

VĖJO JĖGAINĖS ELEKTROS ENERGIJOS KOKYBĖS TYRIMAS

Vytenis LISAIUSKAS, Vytauto didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas, el. paštas: vytenis.lisauskas@stud.vdu.lt

Santrauka

Šiame darbe ištirta vėjo jėgainės gaminamos elektros energijos kokybė ir jos įtaka energijos tiekimo sistemos veikimui. Tyrimai atlikti 73,5 MW galios vėjo jėgainių parke, kurį sudaro 30 jėgainių pietvakarių Lietuvoje. Tyrimui pasirinkta E-101 vėjo jėgainė, kurios bokšto aukštis yra 99 m, rotoriaus diametras – 101 m, o maksimali generuojama galia – 3,05 MW. Matavimai atlikti su Metrel MI 2892 tinklo analizatoriumi ir srovės matavimo ritėmis, jas sumontavus ant aukštos įtampos kabelių. Vėjo greitis ir vėjo jėgainės generuojama galia gauti iš parke įdiegtos stebėjimo SCADA sistemos. Tyrimo metu nustatyta, kad įtampos vėjo jėgainėse vidutiniškai svyravo nuo 645,0 V iki 684,2 V, vėjo greičiui keičiantis nuo 0,6 m/s iki 16,9 m/s, o jėgainės generuojama galia kito nuo 0 iki 3,047 MW. Nežymūs įtampos svyravimai neturėjo ženklios įtakos vidutinės įtampos elektros energijos tinklo kokybei ir stabilumui.

Raktiniai žodžiai: vėjo jėgainė, vėjo greitis, generuojama elektros galia

Įvadas

Visame pasaulyje 2022 m. prie elektros tinklų buvo prijungta 77,6 GW naujų vėjo jėgainių, tai yra 9% metinis augimas, o bendra įdiegta vėjo jėgainių galia pasiekė 906 GW. Visame pasaulyje sausumoje vėjo jėgainių 2022 m. buvo pastatyta 68,8 GW, iš kurių 52 % – Kinijoje (Global wind energy council, 2023).

Europoje 2022 m. pastatyta apie 15 GW naujų vėjo jėgainių, įskaitant ir pastatytas jūroje (963 MW). Atėmus išmontuotų turbinų galią ir leidus pakeisti jas galingesnėmis, grynoji papildoma vėjo turbinų galia per 12 mėnesių iki 2022 m. pabaigos padidėjo 14,4 GW, o tai sudaro 28 % augimą, palyginti su 2021 m. lygiu (11,3 GW) (EurObservER, 2023).

Lietuvoje 2022 m. instaliuota vėjo elektrinių galios 370 MW ir metų pabaigoje šalyje iš viso buvo instaliuota 946 MW galios vėjo elektrinių (803 MW vėjo elektrinių perdavimo tinkle ir 143 MW skirstomajame tinkle). Vėjo elektrinės sudaro 62,4 % šalies elektros tinkle instaliuotos galios atsinaujinančių energijos išteklių (LVEA, 2023).

Vis didesnė vėjo energijos integracija į elektros energijos perdavimo tinklus sukelia elektros energijos kokybės problemas, tokias kaip mirgėjimas, harmonikos, įtampos disbalansas, įtampos kritimas, įtampos padidėjimas ir įtampos svyravimo santykis, riboja vėjo energijos integracijos į tinklą galimybes. Todėl elektros energijos kokybės analizė suteikia svarbios informacijos, leidžiančios nuspręsti apie vėjo jėgainių parkų integracijos lygius (Mahela ir kiti, 2020).

Tyrimo tikslas – įvertinti įvairių veiksnių įtaką vėjo jėgainių parko gaminamos elektros energijos kokybei.

Išsikeltam tikslui pasiekti sprendžiami šie **uždaviniai**:

1. Surinkti ir analizuoti realiu laiku gautus duomenis apie vėjo charakteristikas (greitį, kryptį) ir elektros energijos parametrus (įtampą, srovę, harmonikas) iš vėjo jėgainių parko.
2. Atlikti statistinę analizę, nagrinėjant ryšį tarp vėjo charakteristikų ir elektros energijos kokybės parametrų tarp stabilumo, įtampų svyravimų ir harmonikų lygio.

Tyrimų objektas ir metodai

Tyrimų objektas – 73,5 MW vėjo jėgainių parkas, įrengtas pietvakarių Lietuvoje. Parką sudaro 30 vėjo jėgainių: 19 vienetų Enercon E-101, kurių bokšto aukštis yra 99 m, jėgainės galia – 3,05 MW, 3 vnt. E-101, kurių bokšto aukštis yra 133 m ir 8 vnt. E53 modelių, kurių bokšto aukštis yra 76 m, o galingumas – 800 kW. Visos vėjo jėgainės pradeda gaminti elektros energiją, kai yra pasiekiamas 2 m/s vėjo greitis.

Šis tyrimas atliktas vėjo jėgainėje E-101, kurios bokšto aukštis – 99 m, rotoriaus diametras – 101 m, o maksimalus rotoriaus apsisukimų skaičius yra 14,5 min⁻¹. Vėjo jėgainė turi transformatorių, kuris pakelia įtampą nuo 690 V iki 20 kV, o visos parko jėgainės yra sujungtos į 20/110kV pastotę su 86 MVA transformatoriumi, per kurią atiduoda pagamintą elektros energiją į perdavimo tinklą.

Vėjo greitis, kryptis, vienos vėjo jėgainės įtampos, srovės ir aktyvioji galia išmatuoti parke įdiegta stebėjimo sistema SCADA. Vėjo jėgainės duomenys eksportuoti iš SCADA stebėjimo sistemos „Microsoft Excel“ skaičiuoklės formatu ir apskaičiuota statistiškai reikšmingas ryšys tarp vėjo greičio ir įtampos bei vėjo greičio ir srovės pagal lygtį (Rupšys ir kiti, 2007):

$$r = \frac{\sum((x - \bar{x}) * (y - \bar{y}))}{\sqrt{(\sum((x - \bar{x})^2) * \sum((y - \bar{y})^2))}}$$

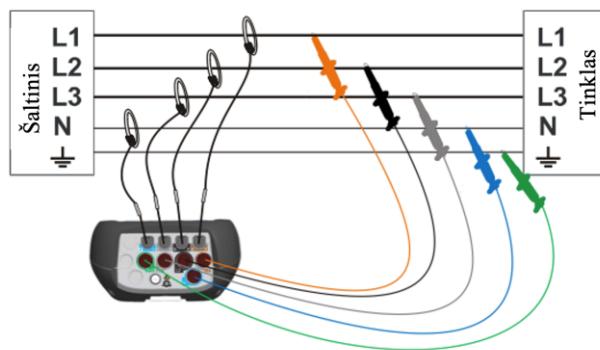
čia r – Pearsono koreliacijos koeficientas, x ir y – duomenys, kuriuos norime palyginti, \bar{x} ir \bar{y} – duomenų vidurkiai,

Vidutinis harmoninis iškraipymas skaičiuojamas pagal lygtį (Metrel d.d., 2019):

$$THD_{U_p} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_n^2}}{U_1} * 100,$$

čia THD_{U_p} – iškreipčių faktorius %, U_n – n-tosios eilės įtampos harmonika, V, U_1 – pagrindinė įtampos harmonika, V.

Tyrimui atlikti naudotas tinklo kokybės analizatorius Metrel MI 2892, jungimo schema (žr. 1 pav.) ir išardomos srovės matavimo ritės A1588. Prietaisais gali matuoti aktyviają ir reaktyviają galią, įtampą, srovę, harmonikas, mirtėjimus, dažnį, įtampų asimetriją. Įranga buvo pajungta vėjo jėgainių parko prisijungimo prie elektros energijos perdavimo į tinklą taške ir nustatytas 3 sekundžių matavimo intervalas. Duomenys, išmatuoti tinklo kokybės analizatoriumi, buvo perkelti į „PowerView“ programą, kurioje apdoroti ir suformuotos ataskaitos pagal EN 50160:2022 standartą (Lietuvos standartizacijos departamentas, 2023).

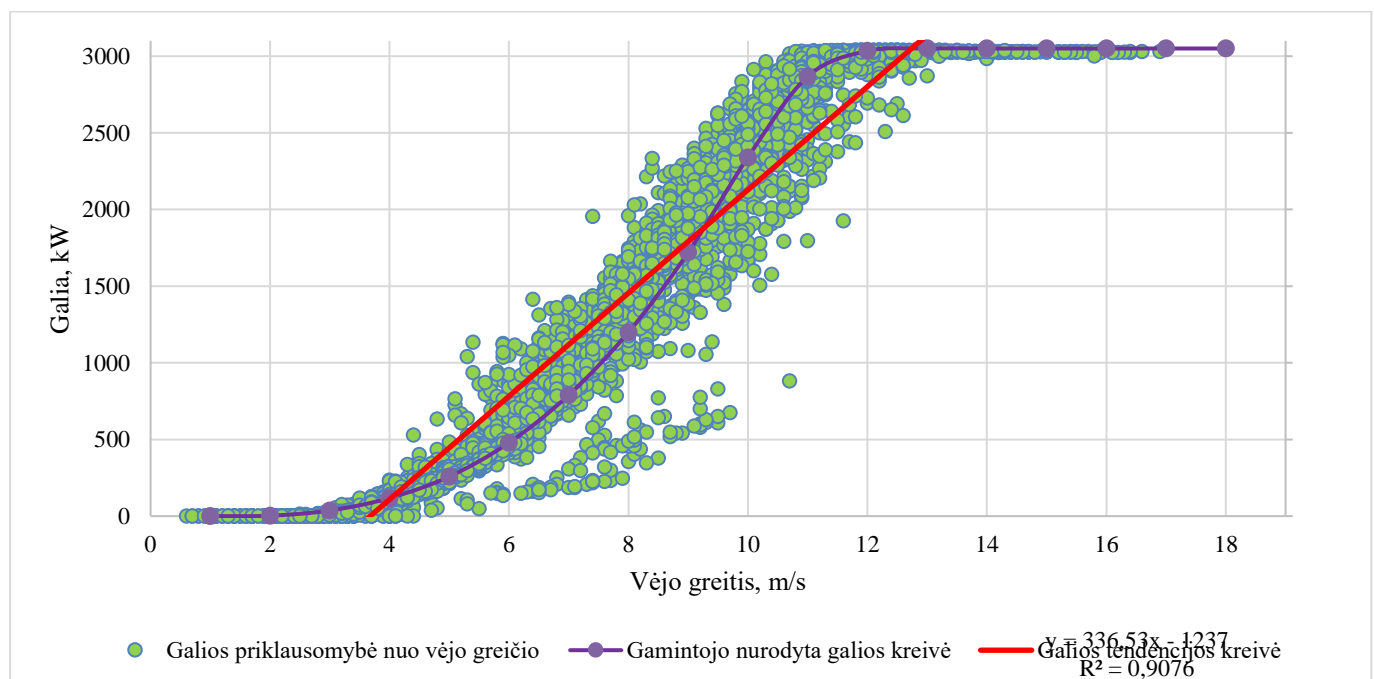


Šaltinis: sudaryta pagal Metrel d.d. (2019)
Source: made by Metrel d.d. (2019)

1 pav. Metrel MI 2893 pajungimo schema.
Fig. 1. The connection scheme of the Metrel MI 2893.

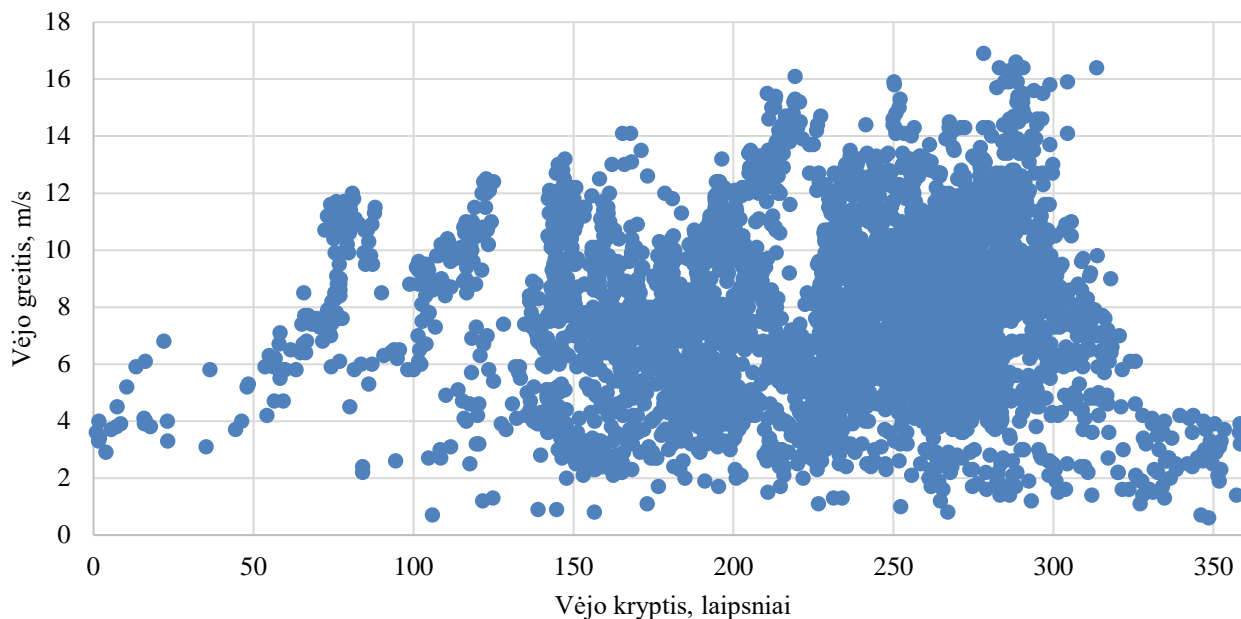
Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas

Tyrimu nustatyta, kad didžiausią galią tiriama vėjo jėgainė pasiekė esant 12,8 m/s vėjo greičiui (žr. 2 pav.). Mažiausias vėjo greitis, prie kurio vėjo jėgainė pradėjo generuoti elektros energiją – 3 m/s. Atlikus skaičiavimus buvo rastas koreliacijos koeficientas $r=0,953$, kuris rodo, kad vėjo jėgainės generuojama galia yra labai priklausoma nuo vėjo greičio. Gamintojo sudarytoje galios kreivėje parodyta, kad maksimali galia pasiekama ties 13 m/s (Enercon, 2012), o tai reiškia, kad atlikti tyrimai yra labai artimi gamintojo nurodytiems.



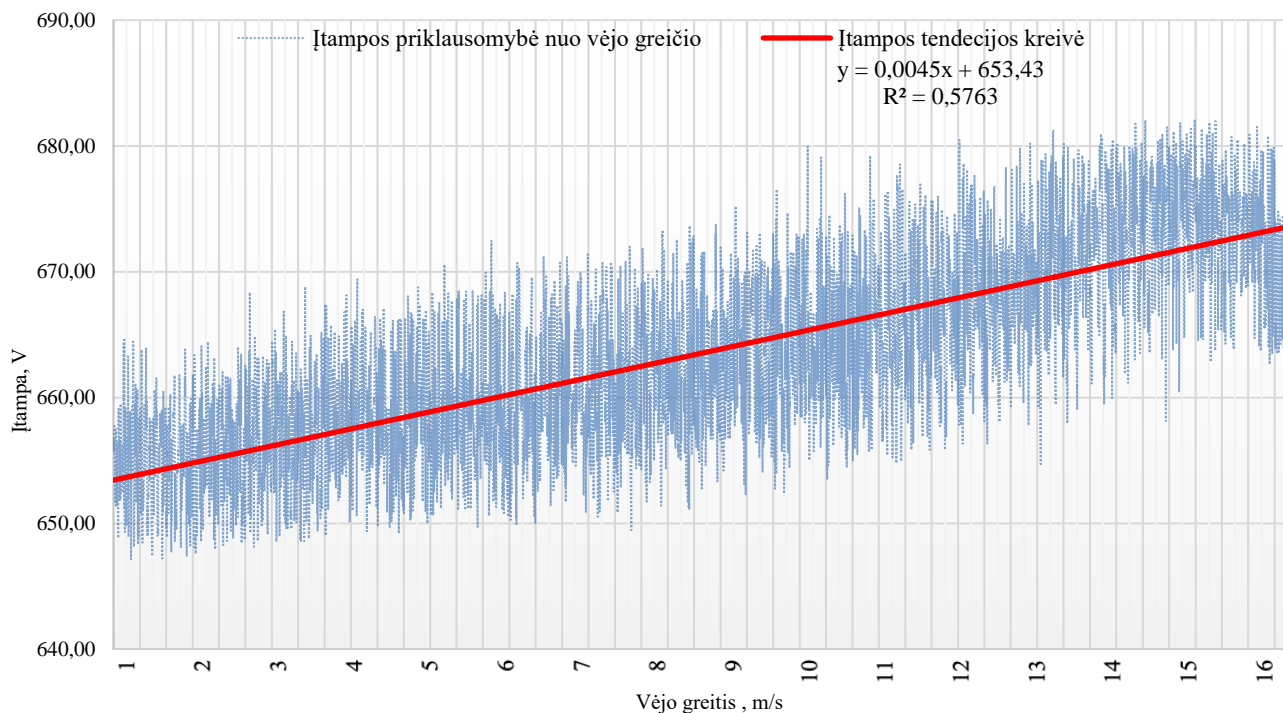
2 pav. Vėjo jėgainės E-101 galios priklausomybė nuo vėjo greičio.
Fig. 2. The dependency of power of a single wind turbine E-101 on wind speed.

Nustatyta, kad vėjo greitis ir vėjo kryptis neturi stipraus ryšio, nes vėjo kryptis nežymiai daro įtaką vėjo greičiui. Tai patvirtina apskaičiuotas Pearsono koeficientas, lygus 0,045, kuris rodo silpną ryšį tarp vėjo greičio ir vėjo krypties (žr. 3 pav.).



3 pav. Vėjo krypties ir vėjo greičio koreliacijos diagrama.
Fig. 3. Wind direction and wind speed correlation diagram.

Regresinės analizės metu nustatyta, kad tarp vidutinės įtampos ir vėjo greičio yra statistiškai reikšmingas teigiamas ryšys. Įtampa didėja apie 1,949 V su kiekvienu vėjo greičio 1 m/s padidėjimu. Gautas koreliacijos koeficientas $r=0,738$ rodo vidutiniškai stiprų teigiamą ryšį tarp šių dviejų kintamųjų (žr. 4 pav.).



4 pav. Vėjo jėgainės vidutinės įtampos priklausomybė nuo vėjo greičio
Fig. 4. Dependence of the average voltage on wind speed of the wind turbine

Šiame darbe atlikta įtampos harmoninių iškraipymų analizė plačiame harmonikų diapazone – nuo 2-sios iki 25-ios (žr. 1 lentelę).

1 lentelė. Vidutinės harmonikų ir bendrųjų harmoninių iškraipymų vertės**Table 1.** Values of average harmonics and total harmonic distortions

Harmonikos Nr.	Reikalavimas THD, %	THD L1, %	THD L2, %	THD L3, %	Harmonikos Nr.	Reikalavimas THD, %	THD L1, %	THD L2, %	THD L3, %
1	< 8,00	0,97	1,01	0,90	14	< 0,50 %	0,02	0,02	0,02
2	< 2,00	0,01	0,01	0,01	15	< 0,50 %	0,04	0,04	0,04
3	< 5,00	0,47	0,58	0,29	16	< 0,50 %	0,02	0,02	0,02
4	< 1,00	0,03	0,03	0,03	17	< 2,00 %	0,22	0,21	0,16
5	< 6,00	0,72	0,74	0,70	18	< 0,50 %	0,02	0,02	0,02
6	< 0,50	0,03	0,03	0,03	19	< 1,50 %	0,04	0,04	0,05
7	< 5,00	0,44	0,34	0,40	20	< 0,50 %	0,02	0,02	0,02
8	< 0,50	0,02	0,02	0,03	21	< 0,50 %	0,02	0,02	0,02
9	< 1,50	0,04	0,05	0,04	22	< 0,50 %	0,02	0,02	0,02
10	< 0,50	0,02	0,03	0,02	23	< 1,50 %	0,05	0,05	0,05
11	< 3,50	0,21	0,22	0,24	24	< 0,50 %	0,02	0,02	0,02
12	< 0,50	0,02	0,02	0,02	25	< 1,50 %	0,09	0,07	0,07
13	< 3,00	0,33	0,32	0,31	-	-	-	-	-

Nustatyta, kad atskirų įtampos harmonikų harmoniniai iškraipymai pasireiškia skirtingai – jų reikšmės gautos nuo 0,02 iki 1,01 %. Didžiausi gauti pirmosios, trečiosios ir penktosios harmonikos iškraipymai, kurie atskirose fazėse siekia 0,29–1,01 %. Bendroji harmoninė iškraipymo dalis (THD) visose fazėse yra mažesnė nei reikalavimas pagal standartą EN 50160 (Lietuvos standartizacijos departamentas, 2023). Tai rodo, kad vėjo jėgainių dažnio keitikliai veikia efektyviai ir sukuria minimalų harmoninių iškraipymą.

Išvados

1. Tyrimas parodė stiprų ryšį tarp vėjo greičio ir generuojamos elektros galios, nes gautas Pearsono koreliacijos koeficientas siekia 0,953. Didžiausią galią tiriama vėjo jėgainė pasiekė esant 12 m/s vėjo greičiui.

2. Tyrimo metu nustatyta, kad tarp vėjo greičio ir vidutinės įtampos yra statistiškai reikšmingas teigiamas ryšys, nes įtampa didėja apie 1,949 V su kiekvienu vėjo greičio padidėjimu 1 m/s.

3. Nustatyta, kad vėjo kryptis nežymiai daro įtaką vėjo greičiui, tarp jų pastebėtas gana žemas koreliacinis ryšys.

4. Harmoninių iškraipymų analizė parodė, kad bendroji harmoninė iškraipymo dalis (THD) visose fazėse yra mažesnė nei nustatyti standartai, o tai rodo efektyvų elektros perdavimo tinklo sistemos veikimą ir mažą vėjo jėgainių parko harmoninių iškraipymų įtaką.

Literatūra

1. Enercon Global GmbH, 2012. Enercon E-101 datasheet. Prieiga per internetą: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/130-enercon-e-101> (žiūrėta 2024-02-26)
2. EurObservER, 2023. Wind Energy Barometer 2022 7 p.
3. Global wind energy council, 2023.. Global wind report 2022. 2023. Global wind energy council. 118 p.
4. Lietuvos standartizacijos departamentas, 2023. Voltage characteristics in public distribution systems. Standard EN 50160:2022, 53 p.
5. Lietuvos vėjo elektrinių asociacija 2023. Vėjo energetika Lietuvoje 2022. Prieiga per internetą: <https://lvea.lt/statistika/> (žiūrėta 2024-02-26)
6. Mahela O. P., Khan B., Alhelou H. H., Tanwar S. 2020. Assessment of power quality in the utility grid integrated with wind energy generation. IET Power Electron. T. 13, P. 2917-2925.
7. Metrel d.d., 2019. Power Master MI 2892 Instruction manual. Version 8.4.6, 216 p.
8. Olsson U., Engstrand U., Rupšys P. (2007). Kaunas: Akademija. Statistiniai metodai: SAS ir MINITAB. 138 p.

STUDY OF WIND TURBINE ELECTRICITY QUALITY

Summary

In this study examined the quality of electricity generated by wind turbines and its impact on the operation of the energy supply system. The research was conducted in a 73.5 MW wind farm consisting of 30 turbines in the southwest of Lithuania. The E-101 wind turbine was selected for the study, which has a tower height of 99 m, rotor diameter of 101 m, and a maximum generating capacity of 3.05 MW. Measurements were carried out using the Metrel MI 2892 Power Quality Analyzer and current measuring coils installed on high voltage cables. Wind speed and the power generated by the wind turbines were obtained from the monitoring SCADA system installed in the park. The study found that the voltage in the wind turbines varied on average from 645.0 V to 684.2 V as the wind speed changed from 0.6 m/s to 16.9 m/s, and the power generated by the turbines changed from 0 to 3.047 MW. Minor voltage fluctuations did not significantly affect the quality and stability of the medium voltage electricity network.

Keywords: wind power plant, wind speed, generated electric power.