



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Mantas Zelba

SKAITINIS INTELEKTAS VĖJO ELEKTRINIŲ PARKO ELEKTROS
ENERGIJOS GAMYBOS PROGNOZAVIMUI

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Prof. dr. Adas Gelžinis

KAUNAS, 2018

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA

SKAITINIS INTELEKTAS VĖJO ELEKTRINIŲ PARKO ELEKTROS
ENERGIJOS GAMYBOS PROGNOZAVIMUI

Baigiamasis magistro projektas

Elektros energetikos sistemos (kodas 621H63005)

Vadovas

(parašas) Prof. dr. Adas Gelžinis
(data)

Recenzentas

(parašas) Lekt. dr. Miglė Kriuglaitė-Jarašiūnienė
(data)

Darbą atliko

(parašas) Mantas Zelba
(data)

KAUNAS, 2018



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Mantas Zelba

(Studento vardas, pavardė)

Elektros energetikos sistemos, 621H63005

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Skaitinis intelektas vėjo elektrinių parko elektros energijos gamybos prognozavimui“

AKADEMINIO SAŽNINGUMO DEKLARACIJA

20 ____ m. _____ d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Manto Zelbos**, baigiamasis darbas tema „Skaitinis intelektas vėjo elektrinių parko elektros energijos gamybos prognozavimui“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad, išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Zelba, Mantas. Skaitinis intelektas vėjo elektrinių parko elektros energijos gamybos prognozavimui. Magistro baigiamasis projektas, vadovas prof. dr. Adas Gelžinis; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros energetikos sistemų katedra.

Mokslo kryptis ir sritis: Elektros ir elektronikos inžinerija, Technologiniai mokslai

Reikšminiai žodžiai: prognozė, vėjo elektrinių parkas, elektros energija, dirbtinis neuroninis tinklas, atsitiktiniai miškai, tiesinė regresija.

Kaunas, 2018. 59 psl.

SANTRAUKA

Darbo tikslas yra ištirti esamam vėjo elektrinių parkui, valandai ir kelioms valandoms į ateitį elektros energijos gamybos prognozes, prognozavimui naudojant informaciją apie esamą ir buvusią elektros energijos gamybą bei joms daromą įtaką, įtraukiant LHMT vėjo greičio prognozes.

Darbe naudojant dirbtinius neuroninius tinklus, atsitiktinius miškus ir tiesinę regresiją prognozuojama elektros energijos gamyba valandai ir kelioms valandoms į ateitį. Pradžioje prognozavimui pasitelkiama vien vėjo elektrinių parko buvusi gamyba. Prognozavimo metodai apmokomi su elektros energijos gamybos istorija, su buvusią gamyba, kuri buvo prieš valandą, dvi, tris ir daugiau. Prognozavimo metodų apmokymams naudojant tokią gamybos istoriją, jų spėjimo rezultatas – būsima sekančios valandos elektros energijos gamyba. Prognozuotų ir realių elektros energijos gamybos reikšmių palyginimui skaičiuojama RMSE (Root Mean Square Error – vidutinė kvadratinė paklaida) paklaida, tam, kad būtų galima prognozių metodus palyginti tarpusavyje.

Sekančiame etape prognozavimo metodai apmokomi su buvusią vėjo elektrinių parko elektros energijos gamybą kartu su vėjo greičio bei krypties prognozėmis. Vėjo greičio ir krypties prognozes VEP, 100 metrų aukštyje, pateikė Lietuvos hidrometeorologijos tarnyba prie aplinkos ministerijos. Apmokytiems metodams, pateikus buvusią elektros energijos gamybą (prieš valandą, dvi ir tris) ir sekančios valandos vėjo prognozes, prognozuojama vėjo elektrinių parko sekančios valandos elektros energijos gamyba. Kaip ir pirmosios prognozės atveju, skaičiuojama RMSE paklaida ir įvertinama vėjo prognozių įtaka prognozuojant vėjo elektrinių parko elektros energijos gamybą.

Darbe tarpusavyje palyginti ne tik prognozavimo metodai, bet ir kaip tiksliai kiekvienas iš metodų prognozuoja elektros energijos gamybą prie atitinkamo vėjo greičio, ar atitinkamą vėjo prognozės valandą.

Zelba, Mantas. Computational Intelligence for the Wind Farm Electricity Production Forecast: Master`s thesis in Electrical Engineering, supervisor prof. dr. Adas Gelžinis; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Department of Electric Power Systems.

Research area and field: Electrical and Electronics Engineering, Technological Sciences

Keywords: predict, forecast, wind farm, electricity generation, artificial neural network, random forests, linear regression.

Kaunas, 2018. 59 p.

SUMMARY

The aim of the work is to investigate the electricity production forecasts, hour and a few hours ahead, for the existing wind farm, using electricity production existing and history information, including LHMT wind speed forecast influence on electricity production forecasts.

In the project using artificial neural networks, random forests and linear regression electricity production forecast is made an hour and a few hours ahead. Firstly, only data is used for forecasting. The forecasting methods are trained with wind farm electricity production history, the production, which was an hour ago, two, three hours and more. Trained forecasting methods with past wind farm electricity production, predicts result – the next hour electricity production. RMSE (Root Mean Square Error) error is calculated between predicted and actual wind farm electricity production values and forecasting methods are compared.

In the next stage, forecasting methods are trained with the past wind farm production (like in a first part) together with wind speed and its direction forecast. Wind forecast is calculated for a wind farm area 100 meters high and provided by Lithuanian hydro meteorological service under the Ministry of the Environment. Trained forecasting methods predicts the next hour electricity production from the past production and next hour wind forecast. As in the first part, RMSE error is calculated between predicted and actual wind farm electric power production and forecasting methods compared again. Compared RMSE errors will be an answer, that influence does the wind forecast to predicting wind farm electricity production.

The work includes not only compared forecasting method, but also how well each of the methods predicts the electricity production at the appropriate wind speed, or the corresponding hour of the wind forecast.

TURINYS

| | |
|--|----|
| SANTRUMPŲ IR ŽENKLŲ AIŠKINIMO ŽODYNAS | 7 |
| ĮVADAS..... | 8 |
| 1. ELEKTROS ENERGIJOS GAMYBOS PROGNOZAVIMO METODAI | 10 |
| 1.1. Elektros energijos gamybos prognozės | 10 |
| 1.2. Prognozių tikslumo apskaičiavimo metodai | 17 |
| 1.3. Dirbtiniai neuroniniai tinklai | 20 |
| 1.4. Atsitiktiniai miškai | 23 |
| 2. VĖJO ELEKTRINIŲ PARKO ELEKTROS ENERGIJOS GAMYBOS PROGNOZIŲ SKAIČIAVIMAS | 26 |
| 2.1. Vėjo elektrinių parko ir Lietuvos hidrometeorologijos tarnybos vėjo prognozių aprašymas | 26 |
| 2.2. Lietuvos hidrometeorologijos tarnybos prognozuoto vėjo paklaida | 29 |
| 2.3. Prognozė „Persistence“ metodu | 33 |
| 2.4. Prognozė tik pagal buvusią gamybos istoriją | 34 |
| 2.5. Optimalaus vėjo elektrinių parko elektros energijos gamybos istorijos valandų skaičiaus nustatymas. | 36 |
| 2.6. Prognozių palyginimas skirtingoms šešioms vėjo prognozės valandoms..... | 39 |
| 2.7. Prognozių paklaidos dydis pagal vėjo greitį | 41 |
| 2.8. Prognozė su gera vėjo prognoze..... | 43 |
| 2.9. Prognozavimo metodų palyginimas | 45 |
| 3. EKONOMINIS PROGNOZAVIMO METODŲ PALYGINIMAS..... | 50 |
| IŠVADOS..... | 55 |
| INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS | 57 |

SANTRUMPŲ IR ŽENKLŲ AIŠKINIMO ŽODYNAS

VEP – vėjo elektrinių parkas;

DNT – dirbtinis neuroninis tinklas;

RF – atsitiktiniai miškai (Random Forests);

TR – tiesinė regresija;

RMSE – root means square error (vidutinė kvadratinė paklaida);

LHMT – Lietuvos hidrometeorologijos tarnyba prie Aplinkos ministerijos.

ĮVADAS

Keičiantis pasaulio klimatui vis daugiau dėmesio skiriama energijai, kuri išgaunama neteršiant gamtos. Tokia energija išgaunama iš hidroelektrinių, vėjo, saulės ir geoterminių elektrinių. Geoterminių bei hidroelektrinių pagaminamą energiją nesunku nuspėti ir kontroliuoti. Įrenginėjant vis didesnius kiekius saulės ir vėjo elektrinių susiduriama su kliūtimi, kad tai ne pastovios energijos šaltiniai, o energijos šaltiniai, kurių generuojama elektros energija nuolat kinta laike, priklausomai nuo vėjo arba saulės. Kai įrengta nedaug tokių elektrinių, jų galios svyravimai dideliame elektros sistemos tinklui, jos stabilumui problemų nesukelia, bet kai jų įrengta sąlyginai daug, elektros tinkle didėja nepastovios galios dydis, kurį staigiai nutraukus, užėjus debesiai ar nustojus pūsti vėjui, reikia kompensuoti kitokiais elektros energijos gamybos šaltiniais.

Tiek Europos Sąjungos, tiek Lietuvos atsinaujinantys energijos ištekliai pagamina vis didesnę dalį reikalingos elektros energijos. Lietuva 2016 metais Europos Sąjungoje instaliavo daugiausiai vėjo elektrinių 15,7 %, lyginant pagal šalies elektros energijos poreikius [3], o 2017 metais Lietuva visai neinstaliavo vėjo elektrinių [22]. „Litgrid“ duomenimis, per 2017 m. naudojant atsinaujinančius energijos išteklius iš viso pagaminta beveik 3,02 TWh elektros energijos, tai sudarė 28,07 proc. galutinio elektros energijos suvartojimo (10,76 TWh) Lietuvoje [1]. 2017 metais, bendras elektros energijos suvartojimas (galutinio elektros energijos suvartojimo ir tinklų technologinių sąnaudų suma) Lietuvoje siekė 11,726 TWh elektros energijos, o iš vėjo energijos išteklių pagaminta elektros energija siekė 1,357 TWh [2]. Lietuvoje vien vėjo energijos ištekliai patenkino daugiau nei dešimtadalį (10,5 proc.) visos šalies elektros energijos poreikio, kai Europos Sąjungos 28 šalys vidutiniškai kompensavo 11,6 proc. metinio elektros energijos poreikio iš vėjo energetikos [22]. Per 2017 metus Lietuvoje buvo pagaminta 3,866 TWh elektros energijos [1] ir daugiau nei trečdalį šios energijos pagamino vėjo elektrinės. Atsižvelgus į elektros energijos poreikių ir Lietuvoje pagamintos elektros energijos kiekius, vėjo elektrinės užima nemažą dalį elektros rinkos Lietuvoje, o dėl tokios sąlyginai didelės ir nepastovios galios, vėjo elektrinių gaminamą elektros energiją būtina prognozuoti.

Nepastovių energijos šaltinių gaminama elektros energija prognozuojama tam, kad jau esamų ir naujai įrengiamų elektrinių su nepastovia elektros energijos gamyba, kintamos galios kompensavimas būtų kuo mažesnis. Lietuvoje iš viso instaliuota 509 MW galios vėjo elektrinių, o elektros energijos perdavimo operatorius AB „Litgrid“, prognozuoja visų 509 MW vėjo elektrinių elektros energijos gamybą [4]. 2016 metus AB „Litgrid“ vėjo elektrinių elektros energijos gamybą prognozavo 9,3 procentų tikslumu, jų prognozės apie einamos dienos vėjo elektrinių pagamintos

elektros energijos prognozę atnaujinamos kiekvieną dieną 8:55 ir 13:55, todėl prognozuojamas laiko intervalas yra kas 5 ir 19 valandų kiekvieną parą.

VEP gaminamos elektros energijos prognozės gali būti skaičiuojamos įvairiais metodais ir skirtingam laiko intervalui į ateitį, nuo kelių minučių iki viso eksploataavimo laikotarpio. AB „Litgrid“ skaičiuojamos vidutinės trukmės prognozės, o šiame darbe skaičiuojamos trumpalaikės, valandos ir kelių valandų į ateitį, elektros energijos gamybos prognozės.

Darbo tikslas – dirbtiniais neuroniniais tinklais, atsitiktiniais miškais ir tiesinės regresijos modeliais prognozuoti VEP elektros energijos gamybą ir ištirti LHMT vėjo prognozės įtaką prognozavimo tikslumui.

Tyrimo objektas – sąlyginai nedidelės galios, 16,5 MW, VEP, pastatytas vakarų Lietuvoje, pajūryje.

Tyrimo uždaviniai:

- Ištirti ryšį (apskaičiuoti determinacijos ir koreliacijos koeficientus) tarp LHMT prognozuojamo vėjo greičio ir realaus buvusio vėjo greičio;
- Nustatyti optimalų buvusios elektros energijos gamybos valandų skaičių, kuris naudingiausias prognozuojant elektros energijos gamybą;
- Patikrinti, kaip vėjo prognozės (LHMT vėjo prognozės yra pateikiamos kas šešias valandas, šešioms valandoms į ateitį) tikslumas įtakoja elektros energijos gamybos prognozavimo tikslumą;
- Prognozuoti VEP elektros energijos gamybą, sakant, kad sekančią valandą pagamins tiek pat elektros energijos kiek ir paskutinę buvusią valandą prieš tai – „Persistence“ metodu;
- Prognozuoti VEP elektros energijos gamybą valandai į ateitį naudojantis tik esama ir buvusia VEP elektros energijos gamyba;
- Palyginti prognozuojamos elektros energijos gamybos tikslumą, pagal vėjo greičio stiprumą;
- Palyginti visus prognozavimo metodus tarpusavyje;
- Ekonomiškai palyginti visus prognozavimo metodus.

1. ELEKTROS ENERGIJOS GAMYBOS PROGNOZAVIMO METODAI

1.1. Elektros energijos gamybos prognozės

2017 metai Europos vėjo energetikoje yra rekordiniai ir rekordas nuolat gerinamas, per šį laikotarpį vėjo energetika pagamino 11,6 % visos Europos elektros energijos poreikių. Instaliuota vėjo elektrinių galia Europoje jau siekia 168,7 GW [22] ir toliau vyksta nuolatinis vėjo energetikos galios augimas ir iki 2020 ir 2030 metų užsibrėžti minimalūs tikslai yra atitinkamai 165 ir 251 GW, vidutiniai – 192 ir 320 GW ir maksimalūs – 216 ir 392 GW [9]. Minimalūs tikslai jau įgyvendinti, o laiko dar yra iki 2020 metų, tad gali būti pasiekti ir maksimalūs. Kasmet vis didėjant atsinaujinančių energijos išteklių instaliuotai galiai, reikia užtikrinti didesnę vėjo elektrinių panaudojimą, jų naudą ir integravimą į elektros energetikos sistemą, reikia gebėti būsimą generuojamą elektros energiją nuspėti, prognozuoti.

VEP generuojamos elektros energijos prognozes galima suskirstyti į keturias grupes[8]:

1. Labai trumpalaikė prognozė. Prognozuojamas laikas – nuo kelių minučių iki valandos į ateitį.
2. Trumpalaikė prognozė. Prognozuojamas laikas – nuo valandos iki kelių valandų į ateitį.
3. Vidutinės trukmės prognozė. Prognozavimo laikas – nuo kelių valandų iki savaitės į ateitį.
4. Ilgalaikė prognozė, Prognozavimo laikas – nuo savaitės iki metų ar daugiau į ateitį.

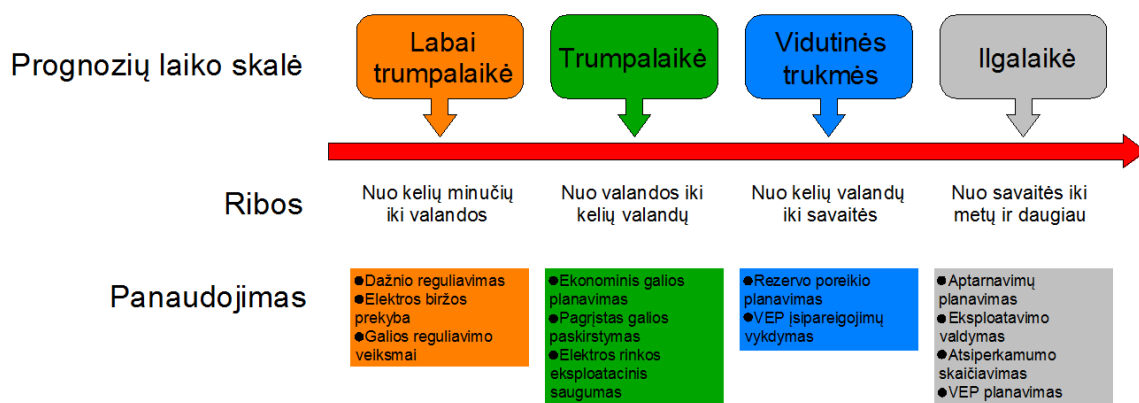
Kuo trumpesnis laikas į ateitį prognozuojamas, tuo prognozavimo tikslumas didesnis ir prognozuoti lengviau, nes galima daryti prielaidą, kad vėjas nepakis ir gamins apytikriai tiek, kiek gamina esamu laiku. Priešingai yra su ilgalaikėmis prognozėmis, kuo didesnis laiko intervalas į ateitį prognozuojamas tuo sunkiau prognozuoti būsimą pagamintą elektros energiją ir prognozavimo paklaida didesnė, nes sudėtinga tampa prognozuoti vėjo greitį.

Kiekviena prognozavimo trukmės grupė yra nuolat naudojama. Labai trumpalaikės prognozės, naudojamos reguliuojant galią, elektros biržos prekyboje, dažnio reguliavime. Toks galios prognozavimas naudojamas Lietuvos elektros energijos perdavimo operatoriaus, norint išlaikyti balansą tarp gaminamos ir vartojamos elektros energijos.

Trumpalaikės prognozės naudojamos ekonominiam galios planavimui, jei yra galimybė kaupti dalį generuojamos elektros energijos, taip pat galios paskirstymo planavimui ir elektros rinkos eksploataciniam saugumui planuoti.

Vidutinės trukmės prognozės naudojamos VEP įsipareigojimų vykdymui ir rezervo poreikio planavimui, jei yra įrengta kaupiklių sistema.

Ilgalaikės trukmės prognozės naudojamos planuojant kasmetinius VEP aptarnavimus, jei yra galimybė tam parenkamas statistiškai mažiausiai vėjuotas laikotarpis, kad būtų prarasta kuo mažesnė elektros energijos gamyba. Taip pat ilgalaikės prognozės naudojamos eksploatacijos valdymui, atsiperkamumo skaičiavimui ir pačių VEP planavimui, statybai ar plėtrai.



1.1.1 pav. Prognozavimo trukmių ir panaudojimų palyginimas [8].

Ne kiekviena prognozė, iš prognozių laiko skalės, turi būti tiksli, pavyzdžiui, ilgalaikė prognozė, kai planuojami kasmetiniai aptarnavimai. Pasirenkamas statistiškai ramiausio vėjo laikotarpis, kada mažiausiai nuostolių atlikti kasmetinius aptarnavimus, nes aptarnavimai planuojami iš anksto ir gali būti suplanuoti prieš kelis mėnesius. Šiame tyrime orientuotasi į trumpalaikę ir labai trumpalaikę vėjo energijos gamybos prognozę, kai elektros energijos gamyba prognozuojama vienai ir kelioms valandoms į ateitį.

Vėjo elektrinių generuojama elektrinė galia priklauso nuo judančio oro tankio ir vėjo greičio stiprumo, kuris tenka vėjo elektrinės vėjaračiui – sparnų užimamam plotui. Kuo aukščiau pastatyta ir kuo aukštesnė vėjo elektrinė, tuo vėjo greitis didesnis ir stabilesnis, todėl vėjo elektrinės statomos kaip galima aukščiau ir kaip galima didesnio sparnų ilgio. Vėjo elektrinės, išnaudoja kinetinę vėjo energiją (1.1.2 formulė), kinetinę energiją verčia į mechaninę energiją, o mechaninę energiją verčia į elektros energiją. Pagal 1.1.2 formulę matyti, kad kinetinė energija priklauso nuo judančio kūno greičio, šiuo atveju vėjo, jo masės ir judėjimo greičio.

$$E_K = \frac{mv^2}{2}; \quad (1.1.2) [7]$$

čia: E_K – kinetinė vėjo energija (J);
 m – judančio kūno masė, (kg);
 v – judančio kūno greitis (m/s);

Iš 1.1.2 kinetinės energijos formulės, galima suskaičiuoti vėjo elektrinėms tenkančią kinetinę vėjo galią. Judančio oro masė yra lygi oro tankio, kertamo ploto ir vėjo greičio (koks kiekis oro praėjo per laiko vienetą) sandaugoms, tuomet vėjo elektrinei tenkanti vėjo galia:

$$P = \eta \cdot \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot v^3; \quad (1.1.3) [5]$$

čia: P – vėjo elektrinės galia (W);
 η – vėjo elektrinės naudingumo koeficientas (maksimalus teorinis – C_p , Betz koeficientas ($16/27=0,593$));
 A – vėjo elektrinės vėjaračio plotas (m^2);
 ρ – oro tankis (kg/m^3);
 v – vėjo greitis (m/s).

Energijos dydis tenkantis elektrinei priklauso nuo vėjo greičio, oro tankio ir vėjaračio ploto. Maksimali vėjo kinetinė energija, kuri paverčiama į mechaninę energiją yra ribota. Vėjo elektrinės negali paimti viso 100 procentų vėjo kinetinės energijos, nes tokiu atveju prieš elektrinę esantis vėjas, už elektrinės turėtų sustoti, atidavęs visą savo energiją. Vėjo kinetinės energijos konvertavimas į mechaninę energiją yra teoriškai apskaičiuotas ir lygus Betz koeficientui (C_p), kuris yra 0,593 [5].

Egzistuoja skirtingi vėjo elektrinių tipai, kurių du pagrindiniai yra vertikalios sukimosi ašies (*Vertical-Axis Wind Turbines – VAWT*) ir horizontalios (*Horizontal-Axis Wind Turbines – HAWT*), pastarieji yra labiausiai paplitę. Kiekvienas vėjo elektrinių tipas turi skirtingų modifikacijų ir skirtingai gerai išnaudoja skirtingą vėjo greitį. Kiekvienas vėjo elektrinės tipas turi skirtingą, teoriškai apskaičiuotą Betz koeficientą ir kuris visada bus mažesnis nei maksimalus bendras koeficientas – 0,593. Šiame tyrime elektros energijos gamybos prognozės skaičiuojamos horizontalios ašies vėjo elektrinėms, turinčioms po tris mentes (sparnus). Kiekviena VEP esanti vėjo elektrinė nuolat matuoja vėjo greitį ir į elektros tinklus atiduodamą elektrinę galią, taip apskaičiuodamos energiją, kurią paima iš atitinkamo stiprumo vėjo greičio (tai ir yra Betz koeficientas). Tokie duomenys renkami ir integruojami, o prisijungus prie vėjo elektrinės kompiuterio, galima gauti kiekvienos iš elektrinių apskaičiuotas galios kreives. Tyrime aprašomų elektrinių apskaičiuotas vėjo energijos konvertavimo į elektros energiją koeficientas pateiktas 2.1.2 paveikslėlyje.

Iš 1.1.3 formulės matyti, kad vėjo elektrinėms didžiausią gaunamos vėjo energijos įtaką daro vėjo greitis, kuris yra kubinės priklausomybės, todėl ir vėjo elektrinių atiduodama elektrinė galia labiausiai priklauso nuo vėjo greičio, tenkančio vėjo elektrinės sparnų diametru. Vėjo greitis yra nepastovus ir nuolat kinta laike, taip pat yra ne vienodo greičio visame vėjaračio plote, todėl ir vėjo elektrinės elektrinė galia nuolat kinta laike per tam tikrą laiką.

Prognozuojant trumpą laiko intervalą į ateitį VEP elektros energijos gamybos prognozes galima suskaidyti į tris kategorijas – fizinę, statistinę ir mišrią. Fiziniai metodai daugiausia remiasi orų prognozėmis ir jų modeliavimu pagal atitinkamas vietovės sąlygas. Statistiniai metodai skaičiuojami naudojant buvusią VEP darbo ir gamybos istoriją, laiko eilutes, kur stulpeliai gali būti vėjo greitis, kryptis, gūšiai, elektros energijos gamyba ir t.t., o eilutės, tai minutės, valandos, paros ar kitas laiko intervalas. Mišri kategorija apjungia fizinių ir statistinių kategorijų stipriąsias savybes ir padidina prognozavimo tikslumą. 1.1.4 lentelėje pateikti VEP elektros energijos gamybos prognozavimo metodai, o po to kiekvienas iš metodų paaiškintas detalčiau.

1.1.4 lentelė. VEP elektros energijos gamybos prognozavimo metodai[8].

| Kategorijos | Metodas | Pavyzdžiai |
|----------------------|-----------------------------|--|
| Fiziniai metodai | Skaitinė orų prognozė | <ul style="list-style-type: none"> • Pasaulinė orų prognozė • MM5 (<i>regional Mesoscale Model</i>) • Orų tyrimai ir prognozės • „Regional Spectra model“ • NWP (<i>Numerical weather prediction</i>) • HIRLAM (<i>High Resolution Limited Area Model</i>) |
| Statistiniai metodai | Laiko eilučių metodai | <ul style="list-style-type: none"> • „Persistence“ • ARMA (<i>Autoregressive Moving Average</i>) • ARIMA (<i>Autoregressive Integrated Moving Average</i>) |
| | Dirbtinio intelekto metodai | <ul style="list-style-type: none"> • DNT • Fuzzy logic • Evolutionary Computation |
| Mišrūs metodai | - | <ul style="list-style-type: none"> • DNT + EC • EC + Fuzzy • WT (<i>Wavelet Transform</i>)+ DNT • DNT + Skaitinė orų prognozė • DNT + Fuzzy |

Visi fiziniai metodai – MM5 (*regional Mesoscale Model*), HIRLAM (*High Resolution Limited Area Model*), NWP (*Numerical weather prediction*), Regional Spectra Model, orų tyrimai ir pasaulinės orų prognozės modeliuoja atmosferinius reiškinius. Modeliuojant orų prognozes remiamasi fizikos dėsniais, atmosferos, vietovės savybėmis ir įvairiais meteorologiniais duomenimis, tokiais kaip temperatūra, vėjo greitis, slėgis, drėgmė, saulės intensyvumas ir t.t.

- MM5 fizinis metodas prognozuoja atmosferinius reiškinius vietai, kuri gali būti nuo 5 kilometrų pločio ar ilgio iki kelių šimtų kilometrų. Šis metodas prognozuoja keturis atmosferinius reiškinius – vėjo greitį, temperatūrą, slėgį ir drėgmę.
- HIRLAM (*High Resolution Limited Area Model*) metodas yra hidrostatinis tinklo taškų modelis, kurio dinaminis branduolys grindžiamas pusiau matuojama, pusiau prognozuojama ir perskaičiuojama daugiapakopio primityvių lygčių prognozavimo sistema, taip pat naudojant vertikalią hibridinę koordinatę [24]. Prognozuoja vėjo greitį, slėgį, temperatūrą, drėgmę ir vertikalų vėjo greitį.
- NWP (*Numerical weather prediction*) metodas naudoja matematinius skaičiavimo metodus atmosferos ir vandenynų prognozėms skaičiuoti, prognozių skaičiavimai remiasi dabartinėmis oro sąlygomis.
- Regional Spectra Model metodas prognozuoja daugiausia vėją ir drėgmę (lietaus kiekį) sinuso ir kosinuso funkcijomis, matematiškai aprašančias ne apvalų (rutulio formos), o cilindro formos pasaulį ar jo dalį.

Su vienu iš fizinių metodų šiame tyrime prognozuojama VEP elektros energijos gamyba. LHMT modeliuoja būsimus atmosferinius reiškinius, taip pat ir vėjo greitį bei kryptį, kurie buvo panaudoti VEP elektros energijos gamybos prognozėms skaičiuoti. VEP elektros energijos gamybą galima prognozuoti naudojantis vėjo prognozėmis, apskaičiuojant gamybą pagal 1.1.2 formulę arba pasinaudojant vėjo elektrinių galios kreivėmis 2.1.1 ir 2.1.2 paveikslėliai. Toks elektros energijos gamybos prognozavimo metodas, kai elektros energijos gamybos prognozės apskaičiuojamos pagal orų prognozes, yra brangus, nes geros vėjo prognozės kainuoja papildomus pinigus, ir tinkantis vidutinėms arba ilgalaikėms prognozėms, tačiau tampa dar labiau komplikotas metodas, kai tarp prognozuojamo ir atitinkamą valandą realaus būsimo vėjo ateityje nebėra tiesinės priklausomybės.

Nepaisant vėjo prognozės sudėtingo modeliavimo, prognozuoti būsimą elektros energijos gamybą tik pagal orų prognozę yra paprastas ir greitas būdas, tačiau visiškai priklausomas nuo prognozuojamo vėjo greičio tikslumo. Kuo prognozuotas vėjo greitis mažiau tikslus, tuo elektros energijos gamybos prognozė bus su didesne paklaida. Taip pat prognozuojant viso VEP elektros

energijos gamybą, sunku įvertinti nevienodas aplinkos sąlygas atskiroms elektrinėms. Sunku atsižvelgti į vietovės charakteristikas, vėjo sukurių daromas įtakas viena kitai ir be to, reikalingos tikslios vėjo prognozės, o elektros energijos generacijos prognozės tikslumas šiuo būdu ypatingai stipriai priklauso nuo vėjo prognozės.

Jei fiziniai prognozavimo metodai reikalauja daug investicijų vėjo prognozėms, o vėliau ir elektros energijos prognozėms suskaičiuoti, tai daug mažiau investicijų reikalaujantis prognozavimo metodas yra statistinis. Statistiniai metodai remiasi buvusia elektros energijos gamybos istorija. Statistiniu metodu prognozuojama VEP elektros energijos gamyba ir šiame darbe, DNT ir RF apmokomi su buvusia VEP elektros energijos gamybos istorija, ir prognozuoja būsimą gamybą.

Tokia prognozė niekada nebus 100% teisinga, nes susiduriama su atsitiktiniais dydžiais, o VEP elektros energijos gamybos prognozės reikšmės yra daugiau ar mažiau statistiškai tikėtinos. Statistinį metodą apmokius su elektros energijos gamybos istorija ir būsima vienos valandos į ateitį gamyba, statistinis metodas randa ryšį tarp elektros energijos gamybos istorijos ir prognozuojamos valandos į ateitį. Apmokius prognozavimo metodą ir tuomet uždavus kokia buvo elektros energijos gamyba prieš valandą, dvi ir daugiau, statistinis metodas duoda tikėtiną elektros energijos gamybos skaitinę reikšmę. Statistiniams metodams reikalingos laiko eilutės su informacija, kurios dėka randama priklausomybė tarp užduoties ir atsakymo verčių, todėl norint prognozuoti elektros energijos gamybą reikia turėti daug laiko eilučių, tam, kad statistiniai metodai galėtų apsimokyti ir vėliau prognozuoti.

Statistiniai metodai (1.1.4 lentelė) skirstomi į laiko eilučių ir dirbtinio intelekto metodus.

Laiko eilučių metodai skirstomi:

- „Persistence“ (liet. išsilaikymas) metodas. Tai yra vienas paprasčiausių ir dar vadinamas naiviu metodu [8]. Toks prognozavimo metodas spėja, kad sekančią valandą VEP pagamins tiek elektros energijos, kiek paskutinę buvusią valandą prieš tai.

$$E_i = E_{i-1}; \quad (1.1.5) [8]$$

čia: E_i – elektros energijos gamyba i -tają valandą;

Toks elektros energijos prognozavimo metodas yra tinkamas prognozuoti tik vienai valandai į ateitį ir dažniausiai naudojamas tik palyginimui su kitais, labiau tiksliais, statistiniais, prognozavimo metodais.

- ARMA (*Autoregressive Moving Average – auto regresyvus kintamas vidurkis*) metodas. Tai metodas, kuris naudojamas tuomet, kai yra tiesinis ryšys tarp

prognozuojamos vertės ir pačios prognozės. ARMA metodas randa tiesinę priklausomybę, ryšį tarp užduoties ir atsakymo, ir taip prognozuoja vėjo elektrinių gamybą. Šį modelį sudaro dvi dalys: kintamo vidurkio (Moving Average) dalis ir auto regresyvi (Auto Regressive) dalis.

$$P(t) = \sum_{i=1}^p \alpha_i P(t-i) + \sum_{j=1}^q \beta_j e(t-j); \quad (1.1.6) [8]$$

čia: $P(t)$ – t valandos elektros energijos gamyba;

p – AR proceso eilė;

α_i – i -tasis AR koeficientas;

q – MA eilės paklaida;

β – j -tasis MA koeficientas;

$e(t)$ – atsitiktinė paklaida (baltasis triukšmas).

ARMA prognozavimo metodas gerai prognozuoja statinius statistinius duomenis, dinaminių duomenų, kai vienam atsakymui gali būti dvi užduotys arba atvirkščiai, prognozuoti negalima.

- ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average – integruotas auto regresyvus kintamas vidurkis) metodas. Tai yra tas pats ARMA metodas, tik ARIMA metodas geba integruoti dinaminę modelio dalį ir ją pakeisti į statinę. ARIMA metodas naudojamas tuomet, kai nėra duomenų laiko eilučių statiškumo.

Dirbtinio intelekto metodai skirstomi į:

- DNT – dirbtinių neuroninių tinklų (*angl. Artificial neural network*) metodas puikiai prognozuoja ne tiesišką priklausomybę tarp užduoties ir atsakymo, todėl DNT yra geras pasirinkimas vėjo energijos prognozavimui, kai net pučiant tam pačiam vidutiniam vėjo greičio, elektros energijos gamyba skiriasi. Nepaisant gerų prognozavimo rezultatų, DNT turi ir trūkumų, tokių kaip persimokymas, apmokymo duomenų apibendrinimas (gali iš kelių laiko eilučių išvesti vieną vidutinę, apibendrintą) ir tai yra sąlyginai daug skaičiavimo resursų reikalaujantis procesas. Plačiau šis metodas aprašomas 1.3 poskyryje.
- Fuzzy logic (neapibrėžta logika) – apsimokydama randa ne tiesines priklausomybes tarp užduoties ir atsakymo. Toks modelis gerai apsimoko su netiksliais duomenimis tarp užduoties ir atsakymo ir naudojamas daugiausia ten, kur galimas apytikslis užduoties atsakymas. Pagrindinis šio metodo trūkumas yra prastas apsimokymas,

todėl dažniausiai šis metodas jungiamas kartu su DNT į ANFIS modelį (*Adaptive Neuro-Fuzzy Interface System*), kad gauti tikslesnius atsakymus.

- Evolutionary Computation (evoliucinis skaičiavimas) – tai toks prognozavimo metodas, kai prognozuojamas užduoties atsakymas, išrenkamas iš visos apmokymų imties, tuomet visus galimus atsakymus iteracijomis atnaušina ir integruoja. Toks metodas gali gerai optimizuoti atsakymą, kai galimas ne vienas tikslus atsakymas. RF yra šio metodo dalis ir detaliau aprašoma 1.4 poskyryje.

Mišrūs metodai naudojami tam, kad būtų pašalinti skirtingų metodų skirtingi trūkumai ir panaudojamos stipriosios metodų savybės, ko eigoje, gaunamos tikslesnės prognozės. Mišrių metodų esmė yra panaudoti skirtingų prognozavimo metodų gerąsias savybes, jas apjungti ir patobulinti gaunamas elektros energijos prognozes.

Iš paminėtų prognozavimo metodų, darbe naudojami šie metodai:

- vienu iš fizinių metodų – VEP elektros energijos gamybos prognozės tik pagal LHMT vėjo prognozes;
- trimis statistiniais metodais – DNT ir RF metodų elektros energijos gamybos prognozės pagal buvusią elektros energijos gamybos istoriją ir „Persistence“ metodu;
- dvejais mišriais metodais (LHMT vėjo prognozės su DNT ir RF).

Visiems prognozavimo metodams suteikiama ta pati informacija ir palyginama, kuris prognozes skaičiuoja tiksliausiai.

Prognozės gali skaičiuoti būsimą VEP galią, tai yra, kiek kW VEP gamins atitinkamą valandą, bet prognozuota galia atitinkamą valandą bus, tos valandos elektros energijos gamyba. Kadangi šiame darbe prognozavimo metodai palyginami tarpusavyje ne tik kaip tiksliai prognozuoja, bet ir kiek už prognozuojamą energiją būtų gauta pajamų, tai prognozuojama atitinkamos valandos elektros energijos gamyba. Esant poreikiui, VEP elektros energijos gamybos prognozę nesunku paversti į prognozuojamą galią, VEP elektros energijos gamyba yra atitinkamos valandos vidutinė galia.

1.2. Prognozių tikslumo apskaičiavimo metodai

Tam, kad LHMT vėjo greičio prognozės ir skaičiuojamos VEP elektros energijos gamybos prognozės būtų įvertintos ir palygintas ar pamatuotas prognozės klaidos dydis, kiekvienai prognozei apskaičiuojamos paklaidos, tarp realios buvusios reikšmės ir prognozuotos.

Prognozių tikslumą, arba prognozavimo paklaidos dydį apskaičiuoti galima absoliučiąja paklaida – prognozuojamos elektros energijos gamybos ir realios buvusios elektros energijos

gamybos reikšmių skirtumo modulis, išreikštas procentais nuo suminės realios gamybos. Tačiau toks prognozavimo paklaidos apskaičiavimo būdas būtų ne visai tiksliai palyginantis metodus. Pavyzdžiui, jei VEP pagamino 100 kWh, o buvo prognozuota 500 kWh, tai yra 400 % paklaida ir klaida yra 4 kartus didesnė nei reali gamyba, todėl gali pasirodyti labai netikslu, tačiau jei VEP pagamino 15 000 kWh, o buvo prognozuota 15 500 kWh, tuomet prognozė jau atrodys sąlyginai tiksli. Todėl šiame tyrime VEP elektros energijos gamybos prognozių paklaidos apskaičiuojamos pagal RMSE 1.2.1 formulę (angl. Root Mean Square Error), tokia paklaida parodo kiek netiksliai buvo prognozuota nuo realios reikšmės, kiek smarkiai spėjimai išsibarstę aplink teisingus atsakymus, palyginant juos pagal suminę VEP instaliuotą galią.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum \left(\frac{\text{paklaida}(h)}{P_{\text{instaliuota}}(h)} \right)^2} \times 100\% \quad (1.2.1) [11]$$

čia: paklaida(h) – kiekvienos valandos prognozės ir realios elektros energijos gamybos skirtumas;

$P_{\text{instaliuota}}$ – vėjo elektrinių parko suminė galia;

N – prognozuojamų valandų skaičius.

Prognozės paklaida, skaičiuojant RMSE procentine paklaida, neatsižvelgia į santykį tarp spėjimo ir tikros reikšmės, atsižvelgiama tik į neatspėtos reikšmės didumą, kuris lyginamas su maksimalia verte, VEP instaliuotos galios atžvilgiu. RMSE nekompensuoja skirtingų spėjimų paklaidų (deficitinis spėjimas nekompensuoja perteklinio ir atvirkščiai), to ir nesiekama, nes jei prognozė klaidinga, nesvarbu ar prognozuota per daug, ar per mažai, bet kokiu atveju prarandamos pajamos. Pavyzdžiui, jei prognozuojama, kad VEP pagamins 100 kWh elektros energijos, bet pagamino 120 kWh, tai už pagamintas papildomas 20 kWh bus mokama labai mažai arba visai nemokama, o jei vietoje tų pačių prognozuojamų 100 kWh elektros energijos bus pagaminta mažiau – 80 kWh, tada už trūkstamas 20 kWh teks sumokėti baudą arba daug didesnę kainą už kWh, nei rinkos kaina. Todėl nesvarbu, kaip prognozė klysta (prognozuoja daugiau ar mažiau nei būsima tikra elektros energijos gamyba), elektros energijos gamybos prognozės viena kitos negali kompensuoti.

Išskirtiniais atvejais šiame tyrime, kaip pavyzdžiui vėjo greičio prognozės palyginimas su realiu buvusiu vėjo greičiu, skaičiuojamos ir kitokios išraiškos paklaida. Tai yra daroma tam, kad ryškiau matytųsi vėjo prognozavimo paklaidų dydis, prognozės paklaida apskaičiuojama absoliutine paklaida, pagal 1.2.2 formulę.

$$AP = \frac{1}{n} \times \sum \left| \frac{x_i - p_i}{x_i} \right| \times 100\% \quad (1.2.2) [12]$$

čia: x_i – realus buvęs vėjo greitis, m/s;

p_i – prognozuotas vėjo greitis, m/s;

n – laiko eilučių skaičius.

Taip pat LHMT teikiamas vėjo prognozes galima iširti, koreliacijos ir determinacijos koeficientais, kurie parodo ryšį tarp prognozuojamų ir realių vėjo greičio verčių, kaip smarkiai jos skiriasi arba yra susijusios. Koreliacijos ir determinacijos koeficientai apskaičiuojami:

$$r = \frac{\overline{XY} - \bar{X} \times \bar{Y}}{\sigma_x \sigma_y}; \quad (1.2.3) [11]$$

$$d = r^2; \quad (1.2.4) [11]$$

$$\sigma_X^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^n (X_t - \bar{X})^2; \quad (1.2.5) [13]$$

$$\sigma_Y^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^n (Y_t - \bar{Y})^2; \quad (1.2.6) [13]$$

čia: r – koreliacijos koeficientas;

d – determinacijos koeficientas;

\bar{X} – realaus buvusio vėjo greičio vidurkis;

X – realus buvęs vėjo greitis;

\bar{Y} – prognozuoto vėjo greičio vidurkis;

Y – prognozuotas vėjo greitis;

\overline{XY} – realaus ir prognozuoto vėjo greičių sandaugų vidurkis;

σ_x – realaus buvusio vėjo greičio dispersija;

σ_y – prognozuoto vėjo greičio dispersija.

Koreliacijos koeficientas yra santykinis dydis, kuris parodo ryšį tarp dviejų kintamųjų, ar matuojamų kintamųjų tiesinė priklausomybė stipri. Skaičiuojant, koeficiento reikšmės nepriklauso nuo kintamųjų matavimo vienetų, nors šiuo atveju matavimo vienetai sutampa. Dažnai tik koreliacijos koeficiento teikiamos informacijos apie kintamųjų priklausomybę būna per mažai. Koreliacijos koeficientų reikšmės gali būti nuo 1 iki -1. Kai koreliacijos koeficientas yra lygus 1, tai rodo, kad du kintamieji kinta laike, juda vienodai. Jų visos reikšmės yra vienodos ir turi tobulą koreliaciją. Tuo tarpu, kai koreliacijos koeficientas lygus -1, reiškia, kad du kintamieji yra tobulos priešingybės, o 0 reiškia, kad jokio ryšio tarp dviejų kintamųjų nėra.

Turint koreliacijos koeficientą, galima apskaičiuoti determinacijos koeficientą, kuris parodo tiesinės regresijos modelio tinkamumą:

- kuo koeficientas didesnis, arčiau 1, tuo prognozės mažiau klydo;
- jei koeficientas $>0,25$ – laikoma, kad su tokia prognoze galima prognozuoti, šiuo atveju su vėjo prognoze prognozuoti elektros energijos gamybą;
- jei koeficientas $<0,25$ – laikoma, kad prognozė netinkama prognozavimui.

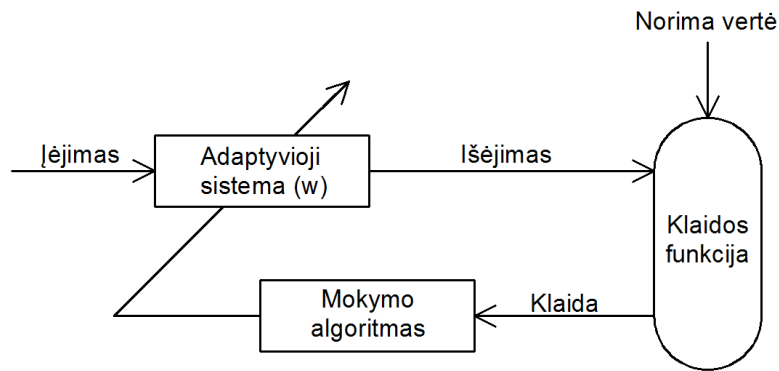
1.3. Dirbtiniai neuroniniai tinklai

Dirbtiniai neuroniniai tinklai (DNT) yra biologiškai įkvėpti skaičiavimo modeliai, naudojami skirtingose srityse, siekiant išspręsti sudėtingas problemas, kurių negalima išspręsti naudojant paprastus analitinius metodus [14]. DNT dažnai sėkmingai taikomi įvairiose srityse, kaip pavyzdžiui garsų atpažinime, įvairių sričių klaidų diagnostikoje, vėjo greičio prognozavime, kompiuterinės grafikos ir kitose srityse [18]. DNT siekiama išspręsti užduotis imituojant kai kurias biologinių sistemų savybes, taip pat, kaip ir biologinės sistemos, kurios geba mokytis, prisitaikyti ir adaptuotis.

DNT – tai informacijos apdorojimo struktūros, netiksliai imituojančios kai kuriuos gyvųjų organizmų smegenyse vykstančius informacijos apdorojimo procesus. Yra apskaičiuota, kad žmogaus smegenų žievėje yra apie 10-500 milijardų (10^9) neuronų ir 60 trilijonų (10^{12}) jungčių tarp jų [16]. Neuronai yra suskirstyti į apytikriai 1000 pagrindinių grupių, kiekviena turinčių po apytikriai 500 neuroninių tinklų [16]. Dėl šių milžiniškų skaičių, kol kas negalima atkartoti žmogaus smegenų neuroninio tinklo, todėl DNT naudojami spręsti konkrečias užduotis, neišsiplečiant, kad neuroninis tinklas netaptų neapskaičiuojamai per didelis.

DNT sudaromi iš daugelio tarpusavyje sujungtų labai paprastų skaičiavimo elementų. Šie elementai, jungiami vieni su kitais įvairaus stiprumo jungtimis, kaip ir minėtas apytikris biologinių organizmų neuronų modelis. Skaičiavimo elementus siejančios jungtys yra analogiškos biologinių neuronų sinapsėms. [15]

Kaip ir vykstant mokymuisi biologinėse smegenyse, DNT mokymosi metu keičiasi jungčių, siejančių neuronus, svorius, jungčių stiprumus. DNT mokosi turėdami duomenų pavyzdžius, įėjimo (užduoties) ir atitinkamas išėjimo (atsakymo) vertes. Mokymosi metu keičiamas jungčių stiprumas (svoriai) iteruojant tol, kol klaida tarp spėjamo atsakymo ir tikrojo atsakymo vertės sumažėja iki minimumo (1.3.1 paveikslėlis).

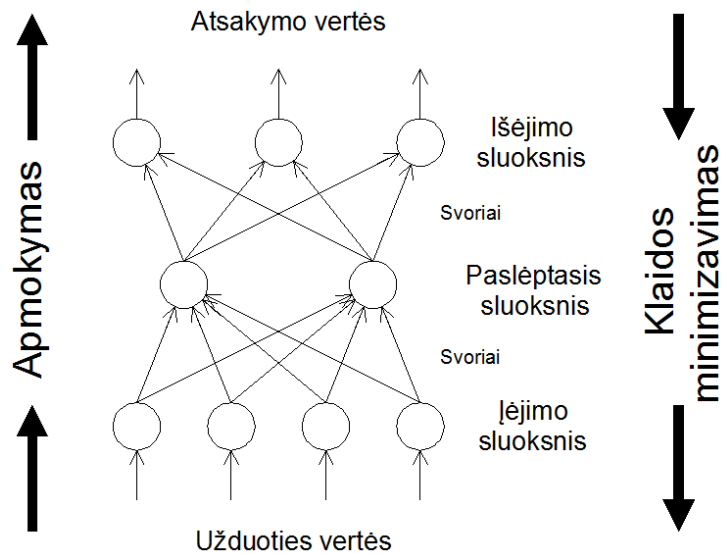


1.3.1 pav. Adaptvyvios sistemos kūrimo proceso schema [15].

Tokiu pat principu apmokoma ir duomenų imtis prognozuojant VEP elektros energijos gamybą valandai į ateitį. Pasirenkama duomenų imties dalis, su kuria DNT bus apmokoma ir likusi dalis, kurią DNT prognozuos nežinodamas atsakymo verčių. Mokymo metu keičiami jungčių stiprumai, tol kol gaunama minimali klaida tarp prognozuojamos elektros energijos gamybos ir realios buvusios. Gavus minimalią paklaidą, jungčių svoriai fiksuojami, išsaugomi, ir išsaugoti jungčių svoriai vėliau jau lemia prognozuojamos elektros energijos gamybos vertes.

Darbe įėjimo (užduoties) vertės priklauso nuo prognozavimo metodo (statistinis, fizinis arba mišrus), ir gali būti tokios kaip: LHMT vėjo greičio ir krypties prognozės, buvęs realus (vėjo elektrinių išmatuotas) vėjo greitis, buvusi elektros energijos gamybos istorija. Išėjimo (atsakymo) vertė, nepriklausomai nuo prognozavimo metodo yra vienoda – prognozuojama VEP elektros energijos gamyba. Išėjimo (atsakymo) vertės taip pat gali būti kelios, kai prognozuojama ne viena valanda į ateitį, o kelios, kaip pavyzdžiui 2.6 poskyryje, elektros energijos gamybos prognozė šešioms valandoms į ateitį.

Kaip ir minėta anksčiau, DNT prognozuojant VEP elektros energijos gamybą remiasi žmogaus smegenų veikimo principu ir schema, kur pagrindiniai skaičiavimų komponentai yra neuronai ir juos siejančių jungčių stiprumas. Biologiniai neuronai yra svarbios nervų ląstelės, kurios susijungdamos tarpusavyje sukuria tankų tinklą. Pirmieji DNT modeliai buvo sukurti dar 1940 ir 1950 metų dešimtmečiais, kartu su pirmuoju DNT apmokymo algoritmu [17]. Po DNT modelio sukūrimo, jie nebuvo naudojami praktikoje, nes tiek dabar tiek anksčiau, toks modelis reikalauja didelių skaičiavimo pajėgumų, o tuo metu buvusiais kompiuterių pajėgumais to padaryti nebuvo galima. Atsiradus greitesnėms ir galingesnėms skaičiavimo mašinoms DNT modelis prisimintas ir pradėtas naudoti. Dar vienas DNT schemas pavyzdys pateiktas 1.3.2 paveikslėlyje, kuriame ryškiau matosi įėjimo (užduoties) ir išėjimo (atsakymo) vertės, paslėptų neuronų sluoksniai ir juos siejančios jungtys.



1.3.2 pav. DNT modelio schema [17].

Tokia DNT modelio schema (1.3.2 paveikslėlis) geriausiai randa ryšį tarp užduoties ir atsakymo verčių. Modelį sudaro įėjimo, išėjimo ir paslėptasis sluoksniai, kuriuos jungia jungtys, vadinamos svoriais. Įėjimo sluoksnio užduoties verčių yra tiek, kiek ir užduoties sąlygų, kaip šio tyrimo atveju, užduoties vertės yra LHMT prognozuojamas vėjo greitis ir jo kryptis, realus (vėjo elektrinių buvusi elektros energijos gamyba prieš valandą ir daugiau. Išėjimo sluoksnio atsakymo vertė yra viena – prognozuojama VEP elektros energijos gamyba. Apsimokant DNT keičia svorių vertes, jungiančias atskirus sluoksnius, taip, kad būtų gauta minimali paklaida tarp tikro atsakymo (realios buvusios VEP elektros energijos gamybos) ir apskaičiuojamos (prognozės). Šio klaidos minimizavimo metu skaičiavimai sklinda atgal nuo išėjimo (atsakymo) klaidos link įėjimo paslėptų neuronų svorių. Apsimokius, svorių vertės išsaugojamos ir naudojamos prognozuojant.

Šiame darbe DNT modelio skaičiuojamos VEP elektros energijos gamybos prognozės pasirinkta apskaičiuoti su 5 paslėptais neuronų sluoksniais, per didelis, kaip ir per mažas, paslėptų neuronų sluoksnių skaičius lemia prognozavimo paklaidos didėjimą. Tyrimo skaičiavimai atliekami 2016b metų leidimo MatLab programa.

DNT apmokymui pasirenkama duomenų imtis, padalijama į dvi dalis, kurios viena (didesnioji dalis) skirta mokymui, o kita – testavimui. Apmokymui skirta duomenų imties dalis turi būti pakankamai didelė, kad DNT užtektų laiko eilučių apsimokymui ir turi būti ne per maža, kad DNT nepersimokytų. Todėl 9/10 duomenų imties naudojamos apmokymui ir tik 1/10 dalies testavimui – prognozavimui. Palyginus prognozuojamas ir realias buvusias elektros energijos gamybos vertes, gaunama paklaida, kiek tiksliai elektros energijos gamyba prognozuota.

1.4. Atsitiktiniai miškai

RF – atsitiktiniai miškai (angl. Random Forests) yra medžių sprendimų kolektyvas, kur kiekvienas miško medžio spėjimas priklauso nuo nepriklausomo atsitiktinio vektoriaus verčių [20], o atsakymas yra viso miško medžių daugumos balsavimas. Reikšmingi klasifikacijos ir regresijos tikslumo patobulinimai gaunami auginant medžių grupę ir leidžiant jiems balsuoti už populiariausią klasę. Auginant medžių grupes – mišką, dažnai yra sukuriami atsitiktiniai vektoriai, kurie ir lemia kiekvieno medžio miške augimą.

Šiame tyrime viena išėjimo (atsakymo) vertė prognozuojama pagal kelias įėjimo (užduoties) vertes, pavyzdžiui, vėjo greitis, vėjo kryptis, realus buvęs (vėjo elektrinių išmatuotas) vidutinis vėjo greitis, ir buvusios VEP elektros energijos gamybos istorijos duomenys. Tam, kad RF aprašymas būtų lengviau suprantamas ir painus, supaprastinta ir priimta, kad duomenų imtį sudaro tik užduotis ir atsakymas, dvi vertės, kintančios laike – eilutėse. Užduotis tai visos įėjimo vertės laiko eilutėse, o atsakymo vertės yra buvusi reali VEP elektros energijos gamyba atitinkamą valandą. Supaprastinus duomenų imtį, ją galima užrašyti taip:

$$D_t = \{(x_i, y_i), i = 1, \dots, N\} \quad 1.4.1[21]$$

čia: x_i – įėjimo (užduoties) vertės;

y_i – išėjimo (atsakymo) vertės;

N – duomenų imties eilučių skaičius.

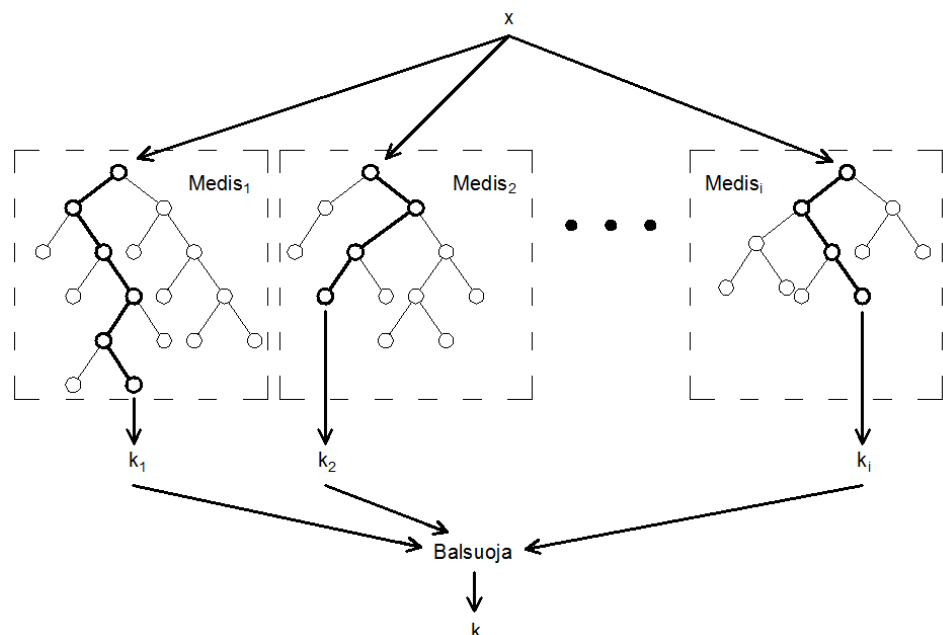
Klasifikacijos ir regresijos uždaviniams spręsti RF yra sudaryti iš grupės medžių. Medis yra su didele dispersija ir beveik nešališkas, o apmokant gali būti sukurtas pagal D_t funkciją. Atsitiktinai, pagal atsitiktinio dydžio, nepriklausomą ir vienodai paskirstytą vektorių r_i , parenkat dalį eilučių, iš duomenų imties D_t , galima surinkti juos į grupę $f(x, D_t, r_i)$ ir pavadinti medžiu. Atsitiktinai parenkant vektorių r_i vidutiniškai apie 2/3 duomenų imties eilučių yra kiekviename medyje, likęs trečdalis imties duomenų į grupelę nepatenka ir tokie duomenys vadinami OOB (out-of-bag). [21]

Kai sprendžiamos klasifikacijos užduotys, RF atsakymas yra daugumos medžių balsavimas. Didėjant medžių skaičiui RF, klasifikacijų klasės spėjimo tikslumas mažėja iki atitinkamos vertės. Kad RF spėjimų paklaida būtų minimali, esminiai yra du veiksniai – nešališki kiekvieno iš medžių spėjimai ir maža koreliacija tarp medžių vidurkių. Kad spėjimai būtų nešališki, medžiai auginami kaip įmanoma didesni, o žemas koreliacijos lygis gaunamas:

- Kiekvieną RF medį auginant atsitiktinės tvarkos ir skaičiaus imties dalimi;
- Kai kiekviena auginamo medžio šaka turi atsitiktinių tvarkos ir skaičiaus kintamųjų n kai visi kintamieji yra N ;
- Dažniausiai $n \ll N$, skaičiuojama $n = \sqrt{N}$ arba $n = (\log_2(N) + 1)$, tuomet i skaičius mažinamas ir didinamas kol pasiekiamas mažiausia paklaida be OOB duomenų. Iš visų i kintamųjų išrenkamas geriausias kintamasis ir tampa šaka. [21]

Apmokant ir po to prognozuojant su RF gali būti pasirenkami du dalykai, tai auginamų medžių kiekis ir $mtry$ – geriausias šakos padalijimas. Jei N – duomenų imties eilučių skaičius, tai pasirenkamos atsitiktinės n eilutės, kurios dalyvauja medžio apmokyme. Tuomet iš n duomenų apskaičiuojama šaka, kuri padalijama į $mtry$ mažesnių šakų skaičių. Mažesnės šakos augina dar mažesnes šakas iš n duomenų ir taip kartojama, kol medis užauginamas. Visas procesas kartojamas tol, kol užauginamas pasirinktas medžių skaičius.

Jei DNT esant trūkstamai informacijai eilutėje, visą eilutę ignoruoja ir su ja neapsimoko, tai RF esamą eilutės informaciją panaudoja apsimokymui, išmesdami tik trūkstamą informaciją, kas priklausomai nuo duomenų imties gali būti privalumu. Be to, RF gali susitvarkyti su daugybe eilučių ir jose esančių skirtingų kintamųjų. Prognozuojant RF OOB duomenis, galima panaudoti kiekvieno medžio atskiram, individualiam testavimui, nes tie duomenys nedalyvavo to medžio auginime. Taip pat OOB duomenys gali parodyti, kokią svarbą vieni ar kiti kintamieji užima imtyje. 1.4.1 paveikslėlyje pavaizduota principinė RF modelio schema, kur i yra medžių skaičius, k_1, k_2, k_i ir k yra klasifikacijų klasės.



1.4.1 pav. Principinė RF modelio schema [21].

Darbe įėjimo (užduoties) vertės priklauso nuo prognozavimo metodo (statistinis, fizinis arba mišrus), ir gali būti tokios kaip: LHMT vėjo greičio ir krypties prognozės, buvęs realus (vėjo elektrinių išmatuotas) vėjo greitis, buvusi elektros energijos gamybos istorija. Išėjimo (atsakymo) vertė, nepriklausomai nuo prognozavimo metodo yra vienoda – prognozuojama VEP elektros energijos gamyba. Išėjimo (atsakymo) vertės taip pat gali būti kelios, kai prognozuojama ne viena valanda į ateitį, o kelios, kaip pavyzdžiui 2.6 poskyryje, elektros energijos gamybos prognozė šešioms valandoms į ateitį.

RF, kaip ir DNT apmokymui pasirenkama duomenų imtis, padalijama į dvi dalis, kurios viena (didesnioji dalis – 9/10) skirta mokymui, o kita (1/10) – testavimui, prognozavimui. RF modelio schemoje skaičiavimams, prognozėms gali būti keičiami du kintamieji ir jie pasirinkti: medžių skaičius – 750 ir šakos padalijimo skaičius – 2. Apsimokymo metu RF augina 750 medžių, o kiekvieno medžio, kiekviena šaka skyia į dvi mažesnes šakas, kol medis užauginamas. Prognozuojant visi užauginti medžiai balsuoja ir daugiausiai balsų surinkusi vertė yra prognozė.

2. VĖJO ELEKTRINIŲ PARKO ELEKTROS ENERGIJOS GAMYBOS PROGNOZIŲ SKAIČIAVIMAS

2.1. Vėjo elektrinių parko ir Lietuvos hidrometeorologijos tarnybos vėjo prognozių aprašymas

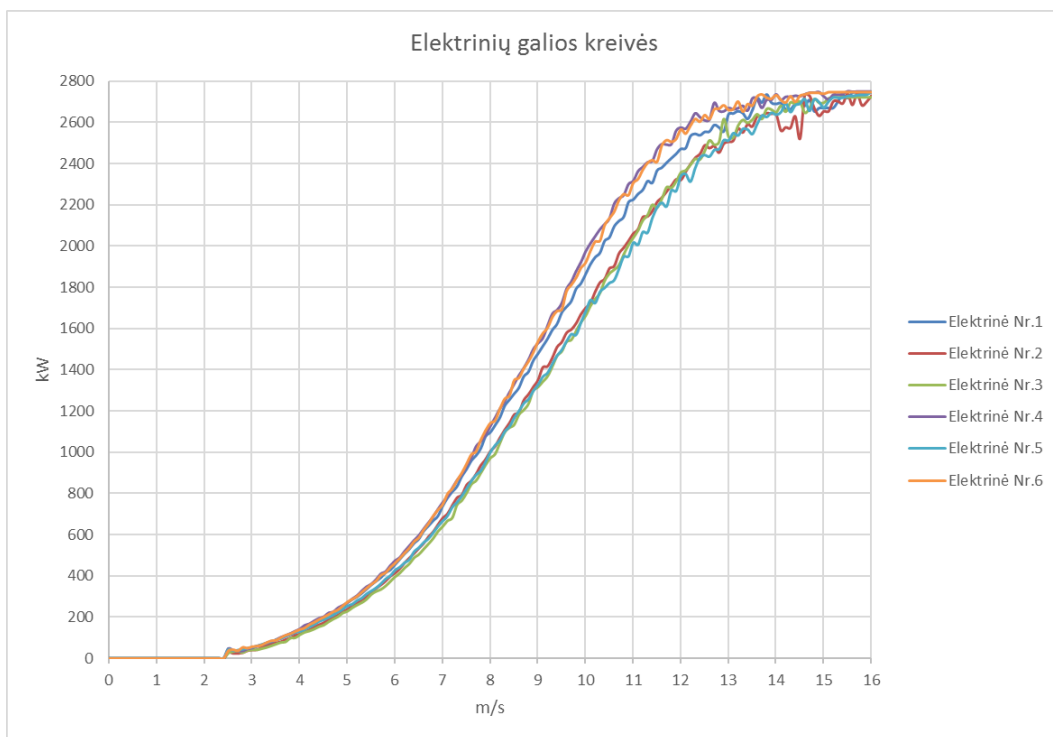
Elektros energijos prognozavimas atliekamas VEP, kuris yra vakarinėje Lietuvos dalyje, pajūryje. Parką sudaro šešios vėjo elektrinės, kurių kiekvienos vardinė galia 2,75 MW, o viso parko galia 16,5 MW. Elektrinės mechaninę energiją į elektros energiją verčia asinchroniniais generatoriais, todėl esant mažesniai nei 2,5 m/s vėjo greičiui, vėjo elektrinės stovi. Kiekvienos iš elektrinių gondola yra 100 metrų aukštyje, o sparnų diametras 100 metrų (kiekvienas sparnas 50 metrų ilgio). Vėjo elektrinės išdėstytos taip, kad darytų kuo mažesnę įtaką viena kitai, todėl mažiausias atstumas tarp dviejų elektrinių yra 5 vėjaračio diametrai (500 metrų).

VEP elektros energijos gamybos prognozavimo laikotarpiu, vėjo elektrinės buvo apytikriai dešimties metų senumo, kadangi elektrinės jau pakankamai ilgai eksploatuojamos, jos ne vienodai nusidėvėjusios. Tol, kol elektrinės naujos, ir elektrinė mechanškai dar nėra pasenusi, visos elektrinės turėtų gaminti apytikriai vienodai elektros energijos, tai yra, pučiant vienodam vėjo greičiui visoms elektrinėms, jos turėtų gaminti vienodai elektros energijos. 2.1.1 paveikslėlyje pateiktos galios kreivės, kurias apskaičiuoja pačios elektrinės. Kiekviena elektrinė nuolat matuoja vėjo greitį ir į elektros tinklus atiduodama elektrinę galią, o laikui bėgant, iš išmatuotų verčių elektrinės susiskaičiuoja galios kreives, kurios parodo, kiek elektrinė gamina elektros energijos prie tam tikro vėjo greičio.

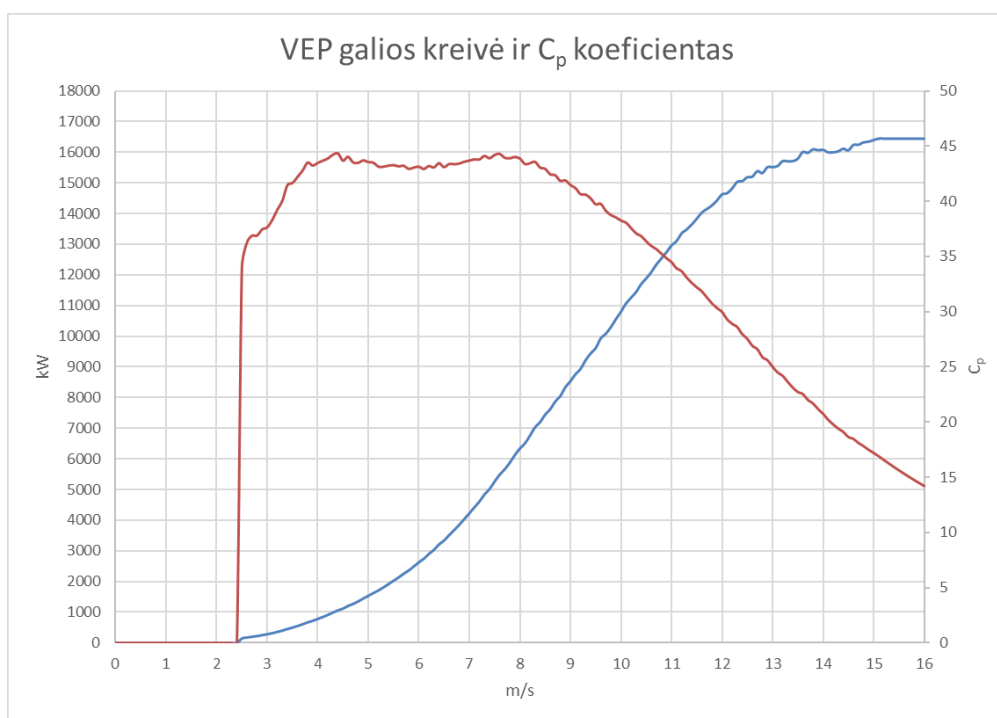
Elektrinių susiskaičiuotų galios kreivių laikotarpius galima pasirinkti, todėl yra galimybė palyginti, kaip elektrinės dirbo pradžioje, jas pastačius ir praėjus kažkuriam tai laikui, tačiau kaip matyti 2.1.1 paveikslėlyje, apskaičiuotos prognozuojamo laikotarpio galios kreivės, kai elektrinės eksploatuotos apie 10 metų, yra nevienodos. Pavyzdžiui, prie 10 m/s tarp geriausiai ir prasčiausiai gaminančios vėjo elektrinės yra apie 300 kW skirtumas, nors visos elektrinės yra vienodos ir vienodai ilgai eksploatuojamos. Todėl galima teigti, kad laikui bėgant, elektrinės dėvisi ir tai daro ne vienodai greitai.

Galios kreivės pateiktos prognozuojamo laikotarpio, o ne suminės (viso eksploatacijos laikotarpio), todėl ties 16 m/s vėjo greičiu galios kreivės baigiasi, nes toks didžiausias vėjo greitis buvo prognozuojamu laikotarpiu. Taip pat galios kreivės esant maksimaliam ir arti maksimaliam vėjo greičiui yra svyruojančios, nes pavyzdžiui 16 m/s vidutinis vėjo greitis pūtė tik tris valandas, ne daug

matavimų, todėl neišvengiama atsitiktinumų, kaip pavyzdžiui ne vienodas vėjo greitis vėjaračio diametre.



2.1.1 pav. VEP elektrinių galios kreivės.



2.1.2 pav. VEP suminė galios kreivė ir naudingumo koeficientas.

Kiekviena elektrinė nuolat matuoja tiek momentinį, tiek vidutinį (momentiniai matavimai integruojami) vėjo greitį ir atiduodamą elektrinę galią į elektros tinklus, todėl kiekviena elektrinė

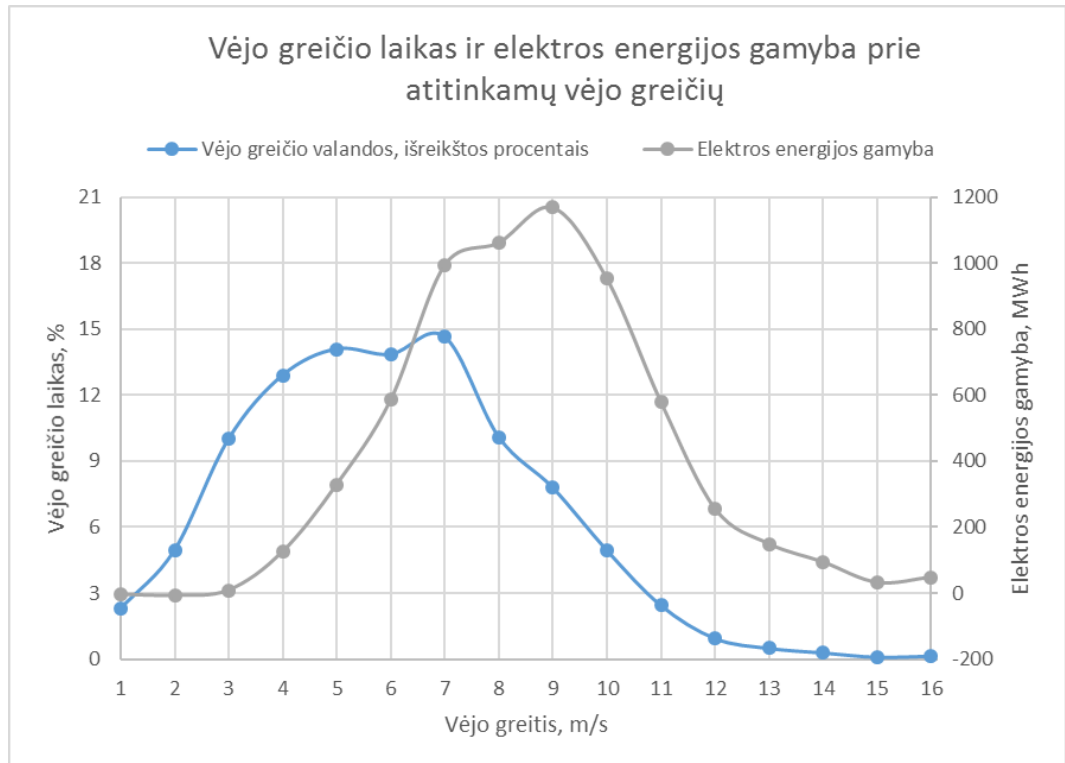
susiskaičiuoja galios kreives bei kiek energijos sugebėjo pasiimti iš vėjo. Laikui bėgant, o elektrinėms senstant, elektrinės paima vis mažiau energijos iš vėjo, todėl vėjo elektrinės kaip ir bet koks kitas mechaninis įrenginys sensta, o nusidėvėjimas yra neišvengiama laiko pasekmė.

2.1.2 paveikslėlyje, VEP naudingumo koeficientas C_p parodo vėjo energijos kiekį tenkantį vėjo elektrinėms ir pagaminamos elektros energijos santykį, maksimalus teorinis koeficientas, vadinamas Betz koeficientu, yra lygus $16/27 = 0,593$ [23]. Betz koeficientu galima apskaičiuoti maksimalią energiją, kurią galima paimti iš tam tikro ploto pučiant vėjui. Jei pučiant vėjui, būtų paimta visa jo kinetinė energija, tai už vėjo elektrinės vėjas turėtų atidavęs visą savo energiją sustoti ir toliau pučiantis vėjas nebegalėtų sukti sparnų, nes iš karto už sparnų vėjas nejudėtų. Todėl iš vėjo paimti visą jo turimą kinetinę energiją vėjo elektrinėmis neįmanoma. Analogiška situacija yra su vėju, jei jo greitis prieš elektrinę ir už jos bus nesulėtėjęs, tai reiškia, kad vėjas neprarado energijos praėjęs pro elektrinę, ko rezultate, neatidavė savo energijos ir elektrinei. 1919 metais Albertas Betz apskaičiavo, kiek maksimaliai galima paimti iš vėjo jo kinetinės energijos ir paversti į mechaninę energiją.

Šiuo atveju, 2.1.2 paveikslėlyje, VEP suminis šešių elektrinių C_p koeficientas netolygiai kinta vėjui didėjant todėl, kad tai yra visų šešių elektrinių vidurkis, kurios skirtingai nusidėvėjusios, turi skirtingus naudingumo koeficientus prie tam tikrų vėjo greičių.

Šalia parko esantys miškai ir reljefo aukščių skirtumai turi įtakos gaminamos elektros energijos kiekiui, pučiant tam pačiam vėjui esančios šešios elektrinės elektros energiją gamina skirtingai. Netoliese esantys miškai, ar pavienių medžių grupės daro įtaką vėjo greičiui, todėl pučiant vėjui tam tikra kryptimi, daroma vienai ar kelioms elektrinėms žalinga įtaka. Nepaisant aplinkos žalingos įtakos elektrinėms, elektrinės šešėliuoja viena kitai, pučiant atitinkamos krypties vėjui, tarp bet kurių dviejų elektrinių, viena stovės priekyje kitos žiūrint į vėją. Nors ir išlaikytas rekomenduojamas 5 vėjaračio diametrų atstumas tarp elektrinių, žalinga įtaka vienos elektrinės kitai egzistuoja.

Per prognozuojamą laikotarpį, daugiausiai laiko pūtė 7 m/s vėjo greitis ir daugiausia elektros energijos pagaminta pučiant 9 m/s vėjo greičiui (2.1.3 paveikslėlis). 9 m/s vėjo greitis pūtė mažiau laiko, nei 7 m/s, bet kadangi prie 9 m/s vėjo greičio elektrinės gamina daugiau elektros energijos negu prie 7 m/s, pagamintos elektros energijos kiekis didžiausias pučiant 9 m/s vėjo greičiui.



2.1.3 pav. Vėjo greičio laikas ir elektros energijos gamyba prognozuojamu laikotarpiu prie atitinkamų vėjo greičių.

2.2. Lietuvos hidrometeorologijos tarnybos prognozuoto vėjo paklaida

Orų prognozės būna ir iki vieno mėnesio laiko į ateitį, tačiau tikslios prognozės modeliuojamos arba skaičiuojamos iki trijų parų į ateitį. Lietuvos hidrometeorologijos tarnyba prie aplinkos ministerijos (LHMT), moksliniams tikslams suteikė modeliuojamas vėjo greičio ir vėjo krypties prognozes vietovei, kurioje pastatytos elektrinės, prognozės taip pat pateikiamos ne žemės paviršiaus taške, o 100 metrų aukštyje, todėl vėjo greičio perskaičiuoti elektros energijos gamybos prognozavimui nereikia, nes ir vėjo elektrinės yra 100 metrų aukštyje. Buvo suteiktos jau kitiems asmenims ar objektams teikiamos vėjo greičio ir krypties prognozės, jos buvo siunčiamos keturis kartus per parą sekančioms 32 valandoms į ateitį, tačiau prognozavimo skaičiavimams naudojamos tik pirmų šešių valandų prognozės, iki sekančios prognozės. Taigi gautos vėjo greičio ir krypties prognozės yra kas šešias valandas ir šešioms valandoms į ateitį (iki sekančios prognozės). Prognozes gauta beveik trijų mėnesių laiko intervalą, 1968 valandas prognozių, tiek yra ir duomenų imtyje eilučių.

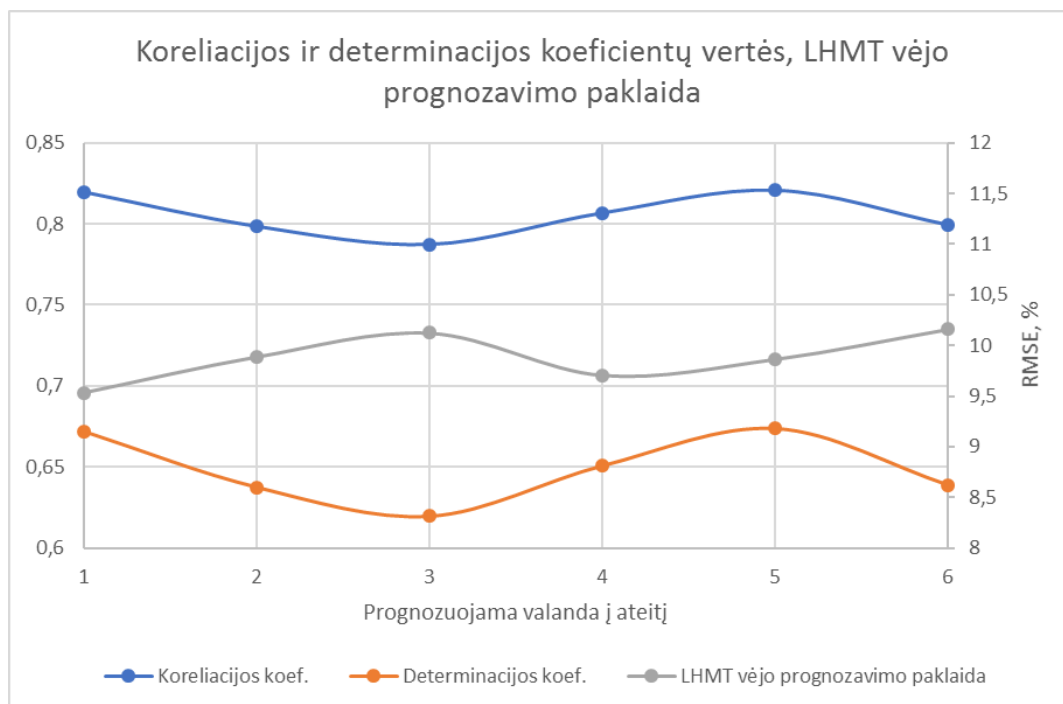
Vėjo greičio ir krypties prognozės buvo suteiktos Lietuvos hidrometeorologijos tarnybos prie Aplinkos ministerijos (LHMT), tarnyba sutiko teikti prognozes kas šešias valandas.

Apskaičiuota, kiek tikslios LHMT vėjo prognozės ir kokią įtaką jos daro elektros energijos prognozavimui, apskaičiuoti duomenų koreliacijos ir determinacijos koeficientai. Apskaičiuoti koeficientai ir paklaidos visos duomenų imties tarp LHMT prognozuojamo vėjo greičio, ir realaus buvusio vėjo greičio:

- Koreliacijos koeficientas tarp vėjo greičio prognozės ir realaus buvusio vėjo greičio = 0.8065;
- Determinacijos koeficientas tarp vėjo greičio prognozės ir realaus buvusio vėjo greičio = 0.6504;
- Paklaidos tarp prognozuojamo vėjo greičio ir realaus buvusio vėjo greičio:
 1. Absoliutinė paklaida = 22,2881 %;
 2. RMSE procentinė paklaida = 9,9417 %.

Vėjo greičio prognozės koreliacijos koeficientas yra 0,8065, tai reiškia, kad tarp prognozuojamo vėjo greičio ir realaus buvusio vėjo greičio egzistuoja stiprus ryšys. Tuo tarpu koreliacijos koeficientas tarp prognozuojamos vėjo krypties ir realaus buvusio vėjo greičio nebuvo skaičiuojamas, nes ryšys yra nykstamai mažas.

Determinacijos koeficientas tarp prognozuojamo vėjo greičio ir realaus buvusio vėjo greičio yra apytikriai lygus 0,65, tai reiškia, kad LHMT vėjo greičio prognozė yra tinkama prognozavimui.



2.2.1 pav. Apskaičiuoti koreliacijos, determinacijos koeficientai, ir vėjo prognozavimo paklaidos tarp LHMT vėjo greičio prognozės ir realaus buvusio vėjo greičio.

Duomenų imtyje, LHMT vėjo greičio ir krypties prognozės yra šešioms valandoms į ateitį, todėl duomenų imtis padalinta į šešias dalis, pirma dalis – visos pirmos prognozuojamos valandos, antra dalis – visos antros prognozuojamos valandos ir t.t.. Kiekvieną dalį sudaro 328 eilutės, kiekvienai iš dalių apskaičiuoti koreliacijos ir determinacijos koeficientai, o iš gautų koeficientų matyti (2.2.1 paveikslėlis), kiek prognozuotas vėjo greitis netiksliai buvo prognozuotas skirtingas prognozuojamas valandas.

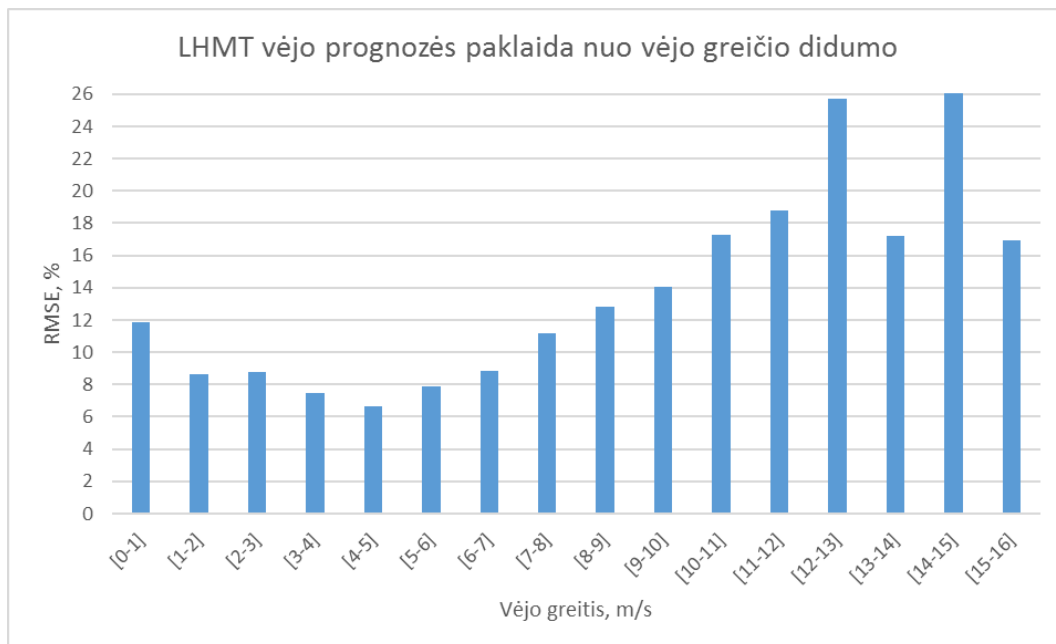
2.2.1 paveikslėlyje matyti, kad LHMT vėjo prognozės yra visos šešias valandas į ateitį apytikriai vienodai netikslios. Pirmoji LHMT prognozuojama valanda tiksliausia, o paskutinioji, šeštoji prognozuojama valanda yra su didžiausia paklaida, tačiau pokytis ne toks didelis, kaip būtų galima tikėtis, prognozavimo paklaidų skirtumas yra tik 0,63 %. LHMT prognozuoja pirmąsias valandas su 9,53 % paklaida, o šeštąsias 10,16 %.

Nors vėjo krypties prognozės koreliacijos koeficientas apskaičiuotas su realiu buvusiu vėjo greičiu yra nykstamai mažas ir pagal koreliacijos koeficiento reikšmes, tiesioginės naudos prognozavimui neduoda, praktikoje susiduriama, kad vėjo kryptis daro įtaką elektros energijos gamybai. Egzistuoja vėjo elektrinių turbulentinės zonos ir jei vėjas pučia atitinkama kryptimi, kad viena elektrinė atsiranda kitos elektrinės turbulentinėje zonoje tokia įtaka pastebima, be to ne visų elektrinių atstumas iki artimiausio miško vienodas. Vienos elektrinės yra kelių dešimčių metrų atstumu nuo miško, o kitos kelių kilometrų atstumu, todėl miškų įtaka elektros energijos gamybai, taip pat ir prognozėms, esant skirtingos krypties vėjams taip pat yra. Apmokant tiek DNT tiek RF prognozavimo metodus, jei būtų turima tiek duomenų, kad to pačio greičio vėjas būtų palygintas visomis kryptimis bent 5⁰ tikslumu, būtų galima pastebėti elektros energijos gamybos skirtumus, o pastebimais skirtumais prognozavimo metodai galėtų apsimokyti, o vėliau ir prognozuoti elektros energijos gamybą tiksliau. Todėl nepaisant nykstamai mažų koeficientų tarp prognozuojamos vėjo krypties ir buvusio realaus vėjo greičio atitinkamą valandą, į būsimas VEP elektros energijos gamybos prognozes vėjo krypties prognozės įtrauktos.

Taip pat, norint išanalizuoti LHMT vėjo prognozes, kiek jos tikslios, jos palygintos su realiu VEP buvusiu vėjo greičiu tą valandą. Visi duomenys suskaidyti į vėjo greičio intervalus, kiekvieno intervalo apskaičiuotos paklaidos pateiktos 2.2.2 paveikslėlyje.

Iš pateiktų rezultatų 2.2.2 paveikslėlyje galima teigti, kad LHMT prognozės tiksliausiai prognozuoja 4 – 5 m/s vėjo greitį, tiek mažesnis, tiek didesnis vėjo greičiai prognozuojami su didesne paklaida, mažesniu tikslumu. Didesnio vėjo greičio prognozavimo paklaida neatitinka kitimo tendencijos, nes didelių vėjo greičio prognozuojamu laikotarpiu nedaug, kaip pavyzdžiui, buvo tik 3 valandos, kuriomis vėjas pūtė tarp 15 ir 16 m/s vidutiniu per valandą greičiu. LHMT prognozės ne

vienodai sėkmingai kiekvieną kartą prognozuoja, o kadangi prie didelių vėjo greičių spėjimų nedaug, todėl ir paklaida svyruoja ne pagal galimas tendencijas.



2.2.2 pav. Vėjo prognozės paklaidos dydis nuo prognozuojamo vėjo greičio stiprumo.

LHMT siūstos vėjo greičio ir krypties prognozės nėra tikslios. Apskaičiavus paklaidą tarp siūstų prognozių ir realaus buvusio vėjo greičio vidutinis absoliutinis paklaidos dydis tarp realaus buvusio vėjo greičio ir prognozuoto vėjo greičio yra 31,6%. Tai reiškia, kad kiekvienos valandos prognozė vidutiniškai suklysta trečdaliu. Pavyzdžiui, jei vėjas pūtė 10 m/s, tai prognozė buvo 7 arba 13 m/s, jei vėjas pūtė 2 m/s, tai prognozė buvo 1,4 arba 2,6 m/s. Tai sąlyginai didelė paklaida, nes prognozuojamas laikotarpis ne tiek toli, kad būtų sunku nuspėti, ar suklysti trečdaliu.

Taip pat LHMT siūstos vėjo greičio prognozės atvaizduotos ir 2.2.4 paveikslėlyje, kur yra atvaizduota vidutinė spėjimo paklaida m/s prie atitinkamo vėjo greičio. Spėjimo paklaida apskaičiuota pagal formulę:

$$A = (\sum_{i=1}^j |x_i - y_i|) \div j \quad 2.2.3$$

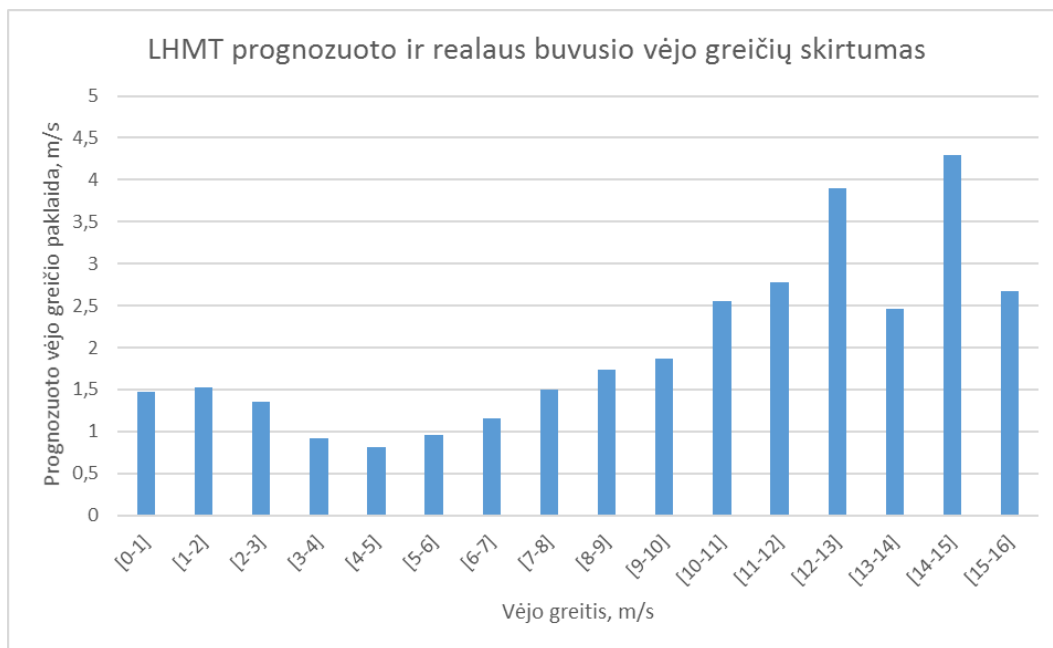
čia: A – vidutinė prognozės spėjimo paklaida, m/s

x_i – realus buvęs vėjo greitis, m/s ;

y_i – prognozuotas vėjo greitis, m/s ;

j – vėjo greičio intervalo duomenų imties eilučių skaičius.

2.2.4 paveikslėlio diagrama iš esmės pateikia tą pačią informaciją kaip ir 2.2.2 paveikslėlis, tačiau šiame paveikslėlyje matoma, kad prognozuojant, pavyzdžiui, nuo 0 iki 1 m/s vėjo greitį, realaus buvusio vėjo greičio ir prognozės tą valandą vidutinis skirtumas yra 1,5 m/s, o prognozuojant nuo 15 iki 16 m/s vėjo greitį, vidutiniškai buvo suklysta 3 m/s.



2.2.4 pav. LHMT prognozuoto ir realaus buvusio vėjo greičių skirtumo dydis nuo prognozuojamo vėjo greičio stiprumo.

2.3. Prognozė „Persistence“ metodu

Tikriausiai pats paprasčiausias ir naiviausias būdas prognozuoti VEP gaminamą elektros energiją trumpam laikotarpiui į ateitį, kaip šiuo atveju valandai į ateitį, yra sakyti, kad VEP sekančią valandą pagamins tiek pat elektros energijos kiek ir paskutinę buvusią valandą prieš tai, toks prognozavimo metodas vadinamas „Persistence“ (liet. atkaklus), pagal 1.1.3 formulę. Tam nereikia jokių prognozavimo resursų, vėjo prognozių, skaičiavimų, spėjimų ar programinės įrangos.

Svarbu paminėti, kad jei VEP elektros energijos galia yra ribojama, arba valdoma operatoriaus, prognozė, sakanti, kad sekančią valandą pagamins elektros energijos, turi būti ne buvusi praėjusios valandos elektros energijos gamyba, o praėjusios valandos buvusi galima pagaminti galia (available power). Vėjo elektrinės pagal išmatuotą vėjo greitį ir apsiskaičiuotas galios kreives, suskaičiuoja kiek elektros energijos galima pagaminti prie tam tikro vėjo greičio ir jei atiduodama galia reguliuojama operatoriaus, elektrinės skaičiuoja ir atiduodamą elektrinę galią, ir kiek būtų

galima atiduoti elektrinės galios, jei ji nebūtų ribota. Todėl prognozuojant būtina atsižvelgti, ar VEP atiduodama elektrinė galia nėra ribojama.

Šiuo prognozavimo būdu nereikalingas nei DNT, nei RF, nei TR, nieko nereikia apmokyti. Tokiu metodu reikia tik apskaičiuoti paklaidą, kuri parodo kiek tiksliai buvo prognozuojama elektros energijos gamyba valandai į ateitį.

Apskaičiuota visos duomenų imties RMSE paklaida yra 7,36 % , o sumos paklaida yra 24,46 %. Šis metodas vizualiai palygintas su kitais prognozavimo metodais 2.9 poskyryje, 2.9.1 paveikslėlyje. Toks prognozavimo metodas valandai į ateitį yra sąlyginai tikslus, nes nereikalauja jokių resursų ir yra paprastas apskaičiuoti. VEP elektros energijos gamyba atspėjama sąlyginai tiksliai, tik smarkiai nepataikoma atvejais, kai vėjo greitis smarkiai keičiasi ar yra permainingas.

2.4. Prognozė tik pagal buvusią gamybos istoriją

Šiame poskyryje VEP elektros energijos gamyba prognozuojama tik pagal buvusią elektros energijos gamybos istoriją. Skirtumas tarp šio ir tolimesnio 2.5 poskyrių yra tai, kad 2.5 poskyryje apskaičiuotas optimalus buvusios gamybos valandų skaičius apmokant buvusią gamybos istoriją kartu su LHMT vėjo prognozėmis, o šiame poskyryje, į apmokymus LHMT vėjo prognozės neįtraukiamos. Šiame poskyryje elektros energijos gamyba prognozuojama vieną valandą į ateitį apmokant prognozavimo metodus su skirtingu skaičiumi valandų buvusios gamybos istorijos.

VEP elektros energiją gamybą valandai į ateitį paprasčiausia prognozuoti, sakant, kad VEP pagamins elektros energijos sekančią valandą tiek, kiek pagamino prieš tai buvusią, kaip 2.3 poskyryje, „Persistence“ metodu. Toks prognozavimo metodas paprastas, tačiau DNT ir RF galima apmokyti su VEP elektros energijos gamybos istorija taip, kad prognozuojant metodai spėtų būsimą elektros energijos gamybą – ją prognozuotų. Tokie metodai sudėtingesni nei „Persistence“ metodas, tačiau jiems taip pat nereikalingos LHMT vėjo prognozės, o ar pasiekiamas didesnis prognozavimo tikslumas nei „Persistence“ metodu, išsiaiškinti reikia abu metodus (DNT ir RF) apmokus ir palyginus gautus prognozavimo tikslumo rezultatus.

Galimai DNT ir RF bandys atspėti elektros energijos gamybos kitimo dėsningumus, pavyzdžiui, jei paskutinę valandą gamino daugiau elektros energijos nei prieš tai buvusią, tai pagal kitimo tendenciją prognozuos ir būsimą elektros energijos gamybą. Prognozavimo metodai tikėdamiesi, kad kitimo tendencijos išsilaikys, valandai į ateitį prognozuos elektros energijos gamybą galimai tiksliau nei pastoviai sakant, kad gamins tiek, kiek ir paskutinę praėjusią valandą („Persistence“ metodu).

Kadangi TR gamybos prognozės tik pagal buvusią gamybos istoriją apskaičiuoti neįmanoma, šiuo atveju patobulintas „Persistence“ metodas ir prognozuojamos vertės apskaičiuojamos pagal paskutinių buvusių dviejų valandų pokytį, pokytis pridedamas prie paskutinės buvusios valandos gamybos ir rezultatas nuspėja kiek elektros energijos VEP pagamins sekančią valandą. Tai tarsi sudėtingesnė „Persistence“ metodo versija, kuri palyginime pavadinta „Persistence 2“. „Persistence 2“ valandos į ateitį prognozės apskaičiuojamos pagal gamybos istorijos pokytį apskaičiuotą tarp paskutinių dviejų valandų, trijų, keturių ir penkių paskutinių valandų, kaip parodyta 2.4.1 – 2.4.5 formulės.

VEP elektros energijos gamybos prognozės, „Persistence 2“ metodu, apskaičiuotos pagal 2.4.1 – 2.4.5 formules. 2.4.1 formulė yra tokia pati, kaip ir skaičiuojant „Persistence“ metodu 2.3 poskyryje.

$$E_i(1) = E_{i-1}; \quad (2.4.1)$$

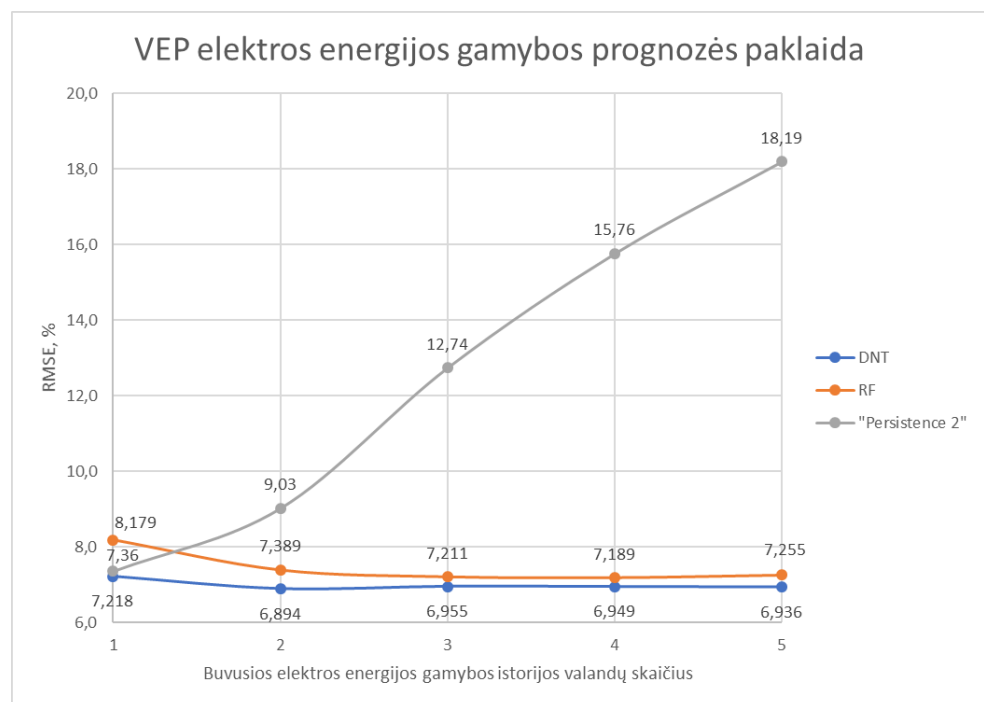
$$E_i(2) = (E_{i-1} - E_{i-2}) + E_{i-1}; \quad (2.4.2)$$

$$E_i(3) = ((E_{i-1} - E_{i-2}) + (E_{i-2} - E_{i-3})) + E_{i-1}; \quad (2.4.3)$$

$$E_i(4) = ((E_{i-1} - E_{i-2}) + (E_{i-2} - E_{i-3}) + (E_{i-3} - E_{i-4})) + E_{i-1}; \quad (2.4.4)$$

$$E_i(5) = ((E_{i-1} - E_{i-2}) + (E_{i-2} - E_{i-3}) + (E_{i-3} - E_{i-4}) + (E_{i-4} - E_{i-5})) + E_{i-1}; \quad (2.4.5)$$

čia: E_i – elektros energijos gamyba i -tąją valandą;



2.4.6 pav. VEP elektros energijos gamybos prognozių paklaidos, prognozuojant tik pagal buvusią VEP elektros energijos gamybos istoriją.

DNT ir RF buvo prognozuoti, kaip parodyta 2.4.6 paveikslėlyje, pradžioje apmokant ir prognozuojant tik su viena buvusios elektros energijos gamybos valanda, po to su dvejomis, trejomis, keturiomis ir penkiomis valandomis buvusios elektros energijos gamybos istorijos. Duomenys padalinti į dešimt dalių ir dešimt kartų prognozuota, kad būtų pašalintas atsitiktinumas, koks pastebimas 2.5.1 paveikslėlyje (*10-fold cross-validation* – kryžminis patikrinimas).

VEP elektros energijos gamybą valandai į ateitį, prognozuojant tik pagal buvusią elektros energijos gamybą, tiksliausiai prognozuoja DNT su dvejomis valandomis buvusios gamybos istorijos (6,894 % RMSE), o prasčiausiai prognozuoja „Persistence 2“ metodas (18,19 % RMSE). Kaip jau minėta, DNT prognozuoja geriausiai su dvejomis valandomis buvusios gamybos, o RF metodas prognozuoja tiksliausiai su keturiomis valandomis buvusios gamybos istorijos (7,189 %), pasiekus tiksliausią prognozavimo tašką, prognozavimo paklaida vėl ima didėti, nes tiek DNT, tiek RF papildomos gamybos istorijos valandos tampa nenaudingos. Apmokant metodus ir jiems duodant per daug duomenų nereikalingi gali tapti dezinformacija ir bloginti galutinį rezultatą, kaip šiuo atveju ir pastebima.

Apmokant RF tik su viena valanda buvusios elektros energijos gamybos istorijos (8,179 %), gamyba prognozuojama prasčiau nei „Persistence 2“ metodu (7,36 %). Taip yra todėl, kad RF neužtenka duomenų atspėti, kaip keisis elektros energijos gamyba sekančią valandą. Suteikus RF dviejų buvusių elektros energijos gamybos valandų istoriją, sekančios valandos prognozės tampa tikslesnės (7,389 %), o suteikus trijų valandų gamybos istoriją (7,211 %), RF metodas aplenkia „Persistence 2“ metodą.

Ankstesniame poskyryje (2.3 Prognozė „Persistence“ metodu) prognozuojant elektros energijos gamybą, „Persistence“ metodu, sakant, kad sekančią valandą pagamins tiek elektros energijos, kiek prieš tai buvusią valandą buvo pagaminta, buvo gauta 7,36 % RMSE paklaida, šiuo atveju prognozuojant be LHMT vėjo prognozės, tik pagal buvusią elektros energijos gamybą, bet jau pasitelkiant DNT buvo gauta 6,89 % RMSE paklaida, tai yra ženklus 0,47 % prognozių tikslumo padidėjimas.

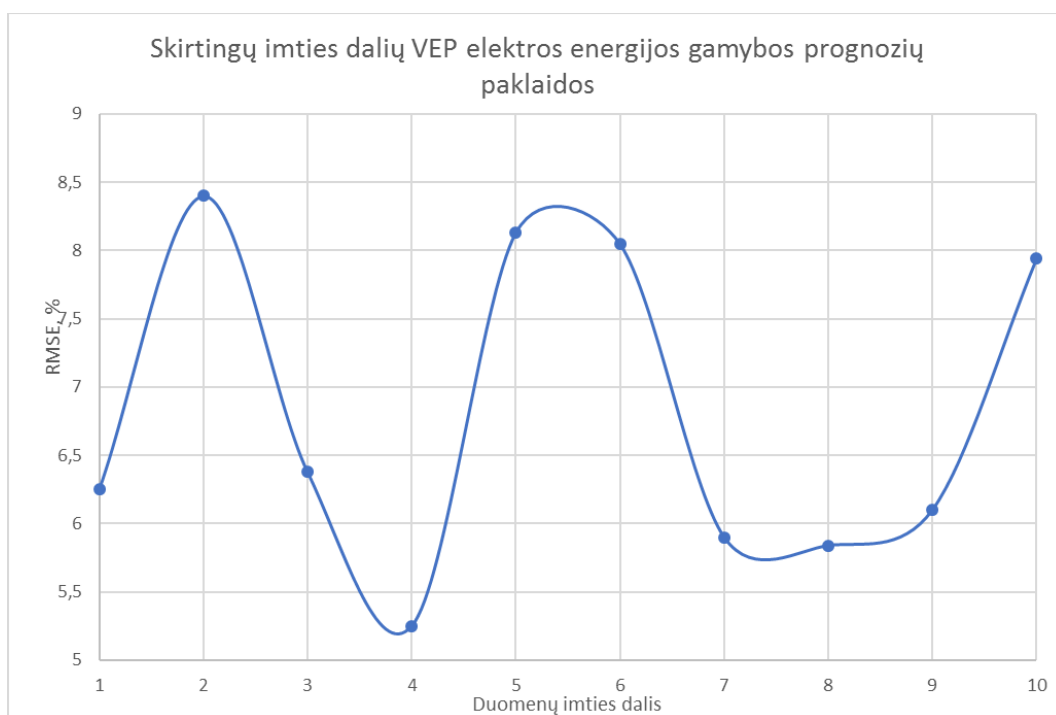
2.5. Optimalaus vėjo elektrinių parko elektros energijos gamybos istorijos

valandų skaičiaus nustatymas.

Ankstesniame 2.4 poskyryje išsiaiškinta, kad prognozuojant elektros energijos gamybą tik pagal buvusią elektros energijos gamybos istoriją, tiksliausiai prognozuoja DNT metodas, apmokytas su dvejomis valandomis buvusios gamybos istorijos. Šiame poskyryje DNT ir RF prognozavimo

metodai apmokomi su LHMT vėjo greičio ir krypties prognozėmis kartu su skirtingu buvusios elektros energijos gamybos valandų skaičiumi, kad būtų ištirtas optimalus buvusios gamybos valandų skaičius, kurį reikia naudoti, prognozuojant kartu su LHMT vėjo prognozėmis. To reikia tam, nes yra neaišku, koks yra optimalus skaičius valandų buvusios gamybos istorijos apmokant DNT ar RF metodus, valanda, o gal dešimt valandų atgal. Tam, kad tai išsiaiškinti, prognozuojama viena valanda į ateitį dvejais prognozavimo metodais (DNT(paslėptų neuronų 5) ir RF (750 medžių)).

Prognozuota dešimt kartų duomenis suskaidžius į dešimt dalių, pirma prognozė – su pirmomis 9 dalimis apmokoma ir su 10-ta dalimi prognozuojama, antra prognozė – su pirmomis 8-iomis ir 10-ta dalimis apmokoma ir su 9-ta dalimi prognozuojama, ir t.t.. Duomenys padalinti į dešimt dalių ir dešimt kartų prognozuota, kad būtų pašalintas atsitiktinumas, koks pastebimas 2.5.1 paveikslėlyje (*10-fold cross-validation* – kryžminis patikrinimas). Laimingi (gerai prognozuojami) duomenys ir nelaimingi (blogai prognozuojami) duomenys, kurie yra naudojami prognozavimui, testuojami, po to rezultatai sumuojami ir išvedamas aritmetinis vidurkis.

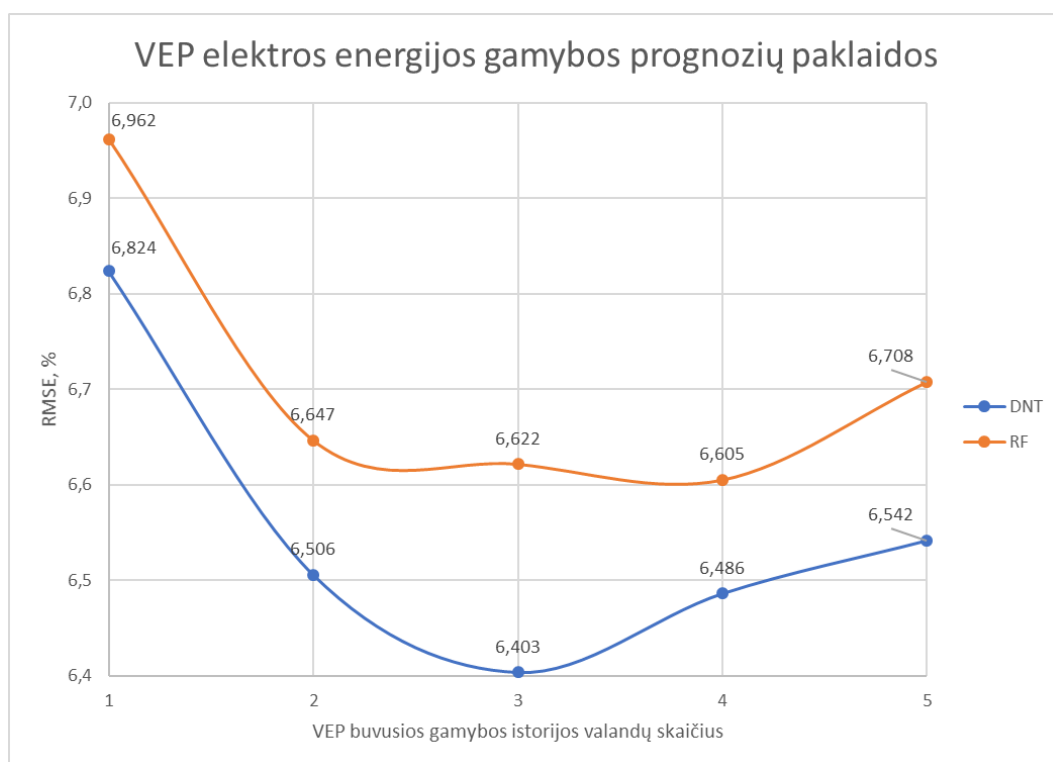


2.5.1 pav. Prognozių tikslumas prognozuojant skirtingas duomenų imties dalis.

Kaip matyti 2.5.1 paveikslėlyje, prognozuojant VEP elektros energijos gamybą DNT metodu, į apmokymus įtraukiant LHMT vėjo prognozes ir penkias valandas buvusios VEP elektros energijos gamybos istorijos, skirtingos imties dalys skirtingai gerai prognozuojamos. 4-ta imties dalis šiuo atveju prognozuojama tiksliausiai (laimingiausiai), paklaida nesiekia 6 %, o prasčiausiai

prognozuojama 6-ta imties dalis (nelaimingiausia), kurią prognozuojant gauta 9 % paklaida. Skirtumas tarp prognozavimo paklaidų, prognozuojant tos pačios imties skirtingas dalis, siekia ir 3 %, tai yra labai daug, lyginant su tuo, kad ir 0,5 % yra daug. Todėl darbe visos prognozavimo paklaidos apskaičiuotos dešimt kartų, išvedus, jų aritmetinį vidurkį tam, kad būtų pašalinti skirtumai tarp laimingai ir nelaimingai prognozuojamų duomenų imties dalių.

Grįžtant prie to, kad reikia nustatyti optimalų VEP buvusios gamybos istorijos valandų skaičių prognozėms skaičiuoti, VEP elektros energijos gamyba prognozuojama apmokant prognozavimo metodus su LHMT vėjo prognozėmis ir atskirai viena valanda, dviem, trimis, keturiomis ir penkiomis valandomis buvusios gamybos istorijos. Kiekvienu iš penkių atvejų prognozuota po dešimt kartų (prognozuotos skirtingos imties dalys), o pateikti atitinkamos valandos rezultatai (2.5.2 paveikslėlis) yra dešimties prognozių aritmetinis vidurkis (*10-fold cross-validation* – kryžminis patikrinimas).



2.5.2 pav. Prognozių tikslumas prognozėms naudojant skirtingą buvusios gamybos valandų skaičių ir LHMT vėjo prognozę.

Iš 2.5.2 paveikslėlio rezultatų matyti, kad tiksliausiai prognozuojama VEP elektros energijos gamyba DNT metodu apmokius jį su LHMT vėjo prognozėmis ir trejomis valandomis buvusios gamybos istorijos, mažiau gamybos istorijos valandų yra nepakankamai informacijos, o daugiau gamybos istorijos valandų tampa dezinformacija apmokant. Panaši situacija pastebima ir

prognozuojant su RF metodu, tik šis metodas geriausiai prognozuoja elektros energijos gamybą su LHMT vėjo prognozėmis ir keturiomis valandomis buvusios gamybos istorijos. Todėl tolimesniuose skaičiavimuose, apmokant DNT metoda bus naudojamos trys valandos buvusios gamybos istorijos, o RF metoda – keturios.

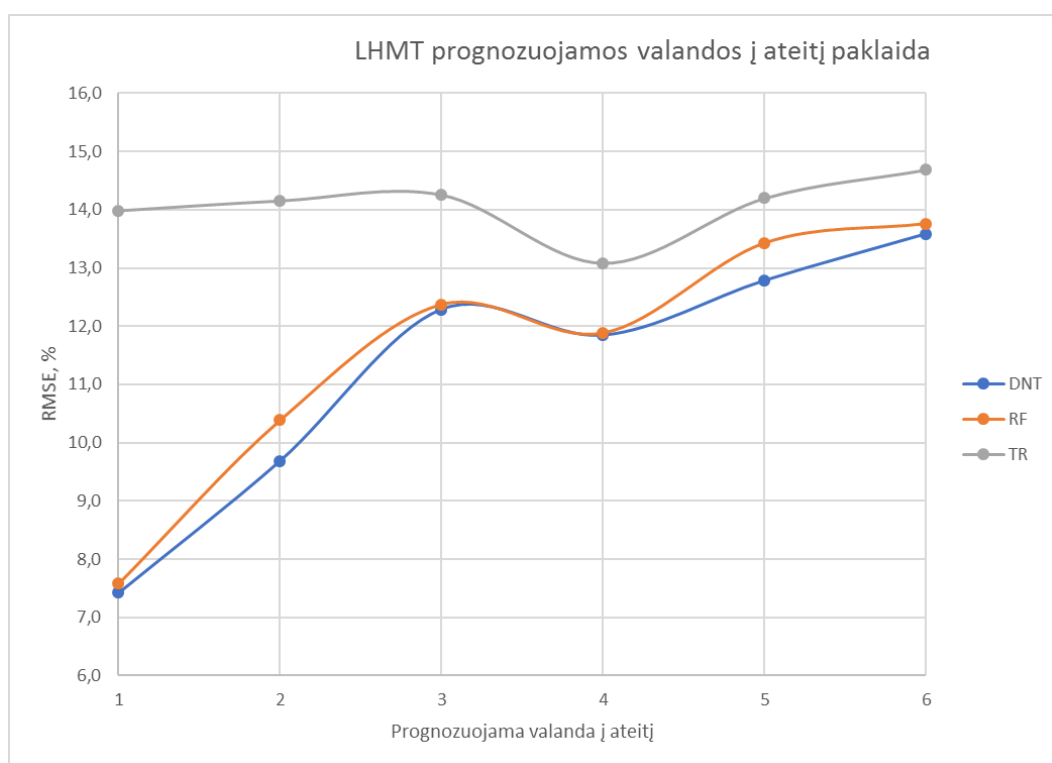
2.6. Prognozių palyginimas skirtingoms šešioms vėjo prognozės valandoms

Pirmajame 1.1 poskyryje išsiaiškinta, kad didžiausią įtaką elektros energijos gamybos prognozėms daro vėjo greitis ir jo prognozė, taip pat 2.5 poskyryje išsiaiškinta, kad prognozuojant optimalu apmokyti DNT metoda su trimis valandomis, o RF metoda su keturiomis valandomis buvusios gamybos. Kadangi LHMT vėjo prognozes teikė kas šešias valandas šešioms valandoms į ateitį, duomenų imtis padalinta į šešias dalis, pirmoji dalis – visos pirmos LHMT prognozuotos valandos, antroji dalis – visos antros valandos ir t.t. Su kiekviena iš dalių prognozuojama VEP elektros energijos gamyba ir apskaičiuojamos prognozavimo paklaidos, kurios palyginamos tarpusavyje. Galima numanyti, kad visos pirmosios valandos prognozuos elektros energijos gamybą tiksliausiai, antrosios mažiau tiksliai ir t.t. iki šeštos, prasčiausiai prognozuojančios elektros energijos gamybą valandos. Taip galėtų ir turėtų būti todėl, kad LHMT lengviausia nuspėti pirmąją būsimos vėjo prognozės valandą, o sunkiausia šeštąją, o pagal LHMT vėjo prognozes skaičiuojamos ir VEP elektros energijos gamybos prognozės.

Nustatyti, su kuriomis LHMT vėjo prognozės valandomis VEP elektros energijos gamyba prognozuojasi tiksliausiai, prognozuojama trimis būdais, DNT, RF ir TR. Duomenys suskaidyti į šešias dalis, tiek, kiek prognozuojamų valandų į ateitį teikė LHMT siūstose prognozėse. Prognozuojant elektros energijos gamybą apmokyta ir testuota (prognozuota) su ta pačia valanda (pirma, antra, trečia ir t.t.). Kadangi turimos 1968 valandos prognozių kas 6 valandas, kiekvienos valandos (pirmos LHMT prognozės valandos, antros ir t.t.) prognozių yra po 328 eilutes. Apmokyti ir testuoti su 328 eilutėmis tiek DNT, tiek RF sunkiai apsimoko, o vėliau ir sunkiai prognozuoja, dėl per mažos duomenų imties. Pavyzdžiui esant mažai duomenų imčiai DNT metodas gali persimokyti ir todėl prognozuoti mažiau tiksliai nei su daugiau duomenų. Nepaisant galimai netikslių rezultatų, kiekvienos valandos 328 eilutės padalintos į dešimt dalių kaip ir ankstesniame tyrime ir prognozuojama po dešimt kartų, tam, kad išvengti atsitiktinai laimingai ar nelaimingai prognozuojamų duomenų (*10-fold cross-validation* – kryžminis patikrinimas).

Pagal atliktas VEP elektros energijos gamybos prognozes matyti (2.6.1 paveikslėlis), kad tiksliausiai DNT (7,42 %) ir RF (7,58 %) metodais prognozuojasi visos pirmosios valandos, o TR tiksliausiai prognozuojasi visos ketvirtos (13,09 %) vėjo prognozės valandos. Visiems trims

metodams prasčiausiai prognozuojasi šeštos, paskutinės prognozės, valandos, taip yra todėl, kad LHMT prognozuojant pirmąsias valandas yra žinomas ankstesnės valandos vėjo greitis, o šešta valanda prognozuojama tik žinant koks vėjo greitis buvo prieš penkias valandas. Taip pat šiuo atveju prognozuojant elektros energijos gamybos prognozes, prognozuojant pirmąsias valandas į ateitį yra žinoma prieš valandą buvusi elektros energijos gamybos istorija, prognozuojant visas antrąsias valandas yra žinoma kiek gamino prieš dvi ir tris valandas, ir t.t. . LHMT vėjo prognozės, kaip matyti ankstesniame 2.2 poskyryje 2.2.1 paveikslėlyje, apytikriai vienodai netikslios visose šešiose prognozuojamose valandose, o elektros energijos gamybos prognozės tiksliausios pirmąsias prognozuojamas valandas, išskyrus TR metodą.



2.6.1 pav. Prognozuojamos valandos į ateitį elektros energijos gamybos paklaida, prognozuojant pagal LHMT vėjo prognozę.

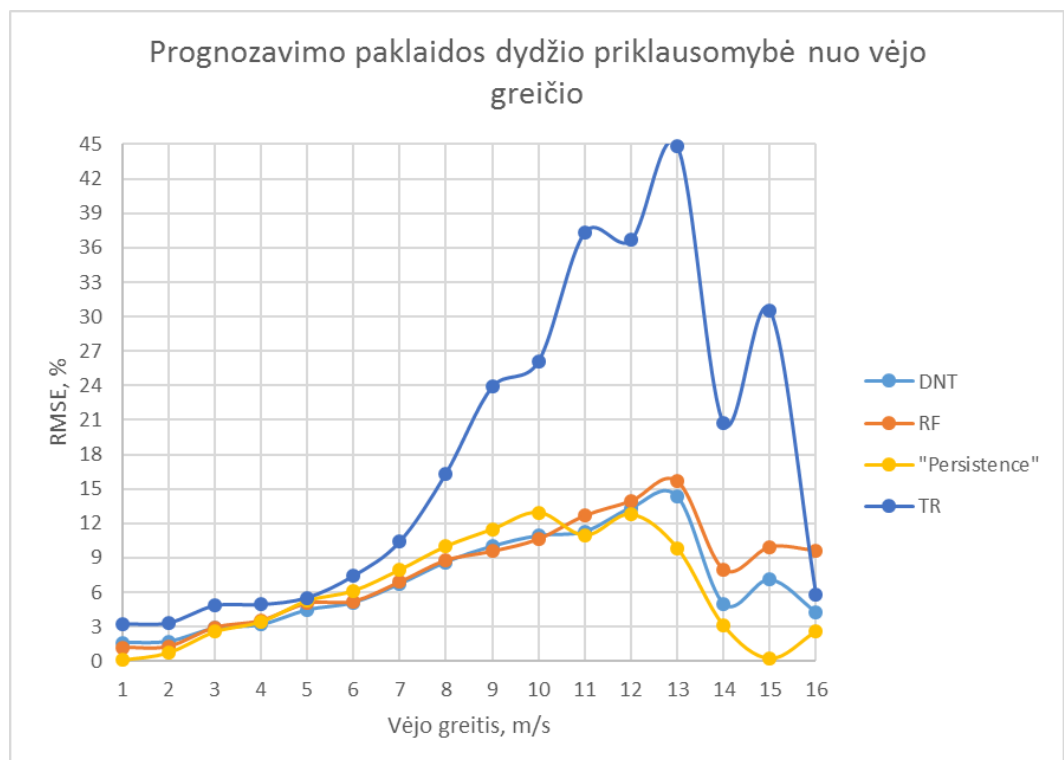
Prognozuojant ketvirtąsias valandas į ateitį TR metodu pastebimas prognozuojamos elektros energijos gamybos tikslumo padidėjimas. Prognozuojant elektros energijos gamybą DNT ir RF metodais, elektros energijos gamyba prognozuojama apytikriai vienodai, tačiau DNT metodas šiek tiek tikslesnis. Galiausiai, atsižvelgus į rezultatus tiksliausiai prognozuojamos visos pirmosios valandos DNT metodu (7,42 %), o prasčiausiai prognozuojamos visos šeštosios valandos į ateitį TR metodu (14,68 %).

2.7. Prognozių paklaidos dydis pagal vėjo greitį

Siekiant išanalizuoti VEP elektros energijos gamybos prognozavimo tikslumą, naudinga žinoti, koks vėjo greitis tiriamose prognozėse prognozuojasi tiksliau. Maži vėjo greičiai, ar kaip tik esant dideliems vėjo greičiams VEP elektros energijos gamyba prognozuojama su mažesne paklaida.

Tokiai analizei palyginti įvairūs prognozavimo metodai, ne tik DNT, RF ar TR, bet ir prognozavimas sakant, kad sekančią valandą pagamins tiek pat elektros energijos kiek prieš tai buvusią valandą („Persistence“ metodu), kaip 2.3 poskyryje prognozuota. Pagal 2.5 poskyryje padarytas išvadas, elektros energijos gamyba DNT metodu prognozuota su 5 paslėptais neuronų sluoksniais, ir trimis valandomis atgal buvusios gamybos istorijos, o RF metodu prognozuota su 750 medžių ir keturiomis valandomis atgal buvusios gamybos istorijos.

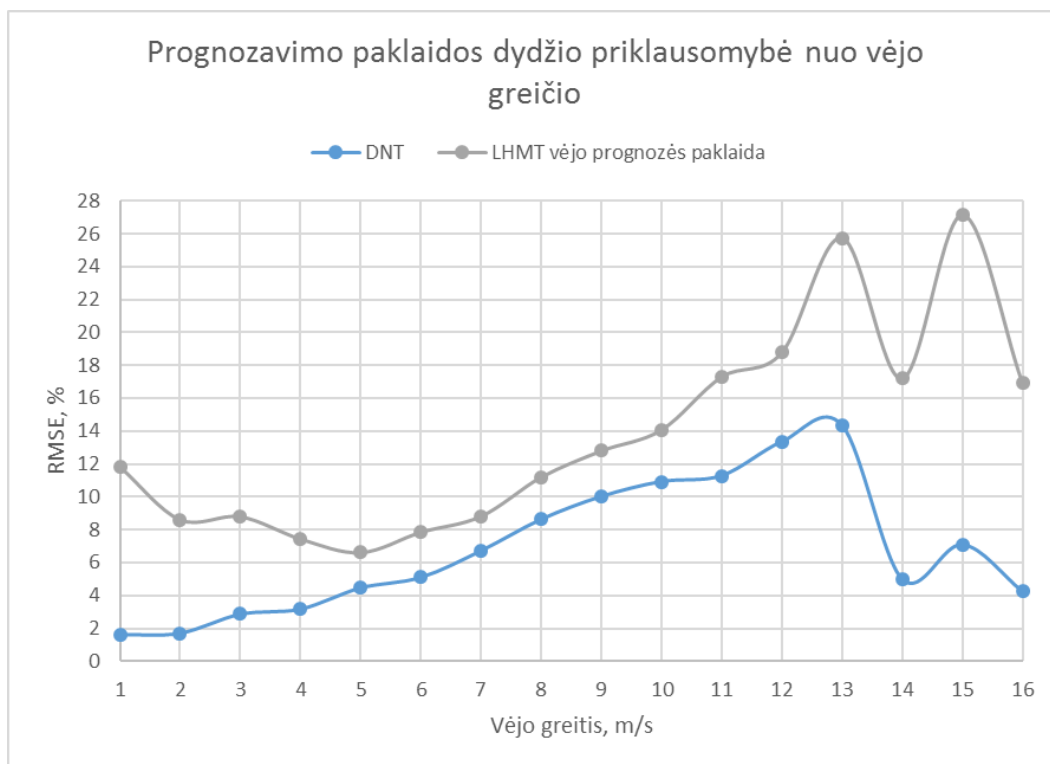
2.2 poskyryje, 2.2.2 paveiksle matyti, kad LHMT vėjo prognozės, prognozuojamu laikotarpiu, tiksliausiai prognozuoja 4 – 5 m/s vėjo greitį, mažesnę vėjo greitį prognozuoja mažiau tiksliai, o prasčiausiai prognozuoja didelius vėjo greičius, bet kokią tai įtaką daro VEP elektros energijos gamybos prognozėms, iširta ir pateikta 2.7.1 paveikslėlyje.



2.7.1 pav. VEP elektros energijos gamybos prognozavimo paklaidos dydžio priklausomybė nuo vėjo greičio.

Mažiausiuose ir didžiausiuose vėjo greičiuose tiksliausiai prognozuojama VEP elektros energijos gamyba „Persistence“ metodu, kaip buvo prognozuota 2.3 poskyryje. Visame likusiame vėjo greičių intervale, kai vėjo greitis yra nuo 3 iki 10 m/s tiksliausiai prognozuoja DNT metodas ir nežymiai atsilieka elektros energijos gamybos prognozės prognozuojant RF metodu.

2.2 poskyryje padaryta išvada, kad LHMT vėjo prognozės skirtingai prognozuoja skirtingus vėjo greičius, tačiau VEP elektros energijos gamybos prognozių tendencijos vėjo greičio intervaluose skiriasi nuo LHMT netikslaus vėjo prognozavimo tendencijos. Žemiau pateiktame 2.7.2 paveikslėlyje palygintos LHMT vėjo greičio prognozės ir geriausiai elektros energijos gamybą prognozavusio – DNT metodo. Paveikslėlyje matyti, kad prognozavimo tendencijos iš dalies atitinka, tai yra, kuo didesnę vėjo greitį prognozuoja LHMT ir DNT, tuo didesnė prognozavimo paklaida. Aiškiau skiriasi mažiausi ir didžiausi vėjo greičiai. Mažiausių vėjo greičių intervale DNT prognozuoja VEP elektros energijos gamybą tiksliau nei LHMT prognozuoja vėjo greitį todėl, kad vėjo elektrinės pradeda dirbti tik prie 2,5 m/s, o visi mažesni vėjo greičiai prognozuojami tiksliau, nes elektrinei per mažas vėjo greitis. Didžiausių vėjo greičių intervaluose DNT prognozuoja VEP elektros energijos gamybą tiksliau, nei LHMT prognozuoja vėjo greitį todėl, kad prie 14,5 m/s vėjo elektrinės pasiekia maksimalią galią, o pučiant stipresniam vėjo greičiui elektrinės daugiau nei maksimali galia negamina.



2.7.2 pav. Prognozių paklaidos, prognozuojant tik pagal buvusią VEP elektros energijos gamybą.

Vėjo greičiui pasiekus 13 m/s ribą pastebimas DNT prognozuojamos elektros energijos gamybos sumažėjusi paklaida, taip yra todėl, kad vėjo elektrinės prie 14,5 m/s pasiekia maksimalią vardinę galią ir net LHMT prognozėms sakant (prognozuojant), kad pūs stipresnis vėjo greitis, elektros energijos gamybos prognozė išlieka tikslesnė, nes VEP negali gaminti elektros energijos didesniu pajėgumu nei jo vardinė galia. Daroma išvada, kad didesnę vėjo greitį LHMT prognozuoja prastai, bet VEP jau būna pasiekęs savo maksimalią galią, prie 14,5 m/s, todėl DNT prognozuoja elektros energijos gamybą sąlyginai tiksliau, nei LHMT prognozuoja vėjo greitį.

LHMT didesnio vėjo greičio prognozavimo paklaida neatitinka kitimo tendencijos ir prie didelių vėjo greičių kinta nevienodai, nes didelių vėjo greičių prognozuojamu laikotarpiu nedaug, kaip pavyzdžiui, buvo tik 3 valandos, kuriomis vėjas pūtė tarp 15 ir 16 m/s vidutiniu greičiu per valandą. LHMT prognozės ne vienodai sėkmingai kiekvieną kartą prognozuoja, o kadangi prie didelių vėjo greičių spėjimų nedaug, todėl ir paklaida svyruoja ne pagal galimas tendencijas.

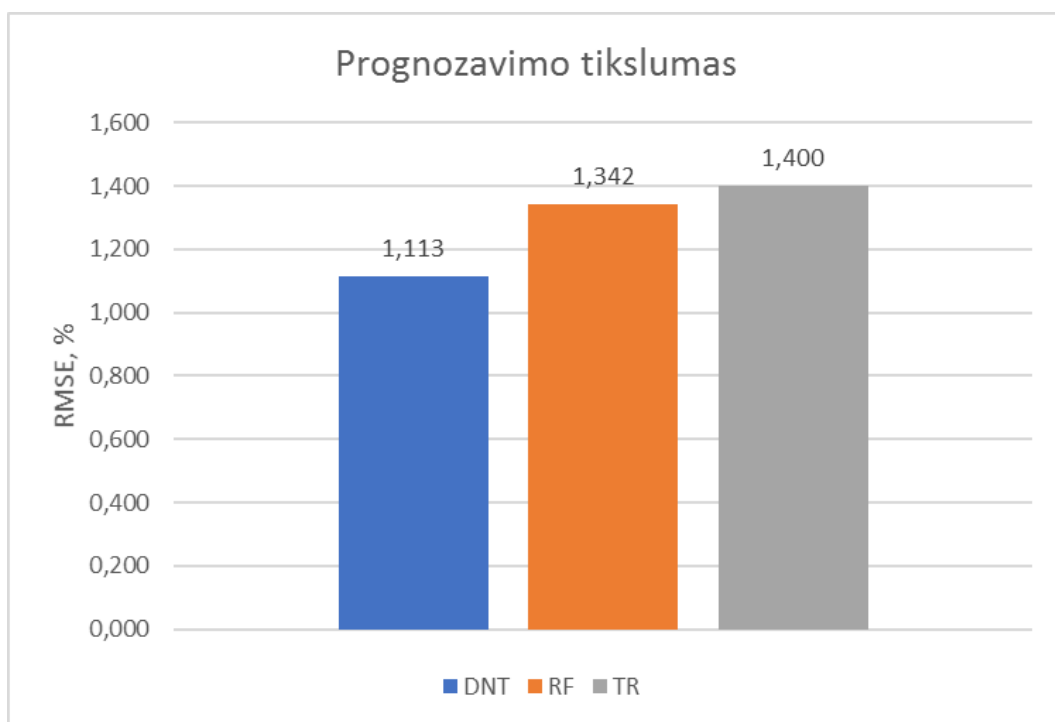
2.8. Prognozė su gera vėjo prognoze

LHMT siūstos vėjo greičio ir krypties prognozės nėra norimai ar galimai tikslios. Apskaičiavus paklaidą tarp siūstų prognozių ir realaus buvusio vėjo greičio vidutinis absoliutinis paklaidos dydis tarp realaus buvusio vėjo greičio ir prognozuoto vėjo greičio yra 31,6%. Tai reiškia, kad kiekvienos valandos prognozė vidutiniškai suklysta trečdaliu. Pavyzdžiui, jei vėjas pūtė 10 m/s, tai prognozė buvo 7 arba 13 m/s, jei vėjas pūtė 2 m/s, tai prognozė buvo 1,4 arba 2,6 m/s. Tai sąlyginai didelė paklaida, nes prognozuojamas laikotarpis ne tiek toli, kad būtų sunku nuspėti, ar suklysti trečdaliu. Tokios sąlyginai netikslios LHMT vėjo prognozės vis tiek prognozuojant VEP elektros energijos gamybą DNT ar RF metodais pagerina prognozavimo rezultatus. Tam, kad būtų patikrintas naudojamų prognozavimo metodų tinkamumas, VEP elektros energijos gamybos prognozės apskaičiuojamos su geromis vėjo prognozėmis.

Galima DNT ir RF metodus apmokyti su idealiai atitinkančia, idealiai gera vėjo greičio prognoze. Tokia prognozė būtų visų šešių elektrinių matuotas vėjo greičio vidurkis atitinkamą valandą, teigiant, kad pačių elektrinių išmatuotas vėjo greitis yra atitinkamos valandos į ateitį vėjo greičio prognozė. Kadangi kiekviena elektrinė matuoja vėjo greitį atskirai, tai vienai valandai gaunami šešių elektrinių išmatuoti vidutiniai vėjo greičiai, iš visų šešių vidutinių vėjo greičių išvedamas valandos aritmetinis vidurkis, kuris ir yra menama vėjo prognozė. Galima abu prognozavimo metodus apmokyti su šia informacija ir ištirti, kaip tiksliai toks metodas galėtų prognozuoti VEP elektros energijos gamybą. Be to, palyginimui, elektros energijos gamyba

suprognuozuota ir TR metodu pagal gerą vėjo greičio prognozę ir palyginti visi trys metodai tarpusavyje.

Kaip ir anksčiau, prognozuojant, DNT metodas apmokomas su trejomis, o RF metodas su keturiomis paskutinėmis valandomis buvusios elektros energijos gamybos istorijos ir realiu buvusiu vėjo greičiu atitinkamą valandą (idealiai gera vėjo greičio prognoze). Taip pat, visa duomenų imtis suskaidoma į dešimt dalių, apmokoma ir prognozuojama dešimt kartų (*10-fold cross-validation* – kryžminis patikrinimas), 2.8.1 paveikslėlyje, pateiktos 10 prognozių aritmetinių vidurkių vertės, trimis prognozavimo metodais.



2.8.1 pav. Prognozių paklaida, prognozuojant su idealiai geromis vėjo greičio prognozėmis.

Iš 2.8.1 paveikslėlio rezultatų matyti, kad pagal tikslias vėjo greičio prognozes galima suprognuozuoti VEP elektros energijos gamybą sąlyginai tiksliai, apie 7 kartus tiksliau nei su LHMT vėjo prognozėmis. Tiksliausiai elektros energijos gamybą valandai į ateitį prognozuoja DNT metodas (1,113 % RMSE), šiek tiek prasčiau prognozuoja RF metodas (1,342 % RMSE), o prasčiausiai TR metodas (1,4 % RMSE).

Kadangi vėjo prognozė buvo realus buvęs pačių elektrinių išmatuotas vėjo greitis, galima manyti, kad elektros energijos gamybos prognozė sąlyginai netiksli. Bet elektros energijos gamybos prognozės netikslumą lemia daug faktorių, kurių pagrindiniai šiuo atveju yra ne vienodas vėjo greitis

vėjaračio diametre (vėjo elektrinės vėjo greitį matuoja centre) ir ne vienodas vėjo greitis tarp elektrinių iš kurių išvedamas jų bendras aritmetinis vidurkis. Vėjo elektrinių elektros energijos gamyba didėjant vėjo greičiui, didėja eksponentiškai, todėl, prie mažo vėjo padidėjimo, gamyba padidėja smarkiai, o pučiant ne vienodam vėjo greičiui tarp elektrinių iš kurio po to išvedamas aritmetinis vidurkis, gaunama paklaida prognozuojant. Todėl galima teigti, kad visiškai idealiai suprognozuoti VEP elektros energijos gamybą neįmanoma, o DNT, kaip VEP elektros energijos prognozavimo metodas, gali būti tikslus ir tinkamas prognozavimui.

2.9. Prognozavimo metodų palyginimas

LHMT suteiktos vėjo prognozės yra kas šešias valandas, todėl lyginant prognozes galima palyginti ne tik, kaip gerai prognozuoja vieną valandą į ateitį, bet ir palyginti, kaip tiksliai prognozuojasi dvi valandos į ateitį, trys, keturios, penkios ir šešios, tiek kiek turima LHMT prognozių valandų į ateitį iki sekančios prognozės.

Lyginant prognozes, kaip pavyzdžiui su turima LHMT vėjo prognoze, prognozuoti būsimą elektros energijos gamybą galima ją apskaičiuojant pagal 1.1.2 formulę arba pasinaudoti elektrinių apsiskaičiuojamomis galių kreivėmis (2.1.1 ir 2.1.2 paveikslėliai) ir taip prognozuoti būsimą elektros energijos gamybą. Abu metodai bus TR prognozavimo metodai, tačiau pastarasis būdas, prognozuojant elektros energijos gamybą pagal elektrinių apsiskaičiuotas galios kreives yra tikslesnis, todėl, kad prie skirtingų vėjo greičių elektrinės skirtingai gerai išnaudoja gaunamą vėjo energiją (C_p koeficientas, 2.1.3 paveikslėlis), o galios kreivės, kurias apsiskaičiuoja pačios elektrinės yra tiksliausias būdas pasakyti, kiek elektrinė gamina prie tam tikro vėjo greičio. Todėl šiuo atveju elektros energijos gamybos prognozė apskaičiuojant būsimą elektros energijos gamybą pagal 1.1.2 formulę nebus skaičiuojama, nes tai akivaizdžiai mažiau tikslesnis metodas, o be to sudėtingesnis ir labiau komplikotas. Kadangi TR prognozavimo metodas remiasi tik elektrinių galios kreivėmis ir LHMT vėjo prognozėmis, VEP elektros energijos gamybos prognozavimo tikslumas priklauso tik nuo LHMT vėjo prognozių tikslumo.

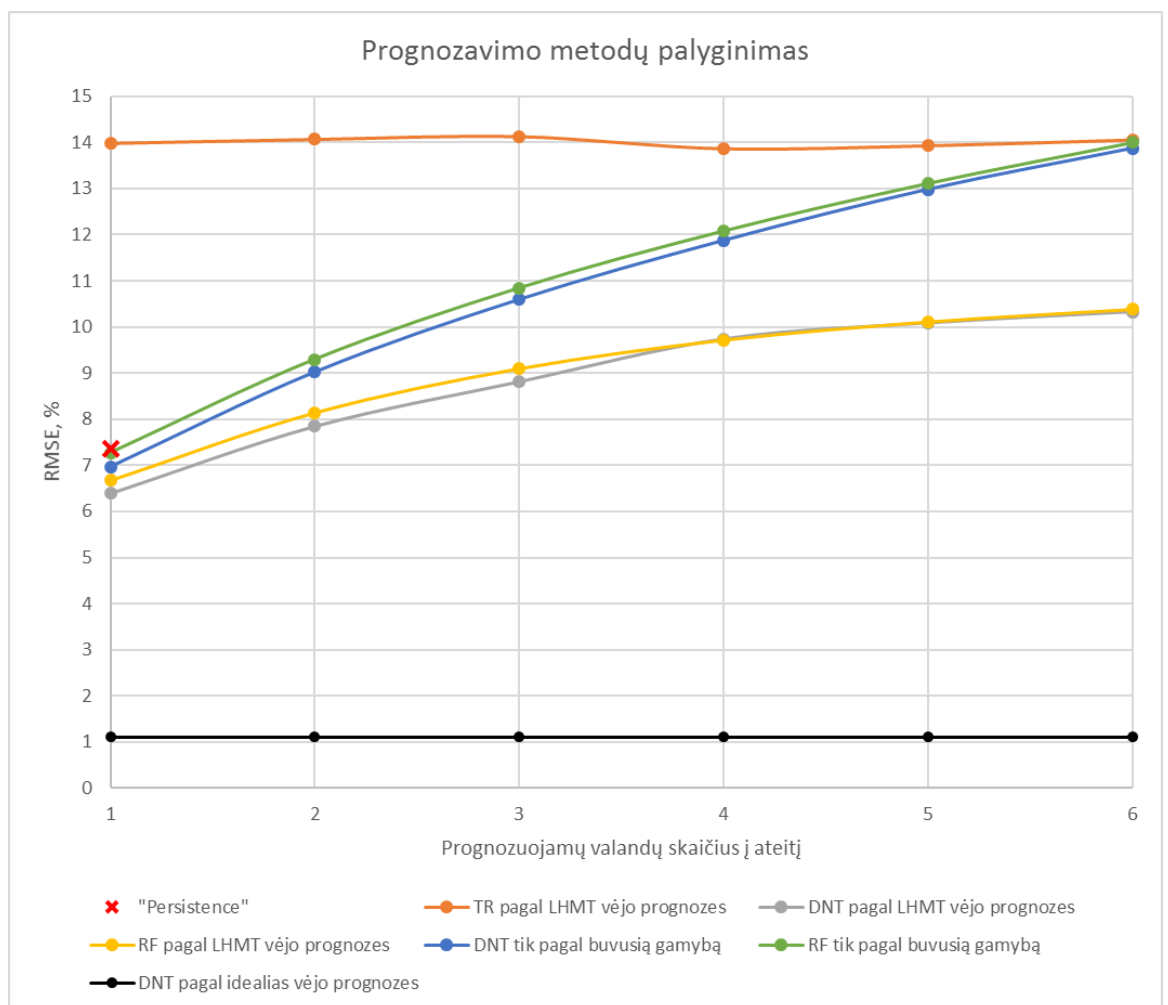
Lyginant prognozavimo metodus svarbu atsižvelgti ir į prognozavimui reikalingų kaštų didumą, todėl į prognozių palyginimą taip pat bus įtrauktas pats paprasčiausias ir mažiausiai resursų reikalaujantis, valandos į ateitį prognozavimo būdas, kuris yra elektros energijos gamybos prognozė, nuolat prognozuojant, kad sekančią valandą pagamins tiek pat elektros energijos kiek ir paskutinę buvusią valandą prieš tai („Persistence“ metodas), kaip buvo prognozuota 2.3 poskyryje pagal 1.1.3 formulę. Tokiam prognozavimo metodui, ne taip kaip likusiems lyginamiems metodams, bus tik

vienas elektros energijos prognozavimo taškas, valandos į ateitį, nes spėjama tik viena valanda į ateitį, o kiti metodai gali prognozuoti ir daugiau valandų į ateitį.

Be paminėtų dviejų prognozavimo metodų į prognozavimo metodų palyginimą bus įtraukti ir DNT bei RF prognozavimo metodai, prognozuojant kiekvienu iš metodų:

- Tik pagal buvusią elektros energijos gamybos istoriją;
- Pagal LHMT vėjo prognozes ir buvusią gamybos istoriją;
- Pagal idealiai geras vėjo prognozes ir buvusią gamybos istoriją (tik tiksliausiu – DNT metodu, pagal 2.8 poskyrį).

Prognozuojant elektros energijos gamybą su idealiai gera vėjo prognoze, visų šešių valandų į ateitį prognozių tikslumas bus vienodas, nes prognozės idealiai geros visoms valandoms į ateitį. Visais metodais prognozuotos elektros energijos gamybos gauti rezultatai pateikti ir palyginti žemiau esančioje 2.9.1 paveikslėlyje ir 2.9.2 lentelėje.



2.9.1 pav. Prognozavimo metodų palyginimas.

2.9.2 lentelė. Prognozavimo metodų paklaidų palyginimas.

| | Prognozuojamos valandos į ateitį | | | | | |
|---|----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Prognozavimo metodas | RMSE, % | | | | | |
| „Persistence“ | 7,359 | - | - | - | - | - |
| TR pagal LHMT vėjo prognozes | 13,987 | 14,071 | 14,133 | 13,871 | 13,936 | 14,061 |
| DNT pagal LHMT vėjo prognozes ir buvusią gamybos istoriją | 6,397 | 7,847 | 8,81 | 9,735 | 10,081 | 10,321 |
| RF pagal LHMT vėjo prognozes ir buvusią gamybos istoriją | 6,671 | 8,142 | 9,1 | 9,72 | 10,116 | 10,387 |
| DNT tik pagal buvusią gamybos istoriją | 6,965 | 9,018 | 10,591 | 11,871 | 12,98 | 13,869 |
| RF tik pagal buvusią gamybos istoriją | 7,268 | 9,297 | 10,845 | 12,081 | 13,113 | 13,999 |
| DNT pagal idealias vėjo prognozes ir LHMT vėjo prognozes | 1,113 | 1,113 | 1,113 | 1,113 | 1,113 | 1,113 |

VEP elektros energijos gamybos prognozavimas, pagal idealias vėjo prognozes ir buvusią elektros energijos gamybos istoriją DNT metodu yra pats tiksliausias, paklaida siekia tik 1,113 %. Paklaida išlieka pastovi ir lygi 1,113 % prognozuojant ir šešias valandas į ateitį, todėl, kad buvo prognozuota su idealiai geromis vėjo prognozėmis. Idealiai geros vėjo prognozės buvo gautos dešimtųjų skaičiaus dalių tikslumu. Tai teoriškai mažiausia galima paklaida prognozuojant, nes vėjo greitis VEP plote tarp visų elektrinių yra netolygiai vienodas, todėl visada bus vėjo prognozės paklaida su realiu buvusiu vėjo greičiu, o tai reiškia, kad ir elektros energijos gamybos prognozės paklaida yra neišvengiama.

Nepaisant, vienu metu esančių ne vienodų vėjo greičių tarp elektrinių, kurie sunkina prognozavimo tikslumą, prognozavimo tikslumą taip pat blogina ir ne vienodas vėjo greitis valandos laikotarpyje. Pavyzdžiui, pagal 2.1 poskyryje esančias VEP galios kreives, 2.1.1 ir 2.2.2 paveikslėliai, jei vėjo greitis visą valandą bus 6 m/s, tada vėjo elektrinės pagamins 2 630 kWh, bet jei pusę valandos pūs 7 m/s vėjo greitis, o likusią pusę valandos pūs 5 m/s vėjo greitis, vidutinis valandos vėjo greitis

bus 6 m/s, tačiau tokią valandą pagamins 2 884 kWh elektros energijos, nors vidutiniškai pūtė vienodas vėjo greitis.

Prognozuojant VEP elektros energijos gamybą, neišvengiamai įtaką prognozavimo tikslumui daro keturios aplinkybės:

1. Ne vienodas vėjo greitis parko plote;
2. Ne vienodas vėjo greitis laike, valandos laikotarpyje;
3. Ne vienodas vėjo greitis elektrinės sparnų plote;
4. Vėjo greičio prognozės intervalas ir tikslumas.

Atsižvelgiant į anksčiau paminėtas keturias aplinkybes, galima teigti, kad net ir teisingos ir tikslios vėjo prognozės jau yra klaidingos. Prognozės intervalo dydis taip pat jau sukuria paklaidą. Kaip pavyzdžiui, jei vėjo prognozė yra 6 m/s, tai tuomet gali pūsti vėjas intervale nuo 5,5 m/s iki 6,4 m/s, o VEP generuojama elektrinė galia skirsis, šiuo atveju atitinkamai 2 033 ir 3 216 kWh. Jei prognozuojamas vėjo greitis dešimtųjų tikslumu (tokia vėjo prognozė naudota 2.8 poskyryje, „Prognozė su gera vėjo prognoze“), prognozės intervalo paklaida smarkiai sumažėja, bet vis tiek išlieka.

Atsižvelgus į visas aplinkybes, kurios lemia VEP elektros energijos gamybos prognozavimo tikslumą, DNT metodo prognozės, apmokius su idealiai gera vėjo prognoze ir buvusią gamybos istoriją, 1,113 % paklaida yra sąlyginai gerai maža paklaida.

VEP elektros energijos gamybą prognozuoti naudojantis vien vėjo elektrinių apsiskaičiuotomis galios kreivėmis ir LHMT vėjo prognozėmis, netikslu, paklaida tiek prognozuojant vieną valandą į ateitį, tiek prognozuojant šešias valandas į ateitį apytikriai vienoda ir siekia 14 % RMSE. Prognozuojant vieną valandą į ateitį, be jokio prognozavimo ar LHMT vėjo prognozių, tiesiog sakant, kad sekančią valandą pagamins tiek pat kiek prieš tai buvusią valandą („Persistence“ metodu), padaroma tik 7,359 % paklaida, ir tai yra beveik dvigubai tiksliau, nei naudojantis LHMT vėjo prognozėmis ir prognozuoti vieną valandą į ateitį.

Prognozuojant elektros energijos gamybą DNT ir RF metodais, juos apmokius su buvusią elektros energijos gamybos istoriją ir LHMT vėjo prognozėmis, elektros energijos prognozavimo paklaida, prognozuojant tik vieną valandą į ateitį siekia apie 6,5 %. Prognozuojant daugiau valandų į ateitį, paklaida atitinkamai didėja. Iš 2.9.2 lentelės ir 2.9.1 paveikslėlio matyti, kad lyginant DNT ir RF metodus tarpusavyje, tiek lyginant prognozes su LHMT vėjo prognozėmis ir buvusią gamybos istoriją, tiek lyginant prognozes tik pagal buvusią VEP elektros energijos gamybos istoriją, DNT metodas VEP elektros energijos gamybą prognozuoja 0,274 – 0,303 % geriau nei RF metodas.

VEP elektros energijos gamybos prognozavimas DNT tik pagal buvusią gamybos istoriją metodu, yra tikslesnis, nei su ta pačia informacija prognozuojant elektros energijos gamybą RF

metodu. Taip pat, tai yra tikslesnis metodas ir už prognozavimo metodą, kuris sako, kad sekancią valandą pagamins tiek pat elektros energijos, kiek prieš tai buvusią valandą – „Persistence“ metodas (paklaida yra 7,359 %). Valandą į ateitį DNT tik pagal buvusią gamybos istoriją metodu prognozuoja su 6,965 % paklaida, o RF – 7,268 %. Iš to galime matyti, kad neturint būsimo vėjo prognozių, prognozuoti VEP elektros energijos gamybą DNT metodu apsimoka labiau nei „Persistence“ ar RF metodais, nes tai yra atitinkamai apie 0,4 ir 0,3 % tiksliau.

Lyginant du prognozavimo metodus, DNT apmokyta tik pagal buvusią gamybos istoriją ir RF apmokyta ta pačia, tik pagal buvusią gamybos istoriją, informacija, DNT metodas su ta pačia informacija prognozuoja apie 0,25 % tiksliau nei RF metodas. Prie tokios prognozavimo informacijos, į abu prognozavimo metodus (DNT ir RF) įtraukus LHMT vėjo prognozes (nors ir nėra jos pakankamai tikslios), jos prognozavimą patikslina abiem metodais. Prognozuojant vieną valandą į ateitį tiek RF tiek DNT metodai patikslėja apie 0,5 % su LHMT vėjo prognozėmis, o prognozuojant ilgesnį laikotarpį, pavyzdžiui šešias valandas į ateitį, VEP elektros energijos gamybos prognozes patikslina smarkiai, pastebima ir 3 % mažesnė paklaida nei prognozuojant vien pagal buvusią gamybos istoriją. Kuo ilgesnis VEP elektros energijos gamybos laikas į ateitį prognozuojamas, tuo LHMT vėjo prognozės tampa svarbesnės.

Iš visų tyrinėjamų metodų, naudingiausia prognozuoti VEP elektros energijos gamybą DNT metodu, juos apmokant su buvusią VEP elektros energijos gamybos istorija ir LHMT vėjo prognozėmis. Prognozuoti pagal idealias vėjo prognozes nėra naudingiausia, nes idealiai gerų vėjo greičio prognozių nebūna. Palyginimui, šiuo metu Lietuvoje visų vėjo elektrinių (509 MW instaliuota galia), visa pagaminama elektros energija yra superkama ir prognozuojama elektros energijos perdavimo operatoriaus AB „Litgrid“, o pačių VEP nereikalaujama prognozuoti kokia bus elektros energijos gamyba ateityje. Per visus 2017 metus AB „Litgrid“ Lietuvos visas vėjo elektrines prognozavo 10,365 % (RMSE) paklaida, o tuo laikotarpiu, kuris prognozuotas šiame tyrime, prognozavo 9,58 % paklaida. Tačiau verta paminėti, kad AB „Litgrid“ teigia, kad jie kasdien prognozuoja 08:55 ir 13:55 laiku, tad jų prognozės yra penkioms ir devyniolikai valandų į ateitį, o koku metodu prognozės skaičiuojamos neatskleidžiama.

3. EKONOMINIS PROGNOZAVIMO METODŲ PALYGINIMAS

VEP elektros energijos gamybos prognozavimo metodus galima palyginti, ne tik, kaip tiksliai kiekvienas iš jų prognozuoja elektros energijos gamybą, tikslumą apskaičiuojant pagal RMSE paklaidą, bet kadangi elektros energija parduodama, galima apskaičiuoti ir palyginti kiekvieno iš prognozuojamų metodų gaunamų pajamų sumas, kiek būtų galima gauti pajamų, parduodant prognozuojamą elektros energiją. Net ir tikslesnis prognozavimo metodas, pavyzdžiui lyginant DNT metodą su RF metodu, bet kuris iš metodų gali sugeneruoti mažiau pajamų, jei vienas iš metodų visada daugiau klystu prognozuodamas per mažai elektros energijos. Yra galimybė, kad apskaičiavus gaunamas pajamas už parduotą elektros energiją, tikslesnis metodas bus ne DNT, o RF, todėl, kad parduodant prognozuojamą elektros energiją, galimi trys įkainiai už pagamintą kWh.

Šiuo metu Lietuvoje visų vėjo elektrinių, visa pagaminama elektros energija yra superkama, o elektrinių savininko ar operatoriaus nereikalaujama prognozuoti, kokia bus elektros energijos gamyba ateityje. Visų vėjo elektrinių elektros energijos gamybos prognozavimą kol kas atlieka elektros energijos perdavimo operatorius AB „Litgrid“. Operatorius prognozuoja elektros energijos gamybą visų veikiančių vėjo elektrinių ir jų galios neriboja, superka viską, ką šios pagamina. Per visus 2017 metus AB „Litgrid“ Lietuvos visas vėjo elektrines prognozavo 10,365 % (RMSE) paklaida, o tuo laikotarpiu, kuris prognozuotas šiame tyrime, prognozavo 9,58 % paklaida. Tačiau verta paminėti, kad AB „Litgrid“ teigia, kad kasdien elektros energijos gamybą prognozuoja 08:55 ir 13:55, tad jų prognozės yra penkioms ir devyniolikai valandų į ateitį.

Trims įkainiams už pagaminamą elektros energijos kWh, galimos trys gamybos ir jos prognozės situacijos. Pirmoji, kai pagaminama tiek elektros energijos, kiek ir prognozuojama, tuomet už pagamintą kWh bus mokama sutarta arba rinkos kaina tuo metu. Antroji situacija, kai pagaminama daugiau elektros energijos nei buvo prognozuota, tokiu atveju, už perteklinę elektros energiją bus mokama sąlyginai labai mažai. Paskutinė, trečioji situacija, kai pagaminama mažiau elektros energijos, nei buvo prognozuota, tokiu atveju už deficitinę elektros energiją reikia sumokėti daugiau, nei už gerai suprognozuotą elektros kWh arba mokama bauda už deficitinę elektros energiją.

Lietuvos elektros sistema yra dalis Nord Pool elektros biržos, kuri valdo Europoje pirmaujančią elektros energijos rinką ir savo klientams siūlo dienos į ateitį ir esamos dienos elektros energijos rinkas. Nord Pool elektros energijos prekybos pagrindas yra dienos į ateitį rinka, o esamos dienos rinka padeda išlaikyti pusiausvyrą tarp vartojimo ir gamybos. Nord Pool duomenimis, 2017 m. vidutinė 1 MWh kaina Lietuvoje buvo 35,13 €/MWh [6], prognozuojamu laikotarpiu buvo 36,27, 37,3 ir 37,79 €/MWh, vidutiniškai 37,12 €/MWh.

Ekonominis prognozių palyginimas apskaičiuotas atsižvelgiant tik į tai, kiek pajamų prarandama arba gaunama prognozuojant pačią elektros energijos gamybą, neatsižvelgiant į tai, kokių kaštų ir kiek jų reikia prognozes apskaičiuoti. Taip pat šis ekonominis prognozavimo metodų palyginimas remiasi naudojant ne realias kainas, nes Lietuvoje dar tokios praktikos nėra, o sukurtas teorines kainas: kai pagaminta prognozuota elektros energijos kaina parduodama už to laikotarpio vidutinę rinkos kainą, kai pagaminama mažiau nei prognozuojama, už nepagamintą elektros energijos kWh mokama tiek kiek mokėtų vartotojas, o kai pagaminama daugiau elektros energijos nei prognozuojama, už tokią elektros energiją nebūtų mokama visai. Toks scenarijus, būtų pats prasčiausias VEP.

Tokios sukurtos teorinės kainos būtų pakankamai blogos sąlygos pardavinėti elektros energiją, nes vėjo energetikos pagaminama elektros energija šiai dienai yra remiama valstybės kvotų, todėl už ją mokama daugiau nei vidutinė rinkos kaina. Be to, investuotojams būtų sudėtinga apskaičiuoti investuotų pinigų į vėjo elektrinių statybą grąžą. Būtų neįmanoma apskaičiuoti per kiek laiko elektrinės atsipirks, nes elektros rinkos kaina nuolat kinta ir negalima nuspėti kokia bus elektros kaina po 10-ties metų, todėl pardavinėti pagaminamą elektros energiją rinkos sąlygomis tampa sudėtinga ir komplikuoja. Taip pat, tęsiant sukurtų sąlygų trūkumus, pardavinėjant prognozuojamą elektros energiją, už perteklinę elektros energiją yra mokama sąlyginai mažai, tačiau vis tiek tai yra pajamos. Be to, būna, kad už ne pagamintą elektros energijos kWh yra mokamos baudos, tačiau elektros biržoje esantiems VEP, gal būtų sukurtos lengvesnės sąlygos pardavinėti prognozuojamą elektros energiją, atsižvelgiant į energijos išteklių. Kiekvieno gamintojo su elektros birža pasirašytos sutartys skirtingos, kiekvienas objektas skirtingas, gaunama skirtingo dydžio parama (kvotos) iš Lietuvos valstybės gaminant elektros energiją, todėl sukurtos teorinės VEP gaminamos elektros energijos kainos:

- kai pagaminama tiek, kiek prognozuota, už MWh, mokama – 45 €/MWh;
- kai pagaminama mažiau, nei prognozuota, už nepagamintą, deficitinę elektros energijos MWh moka gamintojas, kaip vartotojas – 69 €/MWh;
- kai pagaminama daugiau, nei prognozuota, už perteklinę pagamintą elektros energiją nemokama, ji atiduodama veltui – 0 €/MWh.

Prognozuojamu laikotarpiu VEP pagamins 6,377 GWh, tariant, kad visą šią VEP pagamintą elektros energiją, elektros tinklai superka po 45 €/MWh, būtų gauta 286 979,67 eurų pajamų. Tai yra didžiausios galimos gauti pajamos už pagamintą elektros energiją.

Tam, kad būtų lengviau suprastas ekonominis prognozavimo metodų palyginimo apskaičiavimas, toliau paaiškinti visų trijų situacijų (tikslios prognozės, perteklinės ir deficitinės) skaičiavimo pavyzdžiai. Jei pavyzdžiui, atitinkamą valandą buvo prognozuota, kad VEP pagamins

2 550 kWh elektros energijos, tai trejomis situacijomis galima apskaičiuoti pajamų galimybes. Pirmuoju atveju, jei pagamino tiek kiek prognozavo (2 550 kWh), tuomet pajamos bus 114,75 eurų. Antruoju atveju jei pagamins 2 000 kWh, o prognozavo 2 550 kWh, bus 52,05 eurų pajamų. Ir trečiuoju atveju, jei pagamins 3 100 kWh, o prognozavo 2 550 kWh, gaus tuos pačius 114,75 eurų, o už papildomai pagamintą elektros energiją negaus nieko. Tokiu principu prognozavimo metodai palyginti tarpusavyje, kiek pajamų būtų gauta prognozuojant, be to palygintos prognozės prognozuojant skirtingą valandų skaičių į ateitį (iki šešių valandų į ateitį).

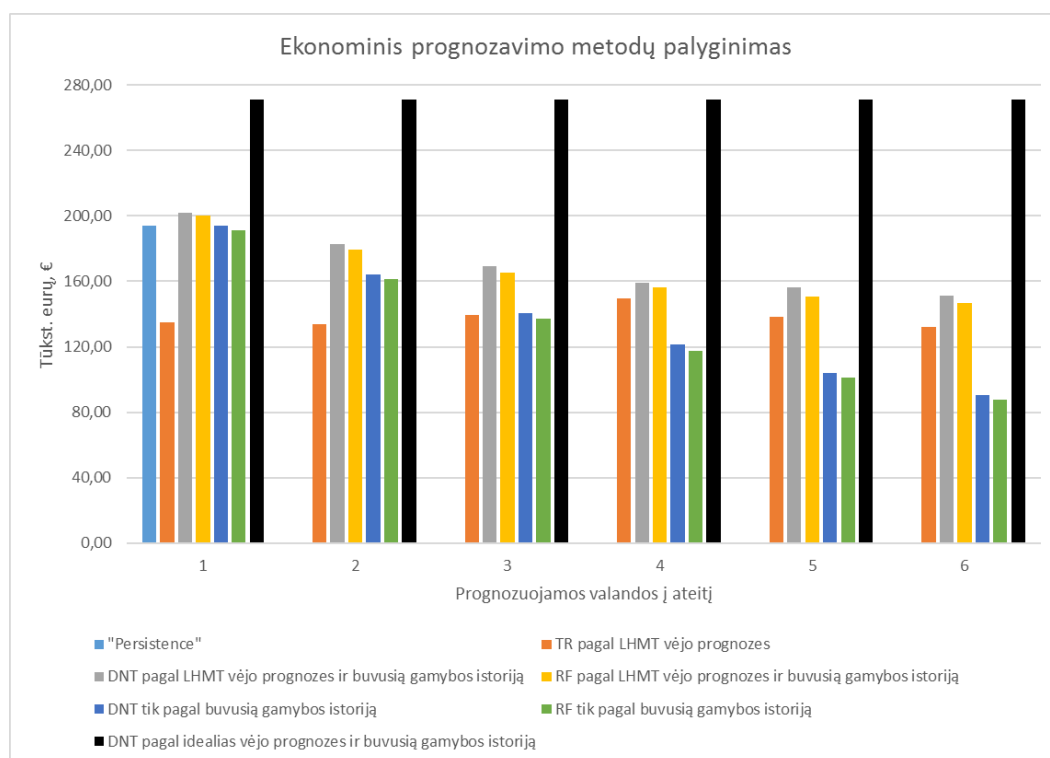
3.1 lentelė. Ekonominis prognozavimo metodų palyginimas.

| | Prognozuojamos valandos į ateitį | | | | | |
|---|----------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Prognozavimo metodas | Tūkstančiai eurų, € | | | | | |
| „Persistence“ | 193,81 | - | - | - | - | - |
| TR pagal LHMT vėjo prognozes | 134,928 | 133,919 | 139,440 | 149,369 | 138,203 | 131,852 |
| DNT pagal LHMT vėjo prognozes ir buvusią gamybos istoriją | 202,18 | 182,63 | 169,43 | 158,93 | 156,09 | 151,23 |
| RF pagal LHMT vėjo prognozes ir buvusią gamybos istoriją | 200,23 | 179,41 | 165,46 | 156,44 | 150,61 | 146,6 |
| DNT tik pagal buvusią gamybos istoriją | 193,98 | 164,37 | 140,3 | 121,33 | 104 | 90,501 |
| RF tik pagal buvusią gamybos istoriją | 190,94 | 161,20 | 137,15 | 117,69 | 101,4 | 87,544 |
| DNT pagal idealias vėjo prognozes ir buvusią gamybos istoriją | 271,13 | 271,13 | 271,13 | 271,13 | 271,13 | 271,13 |

Tam, kad prognozavimo metodų skirtumas išryškėtų, 3.1 lentelės duomenys, grafiškai atvaizduoti 3.2 paveikslėlyje. Iš gautų rezultatų matyti, kad net ir turint idealias ir neklystančias vėjo greičio prognozes, prognozuojamu laikotarpiu (trijų mėnesių laikas), būtų gauta 271,13 tūkst. €, tai yra apie 16 tūkst. € mažiau nei būtų supirkta visa VEP pagaminta elektros energija.

Be idealios, teorinės vėjo greičio prognozės, prognozuojant VEP elektros energijos gamybą, didžiausios pajamos būtų gautos prognozuojant DNT metodu pagal LHMT vėjo prognozes, apmokymams naudojant ir buvusią VEP elektros energijos generacijos istoriją. Tokiu metodu, būtų gauta 202,18 tūkst. € pajamų ir tai yra apie 85 tūkst. € mažiau pajamų, nei būtų supirkta visa elektros energija pagaminta VEP.

Visiems prognozavimo metodams, išskyrus DNT pagal idealias vėjo prognozes ir TR pagal LHMT vėjo prognozes metodus, didėjant prognozuojamų valandų skaičiui į ateitį, būdingas pajamų už parduotą elektros energiją mažėjimas. Kuo toliau į ateitį prognozuojama, tuo gaunama didesnė paklaida prognozuojant, o tai lydi į vis mažesnes pajamas gaunamas už pagaminamą elektros energiją. TR prognozavimo metodo paklaida neturi tendencijos didėti, didėjant prognozuojamų valandų skaičiui į ateitį, todėl, kad TR prognozavimo paklaida priklauso tik nuo LHMT vėjo prognozės, todėl, kaip kinta LHMT vėjo greičio prognozės paklaida, taip pat kinta ir elektros energijos gamybos prognozė. DNT metodas pagal idealias vėjo greičio prognozes didėjant prognozuojamų valandų skaičiui į ateitį, paklaida nedidėja, todėl, kad priimta laikyti, kad visoms šešioms prognozuojamoms valandoms į ateitį bus idealiai geros vėjo greičio prognozės.



3.2 pav. Ekonominis prognozavimo metodų palyginimas.

Prognozuojant trumpą laiko tarpą į ateitį, kaip pavyzdžiui, prognozuojant tik vieną valandą į ateitį, pakankamai didelės pajamos, lyginant su kitais prognozavimo metodais, gaunamos

prognozuojant „Persistence“ metodu. Būtų gauta 193,81 tūkst. €, tai yra apie 93 tūkst. € mažiau nei būtų supirkta visa gaminama elektros energija. Nors ir prarandamos didelės pajamos dėl prognozavimo paklaidos, tokiam prognozavimo metodui reikalingi patys mažiausi prognozavimo kaštai lyginant su kitais metodais, nereikia nei vėjo prognozių nei apskaičiuoti pačių elektros energijos gamybos prognozių. Tai pats paprasčiausias metodas prognozuoti VEP elektros energijos gamybą.

Trijų mėnesių prognozavimo laikotarpyje mažiausiai pajamų dėl netikslaus prognozavimo prarandama prognozuojant DNT metodu vieną valandą į ateitį, metodą apmokant su LHMT vėjo prognozėmis ir buvusia VEP elektros energijos gamybos istorija. Mažiausiai, kaštų reikalaujantis „Persistence“ prognozavimo metodas, sakant, kad sekančią valandą pagamins tiek elektros energijos kiek prieš tai buvusią valandą, pats paprasčiausias, bet tokiu metodu galima prognozuoti tik vieną valandą į ateitį. „Persistence“ metodu nėra galimybės prognozuoti daugiau nei vieną valandą į ateitį. Tiek prognozuojant RF, tiek DNT metodais, kaštai, reikalingi prognozėms apskaičiuoti apytikriai vienodi, o DNT metodas elektros energijos gamybą prognozuoja tiksliau, todėl ir pajamos už pagaminamą elektros energiją didesnės. Pavyzdžiui, prognozuojant vieną valandą į ateitį, DNT metodas prognozuoja 0,274 % mažesne paklaida nei RF metodas, o prognozuojamu laikotarpiu tai sudaro 1,95 tūkst. € (apie 1 % bendros sumos pajamų) daugiau pajamų.

Kadangi DNT ir RF elektros energijos gamybos prognozavimo metodų paskaičiavimo sąnaudos apytikriai lygios, VEP elektros energijos gamybą prognozuoti DNT metodu apsimoka labiau. LHMT vėjo prognozės nors ir nėra norimai tikslios, tačiau jų įtaka elektros energijos gamybos prognozėms sąlyginai didelė, ypač prognozuojant daugiau nei vieną valandą į ateitį. Prognozuojant tik vieną valandą į ateitį DNT metodu, į apmokymus įtraukus LHMT prognozes, pajamos už parduotą pagamintą elektros energiją padidėja 8 tūkst. €, tai sudaro apie 4 % gaunamų pajamų padidėjimą, o prognozuojant ilgesnį laiko tarpą, LHMT vėjo prognozės daro vis didesnę, teigiamą, įtaką prognozėms ir pajamoms. Pagal pasirinktas situacijas ir elektros energijos supirkimo kainas palyginus prognozavimo metodus, jei LHMT vėjo prognozės kainuoja mažiau nei 2,5 tūkst. € per mėnesį, prognozuojant VEP elektros energijos būsimą gamybą, LHMT vėjo prognozes naudinga pirkti ir įtraukti į apmokymus bei prognozes.

IŠVADOS

LHMT siųstos vėjo greičio ir krypties prognozės nėra tikslios. Apskaičiavus paklaidą tarp siųstų prognozių ir realaus buvusio vėjo greičio vidutinis absoliutinis paklaidos dydis tarp realaus buvusio vėjo greičio ir prognozuoto vėjo greičio yra 31,6%. Tai reiškia, kad kiekvienos valandos prognozė vidutiniškai suklysta trečdaliu, o ryškaus didesnio ar mažesnio tikslumo skirtumo tarp pirmos ir šeštos prognozuojamos valandos nėra. LHMT prognozės tiksliausiai prognozuoja 4 – 5 m/s vėjo greitį, tiek mažesnis, tiek didesnis vėjo greičiai prognozuojami su mažesniu tikslumu. Darbe pastebėta, kad LHMT vėjo prognozės daro tiesioginę įtaką elektros energijos gamybos prognozavimo tikslumui – kuo vėjo prognozės tikslesnės, tuo ir elektros energijos gamybos prognozės tikslesnės. Taip pat nustatyta, kad kuo ilgesnis laikas į ateitį prognozuojamas, tuo vėjo greičio prognozės daro didesnę teigiamą įtaką elektros energijos gamybos prognozavimui.

Prognozuojant VEP elektros energijos gamybą valandai į ateitį, tik pagal buvusią elektros energijos gamybą, tiksliausiai prognozuoja DNT metodas apmokytas su dvejomis valandomis buvusios gamybos istorijos (6,894 % RMSE), nedaug atsilieka RF metodas, apmokytas su trijų valandų buvusią gamybos istorija (7,211 % RMSE) ir prasčiausiai prognozuoja „Persistence 2“ metodas (7,36 % RMSE).

Tiksliausiai VEP elektros energijos gamybą valandai į ateitį prognozuoja DNT metodas apmokytas su trimis valandomis buvusios gamybos istorijos ir LHMT vėjo prognozėmis (6,397 % RMSE). RF metodas apmokytas su keturiomis valandomis buvusios gamybos istorijos ir LHMT vėjo prognozėmis valandą į ateitį prognozuoja šiek tiek prasčiau – 6,671 % RMSE. Prasčiausiai elektros energijos gamybą valandai į ateitį prognozuoja TR metodas 13,987 % RMSE, nes šio metodo tikslumas priklauso tik nuo LHMT vėjo prognozės tikslumo, tiksliau valandą į ateitį prognozuoja net ir pats paprasčiausias „Persistence“ metodas (7,36 % RMSE), sakantis, kad sekančią valandą pagamins tiek elektros energijos kiek ir paskutinę buvusią valandą prieš tai.

Visus naudotus prognozavimo metodus apmokant tik pagal LHMT vėjo prognozes, kurios yra kas šešias valandas, tiksliausiai VEP elektros energijos gamyba prognozuojama visas pirmąsias valandas DNT metodu (7,42 % RMSE), o prasčiausiai prognozuojamos visos šeštosios valandos į ateitį TR metodu (14,68 %).

Mažiausiuose ir didžiausiuose vėjo greičiuose tiksliausiai prognozuojama VEP elektros energijos gamyba „Persistence“ metodu, o visame likusiame vėjo greičių intervale, kai vėjo greitis yra nuo 3 iki 10 m/s tiksliausiai prognozuoja DNT metodas ir nežymiai atsilieka RF metodas, apmokius juos su buvusią elektros energijos gamybos istorija ir LHMT vėjo prognozėmis.

Prognozuoti pagal idealias vėjo greičio prognozes tiksliausia (DNT – 1,113 %, RF – 1,342 % ir TR – 1,4 %), tačiau nėra naudingiausia, nes idealiai geros vėjo greičio prognozės naudotos tik prognozavimo metodų tinkamumui nustatyti, o praktikoje sutinkama, kad prognozuojamas vėjo greitis dažniausiai klysta.

Prognozuojant VEP elektros energijos gamybą, net ir su idealiai geromis vėjo prognozėmis, prognozės nebus 100 % tikslios, nes prognozavimo tikslumą neišvengiami lemia keturi faktoriai:

1. Ne vienodas vėjo greitis parko plote;
2. Ne vienodas vėjo greitis laike, valandos laikotarpyje;
3. Ne vienodas vėjo greitis elektrinės vėjaračio plote;
4. Vėjo greičio prognozės intervalas ir jos tikslumas.

Prognozuojamu laikotarpiu VEP pagamino 6,377 GWh, tariant, kad visa ši pagaminta elektros energija būtų supirkta, būtų gauta 286 979,67 € pajamų. Tuo tarpu daugiausia pajamų prognozuojant, būtų gauta DNT metodu (202,18 tūkst. €), jį apmokant su LHMT vėjo prognozėmis ir buvusią VEP elektros energijos gamybos istorija. Mažiausiai, kaštų reikalaujančiu „Persistence“ prognozavimo metodu būtų gauta 193,81 tūkst. € pajamų, bet tokiu metodu galima prognozuoti tik vieną valandą į ateitį. Tiek prognozuojant RF, tiek DNT metodais, kaštai, reikalingi prognozėms apskaičiuoti apytikriai vienodi, o DNT metodas elektros energijos gamybą prognozuoja tiksliau, todėl ir pajamos už pagaminamą elektros energiją didesnės. Prognozuojant vieną valandą į ateitį, DNT metodas prognozuoja 0,274 % tiksliau nei RF metodas, o prognozuojamu laikotarpiu tai sudaro 1,95 tūkst. € daugiau pajamų.

INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS

1. *2017 m. elektros energijos gamybos ir vartojimo balanso duomenys* [interaktyvus]. 2018 [žiūrėta 2018-04-13]. Prieiga per: <http://www.litgrid.eu/index.php/naujienos-ir-ivykiai/naujienos/elektros-vartojimas-lietuvoje-2017-metais--rekordinis-/3814>.
2. *2017 m. vėjo elektrinių pagamintas elektros energijos kiekis* [interaktyvus]. 2018 [žiūrėta 2018-04-13]. Prieiga per: <http://lvea.lt/vejo-elekrines-pernai-pagamino-rekordini-elektros-energijos-kieki/>.
3. *Wind in power. 2016 European statistics* [interaktyvus]. 2017 [žiūrėta 2018-04-13]. Prieiga per: <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/statistics/WindEurope-Annual-Statistics-2016.pdf>.
4. AB „Litgrid“ *vėjo elektrinių elektros energijos gamybos prognozavimas* [interaktyvus]. 2018 [žiūrėta 2018-04-13]. Prieiga per: <http://www.litgrid.eu/index.php/sistemas-duomenys/pt-vejo-elektriniu-gamyba/2869>.
5. O. L. HANSEN, Martin. *Aerodynamics of wind turbines*. London: Earthscan, 2008, p. 3,4. ISBN 9781844074389.
6. *Nord Pool. Elektros energijos kainos Lietuvoje* [interaktyvus]. 2018 [žiūrėta 2018-04-13]. Prieiga per: <https://www.nordpoolgroup.com/Market-data1/Dayahead/Area-Prices/ALL1/Yearly/?view=table>.
7. AMBRASAS Vidmantas ir Bronislavas JASIULIONIS. *Mechanika, molekulinė fizika ir termodinamika: mokomoji knyga*. Kaunas: Technologija, 2007, p. 100. ISBN 978-9955-25-194-1.
8. CHAI, Songjian, Zhao XU, Loi LEI LAI and Kit PO WONG. An overview on wind power forecasting methods. *2015 International Conference on Machine Learning and Cybernetics (ICMLC)*. IEEE, 2015 m., p.765-767. ISBN 978-1-4673-7221-3.
9. *Wind Europe. History* [interaktyvus]. 2018 [žiūrėta 2018-04-13]. Prieiga per: <https://windeurope.org/about-wind/history/>.
10. LIJUAN, Li, Wu JUN, Bo HAI and Liu HONGLIANG. A Novel Model for Wind Power Forecasting Based on Markov Residual Correction. *Renewable Energy Congress (IREC), 2015 6th International*. IEEE, 2015 m. ISBN 978-1-4799-7947-9
11. ZHOU, Hai and Zhijia WANG. A Multiple-model based Adaptive Control Algorithm for Very-short Term Wind Power Forecasting. *2016 IEEE International*

- Conference on Power System Technology (POWERCON)*. IEEE, 2016 m., p. 4. ISBN 978-1-4673-8848-1.
12. SAROHA, Sumit and S. K. AGGARWAL. Multi Step Ahead Forecasting of Wind Power by Genetic Algorithm based Neural Networks. *Power India International Conference (PIICON), 2014 6th IEEE*. IEEE, 2014 m. ISBN: 978-1-4799-6042-2.
 13. LIU, Fang, Ranran LI, Yong LI, Yijia CAO, Daniil PANASETSKY and Denis SIDOROV. Short-Term Wind Power Forecasting Based on T-S Fuzzy Model. *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2016 IEEE PES Asia-Pacific*. IEEE, 2016 m., p. 415. ISBN 978-1-5090-5418-3.
 14. MORINA, Mattia, Francesco GRIMACCIA, Sonia LEVA and Marco MUSSETTA. Hybrid Weather-based ANN for Forecasting the Production of a Real Wind Power Plant. *2016 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*. IEEE, 2016 m., p. 5000. ISSN 2161-4407.
 15. VERIKAS, Antanas ir Adas GELŽINIS. *Neuroniniai tinklai ir neuroniniai skaičiavimai*. KTU, 2008, p. 6. ISBN 978-9955-591-53-5.
 16. ENGELBRECHT, Andries P. *Computational intelligence: an introduction*. Chichester: Wiley, 2007. ISBN 9780470035610.
 17. MOUSTRIS, K.P., D. ZAFIRAKIS, K.A. KAVVADIAS and J.K. KALDELLIS. Wind power forecasting using historical data and artificial neural networks modeling. *Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower 2016)*. IET, 2016 m., ISBN 978-1-78561-406-4.
 18. AZEEM, Abdul, Gaurav KUMAR and Hasmat MALIK. Artificial neural network based intelligent model for wind power assessment in India. *Power India International Conference (PIICON)*. IEEE 7th, 2016 m. ISBN 978-1-4673-8962-4.
 19. LIN, Yujie, Uwe KRUGER, Junping ZHANG, Qi WANG, Lisa LAMONT and Lana El CHAAR. Seasonal Analysis and Prediction of Wind Energy Using Random Forests and ARX Model Structures. *IEEE transactions on control systems technology*. IEEE, 2015 m., vol. 23, no. 5, p. 1996. ISSN 1558-0865.
 20. BREIMAN, Leo. *Machine Learning*. Kluwer Academic Publishers 2001, p. 5, 6. ISSN 0885-6125
 21. VERIKAS, A., A. GELŽINIS ir M. BAČKAUSKIENĖ. *Mining data with random forests: A survey and results of new tests*. 2011 m. *Pattern Recognition* 44(2):330-349.

22. *Wind in power. 2017. Annual combined onshore and offshore wind energy statistics* [interaktyvus]. 2018 [žiūrėta 2018-04-13]. Prieiga per: <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/statistics/WindEurope-Annual-Statistics-2017.pdf>.
23. PETRAUSKAS, Gytis ir Vytautas ADOMAVIČIUS. *Vėjo energijos naudojimas elektrai gaminti: mokomoji knyga*. Kaunas: Technologija, 2012, p. 38. ISBN 978-609-02-0753-6.
24. *HIRLAM – orų prognozavimo metodas* [interaktyvus]. 2018 [žiūrėta 2018-04-13]. Prieiga per: <http://hirlam.org/index.php/hirlam-programme-53/general-model-description>.