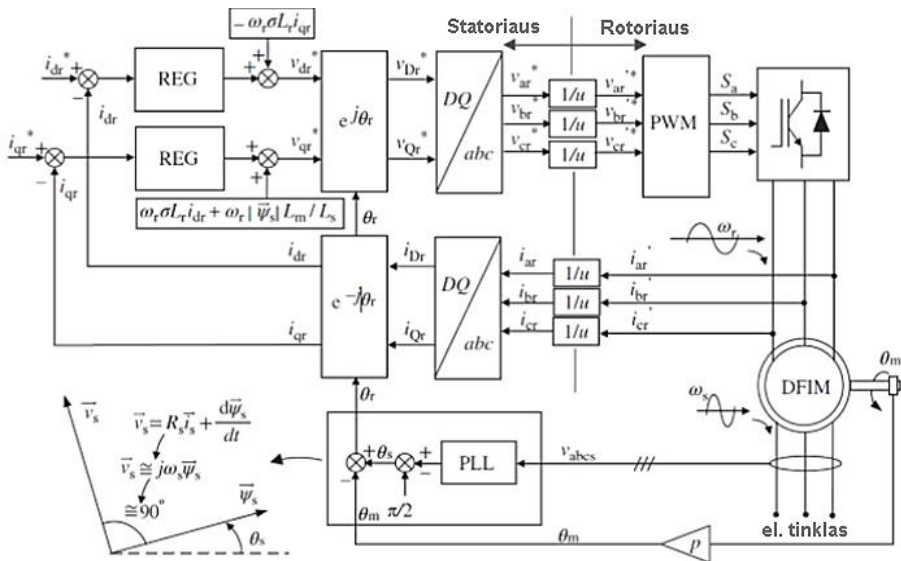
kur p – polių skaičius rotoriuje.

Elektromagnetinio sukimo momento (T_{am}), statoriaus ir rotoriaus aktyviosios (P_{ae}) ir reaktyviosios (Q_{ae}) galių nustatymui, sudaroma algebrinių lygčių sistema:

$$\begin{cases} T_{am} = \frac{3}{4} pL_m (\bar{i}_{rd} \bar{i}_{sq} - \bar{i}_{rq} \bar{i}_{sd}) \\ P_{ae} = \left[\frac{3}{2} (\bar{e}_{sd} \bar{i}_{sd} - \bar{e}_{sq} \bar{i}_{sq}) + \frac{3}{2} (\bar{e}_{rd} \bar{i}_{rd} - \bar{e}_{rq} \bar{i}_{rq}) \right] \\ Q_{ae} = \left[\frac{3}{2} (\bar{e}_{sq} \bar{i}_{sd} - \bar{e}_{sd} \bar{i}_{sq}) + \frac{3}{2} (\bar{e}_{rq} \bar{i}_{rd} - \bar{e}_{rd} \bar{i}_{rq}) \right] \end{cases} \quad (2.27)$$

Keičiant rotoriaus elektrovaros ar srovės vektorių fazes galima greitai keisti sukimo momento ir aktyviosios bei reaktyviosios galių vertes (2.27).

Šilumos siurblio AV valdymui parinktas vektorinis matematinis modelio valdymo metodas (žr. 2.7 pav.). Modelio valdymo vektoriinių dedamųjų nustatymui analizuojamos srovės ir įtamos grandinės struktūros. Fazinis derinimo kontūras PLL (angl. *Phase Locked Loop*) yra taikomas statoriaus grandinės sinchronizavimui pagal elektros energetikos sistemą, taip užtikrinant patikimą parametų įvertinimą prie nedidelių sisteminių parametų švytavimų ir harmonikų.



2.7 pav. Asinchroninio variklio valdymo sistemos matematinis modelis (Kundur, 1994)

Šilumos siurblio AV blokinėje valdymo schemoje yra sudarytos srovės valdymo struktūros, kuriomis per keitiklio sistemą formuojamas rotoriaus grandinės valdymas. Vienas iš modelio svarbiausių reikalavimų – sistemos matematinio modelio valdymo parametrų pulsacijų ir svyravimų filtravimas bei panaikinimas. Šiam tikslui, abiemis d-q koordinačių sistemos grandims panaudojant tarpusavio struktūrų korekcijos pradines sąlygas, taikomos proporcingojo integralo struktūros, kurios atlieka regulatoriaus funkciją. Modelyje yra nevertinamas konverterio įtampos šaltinio ir analizuojamų ar kintančių parametrų nevienalaikiškumas.

Matematinio modelio ekvivalentinės sistemos srovės valdymo struktūros yra aprašomos diferencialinėmis lygtimis ir transformuojamos į polinę d-q koordinačių sistemą, kurioje proporcingojo integralo grandimis formuojamas rotoriaus elektros grandinės srovės stiprinimas. Šiuo pagrindu proporcingojo integralo srovės stiprinimo regulatoriaus lygties, *Laplace* transformacijoje, perdavimo funkcija yra:

$$\bar{i}_{rd} = \bar{i}'_{rd} \frac{sK_p + K_i}{\left(\frac{1 - L_m^2}{L_s L_r} \right) + (K_p + R_r) s + K_i}, \quad (2.28)$$

$$\bar{i}_{rq} = \bar{i}'_{rq} \frac{sK_p + K_i}{\left(\frac{1 - L_m^2}{L_s L_r} \right) + (K_p + R_r) s + K_i}, \quad (2.29)$$

kur K_p – proporcingumo koeficientas; K_i – integralumo koeficientas; s – operatorius.

Iš suformuotų srovės valdymo grandžių kontūrų ir nustatytų magnetinio srauto elektrinio kampo yra sudaroma bendroji valdymo sistemos lygtis:

$$\begin{cases} J_s \frac{d\omega_r}{dt} = T_{am} - T_{ae} \\ \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r \end{cases}, \quad (2.30)$$

kur J_s – mechaninis inercijos momentas; θ_r – elektrinis rotoriaus kampas; T_{am} – mechaninis pasipriešinimo momentas; T_{ae} – asinchroninio variklio elektromagnetinis sukimo momentas.

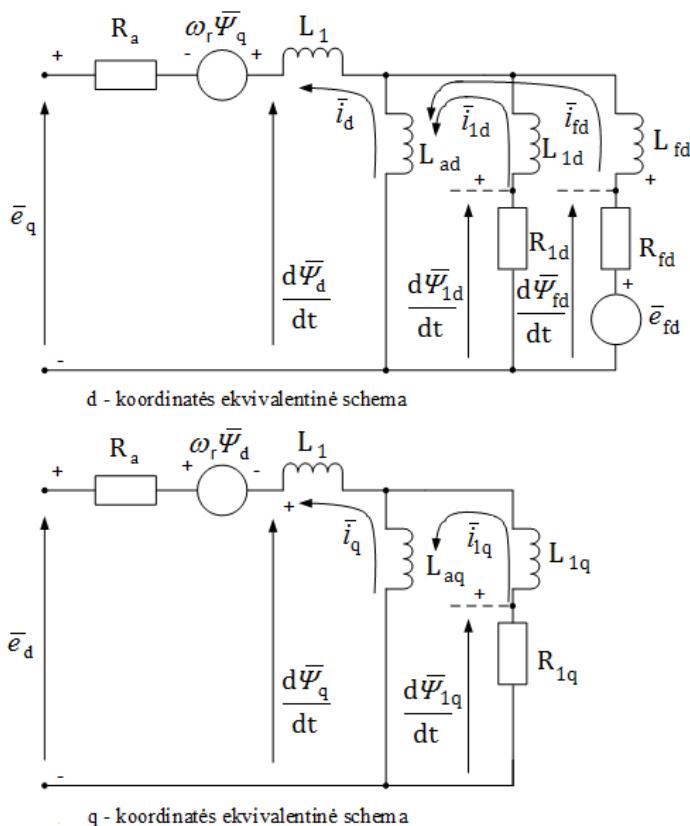
AV rotoriaus srovė yra proporcinga sukimo momentui. Šiuo atveju rotoriaus srovė dalyvauja aktyviosios ir reaktyviosios galios valdymo procese. Todėl pasirinktame darbo režime, rotoriaus apsukų regulatorius priklauso nuo asinchroninio variklio rotoriaus srovės ir įtampos parametrų bei elektromagnetinio sukimo momento T_{ae} vertės. Rotoriaus valdymo sistemos funkcija yra aktyviosios galios balanso palaikymas numatytose ribose, kuris apibrėžiamas vardine AV aktyviaja galia ir jos valdymo diapazonų. AV galios valdymo sistema mikrosekundžių sparta gali keisti aktyviają galią numatytose ribose valdant rotoriaus elektros grandinės įtampos ir srovės vektorius (Deksnyš, Ališauskas, 2013). Įtampos ir srovės vektorių pokytis priklauso nuo valdymo diapazono, susieto su elektromagnetiniu sukimo ir mechaniniu pasipriešinimo momentais, kurie formuoja

tarpusavio įtampos ir srovės vektorių kitimo elektrinius kampus. Šių kampų sąveika ir palaiko aktyviosios galios balansą numatytoje ribose.

Mechaninė asinchroninės mašinos matematinio modelio dalis valdoma atskirai PI regulatoriais, kurių parametrams įtaką turi rotoriaus inercijos momentas.

KCE dujų turbinos sinchroninio generatoriaus galios grandinės matematinis modelis. Standartinio sinchroninio generatoriaus (toliau – SG) galios grandinės matematinis modelis sudaromas iš ekvivalentinių statoriaus ir rotoriaus schemų (žr. 2.8 pav.) (Shenbo, Tang, 2006). Basisukančio rotoriaus galios grandinės žadinimo apvija sukuria magnetinį srautą Ψ_{fd} , todėl matematinį modelį patogiau transformuoti į Parko d-q koordinačių sistemą (Kulkarni, Thosar, 2013; Liwei Wang, Hermann, Dommel, 2007). Taip žadinimo valdymo sistemos modeliui išskiriamos realios ir menamosios vektorių dedamosios.

Žadinimo grandinėje esanti slopinimo apvija veikia SG matematinio modelio funkcionalumą. Žadinimo ir slopinimo apvijos sukuria atskirus elektromagnetinių laukų srautus, kurie matematiniam modelyje yra įvertinami ir transformuojami. Transformacija leidžia įvertinti parametrų mažus svyravimus matematiniam modelyje ir juos stabilizuoti.



2.8 pav. Sinchroninio generatoriaus galios grandinės ekvivalentinė schema (Shenbo, Tang, 2006)

Išreiškiant dujų turbinos SG galios grandinės matematinį modelį algebrinėmis diferencialinėmis lygtimis daroma prielaida, kad modelyje nevertinamos statoriaus grandinės asimetrija, harmonikos, temperatūrų kitimai nuo išorinių sąlygų, nelineinės įmagnetinimo charakteristikos (Agamalov, 2012). Tuomet statoriaus galios grandinę galima išreikšti diferencialinių lygčių sistema:

$$\begin{cases} \bar{e}_d = \frac{d\bar{\Psi}_d}{dt} - \omega_r \bar{\Psi}_q - R_a \bar{i}_d \\ \bar{e}_q = \frac{d\bar{\Psi}_q}{dt} - \omega_r \bar{\Psi}_d - R_a \bar{i}_q \end{cases}, \quad (2.31)$$

kur \bar{e}_d, \bar{e}_q – galios grandinės elektrovaros vektoriaus dedamosios d-q koordinačių sistemoje; $\bar{\Psi}_d, \bar{\Psi}_q$ – magnetinio srauto vektorius d-q koordinačių sistemoje; R_a – aktyvioji apkrovos varža; \bar{i}_d, \bar{i}_q – statoriaus galios grandinės srovės vektorius d-q koordinačių sistemoje; ω_r – rotoriaus kampinis dažnis.

Magnetiniai srautai Parko koordinatėse yra aprašomi algebrinių lygčių sistemomis:

$$\begin{cases} \bar{\Psi}_d = (L_{ad} + L_1) \bar{i}_d + L_{ad} \bar{i}_{fd} + L_{ad} \bar{i}_{1d} \\ \bar{\Psi}_q = (L_{aq} + L_1) \bar{i}_q + L_{1q} \bar{i}_{1q} \\ \bar{\Psi}_{fd} = (L_{aq} + L_1) \bar{i}_d + L_{fd} \bar{i}_{fd} \end{cases}, \quad (2.32)$$

kur L_{ad}, L_{aq} – oro tarpelio induktyvumas d-q koordinačių sistemoje; L_1 – sklaidos induktyvumas; $\bar{i}_{1d}, \bar{i}_{1q}$ – sklaidos srovės vektorius d-q koordinačių sistemoje; \bar{i}_{fd} – žadinimo srovės vektoriaus projekcija į d ašį.

Rotoriaus žadinimo ir slopinimo galios grandinės aprašomos diferencialinių lygčių sistema:

$$\begin{cases} \bar{e}_{fd} = R_{fd} \bar{i}_{fd} + \frac{d\bar{\Psi}_{fd}}{dt} \\ 0 = R_{1d} \bar{i}_{1d} + \frac{d\bar{\Psi}_{1d}}{dt} \\ 0 = R_{1q} \bar{i}_{1q} + \frac{d\bar{\Psi}_{1q}}{dt} \end{cases}, \quad (2.33)$$

kur $\bar{\Psi}_{fd}$ – žadinimo magnetinio srauto vektoriaus projekcija į d ašį; \bar{i}_{fd} – žadinimo srovės vektoriaus projekcija į d ašį; L_1 – sklaidos induktyvumas; R_{1d}, R_{1q} – sklaidos aktyvioji varža d-q koordinačių sistemoje; $\bar{\Psi}_{1d}, \bar{\Psi}_{1q}$ – sklaidos magnetinio srauto vektorius d-q koordinačių sistemoje.

Nevertinant galios grandinėje mažą įtaką turinčių veiksnių, suprastinamos statoriaus žadinimo ir slopinimo grandinių lygtys (2.32, 2.33). Sinchroninio generatoriaus matematinio modelio lygtys transformuojamos matricinėje formoje:

$$\begin{bmatrix} \bar{e}_d \\ \bar{e}_q \\ \bar{e}_{fd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_a & 0 \\ 0 & 0 & R_{fd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_d \\ \bar{i}_q \\ \bar{i}_{fd} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \bar{\Psi}_d \\ \bar{\Psi}_q \\ \bar{\Psi}_{fd} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -\omega_r \bar{\Psi}_q \\ \omega_r \bar{\Psi}_d \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2.34)$$

Nevertinant mažą įtaką turinčių veiksmų sinchroninio generatoriaus darbo režimams, modelio magnetinių srautų algebrinių lygčių sistema (2.32) transformuojama į matricinę formą:

$$\begin{bmatrix} \bar{\Psi}_d \\ \bar{\Psi}_q \\ \bar{\Psi}_{fd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (L_{ad} + L_1) & 0 & L_{ad} \\ 0 & (L_{aq} + L_1) & 0 \\ (L_{ad} + L_1) & 0 & L_{fd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_{fd} \\ \bar{i}_{1q} \\ \bar{i}_{fd} \end{bmatrix} + \bar{i}_{1q} \begin{bmatrix} L_{ad} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2.35)$$

Toliau nustatomas elektromagnetinis sukimo momentas, aktyviosios ir reaktyviosios galios ir sudaroma algebrinių lygčių sistema, kuri įgauna pavidalą:

$$\begin{cases} T_{sm} = \frac{3}{4} p (\bar{\Psi}_{fd} \bar{i}_q - \bar{\Psi}_{fq} \bar{i}_d) \\ P_{se} = \frac{3}{2} (\bar{e}_d \bar{i}_d - \bar{e}_q \bar{i}_q) \\ Q_{se} = \frac{3}{2} (\bar{e}_q \bar{i}_d - \bar{e}_d \bar{i}_q) \end{cases}, \quad (2.36)$$

kur T_{sm} – mechaninis sukimo momentas; p – polių skaičius rotoriuje.

Remiantis antruoju Niutono dėsniumi galima parašyti mechaninio judesio momento ir rotoriaus padėties diferencialinių lygčių sistemą:

$$\begin{cases} J_s \frac{d\omega_r}{dt} = T_{sm} - T_{se} \\ \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r \end{cases}, \quad (2.37)$$

kur J_s – mechaninis inercijos momentas; θ_r – elektrinis rotoriaus kampas; T_{sm} – mechaninis pasipriešinimo momentas; T_{se} – sinchroninio generatoriaus elektromagnetinis sukimo momentas.

Dujų turbinos sinchroninio generatoriaus žadinimo valdymo matematinio modelio darbo režimų suderinamumas. Žadinimo sistemos lygintuvo apkrovos ir sistemos komutacijos vyksmai aprašomi matematinių lygčių sistemų sprendiniais. Kintamosios srovės šaltinių moduluose lygintuvų sistemų grandyse susiformuoja vidinė pilnutinė varža, kuri sistemos valdyme sukelia nelinijinius įtampas kitimus ir padidina apkrovą. Trifazio tiltelio schemeje modeliuojami trys skirtingi darbo režimai ir nustatomi charakteringi lygintuvo apkrovos parametrai (Benalia, 2011).

Norit įvertinti, sinchroninio generatoriaus, tiriamųjų parametrų svyravimus užduotais darbo režimais, nustatoma vardinė galios grandinės srovė $I_n > 1.0$. Tuomet šio modelio darbo režimo srovės ir elektrovartos priklausomybės išreiškiamos algebrinėmis nelygybėmis:

$$I_n < 0,433, \text{ tai } E_{\text{ex}} = 1 - \frac{1}{\sqrt{3}} I_n, \quad (2.38)$$

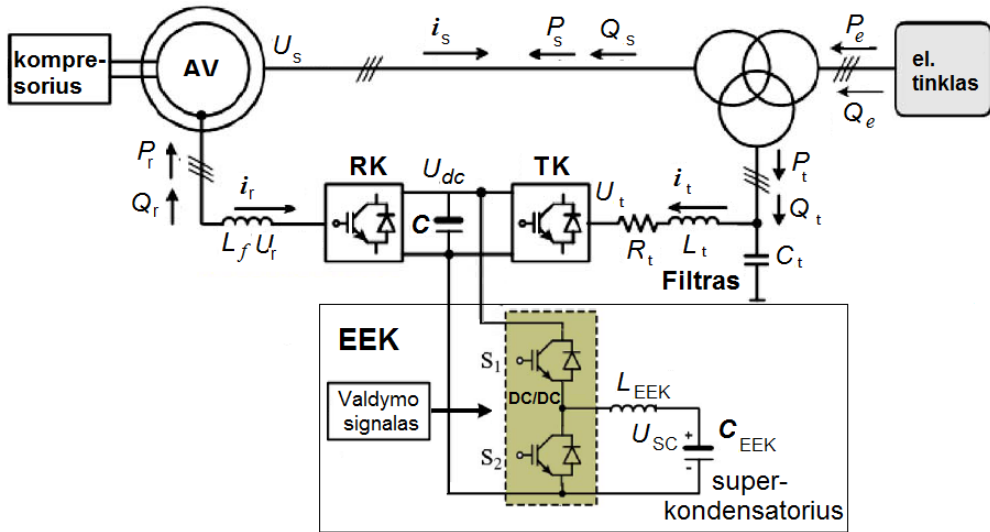
$$0,433 < I_n < \frac{3}{4}, \text{ tai } E_{\text{ex}} = \sqrt{\frac{3}{4} - I_n^2}, \quad (2.39)$$

$$\frac{3}{4} < I_n < 1,0, \text{ tai } E_{\text{ex}} = \sqrt{3}(1 - I_n), \quad (2.40)$$

kur I_n – vardinė transformuota statoriaus galios grandinės srovė; E_{ex} – transformuota statoriaus galios grandinės įtampa.

E_{fdmax} yra žadinimo sistemos modelio maksimalios įtampos ribos, priklausomos nuo magnetinio lauko dedamosios įsisotinimo. Įtampos reguliatorius žadinimo sistemos matematiniam modelyje atskirtas transformacijos struktūromis (Singh, 2011). SG matematinio modelio žadinimo valdymo sistemos parametru laikoma pastoviosios, susietos su apvijų indukcijos valdymu ir inerciniais sukimo momentais bei fizikiniais dėsniais.

Elektros energijos kaupiklio matematinis modelis skirtas balansuoti trumpalaikį, iki 1 s trukmės MEES galios kitimą. Tam sukuriama EEK matematinis modelis, kurio superkondensatorius C_{EEK} per nuolatinės srovės keitiklių DC/DC dvipolius tranzistorius yra prijungtas prie šilumos siurblio asinchroninio variklio su faziniu rotoriumi DC/AC keitiklių nuolatinės srovės grandinės (žr. 2.9 pav.).



2.9 pav. Elektros energijos kaupiklio ir šilumos siurblio modelio schema

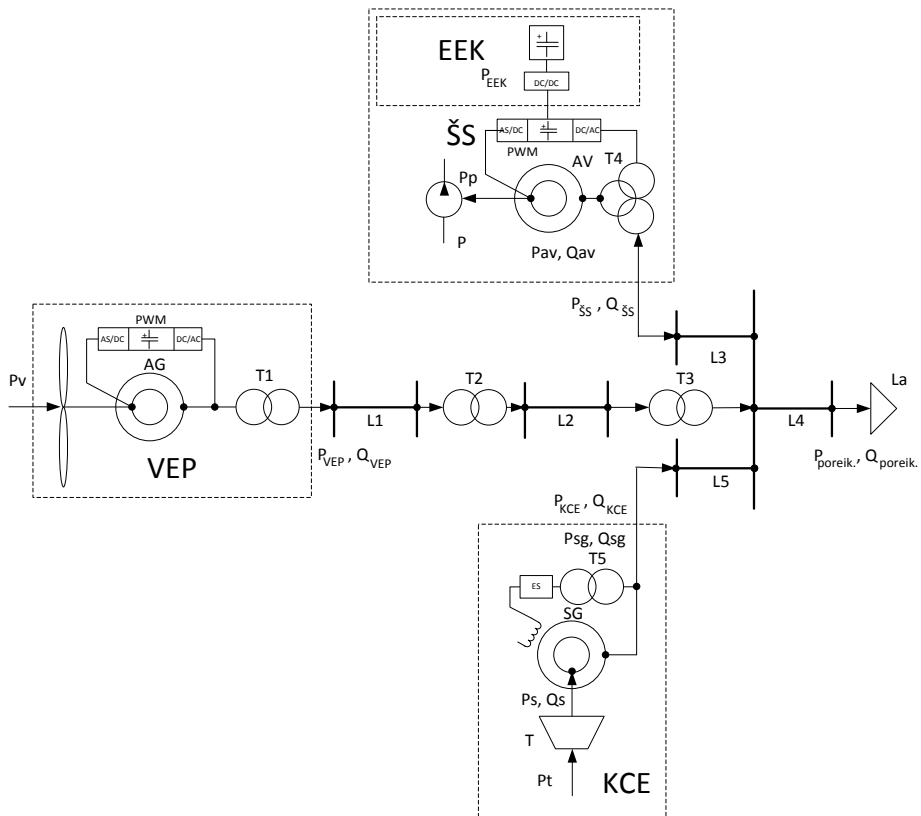
EEK superkondensatorius yra valdomas DC/DC keitiklio tranzistorių S_1 ir S_2 užtūromis, priklausomai nuo AV rotoriaus galios P_r ir elektros tinklo galios P_t dydžių palyginimo rotoriaus keitiklyje RK ir tinklo keitiklyje TK. Esant galiai $P_r < P_t$ superkondensatorius krausis, o esant $P_r > P_t$ išsikraus, t. y. atiduos galią į

MEES. Galios balansavimui reikalinga superkondensatoriaus talpa nustatoma formule (Qu, 2011):

$$C_{EEK} = \frac{2P_n t_n}{U_{SC}^2}, \quad (2.41)$$

kur C_{EEK} – superkondensatoriaus talpa, F; P_n – vardinė SC galia, W; U_{SC} – nominali superkondensatoriaus įtampa, V; t_n – SC vardinės galios palaikymo laikas, s.

Vėjo elektrinių parko galių balansavimo galimybėms nustatyti iš aprašytų sistemos elementų sudaromas visos MEES galios balansavimo modelis (žr. 2.10 pav.).



2.10 pav. Vėjo elektrinių parko galios balansavimo modelis

Modeliuojamoje elektros energetikos sistemoje aktyviosios galios balansas nustatomas lygybe tarp generatorių generuojamos ir vartotojų vartojamos galios. Pradinių sąlygų nustatymui daroma prielaida, kad įtamos U_0 ir dažnio f_0 parametrai yra vardiniai. Remiantis šia prielaida, pradinių sąlygų aplinkoje aprašomi tiriamos MEES aktyviosios galios pokyčiai dalinės išvestinės bendrąja lygtimi:

$$\left| \frac{\partial P_V(U, f)}{\partial U} \right|_0 \Delta U + \left| \frac{\partial P_V(U, f)}{\partial f} \right|_0 \Delta f = \Delta P_G, \quad (2.42)$$

kur P_V – vartojama galia; ΔU – įtampos pokytis sistemoje; Δf – dažnio pokytis sistemoje; ΔP_G – generuojamos galios pokytis.

Į (2.42) lygtį įrašomi šilumos siurblio, elektros energijos kaupiklio ir KCE aktyviųjų galių pokyčiai, kurie aprašomi išplėstine dalinės išvestinės lygtimi:

$$\left| \frac{\partial P_V(U, f)}{\partial U} \right|_0 \Delta U + \left| \frac{\partial P_V(U, f)}{\partial f} \right|_0 \Delta f = \Delta P_{\text{bal.}} + \Delta P_{\text{EEK}} + \Delta P_{\text{SS}} + \Delta P_{\text{KCE}}, \quad (2.43)$$

kur $\Delta P_{\text{bal.}}$ – balansuojamos galios pokytis; ΔP_{EEK} – elektros energijos kaupiklio aktyviosios galios pokytis; ΔP_{SS} – šilumos siurblio asinchroninio generatoriaus aktyviosios galios pokytis; ΔP_{KCE} – KCE sinchroninio generatoriaus aktyviosios galios pokytis.

2.4. Statistinė regresinė vėjo elektrinių parko galios prognozavimo metodika

Mažosios energetikos sistemos elektrinių darbo organizavimui ir vartotojų elektros apkrovos paskirstymui reikia iš anksto prognozuoti VEP generuojamąją galią, todėl tenka tirti galių prognozavimo galimybes. Norint prognozuoti vėjo elektrinių parkų galią, reikia nustatyti šių elektrinių generuojamos galios priklausomybę nuo vėjo greičio, oro tankio, vėjo krypties ir įvertinti elektrinių išsidėstymą parke, vėjo ir atmosferos parametrų prognozavimo netikslumus, kintančią išorinių veiksnių įtaką, kitus kiekybinius ir kokybinius kintamuosius bei siekti aukštesnio galių prognozavimo tikslumo. Uždavinio sprendimui pasitelkiamas daugialypės regresijos modelis. Skiriamos funkcinė ir stochastinė priklausomybių rūšys (Chatterjee, Simonoff, 2013). Funkcinė priklausomybė sieja neatsitiktinius dydžius, todėl nepriklausomųjų kintamųjų kitimas tiksliai apibūdina priklausomojo kintamojo kitimą. Tiesinė funkcija gali būti išreikšta:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_m X_m, \quad (2.44)$$

kur X – nepriklausomieji kintamieji; β – funkcijos koeficientai.

Esant daugialypei tiesinei stochastinei priklausomybei, nepriklausomų kintamųjų atsitiktinis kitimas apibūdina priklausomojo kintamojo kitimą su tam tikra atsitiktine paklaida:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_m X_m + \varepsilon, \quad (2.45)$$

kur X_j – regresijos funkcijos nepriklausomieji kintamieji; β_j – nežinomi tiriamosios duomenų populiacijos regresijos funkcijos koeficientai; ε – atsitiktinė paklaida.

Mažiausių kvadratų metodu apskaičiavus funkcijos koeficientų β_j vertes, regresijos lygtį galima naudoti priklausomojo kintamojo Y vertei nustatyti su tam tikru tikslumu. Daugialypis regresijos modelis susieja priklausomąjį kintamąjį Y su m nepriklausomais kintamaisiais X_1, X_2, \dots, X_m . Tegu turima n priklausomojo kintamojo Y_i stebėjimų Y_1, Y_2, \dots, Y_n ir n kiekvieno nepriklausomojo kintamojo X_j , stebėjimų $X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_{nj}$ (čia $j = \overline{1, m}$). Tuomet daugialypės tiesinės regresinės analizės modelis gali būti pateiktas matricių lygtimi:

$$Y = X \cdot \beta + \varepsilon, \quad (2.46)$$

kur Y – $(n \times 1)$ matmenų priklausomojo kintamojo reikšmių vektorius; X – $n \times (m+1)$ matmenų nepriklausomųjų kintamųjų reikšmių matrica; β – $(m+1)$ matmenų regresijos lygties koeficientų vektorius ir ε – $(n \times 1)$ matmenų atsitiktinių paklaidų vektorius.

Išskleistų matricių išraiška yra:

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1m} \\ 1 & X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & X_{n1} & X_{n2} & \cdots & X_{nm} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}. \quad (2.47)$$

Daugialypės tiesinės regresinės analizės modelyje kintamieji Y, X_1, X_2, \dots, X_m yra kiekybiniai, išmatuoti intervalų ir santykių skalėse arba dvireikšmiai kintamieji (dichotominiai kintamieji), kurių skaičius yra m . Tiesinės regresinės analizės modelį galima taikyti, jeigu duomenys tenkina tam tikras sąlygas. Didžioji dalis regresinės analizės prielaidų yra reikalavimai, kuriuos turi tenkinti atsitiktinės paklaidos ε_i , kurios parodo, kiek stebėtoji Y_i reikšmė skirsis nuo reikšmės, gautos pagal sudarytą regresijos lygtį. Pagrindinės tiesinės regresinės analizės prielaidos yra šios (Čekanavičius, Murauskas, 2004; McClave, James, 2006; Gaur, Ajai S 2007):

1. Atsitiktinės paklaidos ε_i yra pasiskirsčiusios pagal normalųjį skirstinį.
2. Visų ε_i vidurkiai lygūs nuliui, $E\varepsilon_i = 0$.
3. Visų ε_i dispersijos lygios (homoskedastiškumo prielaida), $D\varepsilon_i = \sigma^2$.
4. Duomenyse nėra išskirčių.

Pirmosios dvi prielaidos tikrinamos naudojant Kalmogorov-Smirnov kriterijų.

Išskleistų matricių (2.47) formulė išreiškia tiesinę stochastinę priklausomybę kintamųjų populiacijoje su ε populiacijos paklaida, kuri gaunama pakeičiant tikrą priklausomybės formą tiesine, o β_j yra nežinomi populiacijos regresijos funkcijos koeficientai, kurių indeksas $j = 0, 1, \dots, m$. Stebėjimų imtyje dauguma šios funkcijos realizacijų Y_i turi atitikti fiksuotoms nepriklausomųjų kintamųjų $X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{im}$ vėrtėms, kurių $i = 1, \dots, n$ yra stebėjimų skaičius. Remiantis šiais duomenimis, regresijos lygties koeficientų nustatymo formulės, pagal kurias apskaičiuojami imties regresijos lygties koeficientai (įvertiniai) ir tiriamos imties regresijos lygties koeficientų β_j įvertiniai b_j ($j = 0, 1, \dots, m$) randami mažiausių kvadratų metodu (Čekanavičius, Murauskas, 2004). Taikant šį metodą, ieškoma koeficientų β įvertinių b minimizuojančių funkcijų:

$$L = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \varepsilon^T \varepsilon = (Y - X \cdot \beta)^T (Y - X \cdot \beta) \rightarrow \min, \quad (2.48)$$

kur T – matricos transponavimo veiksmo žymuo.

Sprendžiant lygčių sistemą $\frac{\partial L}{\partial \beta} = 0$ gaunamas mažiausių kvadratų įvertinys:

$$\mathbf{b} = (\mathbf{X}^T \cdot \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \cdot \mathbf{Y}. \quad (2.49)$$

Šis įvertinys turi geras savybes. Jis yra nepaslinktas $E\mathbf{b} = \boldsymbol{\beta}$, o regresijos koeficientų kovariacijų matricos $\text{cov}\mathbf{b} = \sigma^2(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1}$ įstrižainės elementai yra įvertinių $b_0, b_1, b_2, \dots, b_m$ dispersijos (Čekanavičius, Murauskas, 2004).

Nustačius koeficientų $\boldsymbol{\beta}$ įvertinius \mathbf{b} gaunama imties daugialypės tiesinės regresijos funkcija, tinkama prognozuoti vidutines Y reikšmes pagal fiksuotas nepriklausomųjų kintamųjų X_i reikšmes:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_m X_m. \quad (2.50)$$

Turint imties regresijos funkciją, kyla natūralus klausimas: ar gerai regresijos funkcija atitinka duomenis? Vieni iš svarbiausių tinkamumo matų yra standartinė regresijos paklaida ir apibrėžtumo koeficientas (Janilionis, 2013). Remiantis stebėjimo rezultatais $(X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{im}, Y_i, \text{ čia } i = \overline{1, n})$ tikrinama ar gauta imties regresijos lygtis gerai atitinka duomenis. Regresijos funkcija tuo geriau atitiks tyrimo duomenis, kuo mažesni skirtumai yra tarp stebėtų reikšmių Y_i ir pagal imties regresijos (2.50) funkciją apskaičiuotų prognozių \hat{Y}_i verčių. Šis skirtumas vadinamas liekamąja paklaida arba tiesiog trumpai liekana (angl. *residual*):

$$e_i = Y_i - \hat{Y}_i, \quad (2.51)$$

kur e_i – liekana, Y_i – stebėta vertė; \hat{Y}_i – pagal regresijos lygtį apskaičiuota vidutinė vertė.

Panaudojus įvertinius b_j , galima rasti paklaidų įvertinius:

$$\mathbf{e} = \mathbf{Y} - \mathbf{X} \mathbf{b}. \quad (2.52)$$

Paklaidų dispersija σ^2 taip pat nėra žinoma, todėl skaičiuojamas ir jos įvertinys s :

$$s^2 = \frac{\mathbf{e}^T \cdot \mathbf{e}}{n - m - 1} = \frac{1}{n - m - 1} \sum_{i=1}^n e_i^2. \quad (2.53)$$

Regresijos funkcijos tinkamumui įvertinti naudojamos trys nuokrypių kvadratų sumos (Janilionis, 2014):

- bendroji nuokrypių kvadratų suma SS_B (angl. *total sum of squares*), apibūdinanti Y reikšmių sklaidą apie vidurkį \bar{Y} ;
- regresinė nuokrypių kvadratų suma SS_R (angl. *regression sum of squares*), parodanti Y reikšmių sklaidos dalį apie vidurkį \bar{Y} ir paaiškindama Y tiesinę regresiją kintamųjų X_j atžvilgiu, t. y., jų tiesine priklausomybe;

- liekanų kvadratų suma SS_e (angl. *error sum of squares*), apibūdinanti Y reikšmių sklaidą apie regresijos funkciją, t. y. Y reikšmių sklaidą apie vidurkio \bar{Y} dalį, kuri nepaaiškinama tiesine regresija.

Šių nuokrypių kvadratų sumų išraiškos yra:

$$SS_B = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2; \quad SS_R = \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2; \quad SS_e = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n e_i^2. \quad (2.54)$$

Padalinus regresinę nuokrypių kvadratų sumą SS_R iš bendrosios nuokrypių kvadratų sumos SS_B , gaunamas daugialypės regresijos apibrėžtumo koeficientas r^2 parodantis, kuri dydžio Y sklaidos apie vidurkį \bar{Y} dalis paaiškinama tiesine regresija:

$$r^2 = \frac{SS_R}{SS_B}. \quad (2.55)$$

Kuo r^2 artimesnis vienetui, tuo didesnė sklaidos dalis paaiškinama tiesine regresija, t. y. tuo geriau regresijos funkcija aprašo priklausomąjį kintamąjį Y . Daugialypėje tiesinėje regresinėje analizėje naudojamas koreguotas daugialypės regresijos apibrėžtumo koeficientas (angl. *adjusted R Square*) r^2_{adj} (Chatterjee, Simonoff, 2013; Norušis 2012), kurį norint nustatyti reikia įvertinti regresijos lygties nepriklausomųjų kintamųjų skaičių m ir imties didumą n . Koreguotas daugialypės regresijos apibrėžtumo koeficientas parodo, kurią priklausomojo kintamojo Y sklaidos dalį apie vidurkį, galima paaiškinti Y tiesine regresija nepriklausomųjų kintamųjų X_1, X_2, \dots, X_m atžvilgiu.

Ieškant daugialypės tiesinės regresijos funkcijos, tikrinama hipotezė apie regresijos tiesinę priklausomybę. Hipotezė apie visų nepriklausomų kintamųjų regresijos koeficientų vertes tikrinama naudojant Fišerio F kriterijų su dešinine kritine sritimi ir nustatoma naudojant programų paketą SPSS (Janilionis, 2014):

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_m = 0,$$

$$H_a : \text{ bent vienas } \beta \neq 0.$$

Fišerio F kriterijus su dešinine kritine sritimi yra lygus:

$$F = \frac{\overline{SS_R}}{\overline{SS_e}} \sim F(m, n - m - 1), \quad (2.56)$$

kur $\overline{SS_R}$ – regresinis nuokrypių kvadratų vidurkis; $\overline{SS_e}$ – liekanų nuokrypių kvadratų vidurkis.

Nustačius hipotezės H_0 atmetimą ir alternatyviosios hipotezės H_a priėmimą galima teigti, kad regresija yra tiesinė ir yra bent vienas nepriklausomojo kintamojo koeficientas nelygus nuliui, o regresijos modelis bent jau iš dalies tinka prognozėms. Jeigu visi regresijos lygties koeficientai prie nepriklausomų kintamųjų lygūs nuliui,

tai regresijos modelis prognozėms visiškai netinka ir lygtis buvo sudaryta nekorektiškai.

Sprendžiant regresinės analizės lygtį yra aktualu nustatyti nepriklausomųjų kintamųjų X_j įtaką priklausomajam kintamajam Y . Paprastai, X_j įtaka Y kitimui tikrinama nuline hipoteze $H_0: \beta_j = 0$, t. y. ar koeficientas prie X_j populiacijos regresijos lygtyje yra lygus nuliui. Alternatyvioji hipotezė $H_a: \beta_j \neq 0$ reiškia tiesinės priklausomybės tarp X_j , čia $j=1, 2, \dots, m$, ir Y egzistavimą. Hipotezių apie regresijos lygties koeficientus tikrinimui naudojamos Stjudento statistikos:

$$T_j = \frac{b_j}{s_{bj}} \sim \text{St}(n-m-1), \quad j=0, 1, \dots, m. \quad (2.57)$$

Stjudento statistikos vertės leidžia suformuoti stebėto reikšmingumo lygmenį p apie nulinės hipotezės H_0 atmetimą. Jeigu nulinė hipotezė atmetama, tai koeficientas β_j statistiškai reikšmingai skiriasi nuo nulio, t. y. Y reikšmės priklauso nuo X_j . Populiacijos koeficientų β_j pasiklovimo intervalai (PI) lygmeniu $1-\alpha$ yra randami pagal formulę:

$$b_j - t_{1-\alpha/2; n-m-1} \cdot s_{bj} \leq \beta_j \leq b_j + t_{\alpha/2; n-m-1} \cdot s_{bj}, \quad (2.58)$$

kur $t_{\alpha/2; n-m-1}$ – pažymėtas Stjudento skirstinio su $n-m-1$ laisvės laipsniais $\alpha/2$ kvantilis; $j=0, 1, \dots, m$; s_{bj} – koeficientų įverčių b_j standartinė paklaida.

Kai stebėjimų imtis yra nedidelė, tai net ir vienas, labai nuo kitų besiskiriantis stebėjimas gali statistiškai reikšmingai pakeisti regresijos lygties koeficientų įverčius. Todėl reikia nustatyti ar duomenyse nėra išskirčių. Yra nemažai įvairių išskirčių nustatymo metodų (Chatterjee, Simonoff, 2013; Čekanavičius, Murauskas, 2004). Paprasčiausias metodas, kai išskirtis nustatoma pagal standartizuotąją liekaną (angl. *standardized residual*), kuri gaunama iš liekanos e_i (angl. *residual*) atėmus liekanų imties aritmetinį vidurkį ir padalijus iš standartinio nuokrypio. Standartizuotųjų liekanų vidurkis lygus 0, o standartinis nuokrypis lygus 1. Konkretus stebėjimas yra išskirtimi, jeigu standartizuotosios liekanos absoliutinis didumas viršija tris standartinius nuokrypius (Čekanavičius, Murauskas, 2004). Prognozuojant priklausomo kintamojo Y individualias ir vidutines reikšmes duotoms nepriklausomųjų kintamųjų reikšmėms, skaičiuojami vidurkio ir individualių reikšmių prognozių pasiklovimo intervalai (PI) (Chatterjee, Simonoff, 2013; Čekanavičius, Murauskas, 2004). Apskaičiuoti Y prognozės vidutinių reikšmių PI apatiniai ir viršutiniai rėžiai fiksuotoms X reikšmėms ir Y individualių reikšmių prognozavimo PI apatiniai ir viršutiniai rėžiai SPSS pagalba įrašomi į duomenų matricą (Čekanavičius, Murauskas, 2004; McClave, James, 2006).

Nustatyta, kad vėjo elektrinių parko generuojamąją galią daugiausiai lemia du kiekybiniai vėjo greičio (v) ir oro tankio (ρ) nepriklausomi kintamieji ir vienas kokybinis vėjo krypties (K) kintamasis. Sudaryto vėjo elektrinių galių prognozavimo uždavinio sprendimui tikslinga taikyti regresinės analizės modelį kiekvienai vėjo kryptčiai:

$K \in \{N, NNE, NE, ENE, E, ESE, SE, SSE, S, SSW, SW, WSW, W, WNW, NW, NNW\}$.

Tuomet (2.44) išraišką galima supaprastinti ir parašyti:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \varepsilon. \quad (2.59)$$

Remiantis daugialypės tiesinės regresinės analizės modeliu ir gauta (2.59) išraiška reikia nustatyti konkrečios vėjo krypties VEP generuojamos galios priklausomybę ir jos koeficientus, priklausomus nuo vėjo greičio ir oro tankio. Šiam tikslui iš LHMT Šventosios hidrometeorologinės stoties gauti atmosferos oro slėgio (p_o), temperatūros (ϑ), vėjo greičio (v) ir vėjo krypties (K) prognozuojami valandiniai duomenys, o iš Benaičių VEP generuojamos galios (P) statistiniai valandiniai duomenys. Vėjo elektrinių galios priklausomybei ir (2.60) išraiškos koeficientams nustatyti panaudoti 2009 m. keturių laikotarpių duomenys. Gauti atmosferos oro slėgio ir temperatūros valandiniai duomenys perskaičiuoti į oro tankį ρ pagal formulę:

$$\rho = \frac{p_o}{R\vartheta}, \quad (2.60)$$

kur p_o – oro slėgis (hPa); ϑ – temperatūra (K); R – specifinė dujų konstanta orui ($287 \text{ JK}^{-1}\text{kg}^{-1}$).

Kadangi galios charakteristika, taip pat stebėtos galios P priklausomybės nuo oro tankio ρ ir vėjo greičio v sandaugos kintamojoje charakteristikos dalyje yra netiesinės, todėl buvo taikytos įvairios transformacijos, siekiant gauti tiesinę stochastinę priklausomybę. Nustatyta, kad labiausiai tinkama VEP galios P priklausomybės nuo $\rho \cdot v$ ištiesinanti transformacija yra:

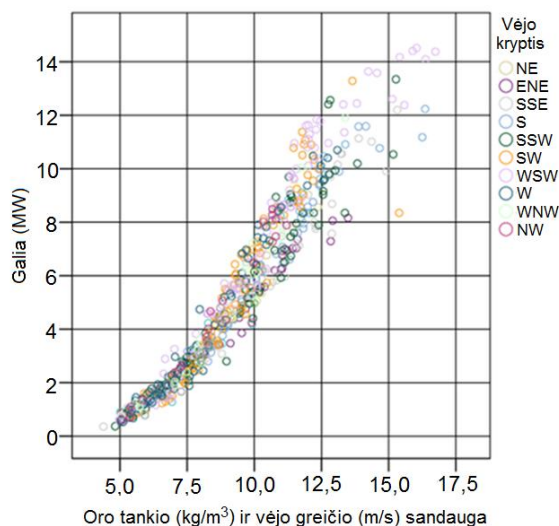
$$Y = \ln(P), \quad X_1 = \frac{1}{\rho \cdot v}. \quad (2.61)$$

Gautoji (2.61) išraiška rodo, kad du nepriklausomus kintamuosius galima pakeisti jų sandaugos vienu kintamuoju. Įvertinus nepriklausomus kintamuosius ρ ir v vienu kintamuoju ρv , galios nustatymo uždavinio sprendimui taikoma daugialypės tiesinės regresinės analizės išraiška tampa jau vieno kintamojo tiesinės regresinės analizės lygtimi:

$$\ln(P) = \beta_0 + \beta_1 \frac{1}{\rho v} + \varepsilon, \quad (2.62)$$

kur β_0, β_1 – nustatytų vėjo krypčių nežinomi imties regresijos lygties koeficientai.

Atlikti paskutiniai pakeitimai vėjo elektrinių generuojamų galių ir atmosferos oro tankio ir vėjo greičio sandaugos taškų sklaidos priklausomybių nepakeičia ir turi aiškia „S“ formos priklausomybę (žr. 2.11 pav.). Ši priklausomybė galioja visoms vėjo kryptims ir todėl gali būti vadinama gautąja tiesinės regresinės analizės lygtimi (žr. 2.62).



2.11 pav. Stebėjimų taškų sklaidos grafikas

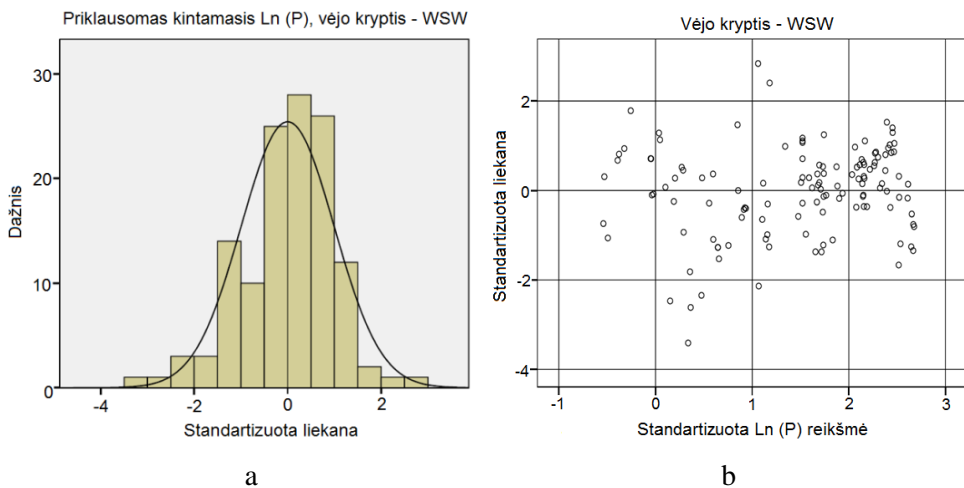
Nežinomų imties regresijos (2.62) lygties koeficientų β_0 ir β_1 įverčių nustatymai atlikti statistikos programų paketu SPSS (McClave, James, 2006). Nustatytos regresijos funkcijos atitikimas imties duomenims patikrintas taikant regresijos modelio tinkamumo rodiklius – standartinę regresijos paklaidą ir apibrėžtumo koeficientą. Nustatyta, kad empirinė funkcija gerai atitinka teorinę funkciją. Apskaičiuoti VE galios prognozavimo tiesinės regresinės funkcijos (2.63) regresijos apibrėžtumo koeficientai (angl. *R Squared*) – $r^2 \in [0,961 \div 0,988]$ artėja prie vieneto visoms tirtoms vėjo kryptims (žr. 2.2 lent.) ir todėl yra geri. Gauta regresijos funkcija paaiškina nuo 96,1 % iki 98,8 % $\ln P$ reikšmių sklaidos vidurkį tiesine regresija nepriklausomojo kintamojo $1/\rho v$ atžvilgiu.

2.2 lentelė. Galios prognozavimo tiesinės regresijos lygties tinkamumo rodikliai

Vėjo kryptis, <i>K</i>	Apibrėžtumo koeficientas r^2	Standartinė regresijos paklaida	Kolmogorovo Smirnovo kriterijaus <i>p</i>
NE	0,973	0,084	0,969
ENE	0,964	0,085	0,614
SSE	0,978	0,118	0,967
S	0,988	0,093	0,628
SSW	0,972	0,133	0,880
SW	0,952	0,166	0,570
WSW	0,978	0,134	0,442
W	0,961	0,165	0,712
WNW	0,970	0,136	0,988
NW	0,973	0,136	0,799
Nevertinta	0,964	0,154	0,642

Apskaičiuotos standartinės regresijos paklaidos (angl. *Std. error off the estimate*), kintančios ribose nuo 0,084 iki 0,166 kurios artėja į nulį (žr. 2.2 lent.). Paklaidos buvo lyginamos tarpusavyje ir taip nustatoma geriausia ir mažiausias paklaidas turinti funkcija. Nustatyta, kad gauta regresijos funkcija tenkina liekamųjų paklaidų normaliojo skirstinio, duomenų išskirčių nebuvimo ir duomenų homoskedastiškumo prielaidas (žr. 2.12 pav.). Įvertinus suderinamumo hipotezės ir įvertinus Kolmogorovo-Smirnovo kriterijaus reikšmes (žr. 2.2 lent.) galima daryti išvadą, kad standartizuotųjų liekanų skirstiniai yra standartiniai normalieji, o hipotezės visoms analizuotoms vėjo kryptims neatmestos, nes ($p \in [0,442; 0,988]$) ir tenkina Kolmogorovo- Smirnovo sąlygą $p > 0,05$ (žr. 2.12 a. pav.).

Homoskedastiškumo prielaida arba sąlyginių dispersijų lygybės prielaida yra reikalavimas, kad su kiekviena fiksuota X_{1j} reikšme arba su kiekviena fiksuota prognozės reikšme \hat{Y}_i , liekanų sklaida būtų vienoda, t. y., kuo liekanų reikšmės vienodžiau išsibarsčiusios apie X_1 arba \hat{Y} ašis, tuo regresijos funkcija geriau aprašo analizuojamus duomenis. Regresijos modelis yra jautrus šios prielaidos pažeidimams. Jeigu prielaida netenkinama, tai prognozė gali būti iš esmės iškreipta. Tiriamuoju atveju pateiktos standartizuotųjų liekanų sklaidos diagramos rodo, kad sąlyginė standartizuotųjų liekanų dispersija yra pastovi ir yra tik keli stebėjimai, kurių standartizuotosios liekanos absoliutinis didumas labai nedaug viršija 3 standartinius nuokrypius, t. y., nėra išskirčių (žr. 2.12 b pav.).



2.12 pav. WSW vėjo krypties regresijos modelio prielaidų tikrinimo grafikai: a – standartizuotųjų liekanų histograma, b – sklaidos diagrama

Nepriklausomojo kintamojo $1/\rho v$ įtaka priklausomojo kintamojo P kitimui patikrinta nuline hipoteze $H_0: \beta_1=0$, kuri atmesta ir yra priimta alternatyvioji hipotezė $H_a: \beta_1 \neq 0$. Tai patvirtina tiesinės priklausomybės tarp $1/\rho v$ ir P egzistavimą ir visų imčių bei populiacijos regresijos lygčių koeficientų reikšmingumą, nes reikšmingumo lygmuo $p < 0,001$ (žr. 2.3 lent.).

Visų tirtų vėjo kryptių tiesinių regresijos lygčių koeficientų β įverčiai b ir standartinė paklaida, Stjudento statistikos, reikšmingumo lygmuo ir pasiklovimo intervalai pateikti 2.3 lentelėje.

2.3 lentelė. Tiesinės regresijos lygties galiai prognozuoti koeficientai ir prielaidų parametrai

Vėjo kryptis K	Regresijos lygties koeficientai			Stjudento statistikos	Reikšmingumo lygmuo p	95 % β_j pasiklovimo intervalo rėžiai	
	Žymuo	Įvertis	Standartinė paklaida			Apatinis	Viršutinis
NE	b_0	4,219	0,099	42,412	0,000	4,013	4,426
	b_1	-25,312	0,905	-27,971	0,000	-27,188	-23,435
ENE	b_0	3,847	0,092	41,602	0,000	3,655	4,039
	b_1	-22,162	0,919	-24,127	0,000	-24,067	-20,257
SSE	b_0	3,851	0,053	72,380	0,000	3,744	3,958
	b_1	-21,473	0,466	-46,088	0,000	-22,411	-20,536
S	b_0	3,958	0,036	110,192	0,000	3,886	4,029
	b_1	-22,258	0,294	-75,712	0,000	-22,845	-21,671
SSW	b_0	4,024	0,050	80,706	0,000	3,925	4,124
	b_1	-22,602	0,404	-55,907	0,000	-23,405	-21,799
SW	b_0	4,320	0,068	63,823	0,000	4,186	4,454
	b_1	-24,859	0,556	-44,747	0,000	-25,961	-23,757
WSW	b_0	4,282	0,039	108,602	0,000	4,204	4,361
	b_1	-24,051	0,321	-74,928	0,000	-24,686	-23,416
W	b_0	4,263	0,084	50,792	0,000	4,096	4,431
	b_1	-24,124	0,599	-40,276	0,000	-25,320	-22,928
WNW	b_0	4,121	0,102	40,222	0,000	3,910	4,332
	b_1	-23,143	0,791	-29,245	0,000	-24,770	-21,517
NW	b_0	4,204	0,112	37,460	0,000	3,970	4,438
	b_1	-23,449	0,877	-26,725	0,000	-25,280	-21,619
Neįvertinta	b_0	4,123	0,055	89,751	0,000	3,812	4,434
	b_1	-23,347	0,465	-61,981	0,000	-25,451	-21,242

Įvertinus gautus analizės rezultatus galima teigti, kad tiesinės regresijos prielaidos yra tenkinamos ir tiesinę regresinės analizės funkciją galima naudoti

praktikoje. Todėl nustatytai vėjo kryptčiai (arba ir nevertinant vėjo kryptties), VEP galios nustatymui galima taikyti tokią tiesinę regresijos lygtį:

$$\ln(\hat{P}) = b_0 + b_1 \frac{1}{\rho v}. \quad (2.63)$$

Pritaikius atvirkštinę transformaciją, gaunama rodiklinė regresijos lygtis VE parko galiai prognozuoti:

$$\hat{P} = e^{b_0 + b_1 \frac{1}{\rho v}}. \quad (2.64)$$

Gauti tiesinės regresinės funkcijos tyrimų rezultatai rodo, kad sudaryta tiesinės regresijos lygtis (2.64) tenkina tiesinės regresijos prielaidas ir gali būti naudojama vėjo elektrinių parkų galios prognozavimui nuo minimalios galios iki įrengtosios galios pasiekimo. Išraiška (2.65) gali būti transformuojama ir į paprastesnę ir naudoti patogesnę išraišką:

$$P = C \cdot e^{-\frac{b}{\rho v}}, \quad (2.65)$$

kur C – atitinkamos vėjo kryptties koeficientas lygus dydžiui e^{b_0} , b – atitinkamos vėjo kryptties koeficientas b_1 .

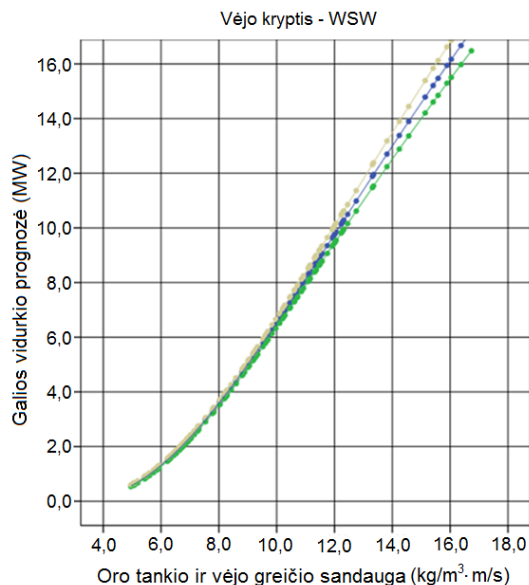
VEP galios prognozavimo formulės koeficientų C ir b vertės nagrinėtoms vėjo kryptims pateiktos 2.4 lentelėje.

2.4 lentelė. Galios prognozavimo išraiškos koeficientai

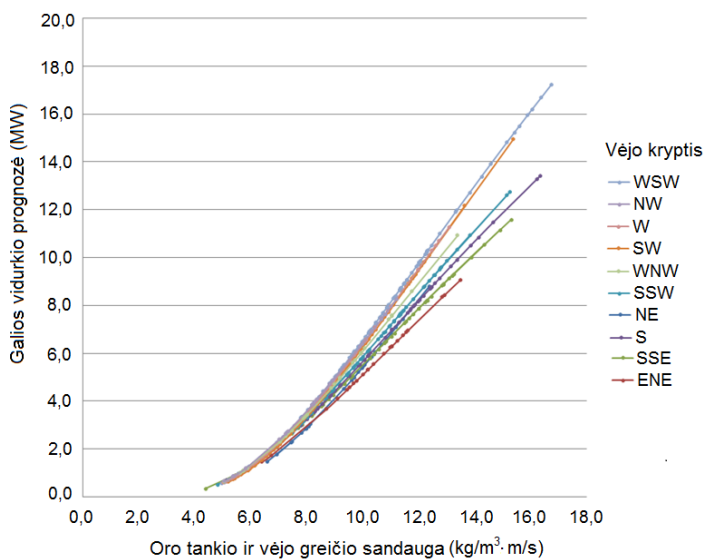
Vėjo krypttis	WSW	NW	W	SW	WNW	SSW	NE	S	SSE	ENE	Bendra
C	72,385	66,954	71,023	75,189	61,621	55,924	67,965	52,353	47,040	46,852	61,744
b	24,051	23,449	24,124	24,859	23,143	22,602	25,312	22,258	21,473	22,162	23,347

Vėjo kryptties WSW prognozuojamas remiantis (2.65) formule, kur galios vidurkio galimas kitimas yra pakankamai nedidelis ir jo PI išsiplėtimas mažai tikėtinas (žr. 2.13 pav.).

Tyrimais nustatyta, kad VE parko galios vidurkio priklausomybė nuo vėjo kryptties yra ženkli ir didėjant oro tankio ir vėjo greičio sandaugos vertei gali pasiekti gana didelius vidurkinių galių skirtumus (žr. 2.14 pav.). Sandaugai ρv pasiekus 17 vertę, galios vidurkio skirtumas gali siekti apie 5 MW ir sudaryti apie 30 % parko įrengtosios galios. Tai rodo, kad vėjo kryptties įvertinimas ir galių prognozavimas kiekvienai kryptčiai yra ne tik tikslingas, bet ir būtinas.

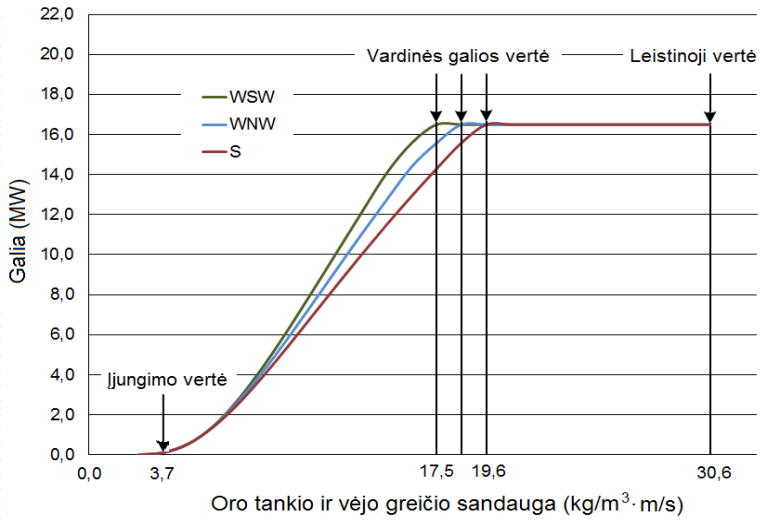


2.13 pav. Vėjo elektrinių parko galios vidurkis su 0,95 pasiklovimo sritimi



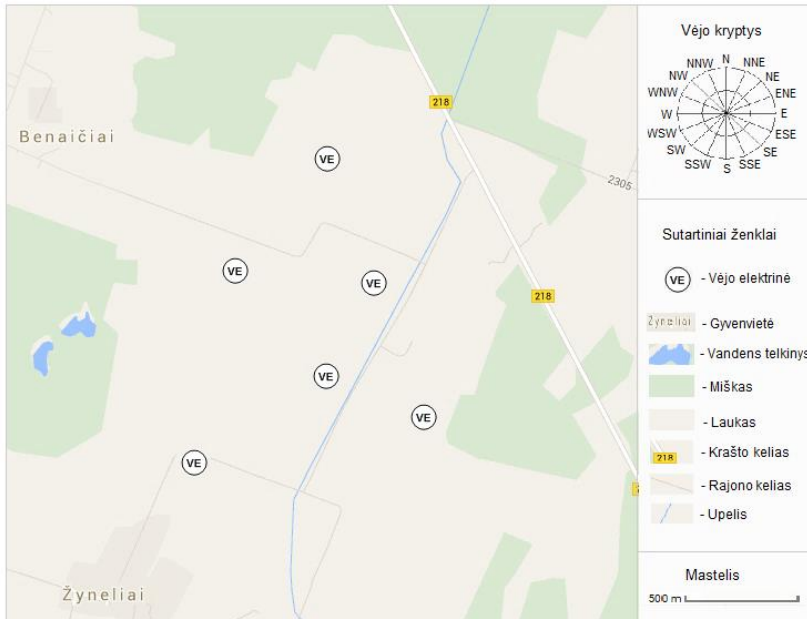
2.14 pav. Vėjo elektrinių parko galios vidurkio priklausomybės nuo vėjo krypties

Gautąją galių prognozavimo (2.65) išraišką nustatyta Benaičių VEP su V100 – 2,75 tipo elektrinėms galios priklausomybė nuo oro tankio ir vėjo greičio sandaugos esant atmosferai ($p_0 = 1013,25 \text{ hPa}$; $\vartheta = 15 \text{ }^\circ\text{C}$; tankis, $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$; $g = 9,81 \text{ m/s}^2$). Tai parodyta 2.15 paveiksle. „Vestas“ tipo elektrinė gali pradėti dirbti esant $3,7 \text{ kg/m}^2\text{s}$ oro tankio ir vėjo greičio sandaugos vertei ir jai padidėjus iki $17\text{--}20 \text{ kg/m}^2\text{s}$. Priklausomai nuo vėjo krypties, elektrinės galia pasiekia vardinę galią.



2.15 pav. Benaičių vėjo elektrinių parko galios priklausomybė standartinės atmosferos sąlygomis

Toliau didėjant oro tankio ir vėjo greičio sandaugos vertei, VE generuojama galia ribojama techninėmis priemonėmis ir nekinta. Oro tankio ir vėjo greičio sandaugai pasiekus didžiausią leistiną vertę $30,6 \text{ kg/m}^2\text{s}$, elektrinė yra išjungiama, saugant ją nuo mechaninio pažeidimo. Sudaryta Benaičių VEP galios charakteristika (žr. 2.15 pav.) vaizdžiai parodo vėjo krypties įtaką ir leidžia apytikriai nustatyti parko generuojamą galią prognozuojamiems atmosferos parametrams.



2.16 pav. Benaičių vėjo elektrinių parko generalinis planas

Pakankamai žymų Benaičių VEP galios skirtumą įvairiomis kryptimis nulemia ne tik elektrinių išsidėstymas, bet ir natūralios bei dirbtinės kliūtys, sukeliančios turbulentinį oro judėjimą (žr. 2.16 pav.).

Benaičių VEP suprojektuotas vyraujančioms WSW ir SW vėjo kryptims ir turinčioms mažiausiai natūralių kliūčių. Didelių kliūčių nėra NW ir W vėjo kryptims, tačiau vėjo elektrinių išsidėstymas yra jau prastesnis. Kitomis vėjo kryptimis, pradedant WNW ir baigiant SSE, parką supa miškai, todėl elektrinių išdėstymas nėra optimalus, generuojama galia kinta lėčiau ir vardinę galią pasiekia vėliau.

Viską apibendrinus galima teigti, kad statistinis regresinis VEP galios prognozavimo modelis įvertina vėjo greitį ir jo kryptis, atmosferos parametrus, jų prognozių sistemingąsias paklaidas, parko elektrinių išdėstymą, natūralias ir dirbtinas kliūtis, žemės paviršiaus šiurkštumą, nuolatinį jų kitimą ir sudaro galimybę tiksliau prognozuoti vėjo elektrinių parko galią.

2.5. Pagrindiniai skyriaus rezultatai

1. Sudaryta vėjo elektrinių parkų parametrų tyrimų metodika leidžianti analizuoti vėjo elektrinių galios kitimo parametrus ir nustatyti elektros energetikos sistemos galių reguliavimui ir balansavimui reikalingas šių parametrų vertes.
2. Sukurta vėjo elektrinių parkų energijos ir galios balansavimo pagal vartotojų elektros ir šilumos poreikį metodika ir modeliai, leidžiantys nustatyti mažosios energetikos sistemos elementų techninius parametrus ir jos savarankiško darbo galimybes.
3. Sukurta statistinė regresinė VEP galios prognozavimo metodika ir modelis, įvertinantis vėjo greitį ir jo kryptis, atmosferos parametrus, jų prognozių sistemingąsias paklaidas, parko elektrinių išdėstymą, natūralias ir dirbtinas kliūtis, žemės paviršiaus šiurkštumą, nuolatinį jų kitimą.

3. VĖJO ELEKTRINIŲ PARKŲ ENERGIJOS IR GALIOS BALANSAVIMO IR PROGNOZAVIMO TYRIMAI

Šiame disertacijos skyriuje pristatomi kintančia galia veikiančių elektrinių generuojamos galios stochastinių parametų tyrimai ir nustatomos įvairių trukmių vidutinės vertės, nuokrypiai ir koreliacijos koeficientai. Šių nustatytų parametrų pagrindu tiriamos VEP energijos ir galios balansavimo galimybės ir tikslumas sukurtoje MES, siekiant užtikrinti vietinių vartotojų elektros ir šilumos poreikius. Paskutiniame skyriaus poskyryje pateikti VEP galios prognozavimo tikslumo tyrimai. Tyrimai vykdomi remiantis antrajame skyriuje pasiūlyta metodologija ir sukurtais modeliais.

3.1. Vėjo elektrinių parkų galių kitimo statistinė analizė

Tiriamąjį objekto charakteristika. Sukurtai VEP galios ir energijos balansavimo ir prognozavimo metodologijai pritaikyti reikia nustatyti VEP generuojamų galių charakteristikas ir parametrus. Tiriamuoju objektu pasirinkti

Lietuvoje veikiantys Benaičių (įrengtoji galia 16,5 MW), Sūdėnų (14 MW) ir Vėjas I (30 MW) VEP, kurie pastatyti Lietuvos vakarinėje dalyje, pajūrio zonoje (žr. 3.1. pav.). Atstumas tarp nagrinėjamų Benaičių ir Vėjas I (Rūdaičiai) vėjo elektrinių parkų yra 18 km, o tarp Sūdėnų ir Benaičių VEP – 3 km. 2008 metais Benaičių VEP pagamino 43,6 GWh elektros energijos, dirbo 4,98 MW vidutine galia, o įrengtosios galios naudojimo trukmė per metus siekė 2642 h ir galios išnaudojimo koeficientas pasiekė 30 %. Per tą patį laikotarpį Vėjas I VEP pagamino 71,8 GWh energijos, dirbo 8,2 MW vidutine galia, o įrengtosios galios naudojimo trukmė per metus siekė 2393 h ir galios išnaudojimo koeficientas buvo didesnis nei 27 %.



3.1 pav. Sūdėnų, Benaičių ir Vėjas I (Rūdaičiai) vėjo elektrinių parkų išsidėstymas

Tyrimams pasirinkti 2009 m. VEP darbo laikotarpiai, kada buvo didžiausiu generuojamos galios kitimai ir tų pačių laikotarpių Lietuvos elektros energetikos sistemos apkrovos matavimo duomenys:

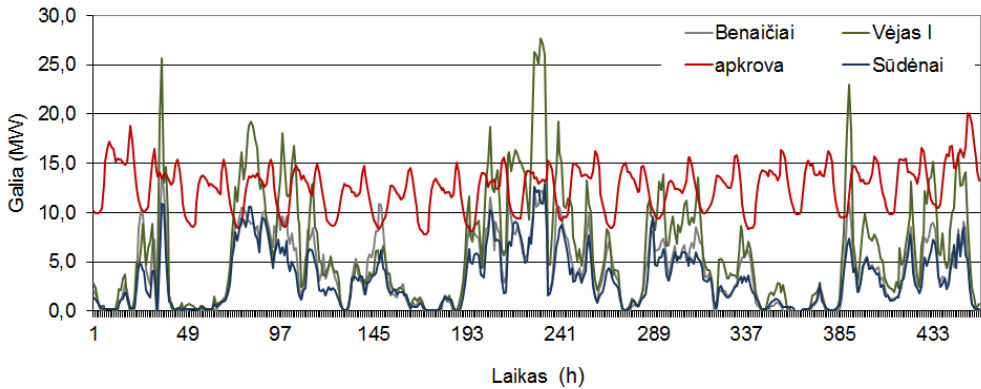
1. Matavimų laikotarpis 2009-03-28 – 04-04 (7 paros);
2. Matavimų laikotarpis 2009-04-25 – 05-07 (12 parų);
3. Matavimų laikotarpis 2009-05-16 – 05-28 (12 parų);
4. Matavimų laikotarpis 2009-07-16 – 07-22 (6 paros).

Vėjo elektrinių generuojamos galios priklausomybei tirti nuo vėjo greičio ir krypties, buvo išmatuoti parametrai Benaičių vėjo elektrinių parko teritorijoje, elektrinių vėjaračio aukštyje ir vidurkinti 10 min trukmei.

Pasirinktų matavimo laikotarpių Lietuvos energetikos sistemos apkrovos ir vėjo elektrinių generuojamos galios yra sekundinės trukmės, išskyrus Sūdėnų VEP, kurio galia yra 1 min trukmės. Sekundiniai matavimų duomenys sudaro galimybę tirti vėjo elektrinių generavimo procesą, keičiant galių vidurkinimo intervalus.

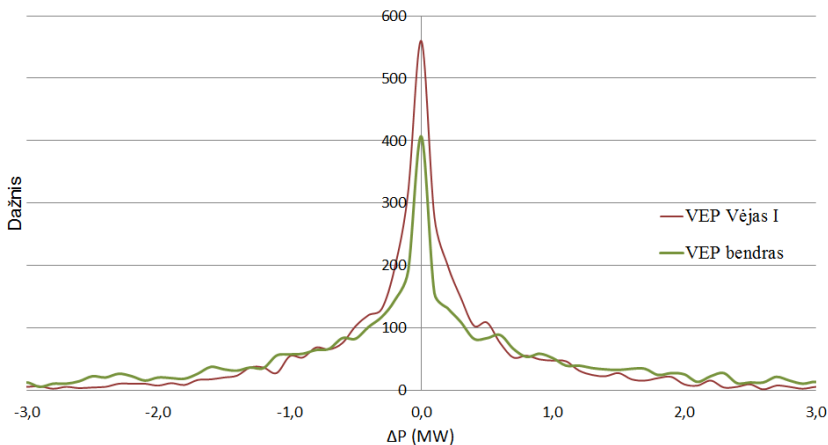
Vėjo elektrinių parkų generuojamos galios kitimo tyrimai. VEP galios generavimo proceso ir įtakos elektros energetikos sistemai tyrimui parinkti 30 s

ir 15 min vidutinių galių pokyčiai, reikalingi pirminio ir antrinio galios reguliavimo rezervams aktyvuoti bei dažniui ir galiai valdyti (Ažubalis, 2011). Taip pat buvo tirti ir valandiniai galios pokyčiai. Pasirinktų laikotarpių nagrinėjamų vėjo elektrinių parkų ir vietinės apkrovos valandiniai galios kitimai pavaizduoti 3.2 paveiksle.



3.2 pav. Vėjo elektrinių parkų Vėjas I, Benaičiai, Sūdėnai ir apkrovos valandiniai galios pokyčiai

Siekiant įvertinti VEP galių kitimą, buvo atlikti tyrimai atskirų matavimo laikotarpių duomenų ir visų duomenų pagrindu. Visų duomenų 30 s vidutinės galios masyvą sudarė 107343 vertės, o 15 min – 3573 vertės. Skaičiavimo rezultatai pateikti 3.3–3.5 paveiksluose ir 3.1 lentelėje.



3.3 pav. Vėjo elektrinių parkų generuojamos galios 15 min vidutinės galios pokyčių skirstinys

Gautų rezultatų analizė (žr. 3.3 pav.) rodo, kad 15 min vidutinės galios pokyčių skirstiniai yra normalieji, kurių vidutinė vertė yra nulinė ir standartinių

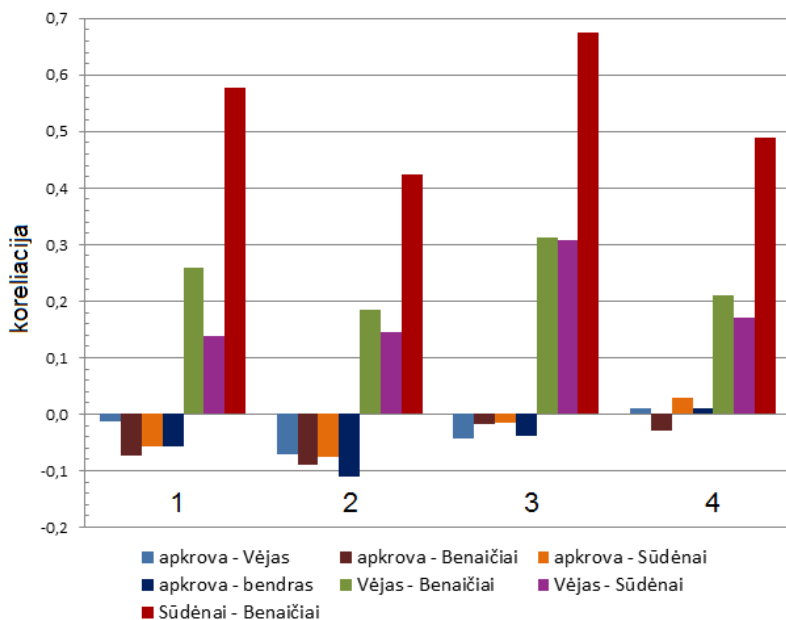
nuokrypių (σ) absoliučioji vertės Vėjo I VEP yra 1,25 MW, o bendrai visų parkų – 2,05 MW. Tačiau bendras visų vėjo elektrinių santykinis standartinis nuokrypis yra mažesnis už atskirų VEP galių pokyčių standartinius nuokrypius ir yra lygus 3,39 % (žr. 3.1 lent.). Didžiausias didėjantis pokytis Vėjas I yra 13,0 MW ir mažėjantis – 11,3 MW. Visų elektrinių didžiausias didėjantis pokytis yra 18,8 MW ir mažėjantis – 22,4 MW. Iš pateiktų duomenų matyti, kad 3σ pasikliautinumo intervalas 6,15 MW neviršija trečdaliao didžiausio galios pokyčio, todėl, analizuojant vėjo elektrinių darbo režimus, toks pasikliautinumo intervalas gali būti ir nepakankamas.

3.1 lentelė. Vėjo elektrinių parkų generuojamų galių kitimo parametrai

Vėjo elektrinių parkas	Įrengta galia, MW	Galių vidurkinimo intervalas											
		30 s trukmė						15 min trukmė					
		Standartinis nuokrypis		Didžiausias galios pokytis				Standartinis nuokrypis		Didžiausias galios pokytis			
				+ ΔP		- ΔP				+ ΔP		- ΔP	
		MW	%	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%
Vėjas I	30	0,46	1,53	5,27	17,6	4,11	13,7	1,25	4,20	13,0	43,3	11,3	37,7
Benaičiai	16,5	0,39	2,36	4,26	25,8	4,63	28,1	0,81	4,48	5,11	30,0	9,75	59,1
Sūdėnai	14	–	–	–	–	–	–	0,74	5,29	6,34	45,3	6,67	47,6
Bendras	60,5	0,61	1,31	5,80	9,59	5,29	8,74	2,05	3,39	18,8	31,1	22,4	37,0

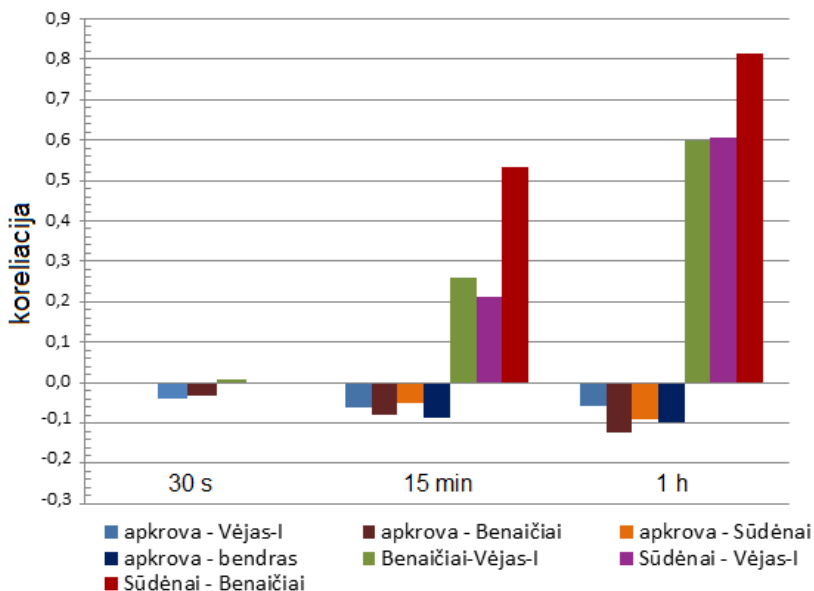
Siekiant nustatyti didžiausią galios pokytį, reikia tirti masyvo derinius pasirinktoms galių vidurkinimo trukmėms, o sudarytose masyvuose rasti gretutinių verčių didžiausią skirtumą. Derinių masyvą, kuriame nustatytas didžiausias vidutinių galių skirtumas, reikėtų naudoti tolimesniems stochastiniams tyrimams. Nustatyta, kad vėjo energijos kitimo didžiausia įtaka pastebima nuo 10 minučių iki kelių valandų trukmių intervale ir pakankamai maža 10 s intervale.

Siekiant įvertinti atskirų ir bendrai visų VEP galių kitimą, buvo tirti ryšiai ir priklausomybės tarp parkų galių kitimo ir nustatyta jų koreliacija skirtingais matavimo laikotarpiais. Vėjo elektrinių parkų galios pokyčių koreliacijos koeficientų (žr. 3.4 pav.) analizė rodo, kad pasirinktų laikotarpių metu, tarp VEP, galių koreliacija yra teigiama ir kinta ribose nuo 0,14 iki 0,68, o tarp parkų ir apkrovos dažniausiai neigiama ir kinta nuo -0,11 iki 0,03. Tokios koreliacijos koeficientų vertės patvirtina faktą, kad vėjų elektrinių parkų plėtra didins galios svyravimus elektros energetikos sistemoje ir pareikalaus papildomų operatyviųjų galios rezervų. Be to, atlikti tyrimai rodo, kad skirtingų laikotarpių galių koreliacija yra analogiška ir nedaug skiriasi savo skaitmenine verte, todėl tolimesniems tyrimams tikslinga naudoti visų tiriamųjų laikotarpių galių matavimo duomenis.



3.4 pav. Vėjo elektrinių parkų 15 min vidutinės galios pokyčių ir sistemos apkrovos koreliacija

Atlikti VEP skirtingos trukmės galios pokyčių tyrimai ir skaičiavimai su visais matavimo duomenimis (žr. 3.5 pav.) rodo, kad 30 s vidutinės galios pokyčių koreliacijos koeficientai tarp dviejų tirtų VEP yra teigiami ir labai maži ir neviršija 0,01, o tarp VEP ir apkrovų – neigiami ir siekia -0,04.



3.5 pav. Vėjo elektrinių parkų generuojamos skirtingos trukmės galios pokyčių koreliacija

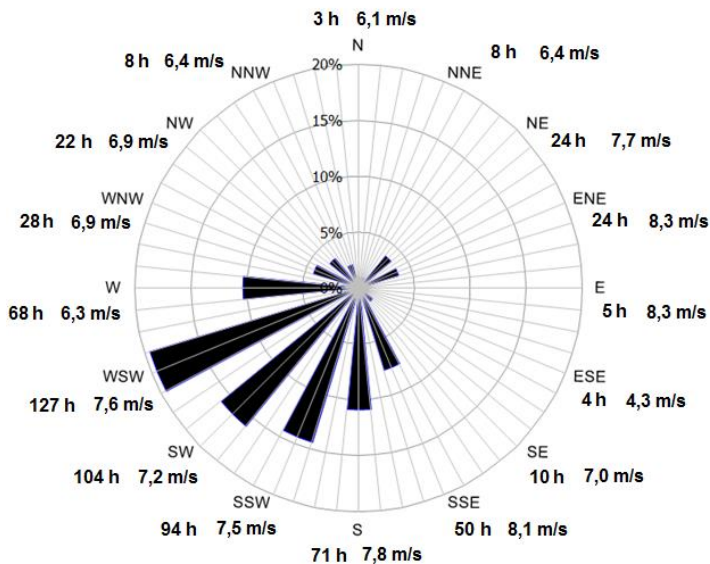
Šiuo atveju tirti galių pokyčiai gali būti laikomi nekoreliuoti. Be to, galios kitimo standartiniai nuokrypiai taip pat yra nedideli (žr.3.1 lent.), todėl sistemos dažniui valdyti reikalingas mažas pirminėsgalios rezervas. Tačiau 15 min vidutinės galios pokyčių koreliacijos koeficientų tarp trijų VEP vertės yra gerokai didesnės, teigiamos ir kinta ribose nuo 0,21 iki 0,53. Artimų Benaičių ir Sūdėnų VEP galių pokyčių koreliacija yra didžiausia, o tarp VEP ir apkrovų yra neigiama ir kinta nuo -0,05 iki -0,09. Šiai galių trukmei galių koreliacija jau yra stipri ir galios kitimo standartiniai nuokrypiai kelis kartus didesni nei 30 s (žr. 3.1 lent.). Tai rodo, kad VE galių balansavimui reikia ir kelis kartus didesnio antrinio galių rezervo.

Didėjant galių vidurkinimo trukmei koreliacijos koeficientai dar labiau padidėja ir valandinės trukmės galių pokyčių koreliacijos koeficientai tarp parkų yra 0,60–0,81 ribose, o tarp parkų ir apkrovos nuo -0,06 iki -0,12.

Vėjo elektrinių galios kitimo priklausomybė nuo vėjo krypties ir greičio.

Norint išsiaiškinti vėjo generuojamos galios priklausomybę nuo vėjo krypties ir greičio, buvo atlikti vėjo matavimai Benaičių VEP teritorijoje vėjo elektrinių vėjaračio aukštyje (80 m). Gautų duomenų pagrindu tiriamajam laikotarpiui sudaryta vėjų rožė (žr. 3.6 pav.), kurioje vėjo trukmė ir vidutinis greitis pagal vėjo kryptis pažymėtas dimensijomis (h,m/s). Nustatyta, kad Lietuvos pajūryje vėjai daugiausia pučia vakarų – pietų sektoriuje ir vėjo vidutinis greitis siekia 6,3–8,1 m/s. Šiame sektoriuje pastoviausias vėjas yra WSW krypties, kurio vidutinis greitis siekia 7,6 m/s. Pakankamai stiprūs, tačiau trumpalaikiai vėjai gali pūsti E ir ENE kryptimis ir siekti 8,3 m/s vidutinį vėjo greitį.

Vėjo krypties įtakos Benaičių VEP generuojamai galiai nustatyti buvo suformuoti 10 min vidutinės galios masyvai pagal vėjo kryptis (10 min vidurkiai) ir sudaryti grafikai tarp dažniausiai vyraujančių vėjo kryptių didžiausiam galios skirtumui nustatyti.



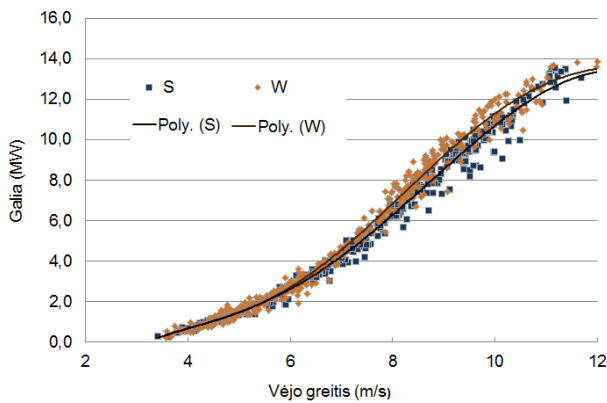
3.6 pav. Vėjų rožė pagal laiką (angl. Wind Rose based on Time)

Gautos vėjo elektrinių parkų galios duomenų kreivės (žr. 3.7 pav.) aproksimuotos 5-ojo laipsnio polinomis, kurių bendra išraiškos forma yra:

$$P = a_s + b_{S1}v + b_{S2}v^2 + b_{S3}v^3 + b_{S4}v^4 + b_{S5}v^5, \quad (3.1)$$

kur P – vėjo elektrinių parko galia (MW); v – vėjo greitis (m/s); a_s ir b_s – statistiniai funkcijos parametrai.

Nustatyti vidutiniai 10 minučių vėjo greičiai yra nuo 3,5 m/s iki 12 m/s. Už šių vėjo greičio ribų generuojama galia nebuvo įtraukta į sudaromus duomenų masyvus, nes VEP darbas prie fiksuotų minimalių ir maksimalių vėjo greičių gali būti nestabilus ir dėl vėjo lokalumo bei elektrinės techninių, ir režiminių priežasčių bei neplanuotų elektrinių atsijungimų, gali iškreipti tyrimų duomenis.



3.7 pav. Benačių vėjo elektrinių parko generuojamos galios kreivės

Gautų tyrimų rezultatų analizė parodė, kad vėjo kryptys turi įtaką VEP generuojamos galios dydžiui visomis tirtomis vėjo kryptimis, o didžiausias galių skirtumas yra tarp vakarų (W) ir pietų (S) vėjo kryptių. Esant tam pačiam vėjo greičiui, mažiausias galių skirtumas yra iki 5 m/s vėjui. Toliau didėjant vėjo greičiui, galių skirtumas didėja ir esant 9 m/s vėjo greičiui, pasiekia 4,2 % įrengtosios galios (žr. 3.7 pav. ir 3.2 lent.). Kitas galios skirtumo mažėjimas gali būti nulemtas statistinių duomenų apimties.

3.2 lentelė. Benačių vėjo elektrinių parko generuojama galia W ir S vėjo kryptims

Vėjo kryptis	Parametrai	Vėjo greitis				
	V , m/s	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0
W	P , MW	4,6	6,8	9,2	11,3	2,7
S	P , MW	4,2	6,3	8,5	10,7	2,4
	ΔP , %	2,4	3,0	4,2	3,6	1,8

Siekiant tikslesnės VEP galios kitimo prognozės, teorinės gamintojų pateikiamos galios kreivės turi būti perskaičiuotos remiantis statistiniais stebėjimų rezultatais, gautais įvertinant vėjo kryptis.

Vėjo krypties įtakos suminiams ir tikimybiniais VEP generuojamos galios pokyčiams nustatyti, sudaryti 15 min vidutinės galios pokyčių masyvai pagal vėjo kryptis. Tyrimams pasirinktas 15 min galios vidurkinimo trukmė ir vėjo greičio intervalas nuo 4 m/s iki 14 m/s, nes mažesni kaip 4 m/s vėjo greičiai neužtikrina visų parkų elektrinių stabilaus darbo dėl techninių ir režiminių priežasčių, o viršutinį vėjo greitį apribojo statistiniai duomenys.

Didžiausią atstumą tarp parkų, kada vėjo parametrai ir pasirinkta galios vidurkinimo trukmė skirtingai įtakos bendrai generuojamai galiai, galima apskaičiuoti pagal formulę:

$$l_{\text{park}} = t_p \cdot v, \quad (3.2)$$

kur t_p – vėjo elektrinių galios vidurkinimo trukmė; v – nustatytas vėjo greitis (m/s).

Pasirinktomis sąlygomis šis atstumas kinta nuo 3,6 iki 12,6 km, priklausomai nuo vėjo greičio. Vėjo elektrinių parkus nutolusius didesniu atstumu, įtakos bendrai generuojamai galiai požiūriu, tikslinga tirti kaip atskirus VEP. Šiuo atveju atskirų parkų statusą tenkiną tik Vėjas I – Benaičiai ir Vėjas I – Sudėnai.

Iš tyrimo rezultatų (žr. 3.3 lent.) matyti, kad vėjo kryptis pakankamai stipriai veikia VEP generuojamos galios kitimą. Nustatyta, kad galių pokyčių koreliacija (r) ir standartiniai nuokrypiai (σ) yra didžiausi vėjui pučiant statmenai VEP išdėstymo linijai ir mažiausi, kai vėjas pučia parkų išdėstymo kryptimi. VEP Vėjas I – Benaičiai mažiausias koreliacijos koeficientas yra 0,11 ir didžiausias – 0,51, o VEP Vėjas I – Sudėnai – 0,07 ir 0,45 atitinkamai. Esant tokiems pat vėjo kryptų nagrinėjamų VEP generuojamos galios pokyčiams, mažiausi standartiniai nuokrypiai yra 3,01 % ir 2,95 %, o didžiausi – 4,95 % ir 4,77 %. Dviejų VEP suminės galios pokyčių santykiniai standartiniai nuokrypiai yra mažesni už atskirų VEP santykinius standartinius nuokrypius beveik visomis vėjo kryptimis (žr. 3.3 lent.).

3.3 lentelė. Vėjo elektrinių parkų generuojamų galių pokyčių parametrai pagal vėjo kryptis

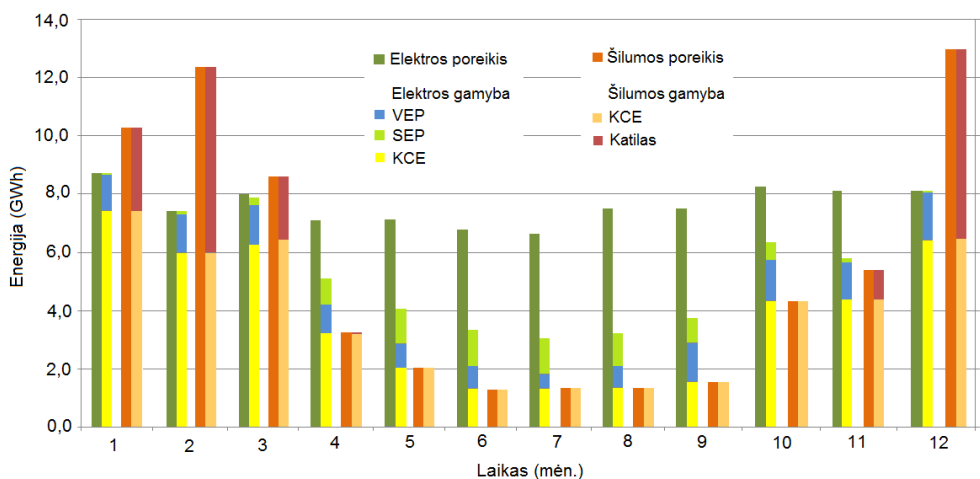
Vėjo elektrinių parkai	Parametrai	Vėjo kryptis								
		NE	ENE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW
Vėjas I Benaičiai	r_{12}	0,33	0,27	0,23	0,11	0,24	0,20	0,29	0,51	0,20
	$\sigma, \%$	4,30	2,80	3,44	3,01	4,52	4,30	4,09	4,95	3,22
Vėjas I Sudėnai	r_{12}	0,32	0,31	0,15	0,07	0,13	0,13	0,36	0,45	0,35
	$\sigma, \%$	3,64	2,95	4,09	2,95	4,55	4,32	4,32	4,77	3,18
Vėjas I Benaičiai	$\sigma, \%$	4,33	3,33	4,33	2,66	5,33	5,33	4,66	5,00	3,33
	$\sigma, \%$	7,27	5,45	4,24	6,06	6,06	5,45	5,45	6,66	4,84
Sudėnai	$\sigma, \%$	5,00	5,71	7,14	5,00	7,14	5,71	5,71	6,42	4,29

Atskirų VEP 15 min vidutinių galių pokyčių santykiniai standartiniai nuokrypiai taip pat priklauso nuo vėjo krypties ir kinta gana plačiame diapazone (žr. 3.3 lentelė) ir pakankamai skiriasi nuo santykinų standartinių nuokrypių, apskaičiuotų neįvertinant vėjo krypties (žr. 3.1 lentelė), todėl vykdant elektros sistemų režimų skaičiavimus ir nustatant vėjo elektrinių parkų įtaką ir generuojamos galios kitimo diapazoną bei operatyviųjų galių rezervus, reikia vertinti vėjo krypties ir parkų geografinio išsidėstymo įtaką.

3.2. Vėjo elektrinių energijos balansavimo tyrimai

Vėjo elektrinių energijos balansavimo tyrimai atliekami antrajame skyriuje sudarytu VEP energijos balansavimo modeliu, pasirinkus labiausiai tam pritaikytą (Connolly *et al.*, 2010) *Energy PRO* programų paketą. Vėjo elektrinių kintančios galios balansavimo galimybės nustatomos pagal sudarytas ir 2.1 ir 2.2 paveiksluose pateiktas MES struktūrines schemas. Parkų pagamintos energijos skaičiavimams atlikti reikalingi vienerių metų laikotarpio vėjo greičio, saulės spinduliuotės ir oro temperatūros valandiniai duomenys buvo gauti iš Lietuvos hidrometeorologijos tarnybos. Šilumos ir elektros vartotojų poreikiai parenkami realūs, miesto turinčio apie 11 tūkstančių gyventojų ir centralizuotą šilumos tiekimą. Šilumos poreikius sudaro 48 930 MWh šildymui, 8 000 MWh – karštam vandeniui ir 7 940 MWh – šilumos nuostoliams vamzdynuose kintantiems priklausomai nuo lauko aplinkos temperatūros. Bendras metinis rajono šiluminės energijos poreikis yra 64 870 MWh. Vartotojų elektros poreikis modeliuojant pagal pirmąją struktūrinę schemą sudaro 91 301,5 MWh energijos (žr. 3.4 lent.) ir 10 0775,1 MWh pagal antrą schemą (žr. 3.5 lent.). Tokių energijos poreikio didėjimą lemia vėjo elektrinių balansavimo metu šilumos siurblio sunaudota elektros energija.

Siekiant išvengti balansavimo metu kombinuoto ciklo elektrinės ir šilumos siurblio nereikalingų stabdymų ir paleidimų, buvo nustatyta 1 MW mažiausia galima generuojama ir vartojama galia.

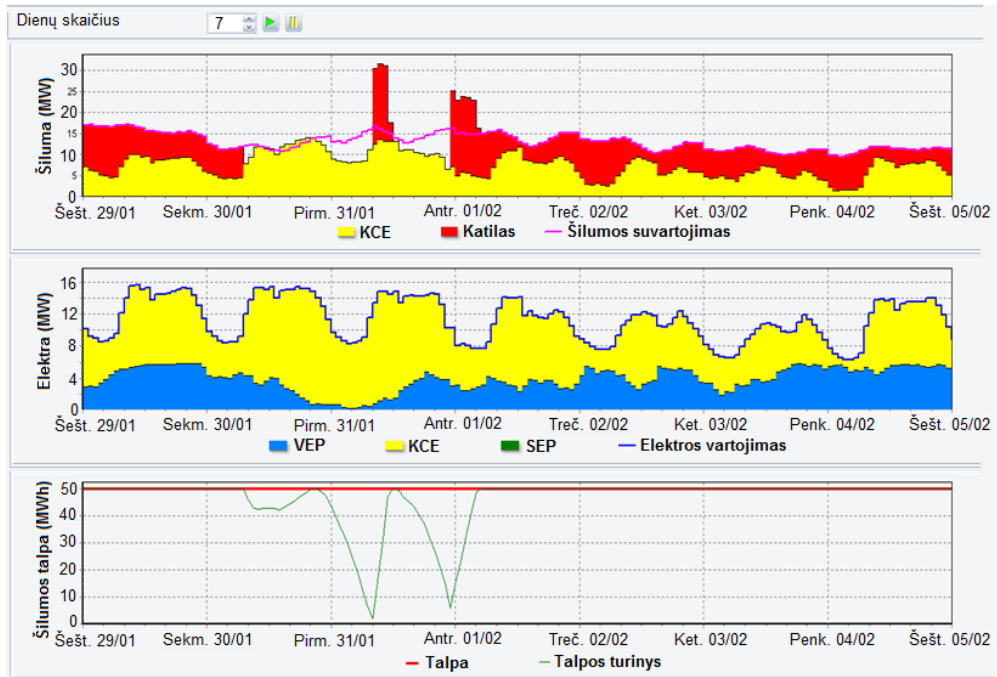


3.8 pav. Elektros ir šilumos energijų balansų rezultatai (modelis su KCE ir katiline)

Atlikus iteracinį VEP elektros energijos balansavimą pagal vietinių vartotojų šilumos ir elektros metinius poreikius (žr. 3.8 pav.) sudarytu pirmuoju energijos balansavimo modeliu (žr. 2.1 pav.) nustatyta, kad MES turi būti įrengta 20 MW elektrinės ir 20 MW šiluminės galių kogeneracinė kombinuoto ciklo elektrinė (KCE), 18 MW šiluminės galios katilinė ir 50,1 MWh šiluminės talpos energijos kaupiklis (ŠEK) (žr. 3.4 lent.). Be to, nustatyta, kad vasaros elektros energijos deficitui sumažinti tikslinga įrengti dar ir 10 MW galios saulės elektrinių parką (SEP). Tuomet MES galima subalansuoti 6 MW galios vėjo elektrinių parką (VEP), kurios generuota elektros energija į EES neeksploatuojama (žr. 3.4 lent.).

3.4 lentelė. VEP energijos balansavimo KCE ir katilinė nustatyti parametrai

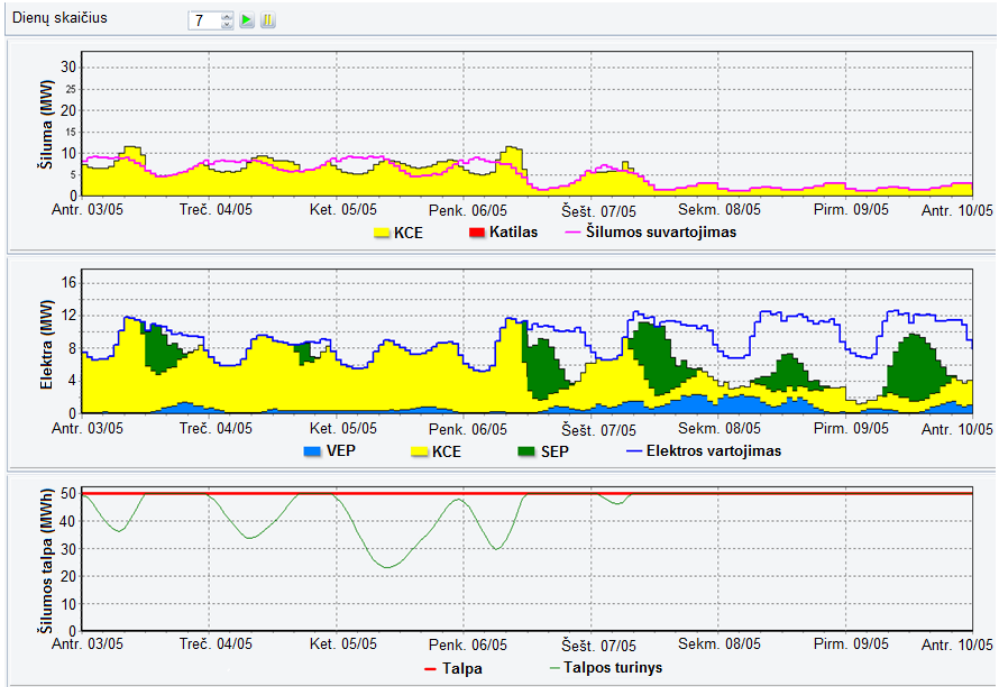
Parametras	Poreikis	KCE	Katilas	ŠEK	SEP	VEP
Galia, MW	–	20 _e +20 _š	18	–	10	6
Elektra, MWh	91 301,5	45 793,3		–	8 556,4	13 641,5
Šiluma, MWh	64 870,0	45 793,3	19 076,7	50,1	–	–



3.9 pav. KCE su katilinė modelio darbo režimai šildymo sezono metu

Modelio su KCE ir katilu VEP galios balansavimo pagal šilumos ir elektros poreikius 7 dienų MES darbo režimai šildymo ir ne šildymo laikotarpiais pateikti 3.9 ir 3.10 paveiksluose, kuriuose viršutinis grafikas rodo šilumos poreikį ir gamybą, vidurinis – elektros poreikį ir gamybą, o apatinis – šilumos kaupiklio energiją. Rezultatų analizė rodo, kad MES šildymo sezono metu, šilumos ir elektros poreikis ir gamyba susibalansuoja (žr. 3.8 pav., 3.9 pav.), o nešildymo sezono metu, šilumos

poreikis yra taip pat tenkinamas, nors elektros balansas nepasiekiamas (žr. 3.8 pav., 3.10 pav.). Šiuo atveju, normalaus darbo režimo metu vartotojams trūkstama elektros energijos dalis yra importuojama iš EES.



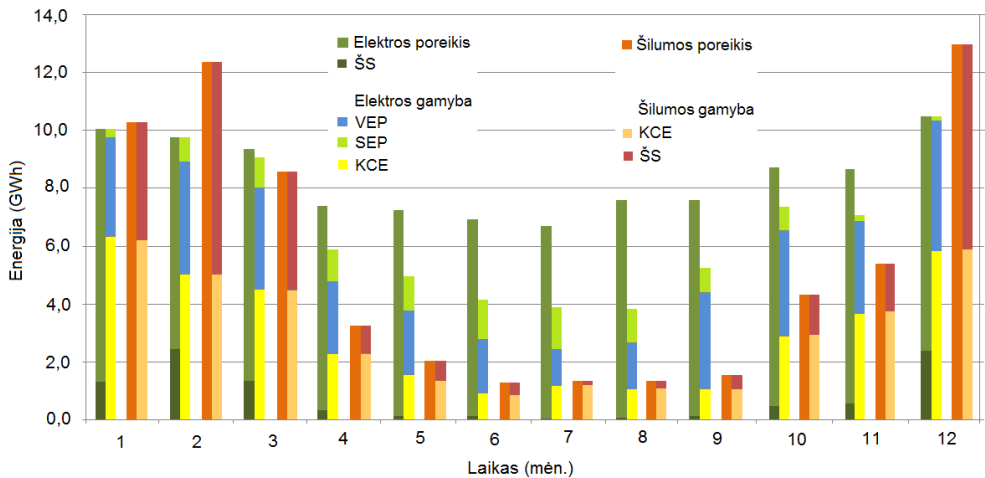
3.10 pav. KCE su katiline modelio darbo režimai nešildymo sezono metu

Esant avariniam režimui ir MES atsiskyrus nuo EES šią trūkstamą elektros energijos dalį padengia dujų turbogeneratorius, kurio forsutas darbas sumažina KCE bendrą naudingojo veikimo koeficientą, todėl vartotojų elektros poreikis ir elektros gamyba susibalansuoja. Tyrimo rezultatai rodo, kad šilumos balansui pasiekti reikia šilumos energijos kaupiklio ištisus metus (žr. 3.8 pav.).

Remiantis pirmojo modelio VEP energijos balansavimo rezultatais (žr. 3.4 lent.) nustatyta, kad VEP galios balansavimo pagal vartotojų šilumos poreikį efektyvumo rodiklis yra $0,092 \text{ MW}_e/\text{GWh}_s$, paskirstytos generacijos kogeneracinių elektrinių šiluminės ir elektrinės galių plėtos rodiklis yra po $0,308 \text{ MW}/\text{GWh}_s$, katilinių galios plėtos rodiklis yra $0,278 \text{ MW}_s/\text{GWh}_s$, šilumos kaupiklių talpos plėtos rodiklis yra $0,772 \text{ MWh}_s/\text{GWh}_s$ ir saulės elektrinių parkų galių plėtos rodiklis yra $0,154 \text{ MW}_e/\text{GWh}_s$.

Atlikus iteracinį energijos balansavimą pagal vietinių vartotojų šilumos ir elektros metinius poreikius (žr. 3.11 pav.) sudarytu antruoju energijos balansavimo modeliu (žr. 2.2 pav.) nustatyta, kad MES turi būti įrengta 20 MW elektrinės galios ir 20 MW šiluminės galios kogeneracinė kombinuoto ciklo elektrinė (KCE), 6 MW elektros apkrovos ir 18 MW šiluminės galios šilumos siurblių (ŠS) su vidutiniu siurblio naudingumo koeficientu $\text{COP}=3$ (žr. 2.4 pav.) ir 50,1 MWh šiluminės talpos energijos kaupiklių (ŠEK) (žr. 3.5 lent.). Be to, nustatyta, kad vasaros elektros

energijos deficitui sumažinti tikslinga įrengti dar ir 13 MW galios saulės elektrinių parką (SEP). Tuomet MES galima subalansuoti 16 MW galios vėjo elektrinių parką (VEP), kurios generuota elektros energija į EES neeksportuojama (žr. 3.5 lent.).



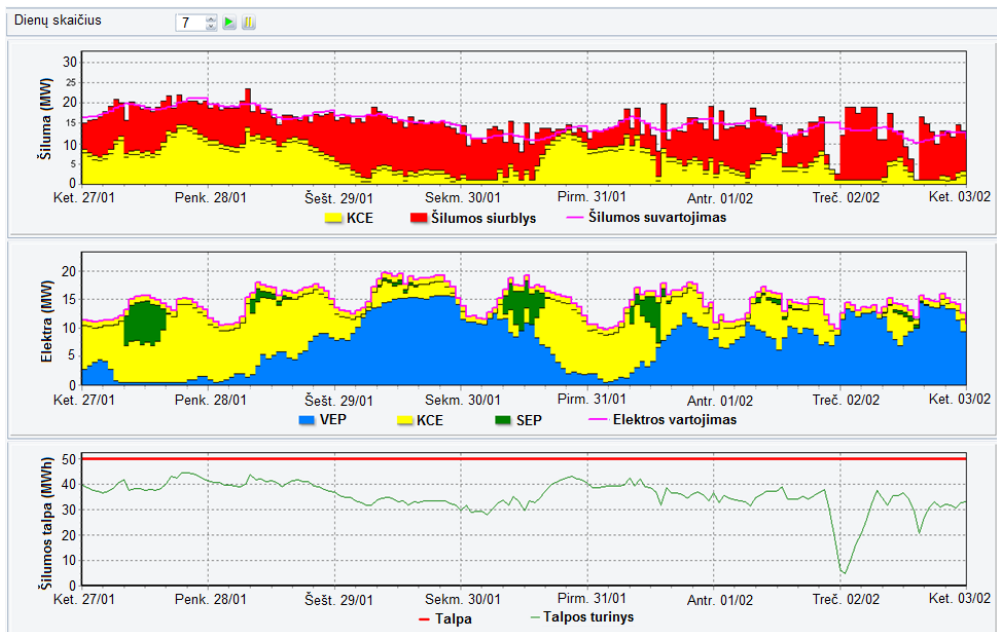
3.11 pav. Elektros ir šilumos energijų balansų rezultatai (modelis su KCE ir šilumos siurbliu)

Modelio su KCE ir šilumos siurbliu VEP galios balansavimo pagal elektros ir šilumos poreikius 7 dienų MES darbo režimai šildymo ir ne šildymo laikotarpiais pateikti 3.12 ir 3.13 paveiksluose, kuriuose viršutinis grafikas rodo šilumos poreikį ir gamybą, vidurinis – elektros poreikį ir gamybą, o apatinis – šilumos kaupiklio energiją.

3.5 lentelė. VEP energijos balansavimo KCE ir šilumos siurbliu nustatyti parametrai

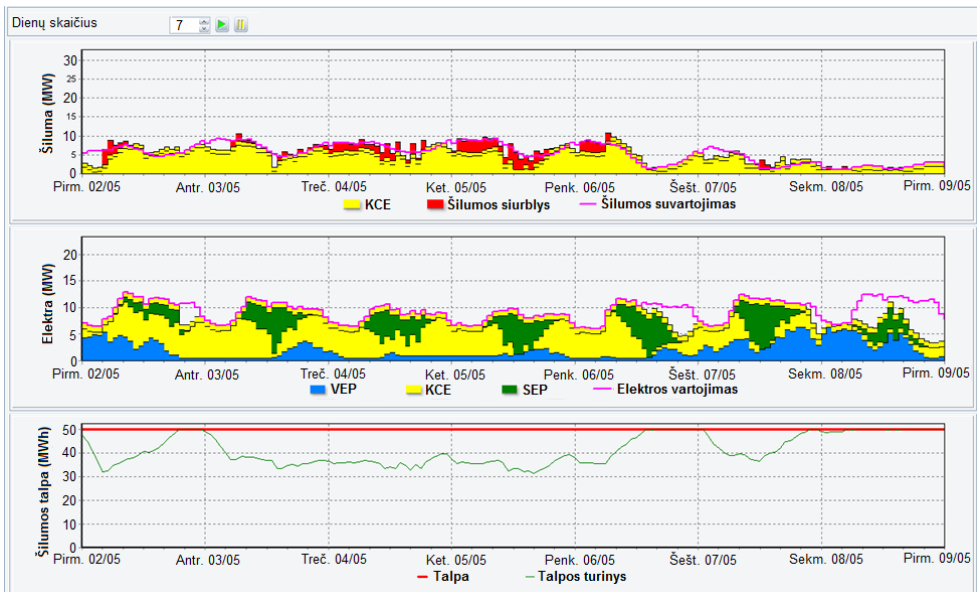
Parametras	Poreikis	KCE	ŠS	ŠEK	SEP	VEP
Galia, MW	–	20_e+20_s	-6_e+18_s	–	13	16
Elektra, MWh	100 775,1	36 449,2	9473,6	–	10 907,2	35 008,8
Šiluma, MWh	64 870,0	36 449,2	28 420,8	50,1	–	–

Rezultatų analizė rodo, kad MES žiemos sezono metu elektros poreikis ir gamyba susibalansuoja (žr. 3.12 pav.), o vasaros sezono metu elektros balansas nepasiekiamas (žr. 3.13 pav.). Šiuo atveju, normalaus darbo režimo metu vartotojams trūkstant elektros energijos dalis taip pat yra importuojama iš EES. Esant avariniam režimui ir MES atsiskyrus nuo EES, šią trūkstamą elektros energijos dalį padengia dujų turbogeneratorius, kurio forsuotas darbas sumažina KCE bendrą naudingą veikimo koeficientą, tačiau vartotojų elektros poreikis ir elektros gamyba susibalansuoja. Tyrimo rezultatai rodo, kad šilumos balansui pasiekti reikia šilumos energijos kaupiklio ištisus metus (žr. 3.11 pav.).



3.12 pav. KCE su šilumos siurbliu modelio darbo režimai šildymo sezonu

Nustatyta, kad vietinių vartotojų šilumos gamybai panaudojus šilumos siurblius, būtų galima subalansuoti ne 6 MW, o jau 16 MW VEP įrengtosios galios. Tai rodo, kad šilumos siurblių panaudojimas net 2,7 karto padidina VEP energijos balansavimo efektyvumą.



3.13 pav. Modelio su KCE ir šilumos siurbliu darbo režimai nešildymo sezonu

Remiantis antrojo modelio VEP energijos balansavimo rezultatais (žr. 3.5 lent.) nustatyta, kad VEP galios balansavimo pagal vartotojų šilumos poreikį efektyvumo rodiklis yra 0,247 MW_e/GWh_s, paskirstytos generacijos kogeneracinių elektrinių šiluminės ir elektrinės galių plėtos rodiklis yra po 0,308 MW/GWh_s, šilumos siurblių šiluminės galios plėtos rodiklis yra 0,278 MW_s/GWh_s, šilumos kaupiklių talpos plėtos rodiklis yra 0,772 MWh_s/GWh_s ir saulės elektrinių parkų galių plėtos rodiklis yra 0,200 MW_e/GWh_s.

Centralizuotai tiekiamos šilumos poreikis Lietuvai yra apie 10 TWh energijos per metus (Lietuvos šilumos tiekėjų asociacija [LŠTA], 2012). Atmetus didžiųjų miestų šilumos poreikį rajoniniams miestams lieka apie 3,8 TWh. Šis šilumos poreikis, pritaikius nustatytus mažosios energetikos sistemos energetinių įrenginių galios plėtos rodiklius, leistų integruoti į elektros energetikos sistemą nuo 350 MW (pirmasis modelis) iki 939 MW (antrasis modelis) papildomos galios vėjo elektrinių. Tokiai vėjo elektrinių integracijai pasiekti reikia energetikos sistemoje pastatyti po 1 170 MW elektrinės ir šiluminės galių paskirstytosios generacijos kogeneracinių elektrinių (šiuo atveju KCE), 1 056 MW galios katilinių arba šilumos siurblių ir 2 934 MWh talpos šilumos kaupiklių. Taip pat atsiranda galimybė elektros energetikos sistemoje įrengti nuo 585 MW (pirmasis modelis) iki 760 MW (antrasis modelis) galios saulės elektrinių parkus.

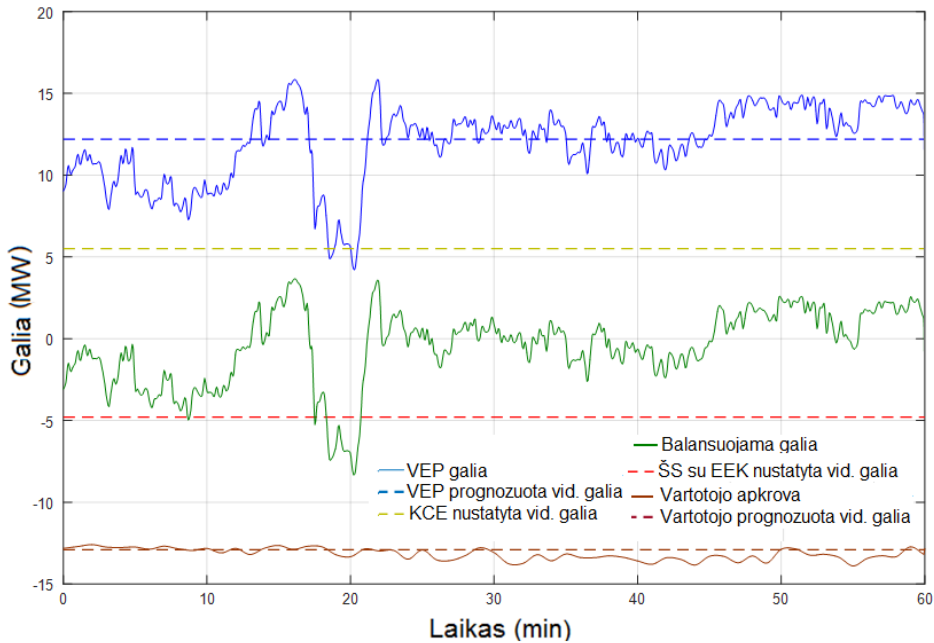
3.3. Vėjo elektrinių galios balansavimo tyrimai

MEES galios balansavimo tyrimai vykdomi 2.2 poskyryje sudarytu galios balansavimo matematinio modeliu (žr. 2.10 pav.), antruoju energijos balansavimo modeliu (žr. 2.3 pav.) nustatytomis VEP, KCE ir šilumos siurblio galiomis (žr. 3.5 lent.) ir statistiniu regresiniu vėjo elektrinių galių prognozavimo modeliu (žr. 3.17 pav.) nustatyta prognoze. Modeliuojamą KCE sudaro 13,5 MW dujų turbinos ir 6,5 MW garo turbinos įrengta elektrinė galia. Parenkant pirminių ir antrinių rezervų galias buvo remtasi Benaičių VEP galios generavimo kitimo 30 s standartinių nuokrypių $3\sigma = 1,17$ MW ir 15 min. $-3\sigma = 2,43$ MW vertėmis, nustatytomis atlikus statistinius tyrimus (žr. 3.1 lent.). Galios balansavimo modelyje naudojami sekundiniai VEP generavimo ir vartotojų apkrovos galių kitimo duomenys ir jų reikšmių imtys parinktos tuo metu, kai Benaičių VEP galios kitimas buvo didžiausias (žr. 3.1 lent.). Sukurtu statistiniu regresiniu vėjo elektrinių galių prognozavimo modeliu prieš 24 h prognozuojama VEP didžiausių galios kitimo vienos valandos 12,2 MW vidutinė galia. Tos pačios valandos MEES elektros vartotojų galios poreikio, įvertinant ir aktyviosios galios nuostolius elektros tinkle, vidutinė 12,9 MW galia nustatyta statistinių duomenų pagrindu. Remiantis VEP energijos balansavimo modelio gautais šilumos poreikio rezultatais nustatoma 4,8 MW vidutinė valandinė ŠS elektrinė galia. Iš (2.21) balanso lygties apskaičiuojama KCE 5,5 MW vidutinė valandinė galia. Dėl VEP generuojamos galios nuokrypio nuo prognozuotos galios ir apkrovos nuokrypių nuo prognozuotos galios atsiranda nesubalansuota galia. Šis galių nuokrypis nustatytas pagal išraišką:

$$P_{\text{balans.}} = P_{\text{VEP reali.}} - P_{\text{VEP prog.}} - P_{\text{apkr. reali.}} + P_{\text{apkr. prog.}}, \quad (3.3)$$

kur P_{balans} – balansuojama galia (MW); $P_{\text{VEP reali}}$ – vėjo elektrinių parko reali galia (MW); $P_{\text{VEP prog}}$ – vėjo elektrinių parko prognozuota galia (MW); $P_{\text{apkr. reali}}$ – apkrovos realioji galia (MW); $P_{\text{apkr. prog}}$ – apkrovos prognozuota galia (MW).

VEP generuojamos galios, vartotojų apkrovos galios ir jų suminės – balansuojamos galios vienos valandos trukmės grafikai bei prognozuojamos valandinės vidutinės galios pateiktos 3.14 paveiksle. Galios balansavimo, kaip ir energijos balansavimo skaičiavimuose priimta, kad KCE mažiausia generuojama galia ir šilumos siurblio mažiausia vartojama galia yra 1 MW.



3.14 pav. MEES aktyviųjų galių kitimas

Nustatomas MEES balansuojamos galios paskirstymas EEK, ŠS ir KCE:

$$P_{\text{balans.}} - P_{\text{ŠS vart.}} - P_{\text{ŠS nustat.}} \pm \Delta P_{\text{EEK.}} - P_{\text{KCE gener.}} + P_{\text{KCE nustat.}} = P_{\text{MEES nb}}, \quad (3.4)$$

kur $P_{\text{ŠS vartojama}}$ ir $P_{\text{ŠS nustat.}}$ – ŠS AV vartojama ir iš anksto nustatyta galia; ΔP_{EEK} – EEK galios pokyčiai; $P_{\text{KCE gener.}}$ ir $P_{\text{KCE nustat.}}$ – KCE generuojama ir iš anksto nustatyta galia; $P_{\text{MEES nb}}$ MEES likęs galios nebalansas.

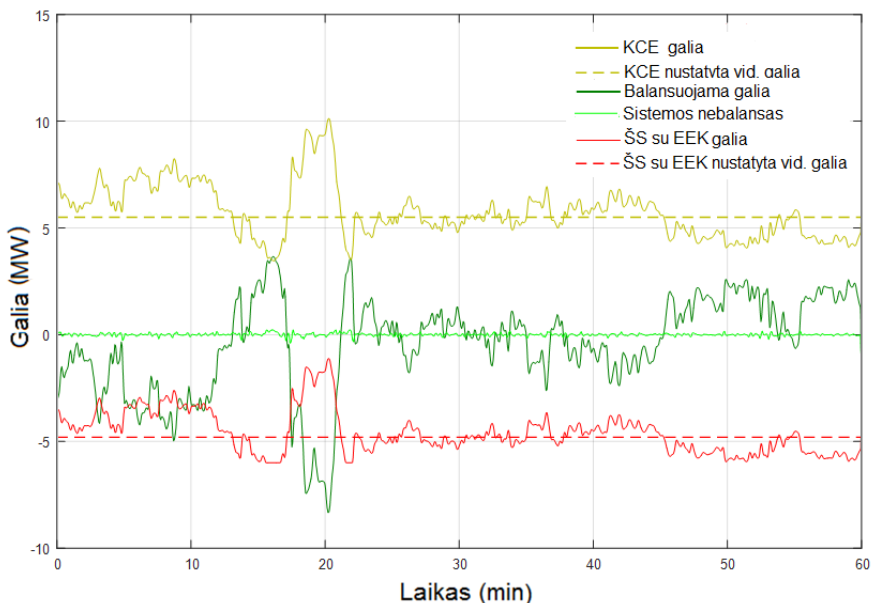
MEES galių balansavimui reikalingi elektros energetikos įrenginių dinaminiai parametrai pateikti 3.6 lentelėje. VEP galių balansavimo tyrimui pasirinkta *PowerFactory 14* programa.

Atsiradus MEES galios nebalansui, iš pateiktos (3.4) lygties, pirmiausiai reaguoja šilumos siurblys, mikrosekundžių sparta didindamas arba mažindamas vartojamą AV galią. ŠS dirbant nustatyta ribine ar artima jai galia balansavimą atlieka EEK su superkondensatoriumi. Vėliausiai į sistemos galios nebalansą reaguoja KCE.

3.6 lentelė. Modeliuojamos mažosios energetikos sistemos dinaminiai parametrai

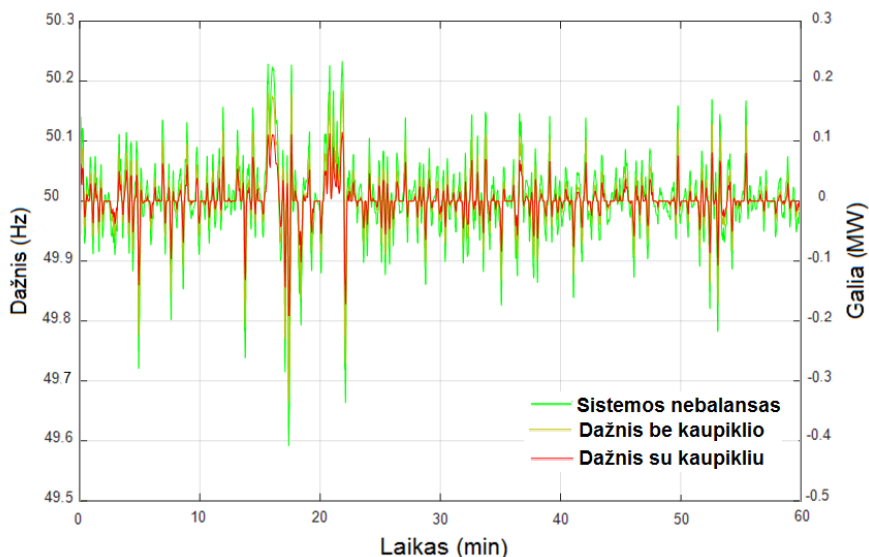
Parametras	L	T2	T3	EEK	ŠS	KCE
U_n (kV)	110	110/20	110/10	2	10	10
P_n (MW)	-	-	-	3,5	6	20
S_n (MVA)	-	25	25	-	-	-
C_n (F)	-	-	-	2,8	-	-
J (kg/m ²)	-	-	-	-	301,1	2085,3
ω (rad/s)	314	314	314	-	157	314
τ (s)	0,006	0,07	0,07	0,005	0,15	0,275

Modeliuojamoje MEES dėl valdymo sistemų reakcijos laiko ir balansuojančių įrenginių inercijos yra fiksuojamas bendras sistemos nebalansas. Gauti modeliuojamos MEES balansavimo tyrimo rezultatai pateikti 3.15 pav. ir 3.16 pav.



3.15 pav. MEES galių kitimas ir nebalansas

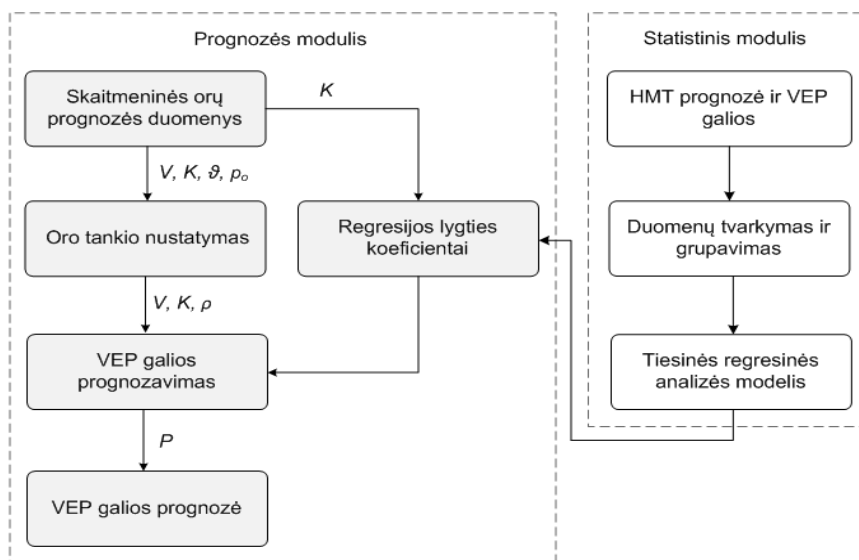
Vėjo elektrinių parkų galios balansavimo tyrimų rezultatų analizė rodo, kad parinktais balansuojančių įrenginių techniniais parametrais ir gautomis charakteristikomis, įvykus nustatytam didžiausiam VEP galios pokyčiui, MEES gali būti subalansuota nežymiai viršijant 0,4 Hz dažnio nuokrypio ribas, o panaudojus elektros energijos kaupiklį didžiausias dažnio nuokrypis yra 0,19 Hz, t. y. leistinose $\pm 0,2$ Hz nuokrypių normose (žr. 3.16 pav.). Todėl įvykus sistemei EES avarijai, tokia MES galėtų likti stabili ir sėkmingai dirbti bei aprūpinti vartotojus kokybiška šiluma ir elektra.



3.16 pav. Dažnio pokyčiai MEES

3.4. Statistinio regresinio vėjo elektrinių galių prognozavimo modelio tikslumo tyrimai

Remiantis antrame skyriuje pateikta tiesinės regresinės analizės metodologija ir gautąja rodikline regresijos lygtimi (2.65) bei nustatytais regresinės lygties koeficientais vėjo kryptims sudarytas vėjo elektrinių parkų galių prognozės statistinis regresinis modelis, susidedantis iš prognozės ir statistinio modulių (žr. 3.17 pav.).



3.17 pav. Vėjo elektrinių parko galių prognozės statistinis regresinis modelis

Statistiniame modulyje kaupiami hidrometeorologinės tarnybos (toliau – HMT) vėjo greičio, krypties, atmosferos slėgio ir oro temperatūros prognozės duomenys. Iš VEP SCADA sistemos tiesiogiai gauta informacija apie generuojamą galią ir veikusių elektrinių skaičių pirmiausia yra rūšiuojama, grupuojama pagal vėjo kryptis ir įtraukiami tik tie duomenys, kada veikė visos parko elektrinės. Po to VEP generuojamos galios duomenys yra analizuojami ir šalinamos nustatytos išskirtys. Galutinai atrinktų duomenų pagrindu regresinės analizės modeliu apskaičiuojami regresijos lygties koeficientai kiekvienai vėjo krypčiai. Nustatyti koeficientai periodiškai atnaujinami ir persiunčiami į prognozės modulį.

VEP galiai prognozuoti į prognozės modulio skaitmeninės orų prognozės duomenų bloką pateikiami prognozuojamo laikotarpio vėjo greičio, krypties ir atmosferos metrologiniai duomenys, kurie grupuojami pagal vėjo kryptis. Toliau apskaičiuojamas oro tankis visoms vėjo kryptims ir iš regresijos lygties koeficientų bloko pagal vėjo kryptis pasirenkami visi reikalingi regresinės lygties koeficientai. VEP galios prognozavimo bloke nustatoma parko galia prognozuojamam laikotarpiui pagal nustatytą (2.65) regresijos lygtį ir vėjo kryptis. Sudarytu modeliu gauta VEP galios prognozė gali būti naudojama parko darbo planavimui ir dalyvavimo elektros rinkoje galimybių nustatymui.

Prognozavimo tikslumo tyrimams pasirinktas vienas iš išsamiausių informacijos 2009 m. liepos 15–22 d. laikotarpis. Šiam laikotarpiui LHMT regeneruoti SOP modelio *Harmonie* vėjo ir atmosferos prognozių duomenys. Benaičių VEP vėjo greitis ir kryptis nurodytam laikotarpiui buvo atkurti pasinaudojus *HIRLAM* modelio duomenų baze ir perskaičiuoti į 100 m aukštį, o horizontaliai parinkti taip, kad vėjo prognozės ir VE parko koordinatės kiek galima daugiau sutaptų. Nurodyto laikotarpio SOP kiekvienos valandos vėjo ir atmosferos prognozių duomenys buvo pateikti 24 h į priekį ir atnaujinti keturis kartus per parą (00, 06, 12 ir 18 h). Pasiūlytu prognozės modeliu (žr. 3.17 pav.) prognozuota Benaičių VEP generuojama galia.

Statistinio regresinio modelio tikslumui tirti buvo panaudota to pačio laikotarpio Benaičių VEP realiai generuota galia, taip pat ir parko elektrinėse išmatuotos vėjo greičio ir krypties vertės. Prognozės modeliams palyginti ir tikslumui vertinti, apskaičiuotos valandos santykinės vidutinės paklaidos (SVP):

$$SVP = \frac{1}{nP_{inst}} \sum_{i=1}^n |P_{i\text{ fakt}} - P_{i\text{ pr}}|, \quad (3.5)$$

ir santykinės vidutinės kvadratinės paklaidos (SVKP) vėjo elektrinių parko įrengtosios galios atžvilgiu:

$$SVKP = \frac{1}{P_{inst}} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{i\text{ fakt}} - P_{i\text{ pr}})^2}, \quad (3.6)$$

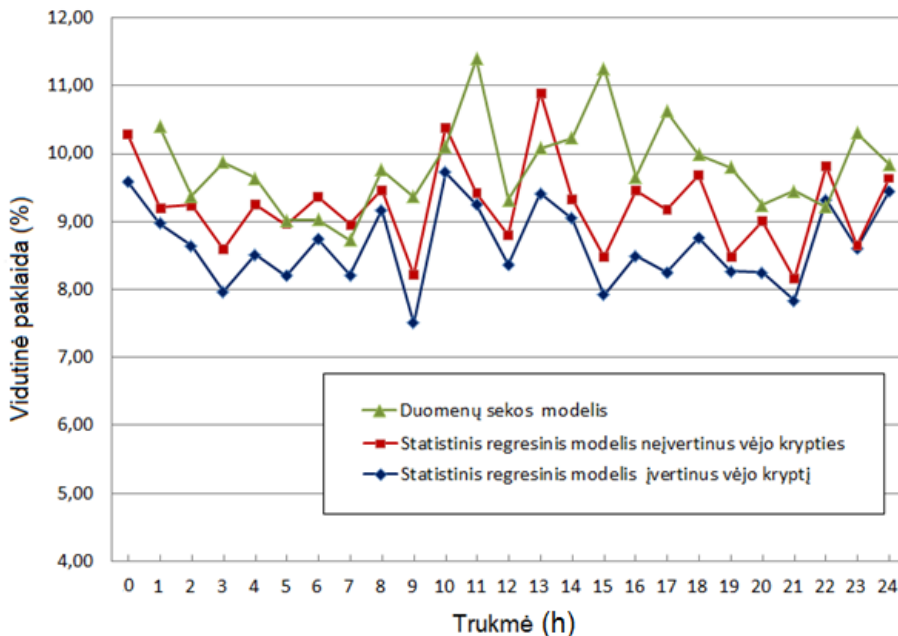
kur n – duomenų reikšmių skaičius; $P_{i\text{ fakt}}$ – faktinė galia; $P_{i\text{ pr}}$ – prognozuota galia, P_{inst} – vėjo elektrinių instaliuota galia.

VEP galios prognozavimo sukurtu statistiniu regresiniu modeliu tikslumo tyrimai ir gautų rezultatų analizė rodo, kad vienos savaitės sutapatintų parų

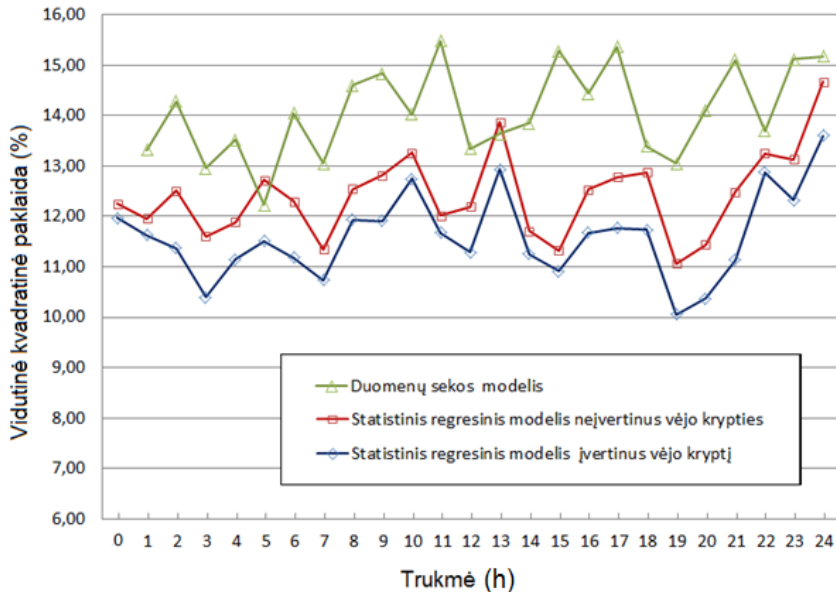
valandinė SVP, įvertinant vėjo kryptį, kinta nuo 7,51 % iki 9,72 %, o nevertinant vėjo krypties, padidėja iki 8,16–10,91 % VEP įrengtosios galios (žr. 3.18 pav.). Apskaičiavus savaitės SVP nustatyta, kad galios prognozavimo paklaida, įvertinus vėjo kryptį, ne didesnė, nei 8,66 %, o nevertinus vėjo krypties, paklaida padidėja iki 9,24 %. Sukurto modelio įvertinimui, tos pačios galios prognozės atliktos ir lyginamuoju duomenų sekos modeliu ir nustatyta, kad savaitės sutapatintų parų valandinė SVP svyruoja 8,73–11,39 %. ribose, o savaitės SVP siekia 9,82 % VEP įrengtos galios.

Analogiški SVKP tyrimai parodė, kad vienos savaitės sutapatintų parų valandinė SVKP, įvertinant vėjo kryptį, kinta nuo 10,3 % iki 13,7 % ir savaitės SVKP neviršija 11,64 %. Nevertinus vėjo krypties vienos savaitės sutapatintų parų valandinė SVKP padidėja iki 11,02–14,72 % ir savaitės SVKP iki 12,45 % VEP įrengtosios galios (žr. 3.19 pav.). Palyginamieji skaičiavimai duomenų sekos modeliu rodo, kad šio modelio vienos savaitės sutapatintų parų valandinė SVKP svyruoja 12,24–15,47% ribose ir vidutinė savaitės SVKP siekia 14,09 % VEP įrengtos galios.

Elektros perdavimo sistemos operatoriams ir vėjo elektrinių parkų savininkams, balansuojančių įrenginių darbo režimams sudaryti ir dalyvauti elektros rinkoje reikalinga galimai tikslesnė vėjo elektrinių galių kitimo prognozė artimiausioms 24 valandoms. Prognozavimui pasirinkta 2009 m. liepos 21 d. para, kurios pradiniai duomenys pateikti 3.20 paveiksle. Paveiksle pateikti prognozuojami paros valandiniai vėjo greičiai, VEP realūs 10 minučių vidutiniai vėjo greičiai ir reali generuojama parko minutinė vidutinė galia.

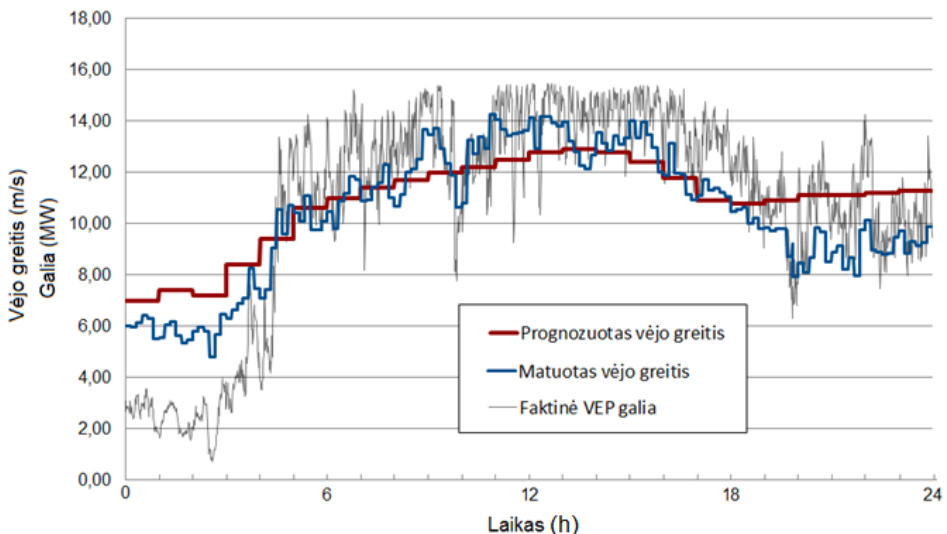


3.18 pav. Vėjo elektrinių parko galios prognozės santykinės vidutinės paklaidos



3.19 pav. Vėjo elektrinių parko galios prognozės santykinės vidutinės kvadratinės paklaidos

Prognozuojami vėjo greičiai ir realūs vėjo greičiai per parą gana panašūs, tačiau prognozių tikslumas yra nevienodas ir jis nejautrus trumpalaikiams vėjo greičio pokyčiams. Tai gali turėti gana didelę įtaką statistinio regresinio galios prognozės modelio tikslumui.



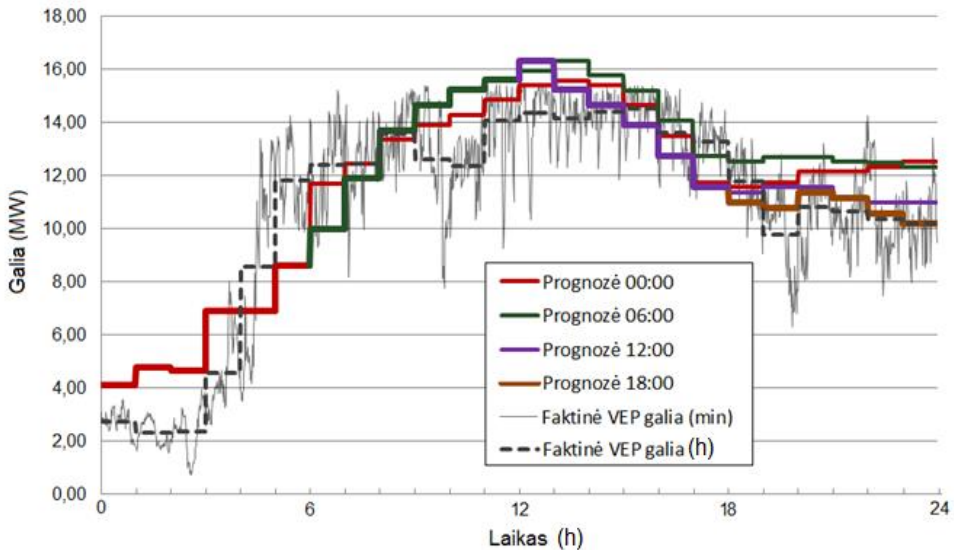
3.20 pav. Vėjo elektrinių parko paros prognozuota ir matuota galia ir vėjo greitis (2009-07-21)

Remiantis pradiniais (žr. 3.20 pav.) ir oro prognozės duomenimis statistiniu regresiniu modeliu, buvo prognozuota vienos paros, valandos intervalo VEP galia ir

palyginta su faktiniais duomenimis (žr. 3.21 pav.). Galios prognozė buvo atnaujinta kas 6 valandas (6, 12 ir 18 h). VEP faktinė vidutinė galia pateikta vienos minutės ir vienos valandos trukme.

Prognozuotų ir matuotų duomenų analizė rodo (žr. 3.21 pav.), kad grafike per pirmąsias tris valandas esantys prognozuojamų ir faktinių galių neatitikimai gali būti paaiškinti ne visų vėjo elektrinių darbu dėl per mažo vėjo greičio prie kai kurių parko elektrinių. Nustatyta, kad apskaičiavus vėjo elektrinių parko vidutinį 5,43 m/s vėjo greitį 10 min intervale (žr. 3.21 pav.), parko atskirose elektrinėse vėjo greitis buvo nuo 3,3 iki 5,9 m/s. Benaičių parko V100–2,75 tipo vėjo elektrinės pradeda dirbti esant 10 min vidutiniam 4,0 m/s vėjo greičiui ir stabdomos esant 3,0 m/s vėjo greičiui. Tokie VE darbo nustatymai daromi tam, kad būtų sumažinti nereikalingi vėjo elektrinių prisijungimai prie elektros tinklo. Tai rodo, kad valandinės vėjo prognozės ne visiškai atspindi VEP galimus darbo režimus ir sukurtam galios prognozavimo modeliui reikia papildomos informacijos. Taip pat, atliekant pirmines vėjo greičio prognozes nepavyko tiksliau įvertinti vėjo greičio sumažėjimo 10–11 valandomis ir po 18 valandos (žr. 3.21 pav.). Iš grafiko galima matyti, kad pirminė prognozė buvo netiksli per paskutines keturias paros valandas, o šeštą ir dvyliktą valandą buvo nepakankamai tiksli atmosferos prognozės. Tai ir lėmė VEP galių prognozavimo paklaidas.

Apskaičiuota vienos paros santykinė vidutinė paklaida (SVP) neatnaujintai prognozei yra 7,52 %, o atnaujintos kas 6 h prognozės SVP sumažėjo iki 7,42 %. Tyrimo rezultatų analizės pagrindu galima daryti išvadą, kad sukurtas statistinis regresinis galios prognozės modelis yra tinkamas ir perspektyvus VEP galiai prognozuoti.



3.21 pav. Vėjo elektrinių parko paros prognozuota ir faktinė galios (2009-07-21)

Palyginus modelio gautus rezultatus su literatūroje pateiktais kitų autorių tyrimų rezultatais nustatyta, kad gautos prognozių paklaidos yra panašios, o kai

kuriais atvejais net ir mažesnės už tipines, daugelio modelių gaunamas SVP paklaidas, svyruojančias apie 10 % VE parko įrengtosios galios vertės (Costa *et al.*, 2008; Junga, Broadwater, 2014).

Gauti rezultatai leidžia teigti, jog sudarytas statistinis regresinis galios prognozės modelis tinka VE parko galios kitimui prognozuoti ir gali būti universalus prognozavimo modelis, įvertinantis ne tik vėjo parametrų prognozavimo paklaidas, bet ir besikeičiančių VEP aplinkos veiksnių kitimo įtaką.

3.5. Pagrindiniai skyriaus rezultatai

1. Nustatyta, kad vėjo elektrinių parkų 30 s vidutinės galios pokyčių standartiniai nuokrypiai yra nedideli ir neviršija 1,31 % įrengtosios galios, o galios pokyčių koreliacija tarp parkų yra teigiama bet silpna 0,01, todėl reikalingas nedidelis pirminis galių reguliavimo rezervas. Vėjo elektrinių parkų 15 min vidutinės galios pokyčių standartiniai nuokrypiai yra pakankamai dideli ir siekia 3,39 % įrengtosios galios, o teigiama galios pokyčių koreliacija padidėja iki 0,53, todėl reikalingas didesnis antrinis galių reguliavimo rezervas.
2. Nustatyta, kad tarp vėjo elektrinių parkų galios pokyčių ir apkrovos galių pokyčių koreliacija yra neigiama, todėl vėjo elektrinių skverbtis į elektros energetikos sistemą didins visus operatyviusios galios rezervas.
3. Vėjo elektrinių parko generuojama galia esant vienodam vėjo greičiui gali kisti priklausomai nuo vėjo krypties, todėl vykdant elektros sistemų režimų skaičiavimus ir nustatant vėjo elektrinių parkų įtaką ir generuojamos galios kitimo diapazoną bei operatyviųjų galių rezervas, reikia vertinti vėjo krypties ir parkų geografinio išsidėstymo įtaką, kuri Benaičių VEP siekia 4,20 % įrengtosios galios.
4. Sudarytais vėjo elektrinių parko energijos balansavimo modeliais iširta, kad vėjo elektrinių galios balansavimo efektyvumo rodiklis yra 0,092 MW_e/GWh_s, kai šilumą papildomai gamina katilinė ir 0,247 MW_e/GWh_s, kai šilumą papildomai gamina šilumos siurbliai. Nustatyta, kad išnaudojant Lietuvos rajoninius šilumos poreikius, būtų galima papildomai subalansuoti nuo 350 MW iki 940 MW vėjo elektrinių galios, nesumažinant elektros perdavimo tinklo pralaidumo.
5. Nustatyta, kad išnaudojant tik Lietuvos rajoninius šilumos poreikius vėjo elektrinių integracijai pasiekti, Lietuvos energetikos sistemoje atsirastų po 1 170 MW elektrinės ir šiluminės galių paskirstytosios generacijos kogeneracinių elektrinių, 1 056 MW galios katilinių arba šilumos siurblių, 2 934 MWh talpos šilumos kaupiklių ir nuo 580 MW iki 760 MW galios saulės elektrinių parkų.
6. Nustatyta, kad balansuojant VEP kintančią galią kogeneracine elektrine ir šilumos siurbliu, MEES dažnio nuokrypis nežymiai viršija 0,4 Hz ribą, o panaudojus ir elektros energijos kaupiklį dažnio nuokrypis neviršija $\pm 0,2$ Hz ribų. Todėl įvykus sisteminei EES avarijai, tokia MES galėtų likti stabili ir sėkmingai dirbti bei aprūpinti vartotojus kokybiška šiluma ir elektra.
7. Nustatyta, kad patobulinto statistinio regresinio vėjo elektrinių parko galios prognozavimo modelio vienos paros galios prognozės santykinė vidutinė paklaida yra sumažinta ir neviršija 7,52 % įrengtosios galios.

IŠVADOS

Disertacijoje pristatyta vėjo elektrinių parkų energijos ir galios balansavimo pagal vietinių vartotojų elektros ir šilumos poreikį bei statistinio regresinio prognozavimo metodikos ir modeliai, skirti vėjo elektrinių integracijos į elektros energetikos sistemą galimybėms tirti. Pasiūlyta metodika leidžia energetikos sistemoje sukurti savarankiškai valdomas mažąsias energetikos sistemas ir sukurtais modeliais nustatyti jų techninius parametrus, užtikrinti kokybiškus darbo režimus ir pasiekti teigiamą poveikį elektros energetikos sistemai. Atlikti moksliniai tyrimai leidžia daryti šias išvadas:

1. Nustatyta, kad tirtų vėjo elektrinių parkų 30 s trukmės vidutinės galios pokyčių standartiniai nuokrypiai yra nedideli ir neviršija 1,31 % įrengtosios galios, o galios pokyčių koreliacija tarp parkų yra teigiama, bet silpna 0,01. Vėjo elektrinių parkų 15 min. trukmės vidutinės galios pokyčių standartiniai nuokrypiai padidėja iki 3,39 % įrengtosios galios, o teigiama galios pokyčių koreliacija tarp vėjo elektrinių parkų padidėja iki 0,53. Taip pat nustatyta, kad vėjo krypties ir elektrinių geografinio išsidėstymo įtaka Benaičių parko generuojamai galiai sudaro iki 4,20 % įrengtosios suminės galios.
2. Nustatyta, kad užtikrinant visos Lietuvos rajoninius šilumos poreikius būtų galima subalansuoti iki 350 MW vėjo elektrinių galios, kai papildoma šiluma gaminama katilinėse ir iki 940 MW – šilumos siurbliais, nesumažinant elektros perdavimo tinklo pralaidumo ir įrengiant iki 1 170 MW galios paskirstytosios generacijos kogeneracinių elektrinių.
3. Nustatyta, kad balansuojant vėjų elektrinių parko kintančią galią kogeneracine elektrine ir šilumos siurbliu mažosios elektros energetikos sistemos dažnio nuokrypis nežymiai viršija $\pm 0,4$ Hz, o panaudojus ir elektros energijos kaupiklį dažnio nuokrypis neviršija $\pm 0,2$ Hz. Šie rezultatai rodo, kad įvykus totalinei elektros energetikos sistemoje avarijai, sukurta mažoji energetikos sistema galėtų likti stabili ir sėkmingai dirbti bei aprūpinti vartotojus kokybiška šiluma ir elektra.
4. Patobulinto vėjo elektrinių parko galios prognozės modelio, įvertinančio vėjo greitį ir kryptį, atmosferos slėgį ir temperatūrą, vėjo ir atmosferos prognozių sistemingąsias paklaidas, elektrinių išdėstymą parko teritorijoje, natūralias ir dirbtinas kliūtis, žemės paviršiaus šiurkštumą ir nuolatinį jų kitimą, vienos paros santykinė vidutinė paklaida neviršija 7,52 % įrengtosios galios.

LITERATŪROS SARAŠAS

ABBEY, Ch. and G. J. FELLOW. Supercapacitor Energy Storage for Wind Energy Applications, [interaktyvus] IEEE Transactions on industry applications, 2007, Volume 43, ISSN: 0093 – 9994 p. 769 – 776 [žiūrėta 2014 03 24] Prieiga per: <http://ieeexplore.ieee.org/>

ADAMS T., and F. CADIEUX. Wind power in Ontario: Quantifying the benefits of geographic diversity. *Publication: Engineering Institute of Canada, 2nd Climate Change Technology Conference*, May 12-15 2009 McMaster University. [interaktyvus] [žiūrėta 2014 03 05] Prieiga per: http://tomadamsenergy.com/wp-content/uploads/2009/05/windpowergeodiversitybenefits_adams_cadieux-colour-graphs-and-citation1.pdf

ADOMAVIČIUS V. Šiuolaikiniai elektros energijos kaupikliai *Kauno technologijos universitetas* 2011 [interaktyvus]. [žiūrėta 2014 03 20] Prieiga per: <http://gjstudija.net/ltma/ltma-darbai/LTMAMd-7-VA-ElektKaup.pdf>

AGAMALOV, O. N. Excitation Control of the Synchronous Machines with use an Error Function of the Complex Argument. *WSEAS TRANSACTIONS on POWER SYSTEMS*, vol. 4, 2012. [interaktyvus] [žiūrėta 2014 04 22]. Prieiga per: <http://www.wseas.org/multimedia/journals/power/2012/55-397.pdf>

ANDERSSON G. Dynamics and Control of Electric Power Systems *EEH - Power Systems Laboratory, ETH Zurich* 2012.

ANDRIUŠKEVIČIUS, R., ir kt., Vėjo elektrinių generuojamos galios svyravimų ir jų galimos įtakos Lietuvos elektros energetikos sistemos darbui įvertinimas. // Lietuvos mokslų akademijos leidykla, *Energetika*. 2004, nr. 3, p.45–50.

AŽUBALIS M., et al. Estimation of the Feasible Wind Power in a Small Power System. // *Electronics and Electrical Engineering*. – Kaunas: Technologija, 2011. No. 1(107). p. 79–82.

BADGER, J. et al. Report on the Use of Stability Parameters and Mesoscale Modelling in Short-Term Prediction. *Risø-R-Report*. [interaktyvus] Wind Energy Department, Risøe National Laboratory, Technical University of Denmark, Roskilde, Denmark, 2007. 32 p. ISSN 0106–2840, ISBN 978-87-550-3615-4 [žiūrėta 2014 03 22] Prieiga per: <http://www.researchgate.net/>

BARANAUSKAS, A., and M. AŽUBALIS. The evaluation of the load and wind power forecasting errors // *Electrical and control technologies: proceedings of the 9th international conference on electrical and control technologies ECT 2014 / Kaunas University of Technology, IFAC Committee of National Lithuanian Organisation, Lithuanian Electricity Association*. Kaunas: Technologija. ISSN 1822–5934. 2014, p. 162–167.

BENALIA, L. Control of a Double Feed and Double Star Induction Machine Using Direct Torque Control, *INTECH*, 2011. [interaktyvus] [žiūrėta 2013 04 22]. Prieiga per: <http://www.intechopen.com/books/howtoreference/torque-control/control-of-a-double-feed-and-double-star-induction-machine-using-direct-torque-control>

BENDIKAS, T., and A. NEMURA. The mathematical model of fixed-speed wind turbine from Engineering/*The Lithuanian Academy of Sciences*. 2005. ISSN 0235-7208. No. 1. p. 53–61

BIRGIOLAS, E., ir V. KATINAS. Vėjo srauto parametrų kitimo dėsningumų tyrimas Lietuvos pajūryje. // Lietuvos energetikos institutas, Lietuvos mokslų akademijos leidykla, *Energetika* 2006. Nr. 2. P. 29 – 33.

CHANG, W. A., Literature Review of Wind Forecasting Methods *Journal of Power and Energy Engineering*, [interaktyvus] 2014, 2, 161-168 Published Online April 2014 in

SciRes [žiūrėta 2014 12 22] Prieiga per:

<http://www.scirp.org/Journal/PaperInformation.aspx?PaperID=44881>

CONNOLLY, D., et al. 2010. A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems, *Applied Energy* 87(4) [interaktyvus]: 1059–1082. [žiūrėta 2012 03 16] Prieiga per: <http://www.sciencedirect.com/>

COSTA, A., et al. A review on the young history of the wind power short-term prediction *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [interaktyvus] 2008 Volume 12, Issue 6, August 2008, Pages 1725–1744. [žiūrėta 2013 04 19] Prieiga per:

<http://www.sciencedirect.com/>

CHATTERJEE S., and J. S. SIMONOFF. Wiley Handbooks in Applied Statistics: Handbook of Regression Analysis : NJ, USA: Wiley, 2013.- 252 pp

CHEN, X ., et al. Increasing the Flexibility of Combined Heat and Power for Wind Power Integration in China: Modeling and Implications. [interaktyvus] *Power Systems, IEEE Transactions on* 2015 Volume:30, Issue: 4 ISSN: 0885–8950 p. 1848 – 1857 [žiūrėta 2015 02 24] Prieiga per: <http://ieeexplore.ieee.org/>

ČEKANA VIČIUS V., ir G. MURAU SKAS. Statistika ir jos taikymai. D.2-Vilnius: TEV, 2004.- 272p. ISBN 9955-491-16-7

ČIČINSKAS, R., ir kt., Įvairių kogeneracijos technologijų įrengimo galimybių ir sąnaudų studijos bei rekomendacijų dėl šių technologijų diegimo parengimas, 2007 Ataskaita Nr.012007 Termo Sistemų Projektai [interaktyvus]. [žiūrėta 2013 02 24] Prieiga per:

<http://www.ena.lt/Ataskaitos/Kogener.pdf>

DEKSNYS R. P., and R. STANIULIS. Penetration and integration of wind power plants into Lithuanian power system // *Oil Shale, Estonian Academy Publishers*, 2009 ISSN 0208–189X, *Oil Shale*, Vol. 26, No. 3 Special, pp. 319–330

DEKSNYS R. P., and D. ALIŠAUSKAS. Transient processes and dynamic of variable speed pump storage unit // *Oil Shale, Estonian Academy Publishers*, 2013 ISSN 0208–189X, *Oil Shale*, Vol. 30, No. 2S, pp. 244–256

DEKSNYS R. P., et al. Possibilities of wind power plants penetration into electric power system // *Electrical and Control Technologies ECT - 2008: 3rd International conference*. Kaunas: Technologija, 2008. ISBN 978-9955-25-484-3. p. 27–31.

EMD International A/S. energyPRO User’s guide. 2014. [interaktyvus] [žiūrėta 2014 02 12]. Prieiga per: <http://www.emd.dk/energypro/>

Emerson Climate Technologies 2012. ATMOSphere Europe. Ammonia will defend its market-leading position in Europe. 23 October 2013, [žiūrėta 2014 01 09]. Prieiga per:

http://www.ammonia21.com/web/assets/companybrochure/file/448_dvi143_neatpump_en_1209.pdf

EPA United States Environmental Protection Agency, USEPA William Jefferson Clinton Building South 1200 Pennsylvania Avenue N.W. Washington, DC 20004.

[interaktyvus] [žiūrėta 2015 10 09]. Prieiga per: www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/catalog_of_chp_technologies.pdf

ERNST, B. Short – Term Power Fluctuations of Wind Turbines from the Ancillary Services Viewpoint. Institut für Solare Energieversorgungstechnik Königstor 59 D-34119 Kassel Germany 2005, [interaktyvus]. [žiūrėta 2014 03 20] Prieiga per: <http://www.iset.uni-kassel.de>

ESA Energy Storage Association, Washington, DC 20005 USA. 2012. [interaktyvus] [žiūrėta 2012 01 09]. Prieiga per: <http://www.energystorage.org/technology/>

EVANS, A., et al., Assessment of utility energy storage options for increased renewable energy penetration *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [interaktyvus] Volume 16, Issue 6, August 2012, Pages 4141–4147 Graduate School of the Environment,

Faculty of Science, Macquarie University, Sydney NSW 2109, Australia [žiūrėta 2015 05 16] Prieiga per: <http://www.sciencedirect.com/>

European Commission Directorate-General for Energy in collaboration with Climate Action DG and Mobility and Transport DG. – European Union, 2010. EU energy trends to 2030 – UPDATE 2009. [interaktyvus]. Prieiga per internetą:

http://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020/docs/trends_to_2030_update_2009_en.pdf

European Commission Reference scenario 2013. EU energy, transport and GHG emissions trends to 2050.[interaktyvus]. [žiūrėta 2014 01 20] Prieiga per:

<http://ec.europa.eu/transport/media/publications/doc/trends-to-2050-update-2013.pdf>

Europos Parlamento ir tarybos direktyva 2009/28/EB dėl skatinimo naudoti atsinaujinančių išteklių energiją // Oficialus ES leidinys, 2009 m. gegužės 6 d. [interaktyvus].

[žiūrėta 2014 01 20] Prieiga per: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0028&from=EN>

FOLEY, M., et al. Current methods and advances in forecasting of wind power generation *Renewable Energy* [interaktyvus] 37 2012 1e8 [žiūrėta 2013 04 19] Prieiga per:

<http://www.sciencedirect.com/>

GASSET, N., et al. Comparison of Wind Flow Models for Wind Resource Assessment in Wind Energy Applications *Energies* 2012, 5, 4288-4322; doi:10.3390/en5114288 [žiūrėta 2014 03 22] Prieiga per: <http://www.mdpi.com/1996-1073/5/11/4288>

GAUR, AJAI S., (2007) Statistical methods for practice and research: a guide to data analysis using SPSS. New Delhi: Response Books.

GELAŽANSKAS, L., et al. Hybrid wind power balance control strategy using thermal power, hydropower and flow batteries. *Electrical Power and Energy Systems* 74 (2016) 310–321. 2015 [interaktyvus]. [žiūrėta 2015 08 16] Prieiga per:

<http://www.sciencedirect.com/>

Global Wind Energy Council, Global Wind Statistics 2014 [interaktyvus] [žiūrėta 2015 01 16]. Prieiga per: <http://www.gwec.net/global-figures/graphs/>

GOMES, P., and R. Castro. Wind Speed and Wind Power Forecasting using Statistical Models: AutoRegressive Moving Average (ARMA) and Artificial Neural Networks (ANN) *International Journal of Sustainable Energy Development (IJSED)*, Volume 1, Issues 1/2, March/June 2012. V.

HAMMONS, T. J. Dispersed generation and its impact in europe on power system structure and secure power system operation. *Cybernetics & Systems* July 2007.

[interaktyvus]. [žiūrėta 2013 04 20]. Prieiga per internetą <http://ieeexplore.ieee.org>

HAN, S.et al. Tabu Search Algorithm Optimized ANN Model for Wind Power Prediction with NWP *ICSGCE* 2011: 27–30 September 2011, Chengdu, China, ISSN: 1876-6102 *Energy Procedia* [interaktyvus] 12 (2011) 733-740. [žiūrėta 2014 02 21] Prieiga per:

<http://www.sciencedirect.com/>

HEDEGAARD, K., et al. Wind power integration using individual heat pumps - Analysis of different heat storage options. [interaktyvus] *Energy* 11/2012; 47(1):284–293. DOI: 10.1016/j.energy.2012.09.030 [žiūrėta 2015 03 21] Prieiga per:

<http://www.researchgate.net/>

International Electrotechnical Commission (IEC), Grid integration of large-capacity Renewable Energy sources and use of large-capacity Electrical Energy Storage. Geneva, Switzerland 2012. [interaktyvus] [žiūrėta 2014 03 22] Prieiga per: <http://www.iec.ch>

YANG, Y., et al. The large-scale wind power integration using the integrated heating load and heating storage control. [interaktyvus] PowerTech, Conference, Eindhoven. IEEE 2015, p. 1–6 [žiūrėta 2015 08 14] Prieiga per: <http://ieeexplore.ieee.org/>

YAMAGUCHI, A. and T. Ishihara. Wind Power Forecasting by using Physical and Statistical Approach Department of Civil Engineering, School of Engineering, *The University of Tokyo* [interaktyvus] 2010 [interaktyvus]. [žiūrėta 2015 03 12] Prieiga per: http://windeng.t.u-tokyo.ac.jp/ishihara/proceedings/2010-2_poster.pdf

JANILIONIS, V. Daugialypės regresinės analizės taikymas socialiniuose tyrimuose: Lietuvos HSM duomenų archyvas [žiūrėta 2014-06-30]. Prieiga per: http://www.lidata.eu/index.php?file=files/mokymai/Janilionis_IV/jan_IV.html&course_file=jan_IV_1.html/

JANILIONIS, V. Koreliacinės ir regresinės analizės pagrindai: Lietuvos HSM duomenų archyvas - [interaktyvus] [žiūrėta 2014-06-30]. Prieiga per: http://www.lidata.eu/index.php?file=files/mokymai/Janilionis_III/jan_III.html&course_file=jan_III_2.html/

JONAITIS, A. Atsinaujinančius energijos išteklius naudojančių elektrinių prijungimo prie 330–110 kV elektros perdavimo tinklo iki 2030 m. galimybių studija (vieša versija) // Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros energetikos sistemų katedra. 2014 m. [interaktyvus] [žiūrėta 2015 01 17] Prieiga per: http://www.enmin.lt/20140916_LITGRID_AEI_viesa_ataskaita.pdf

JUNGA, J., and R. BROADWATER. Current Status and Future Advances for Wind Speed and Power Forecasting Renewable and Sustainable *Energy Reviews* [interaktyvus] Volume 31, March 2014, Pages 762–777 [žiūrėta 2015 04 25] Prieiga per: <http://www.sciencedirect.com/>

KONDOH, J., Autonomous frequency regulation by controllable loads to increase acceptable wind power generation. [interaktyvus] National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Energy Technology Research Institute, Central 2, Tsukuba, Ibaraki, Japan, *Wind Energy*. 09/2009; 13 (6):529 – 541. DOI: 10.1002/we.375 [žiūrėta 2015 03 22] Prieiga per: <http://www.researchgate.net/>

KUHI-THALFELDT R., and J. VALTIN Combined Heat and Power Plants Balancing Wind Power// Estonian Academy Publishers, Oil Shale, 2009, Vol. 26, No. 3 Special, pp. 294–308 ISSN 0208-189X

KULKARNI, S. S. AND A. G. THOSAR. Mathematical Modeling and Simulation of Permanent Magnet Synchronous Machine, *International Journal of Electronics and Electrical Engineering*, vol. 1, 2013

Lietuvos statistikos departamentas, Oficialiosios statistikos portalas 2015 [interaktyvus], [žiūrėta 2015 04 16] Prieiga per internetą: <http://osp.stat.gov.lt/statistiniu-rodikliu-analize1>

Lietuvos šilumos tiekėjų asociacija [interaktyvus] [žiūrėta 2014-03-30]. Prieiga per: http://www.lsta.lt/files/statistika/19493_LSTA_Ukines%20veiklos%20apzvalga_2012_WEB.pdf

LIWEI WANG J. J. et al. Re-examination of Synchronous Machine Modeling Techniques for Electromagnetic Transient Simulations, *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, [interaktyvus] vol. 22, 2007. 1221 - 1230 [žiūrėta 2013 04 14] Prieiga per: <http://ieeexplore.ieee.org/>

LU, Y., et al. Intelligent Islanding Technique Considering Load Balance for Distribution System with DGs. *Cybernetics & Systems* October 2006. [interaktyvus]. [žiūrėta 2013 04 20]. Prieiga per: <http://ieeexplore.ieee.org>

LUND, H., et al. From electricity smart grids to smart energy systems e A market operation based approach and understanding. [interaktyvus] *Energy*. 06/2012; 42(1):96–102. DOI: 10.1016/j.energy.2012.04. [žiūrėta 2015 03 21] Prieiga per: <http://www.researchgate.net/>

MARČIUKAITIS, M. Vėjo elektrinių galios prognozavimo galimybės Lietuvoje // Lietuvos energetikos institutas, Lietuvos mokslų akademijos leidykla, *Energetika*. 2007. T. 53. Nr. 3. P. 72–76

MARTINAITIS, M., ir kt. Nedidelės galios kogeneracinių jėgainių šilumos akumuliatorių dydžių paieška. Lietuvos mokslų akademijos leidykla, *Energetika*, 2004, Nr. 2, p. 47–53.

MCCLAVE, JAMES T. Statistics for business and economics. (2006) Upper Saddle River : Pearson Prentice Hall

MOLINA G. M., (2010). Dynamic Modelling and Control Design of Advanced Energy Storage for Power System Applications, Dynamic Modelling, ISBN: 978-953-7619-68-8, InTech, [interaktyvus] March 2010, [žiūrėta 2015 04 27] Prieiga per:

<http://www.intechopen.com/books/dynamic-modelling/dynamic-modelling-and-control-designof-advanced-energy-storage-for-power-system-applications>

NIELSEN, K., et al. Radiation sensitivity tests of the HARMONIE 37h1 NWP model The Smithsonian/NASA *Astrophysics Data System*, [interaktyvus] Geoscientific Model Development, Volume 7, Issue 4, 2014, pp.1433-1449 [žiūrėta 2015 03 12] Prieiga per: <http://www.geosci-model-dev-discuss.net/6/C3052/2014/gmdd-6-C3052-2014-supplement.pdf>

NORUŠIS MARIJA J. IBM SPSS 19.0 Guide to Data Analysis. USA: Pearson. 2012.- 672 pp. ISBN-10: 0321748417, ISBN-13: 9780321748416

OULD ABDESLAM, D. et al., Steady-State Analysis and Control of Double Feed Induction Motor. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. 6, 2012. [interaktyvus] [žiūrėta 2014 02 26]. Prieiga per: <http://waset.org/publications/6500/steady-state-analysis-and-control-of-double-feed-induction-motor>

QU, L. and W. QIAO. Constant Power Control of DFIG Wind Turbines With Supercapacitor Energy Storage, [interaktyvus] IEEE Transactions on industry applications, 2011, Volume 47, ISSN: 0093 – 9994 p. 359 – 367 [žiūrėta 2014 03 24] Prieiga per: <http://ieeexplore.ieee.org/>

PARKS, K., et al. Wind Energy Forecasting: A Collaboration of the National Center for Atmospheric Research (NCAR) and Xcel Energy NREL is a national laboratory of the U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, operated by the Alliance for Sustainable Energy, LLC. *Subcontract Report*. [interaktyvus] NREL/SR-5500–52233 October 2011. [žiūrėta 2015 03 12] Prieiga per: <http://www.nrel.gov/docs/fy12osti/52233.pdf>

SHENBO YU. and R. TANG. Electromagnetic and Mechanical Characterizations of Noise and Vibration in Permanent Magnet Synchronous Machines, *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, [interaktyvus] vol. 42, 2006. 1335 – 1338 [žiūrėta 2013 04 14] Prieiga per: <http://ieeexplore.ieee.org/>

SIDERATOS, G. and N. D. HATZIARGYRIOU. An Advanced Statistical Method for Wind Power Forecasting Power Systems, [interaktyvus] *IEEE Transactions on*, 2007, Volume 22 , Issue 1 ISSN : 0885-8950 p. 258 – 265 [žiūrėta 2014 03 24] Prieiga per: <http://ieeexplore.ieee.org/>

SINGH, M. Dynamic Models for Wind Turbines and Wind Power Plants, *NREL Technical Monitor: Eduard Muljadi Prepared under Subcontract*, vol. XEE-8-77567-01, 2008 –2011. [interaktyvus] [žiūrėta 2013 04 25]. Prieiga per: <http://www.nrel.gov/docs/fy12osti/52780.pdf>

STATHOPOULOS, Ch., et al. Wind power prediction based on numerical and statistical models *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* [interaktyvus] January 2013, Pages 25–38 [žiūrėta 2014 05 23] Prieiga per: <http://www.sciencedirect.com/>

SUWANNARAT, A., et al. Power System Operation with Large Scale Wind Power Integration. *Power Tech*, 2007 IEEE Lausanne [interaktyvus]. [žiūrėta 2015 08 16] Priega per: <http://ieeexplore.ieee.org/>.

SORKNÆS, P., et al. Overview of current status and future development scenarios of the electricity system in Denmark – allowing integration of large quantities of wind power [interaktyvus] Facilitating energy storage to allow high penetration of intermittent renewable energy 2013 [žiūrėta 2015 02 27] Priega per: www.store-project.eu

Vestas. Technical description V100 – 2,75 MW [interaktyvus] [žiūrėta 2011 03 21]. Priega per: http://exportinitiative.dena.de/fileadmin/publikationen_veranstaltungsdoku/dokumente/BF_Windenergie_06/2_J._Clausen_VESTAS.pdf

ZHAO, H., et al. Review of energy storage system for wind power integration support, *Applied Energy* [interaktyvus] Volume 137, 1 January 2015, Pages 545–553 [žiūrėta 2015 05 16] Priega per: <http://www.sciencedirect.com/>

WAN, Y. Wind Power Plant Behaviors: Analyses of Long-Term Wind Power Data. Technical Report 2004, NREL/TP-500-36551 [interaktyvus]. [žiūrėta 2014 03 20] Priega per: <http://www.nrel.gov/docs/fy04osti/36551.pdf>

WAN, Y. Summary Report of Wind Form Data September 2008. Technical Report, NREL/TP-500-44348 May 2009. [interaktyvus]. [žiūrėta 2014 03 20] Priega per: <http://www.nrel.gov/docs/fy09osti/44348.pdf>

WANG, X., et al. A Review. of Wind Power Forecasting Models. [interaktyvus] *Energy Procedia*. Volume 12, 2011, Pages 770–778. (ICSGCE 2011) [žiūrėta 2015 03 21] Priega per: <http://www.sciencedirect.com/>

MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ SĄRAŠAS DISERTACIJOS TEMA

STRAIPSNIAI

Tarptautinėse duomenų bazėse esančiuose mokslo leidiniuose paskelbti straipsniai „Thomson Reuters Web of Science“ leidiniuose, turinčiuose citavimo indeksą

1. Deksnys, Rimantas Pranas; **Stankevičius, Aldas**; Investigation of wind power generation in Lithuania // Oil Shale. Tallin, Estonian Academy Publishers. ISSN 0208-189X. 2011, Vol. 28, sp. iss. SI. 2011.
2. Deksnys, Rimantas Pranas; **Stankevičius, Aldas**; Statistical analysis of power generation of wind parks // Elektronika ir elektrotechnika = Electronics and Electrical Engineering. Kaunas, KTU. ISSN 1392-1215. 2012, nr. 2(118). 2012.

Kitų tarptautinių duomenų bazių leidiniuose

3. Deksnys, Rimantas Pranas; **Stankevičius, Aldas**; Investigation of changes in power generation in wind power parks // Electrical and Control Technologies: proceedings of the 6th international conference on Electrical and Control Technologies ECT 2011 / Kaunas University of Technology, IFAC Committee of National Lithuanian Organisation, Lithuanian Electricity Association. Kaunas : Technologija 2011. p. 299-302. ISSN 1822-5934.
4. Deksnys, Rimantas Pranas; **Stankevičius, Aldas**; Modelling and analysis the compensation of power fluctuation of wind power farm // Electrical and control technologies : proceedings of the 8th international conference on electrical and control technologies ECT 2013, May 2-3, 2013, Kaunas, Lithuania / Kaunas University of Technology, IFAC Committee of National Lithuanian Organisation, Lithuanian Electricity Association. Kaunas, Technologija. ISSN 1822-5934. 2013.
5. Deksnys, Rimantas Pranas; **Stankevičius, Aldas**; Modelling and analysis of wind and solar generation // Electric power quality and supply reliability : 9th international conference PQ2014, June 11-13, 2014, Rakvere, Estonia : conference proceedings / Tallinn University of Technology. Piscataway, NJ : IEEE, 2014. p. 139-142.

SL344. 2016-05-12, 11,5 leidyb. apsk. I. Tiražas 12 egz. Užsakymas 209.
Išleido Kauno technologijos universitetas, K. Donelaičio g. 73, 44249 Kaunas
Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas