

Pastovaus greièio vėjo elektriniø parko matematinis modelis

**Tomas Bendikas,
Antanas Nemura**

*Lietuvos energetikos institutas,
Sistemø valdymo ir automatizavimo
laboratorija, Breslaujos g. 3,
LT-44403 Kaunas, Lietuva*

Tinkamai parinkti vėjo elektriniø tipà, prijungimo vietà ir galià, atspindėti jø savybes bei àvertinti statinius ir dinامينius elektros tinklo parametrus yra mokslinë, techninë ir technologinë problema. Jai iðspræsti naudojami esamø sistemø su jau pastatytomis vėjo elektriniø matavimø apibendrinimai, pritaikant juos Lietuvos energetinës sistemos (LES) sàlygoms, o skaièiavimams atlikti – matematiniai modeliai.

Siekiant paprastumo modeliuojant vėjo elektrinës mechaninæ dalà, daþnai apsiribojama vienos ekvivalentinës masës modeliu, o elektrinë dalis – generatorius ir elektros tinklas modeliuojami panaudojant Thevenino matematinà modelà, taèiau vėjo elektrinës mechaninës dalies dviejø ekvivalentiniø masiø matematinis modelis kartu su elektrinës dalies treèios–penktos eilës Thevenino matematinio modeliu daug tiksliau atspindi realius procesus nagrinèjamose sistemose.

Taèiau paskelbtuose darbuose dar maþai duomenø apie vėjo elektriniø parko modeliavimà àvertinant vėjo turbinø velenø spyruokliuojantà sukamàjà veikimà. Ðiame darbe bandoma uþpildyti minètà spragà.

Raktaþodþiai: elektros kokybë, matematinis modeliavimas, sukamasis spyruokliavimas, vėjo elektrinë, vėjo greièio matavimai

1. ÁVADAS

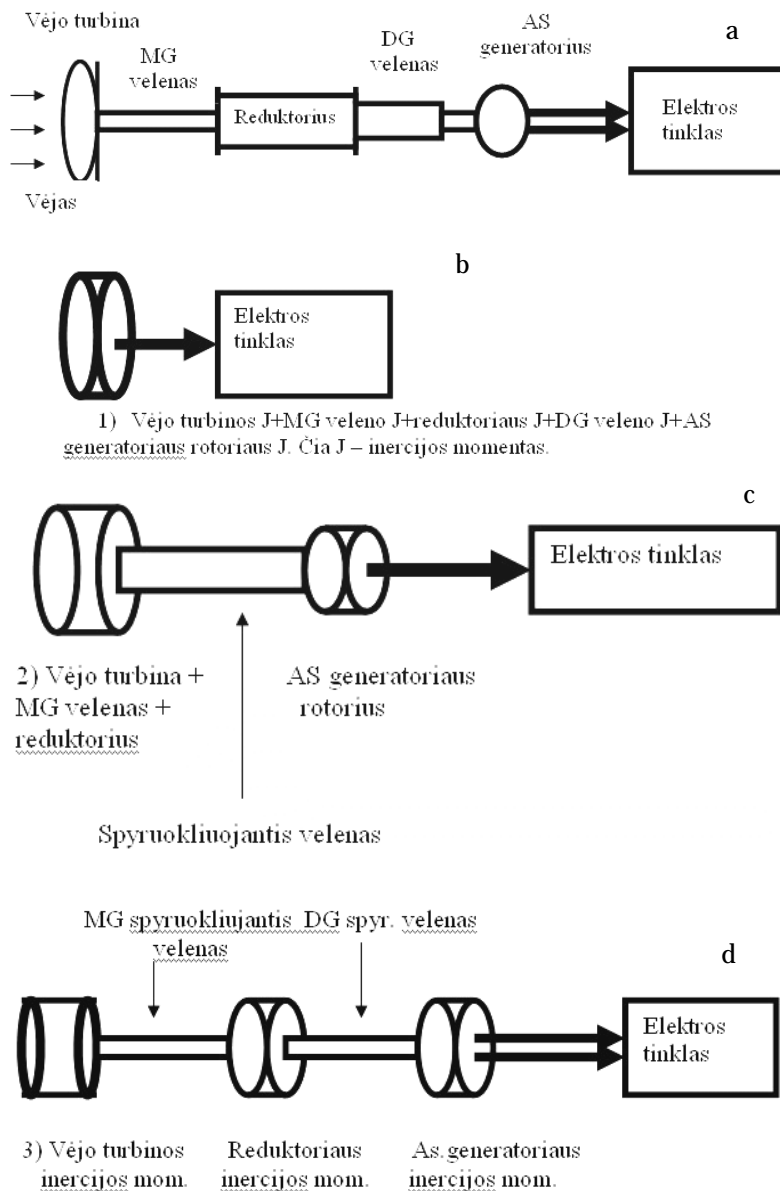
Tinkamai parinkti vėjo elektriniø tipà, prijungimo vietà ir galià, atspindėti jø savybes bei àvertinti statinius ir dinامينius elektros tinklo parametrus yra mokslinë, techninë ir technologinë problema. Jai iðspræsti naudojami esamø sistemø su jau pastatytomis vėjo elektriniø (pvz., Danijos, Vokietijos, Ispanijos) matavimø apibendrinimai, pritaikant juos LES sàlygoms, o skaièiavimams atlikti – matematiniai modeliai.

Atlikus paskelbtø darbø [1–4] analizæ galima daryti iðvadà, kad, siekiant paprastumo modeliuojant vėjo elektrinës mechaninæ dalà, daþnai apsiribojama vienos ekvivalentinës masës modeliu, o elektrinë dalis – generatorius ir elektros tinklas modeliuojami panaudojant Thevenino matematinà modelà [1, 2]. Straipsnyje [2] pateikiamos ir vėjo elektriniø parko matricinës tiesinës diferencialinës lygtys, kurios deþa neatspindi mechaniniø ir elektriniø parko pokyèiø dël vėjo turbinø veleno sukamojo spyruokliuojanèio veikimo. Straipsniuose [3, 4] akivaizdþiai parodyta, kad vėjo elektrinës mechaninës dalies dviejø ekvivalentiniø masiø matematinis modelis kartu su elektrinës dalies treèios–penktos eilës Thevenino matematinio modeliu kur kas tiksliau atspindi realius pro-

cesus nagrinèjamose sistemose. Taèiau paskelbtuose darbuose dar maþai duomenø apie vėjo elektriniø parko modeliavimà àvertinant vėjo turbinø velenø spyruokliuojantà sukamàjà veikimà. Ðiame darbe bandoma uþpildyti minètà spragà.

2. PASTOVAUS GREIÈIO VÈJO ELEKTRINÈS MATEMATINIS MODELIS, ÁVERTINANT VÈJO TURBINOS VELENO SUKAMÀJÀ SPYRUOKLIAVIMÀ

Pastovaus greièio vėjo elektrinës su asinchroniniu generatoriumi matematinis modelis. Pastovaus greièio vėjo elektrinë susideda ið vėjo turbinos, reduktoriaus ir asinchroninio generatoriaus. Priklausomai nuo vėjo turbinos galios, jos sukimosi greitis yra 8–30 aps./min. Generatoriaus sinchroninis sukimosi greitis yra 1500 aps./min. Generatoriaus reþimu dirbanèios asinchroninës maðinos sukimosi greitis yra 0,5–2% didesnis uþ sinchroninà sukimosi greità $Dydis S_1 = 100 \cdot (n - n_s) / n_s$ [%] vadinasi slydimu. Tiek vėjo turbinos, tiek generatoriaus sukimosi greitis nèra pastovus, taèiau greièio kitimo ribos yra gana siauros, jas apibrèþia slydimas S_1 ir praktiðkai nevirðija 2% nuo sinchroninio sukimosi greièio.



1 pav. Vėjo elektrinės schema. (a) – vienos besisukanėios masės modelio schema; (b) – dviejų masių modelio schema; (c) – trijų masių modelio schema. (d) Pažymėta: MG velenas – mažo greičio velenas, DG velenas – didelio greičio velenas

Sudarant šio tipo vėjo elektrinės matematiną modelą, jos mechaninė dalis gali būti ávairiai traktuojama: 1) vienos ekvivalentinės masės modelis, kuriame vėjo turbinos, reduktoriaus ir asinchroninio generatoriaus inercijos momentai sudedami, ávertinant atitinkamą masių sukimosi greitį; 2) dviejų masių modelis, kuriame vėjo turbinos ir generatoriaus besisukanėios masės sujungtos spyruokliuojanėiu velenu (dėl sukimo momento kitimo velenas veikia kaip spyruoklė), o reduktoriaus inercijos momentas pridamas atitinkamai prie vėjo turbinos arba prie generatoriaus inercijos momento; 3) trijų masių modelis, kai vėjo turbinos, reduktoriaus ir generatoriaus besisukanėios masės yra sujungtos atitinkamai dviem spyruokliuojanėiais velenais. Visi trys atvejai pavaizduoti 1 pav.

Kadangi atskiros masės sukasi skirtingais greičiais, tai tariamas iðinercijos momentas J_p kai generatoriaus rotoriaus sukimosi greitis ω_{GR} apskaičiuojamas pagal ðitokià priklausomybà:

$$J_p = J_{GR} + J_R + J_{VT} (\omega_{VT}/\omega_{GR})^2; \quad (3)$$

čia ω_{VT} – vėjo turbinos kampinis greitis, J_{GR} – generatoriaus rotoriaus inercijos momentas, J_R – reduktoriaus inercijos momentas, kai generatoriaus rotoriaus kampinis greitis ω_{GR} , J_{VT} – vėjo turbinos inercijos momentas, apskaičiuotas, kai vėjo turbinos kampinis greitis ω_{VT} . Paþymėsimė, kad maþo greičio (MG) veleno inercijos momentas pridėtas prie vėjo turbinos inercijos momento, o didelio greičio (DG) veleno inercijos momentas pridėtas prie generatoriaus rotoriaus inercijos momento.

Daugelyje publikacijų apsiribojama vienos besisukanėios masės modeliu. Kai kuriais atvejais tai gal ir neturi didelės reikšmės, ypač kai vėjo elektrinė yra kintamo greičio su elektroniniu konverteriu, nes ðiuo atveju vėjo elektrinės dinamika yra atskirta nuo elektros tinklo dinamikos, t. y. vėjo elektrinės besisukanėios masių inercija neturi átakos bendrai elektros tinklo inercijai. Taėiau pastovaus greičio vėjo elektrinės dinamika yra susieta su elektros tinklo dinamika, todėl būtina ávertinti autoðvytavimus, atsirandanėius dėl to, kad vėjo turbina ir generatorius yra sujungti spyruokliuojanėiu velenu. Kai tokių vėjo elektrinių prijungta galia sudaro kelis ðimtus megavatų, elektros perdavimo tinklo dinamika gali pablogėti dėl to, kad dėl ávairių trikdþių atsirandantys ðvytavimai uþtruks ilgiau, jø amplitudė bus didesnė, o tai neigiamai atsiliėps elektros sistemos darbui. Todėl aktualu iðtirti tokių ðvytavimų galimybę ir realų pavojų pabloginti EES stabilumą.

Vienos besisukanėios masės atveju vėjo elektrinės mechaninė dalis apraðoma lygtimis:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{2H} (M_V - M_E - k_D \omega), \quad (4)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega; \quad (5)$$

čia ω – generatoriaus rotoriaus kampinis greitis [rad/s], rotoriaus sukimosi kampas [rad], M_V – vėjo turbinos sukimo momentas [Nm], M_E – elektrinis ap-

krovos momentas, k_D – kombinuotas rotoriaus mechaninis ir apkrovos slopinimo koeficientas, H – kombinuota rotoriaus ir apkrovos inercijos laiko pastovioji. Laiko pastovioji H apskaièiuojama pagal priklausomybæ [5]

$$H = 5.48 \cdot 10^{-9} \cdot J_p \cdot n^2 / S_{\text{vard}} \text{ [MWS / MVA]}; \quad (6)$$

èia J_p – tariamas inercijos momentas esant generatoriaus rotoriaus kampiniam greièiui kgm^2 , n aps./min, S MVA.

Jeigu elektros sistema susideda iš m agregatø, tada sistemos laiko pastovioji H_S apskaièiuojama taip:

$$H_S = \frac{\sum_{i=1}^m H_i P_{i \text{ vard}}}{\sum_{i=1}^m P_{i \text{ vard}}} \quad (7)$$

arba

$$H_S = \frac{\sum_{i=1}^m H_i S_{i \text{ vard}}}{\sum_{i=1}^m S_{i \text{ vard}}}; \quad (8)$$

èia $P_{i \text{ vard}}$ – i -ojo agregato vardinė aktyvioji galia MW, $S_{i \text{ vard}}$ – i agregato tariamoji vardinė galia MVA.

Pagal (4) ir (5) analitines priklausomybes galima sudaryti struktūrinæ modelio schemà (2 pav.).

Dviejø besisukanèiø masiø, sujungtø spyruokliujanèiu velenu, modelis bus daug sudètingesnis. Ðiuo atveju turèsime tokias mechaninës sistemos dinamikos lygtis:

$$J_1 \varphi_1'' + (r_{12} + r_1) \varphi_1' - r_{12} \varphi_2' + c_{12} (\varphi_1 - \varphi_2) = M_V(t), \quad (9)$$

$$J_2 \varphi_2'' + (r_{12} + r_2) \varphi_2' - r_{12} \varphi_1' + c_{12} (\varphi_2 - \varphi_1) = -M_E(t); \quad (10)$$

èia J_1 ir J_2 – vėjo turbinos ir asinchroninio generatoriaus rotoriaus inercijos momentai, kai rotoriaus greitis $\omega_2 = d\omega_2 / dt$, ω_1 – vėjo turbinos sukimosi kampas, ω_2 – asinchroninio generatoriaus rotoriaus sukimosi kampas, $\varphi_1', \varphi_1'', \varphi_2', \varphi_2''$ – pirmoji ir atitinkamai antroji φ_1 ir φ_2 iðvestinės pagal laikà, $\varphi_1' = \omega_1, \varphi_2' = \omega_2$; r_{12} – veleno, jungianèio vėjo turbinos ir generatoriaus rotoriaus mases, sukamøjø virpesiø slopinimo koeficientas, r_1 ir r_2 – vėjo tur-

binos ir atitinkamai generatoriaus rotoriaus slopinimo koeficientai, c_{12} – veleno standumo koeficientas, $M_V(t)$ – vėjo turbinos sukimo momentas, M_E – generatoriaus rotoriaus elektrinis pasipriešinimo momentas.

(9) ir (10) formules padalijame iš c_{12} ir uþraøme ðitaip:

$$T_1^2 \varphi_1'' = -2T_1 \alpha_1 \varphi_1' + \beta_{12} \varphi_2' - \varphi_1 + \varphi_2 + M_V / c_{12}, \quad (11)$$

$$T_2^2 \varphi_2'' = -2T_2 \alpha_2 \varphi_2' + \beta_{12} \varphi_1' - \varphi_2 + \varphi_1 - M_E / c_{12}; \quad (12)$$

èia $T_1^2 = J_1 / c_{12}$, $\alpha_1 = (r_{12} + r_1) / (2 T_1 c_{12})$, $\beta_{12} = r_{12} / c_{12}$, (13)

$$T_2^2 = J_2 / c_{12}, \quad \alpha_2 = (r_{12} + r_2) / (2 T_2 c_{12}). \quad (14)$$

T_1 ir T_2 yra laiko pastoviosios, α_1 ir α_2 – slopinimo koeficientai, β_{12} – ryøio tarp mechaninës sistemos virpesiø sukamøjø greièiø ω_1 ir ω_2 dedamøjø koeficientas.

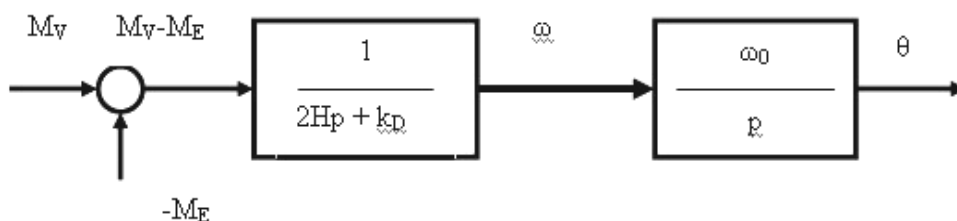
Ið (11) ir (12) lygèiø gautos struktūrinës modelio schemas ir sudarytas matematinis modelis.

Svytavimø trukmè ir amplitudè priklauso nuo slopinimo koeficientø α_1 , α_2 ir β_{12} verèiø. Būtina paþymèti, kad nuo ðiø slopinimo koeficientø verèiø priklauso ir slydimo dydis, nes trintis ne tik slopina ðvytavimus, bet ir sudaro papildomà apkrovà vėjo turbinaì.

3. VÈJO ELEKTRINIØ PARKO GENERUOJAMOS GALIOS VARIACIJOS KOEFICIENTO PRIKLAUSOMYBÈ NUO VÈJO ELEKTRINIØ KIEKIO, TIPO IR IÐDÈSTYMO

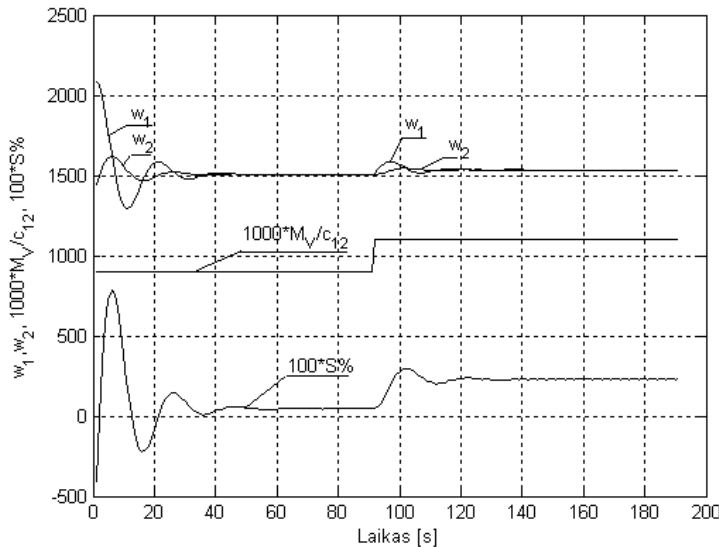
Būdingi du atvejai: 1) kai parkà sudaro pastovaus greièio vėjo elektrinës, 2) kai parke yra tik kintamo greièio vėjo elektrinës. Vėjo elektriniø parko matematiná modelá sudarysime panaudodami SIMULINK'o priemones, anksèiau apraðytas matematinës iðraiðkas, gautus identifikavimo rezultatus ir vėjo greièio matavimo duomenis. Vėjo greièio matavimai buvo atlikti 2003 m. lapkrità Giruliuose apie 1 km atstumu nuo jūros kranto 50, 30 ir 10 m aukðtyje, panaudojant specialiaà árangà. Paþymėtina, kad

neturime vėjo greièio matavimo duomenø kaimyniniuose taðkuose, pvz., 200–300 m atstumu, tiek pagal vėjo kryptà, tiek pagal vėjo frontà, todėl, modeliuojant vėjo elektriniø parko darbà, reikès daryti tam tikras prielaidas. **Pirmoji prielaida:** tarsime,

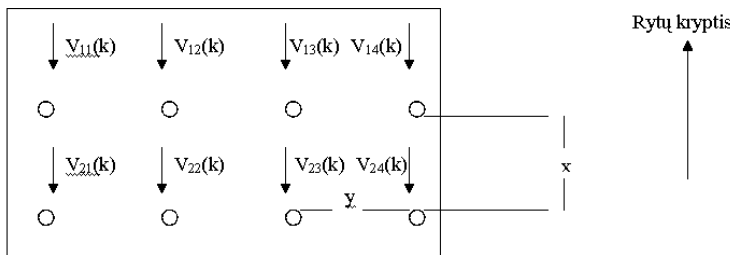


2 pav. Nereguliuojamos EES struktūrinè schema

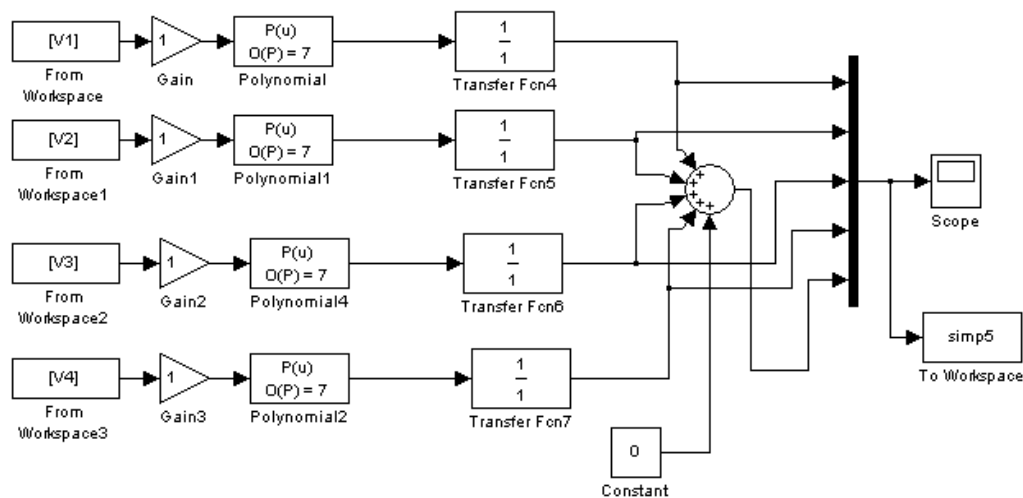
Kai asinchroninis generatorius prijungtas prie sisteminio elektros tinklo, tada $H = H_S$. Ðiuo atveju pastebima, kad dël didelës galios pastovaus greièio vėjo elektriniø prijungimo prie sisteminio elektros tinklo gali pasikeisti laiko pastovioji H_S , taèiau sistemos modelio struktūra iðlieka nepakitusi ir ðvytavimø galimybè dël spyruokliujanèio veleno neiðryðkèja



3 pav. w_1 ir w_2 sukimosi greičiø [aps./min], vėjo turbinos sukimo momento M_v , padauginto iš 1000 ir padalyto iš veleno glaudumo koeficiento c_{12} , t. y. dydžio $1000 \cdot M_v / c_{12}$ ir asinchroninio generatoriaus slydimo, padauginto iš 100, kitimas pagal laiką. Vėjo turbinos sukimo momentas M_v kinta nepriklausomai ir šuoliškai $\pm 10\%$, o dydžiai w_1 , w_2 ir slydimas $S\%$ – kaip reakcija á M_v duoliškà kitimà



4 pav. Vėjo elektriniø iðdëstymas parko teritorijoje. O – vėjo elektrinë, $V_{11} - V_{41}$ – pirmoje eilėje stovinëias elektrines veikiančys vėjo greičiai (vėjo turbinos ašies aukštyje), $V_{12} - V_{42}$ – antroje eilėje stovinëias elektrines veikiančys vėjo greičiai, x – atstumas tarp eiliø, y – atstumas tarp eiliø statmena kryptimi, \rightarrow vėjo kryptis



5 pav. Keturiø pastovaus greičio vėjo elektriniø parko matematinio modelio schema

kad vėjo greitis pagal vėjo kryptá iðlieka nepakitæs per visà parko teritorijà, bet pasikartoja vëluodamas

$$\tau = x / \bar{V}; \quad (15)$$

ëia x – atstumas tarp mus dominanëiø taðkø vėjo kryptimi, \bar{V} – vidutinis vėjo greitis. **Antroji prielaida:** vėjo greitis iðilgai vėjo fronto, t. y. statmena kryptimi vėjui kinta pastoviai per visà parko teritorijà, taëiau, priklausomai nuo atstumo y , prisideda adityvus, su vėjo greičio kitimu $V(k)$ nekoreliuotas, bet panaðus á jà procesas $S(k)$:

$$V_s = m_y \cdot V(k) + (1 - m_y) \cdot S(k); \quad (16)$$

ëia m_y – svorio koeficientas, lygus V_s ir V koreliacijos koeficientui; kuo atstumas y iðilgai vėjo fronto yra didesnis, tuo m_y yra mažesnis, $0 < m_y < 1$. Turint pakankamai ilgà vėjo greičio matavimo duomenø eilutæ $V(k)$, $k = 1, 2, \dots, r$, kaip procesà $S(k)$ galima panaudoti pakankamai nutolusà tà patà vėjo greità t. y. $V(k-h)$, $h > 500-600$ sek.

Vėjo elektriniø iðdëstymas parko teritorijoje pavaizduotas 4 paveiksle.

Jame matyti, kad vėjo kryptis yra tiksliai ið vakarø á rytus. Modeliuodami tarsime, kad turime tik $V_{11}(k)$, $k = 1, 2, \dots, r$ sek., matavimo duomenis, laiko diskretiškumo intervalas $\Delta t = 1$ sek., vėjo kryptis laikui bëgant nesikeiëia, $V_{2i}(k) = V_{1i}(k-\tau)$, $i = 1, 2, 3, 4$, $\tau = x / \bar{V}$, \bar{V} – vidutinis pagal laikà greitis, $V_{12}(k) = m_y \cdot V_{11}(k) + (1 - m_y) \cdot V_{11}(k-600)$, m_y – koreliacijos koeficientas tarp V_{11} ir V_{12} , ir atitinkamai bendroju atveju galima rašyti $V_{1i} = m_y \cdot V_{1i(i-1)} + (1 - m_y) \cdot V_{1i(i-1)}$, $i = 2, 3, 4, \dots$. Vidutinis vėjo greitis $\bar{V}_{jj} = 7,88$ m/s, turbulentiškumas $V_{turb} = 20,1\%$.

Generuojamos galios fluktuacijos išreiškiamos standartiniu nuokrypiu σ ir variacijos koeficientu $Turb = \sigma / m$; ëia m yra atsitiktinio proceso vidurkis. Kai sudedami du atsitiktiniai procesai, pvz., P_{11} ir P_{21} , jø sumos standartinis nuokrypis

$\sigma_{P_{11}+P_{21}} = \sqrt{\sigma^2_{P_{11}} + \sigma^2_{P_{21}} + 2\rho\sigma_{P_{11}}\sigma_{P_{21}}}$; èia ρ - P_{11} ir P_{21} koreliacijos koeficientas. Kai procesai tarpusavyje nekoreliuoti ($\rho = 0$), tada

$\sigma_{P_{11}+P_{21}} = \sqrt{\sigma^2_{P_{11}} + \sigma^2_{P_{21}}}$. Jeigu visos vėjo elektrinės yra vienodos, jø generuojamos galios tarpusavyje nekoreliuotos ($\rho = 0$), visi σ taip pat vienodi,

tada $\sigma_{\sum P} = \sqrt{n}\sigma_P$. Jeigu $\rho = 1$ (pilna koreliacija),

tada $\sigma_{\sum P} = n\sigma_P$; èia n - vėjo elektrinių skaičius.

Bendruoju atveju, kai $0 < \rho < 1$, gausime priklausomybæ $\sqrt{n}\sigma_P \leq \sigma_{\sum P} \leq n\sigma_P$, kuri nustato $\sigma_{\sum P}$ ribas.

Vėjo elektrinių parko, susidedanèio ið keturiø pastovaus greižio vėjo elektrinių, iðdëstyto á dvi eiles, matematinis modelis pateiktas 5 pav.

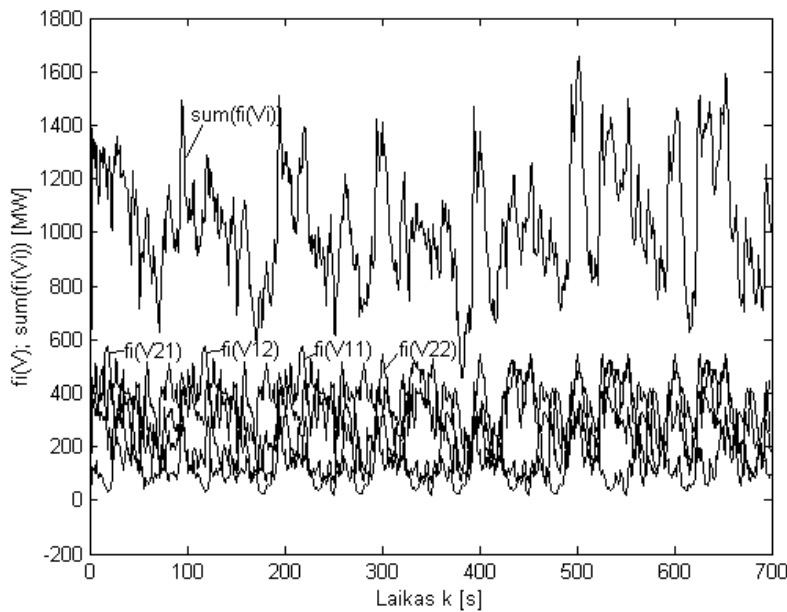
Kaip matyti 5 pav., visos parko vėjo elektrinės neturi inercijos.

6 pav. parodytas atskirø vėjo elektrinių generuojamos galios kitimas ir viso parko bendros generuojamos galios kitimas. Generuojamø galiø variacijos koeficientai $TurbP_j = TurbP_j$ yra tokie:

- $TurbP_{11} = 54,0757,$
- $TurbP_{21} = 55,8487,$
- $TurbP_{12} = 52,0434,$
- $TurbP_{22} = 54,0687,$
- $TurbsumP_j = 19,7222$

Vėjo greižio koreliacinë matrica yra

$R =$			
1,0000	0,0203	0,0322	0,2042
0,0203	1,0000	-0,2059	0,2341
0,0322	-0,2059	1,0000	-0,0755



6 pav. Keturiø pastovaus greižio vėjo elektrinių parko generuojamø galiø kitimas pagal laikà, kai koreliacija tarp vėjo greižio V_{11} , V_{12} , V_{21} ir V_{22} yra maþa. Tai teorinis atvejis, kuris praktikoje gali pasitaikyti, kai atstumas tarp parko vėjo elektrinių yra dideli, didesni uþ 1 km

0,2042 0,2341 -0,0755 1,0000
 Tai yra idealizuotas atvejis, nes praktiškai sunku pasiekti, kad koreliacija tarp vėjo greižio, veikianèio arti stovinèias vėjo turbinas, bûtø paneigtinai maþa.

Toliau panagrinësimë atvejà kai koreliacija tarp V_{11} ir V_{12} yra didelë, t. y. kai iðilgai vėjo fronto vėjo greižio pobûdis stabilus, palyginti su vėjo kryptimi. Tarsime, kad vėjo greitis

$$V_{12}(k) = 0,7 \cdot V_{11}(k) + 0,3 \cdot V_{11}(k-600), \quad (17)$$

$$V_{21}(k) = V_{11}(k-40),$$

$$V_{22}(k) = V_{12}(k-40).$$

Ðiuo atveju vėjo greižio koreliacinë matrica yra

$R =$			
1,0000	0,2793	0,8891	0,2354
0,2793	1,0000	0,3290	0,8918
0,8891	0,3290	1,0000	0,3566
0,2354	0,8918	0,3566	1,0000

Generuojamø galiø kitimas parodytas 7 pav., o variacijos koeficientai yra

- $TurbP_1 = 54,0757,$
- $TurbP_2 = 55,7211,$
- $TurbP_3 = 43,4039,$
- $TurbP_4 = 44,6920,$
- $TurbsumP_j = 39,7057.$

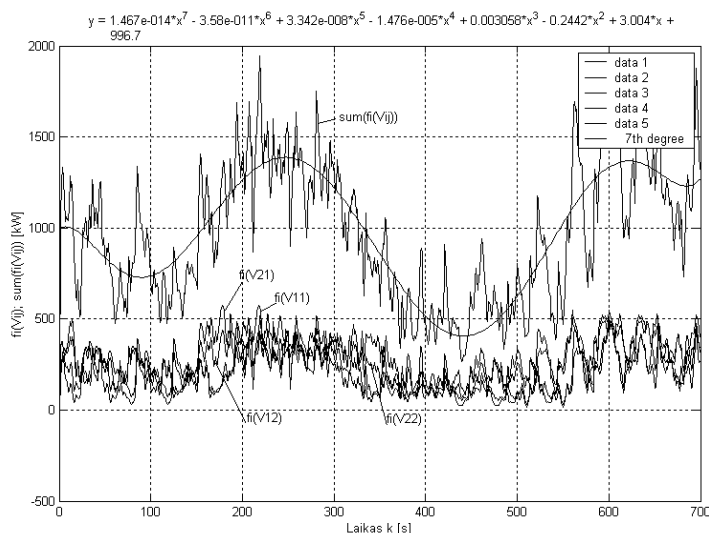
7 paveiksle taip pat parodyta bendros parko generuojamos galios kitimo kreivë, aproksimuota 7-o laipsnio polinomu.

4. VËJO ELEKTRINIØ ÁTAKA ELEKTROS ENERGIJOS SISTEMOS ELEKTROS KOKYBËS PARAMETRAMS

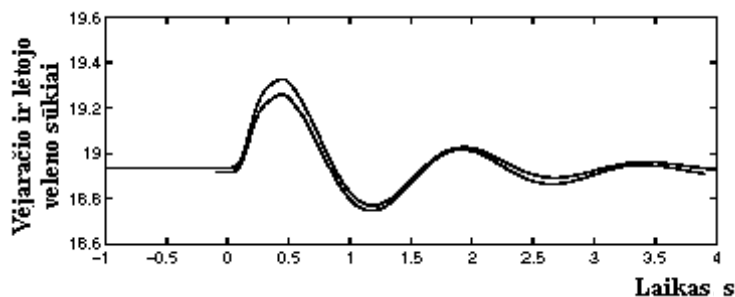
4.1. Reaktyviosios galios suvartojimo kompensavimas

Dauguma eksploatuojamø vėjo elektrinių turi asinchroninius generatorius. Pati asinchroninë maðina reaktyviàjà galià tik vartoja ið prijungto tinklo. Vartojimui kompensuoti jau elektrinëje árengiamos kelios kondensatoriø baterijos. Tiek puèiantis vëjas, tiek vėjo elektrinės iðëjime generuojamoji galia labai kinta. Kinta ir reaktyviosios galios suvartojimas.

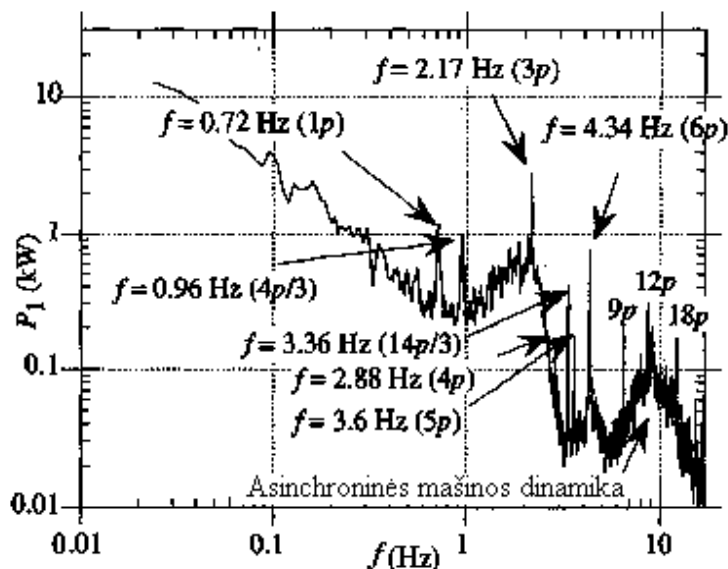
Sunkiausias reaktyviosios galios vartojimo reþimas susidaro, kai tuo paèiu laiko momentu paleidþiamos kelios vėjo elektrinės. Jei prijungimo tinkle, prie kurio yra prijungtas vėjo elektrinių parkas, susidedantis ið keliolikos ar daugiau elektrinių, ávyko trumpasis jungimas, kuris buvo sëkmingai atjungtas, visø parko elektrinių galia pradeda maþëti. Ypaè didelis momentinis reaktyviosios galios poreikis virsta tinklo átampos kryþiu



7 pav. Keturiø pastovaus greièio vėjo elektriniø parko generuojamø galiø kitimas laikui bėgant, esant didelei vėjo greièio koreliacijai



8 pav. Vėjo elektrinės lėtojo veleno sukio kitimo dėl trumpojo jungimo modeliavimas



9 pav. Vėjo elektrinės generuojamos galios kitimo spektras, p – rotoriaus sukiai ([7])

ir, jei nebuvo imtasi priemoniø, viso elektros tinklo prijungimo mazgo atjungimu.

Tokios reaktyviosios galios reþimà stabilizuojanèios priemonës gali bûti atskirø vėjo elektriniø ásiungimø perstûmimas laike arba modernûs reakty-

viosios galios statiniai kompensatoriai, kuriø tiristoriais valdomus kondensatorius galima labai greitai ájungti.

4.2. Vėjo elektrinės virðatampiai ir gilius kryèiai

Vėjo elektrinės asinchroninis generatorius gali generuoti virðatampius. Jei elektros tinkle dėl elektrinės darbo ar dėl kitø árenginiø papaidos ávyksta trumpasis jungimas, prijungimo taðke maþėja átampa, o elektrinë, negalédama atiduoti generuojamàjà galià á tinklà, pradeda sparèiau dirbti. 8 paveiksle matyti, kad jos generatorius generuoja maþiau galios, o dėl statoriaus ásimagnetinimo pradeda didėti elektrinės átampa. Ypaè pavojingi virðatampiai atsiskyrusioje elektros tinklo dalyje, kurioje liko veikti vėjo elektrinë. Virðatampiai pavojingi tiek elektrinei, tiek prie elektros tinklo prisijungusiems vietiniams elektros vartotojams. Tokiais atvejais elektrina turi iðjungti relinë apsauga.

Modeliuojant elektros tinklus su vėjo elektrinëmis ir skaièiuojant mazgø átampos per trumpàjà jungimà vienoje linijoje ir po jo, mazguose átampa maþėja labai panaðiai. Kryèio trukmė apie 2 sek., taèiau kryèio gylis skiriasi.

Kuo arèiau trumpojo jungimo vietos yra generatoriai, tuo labiau sumaþėja mazgø átampa. Paskirstytojo generavimo paplitimo mastams didėjant, atsikurianèioji átampa pasiekia buvusà lygà tik po tam tikro laiko. Ðis tyrimas yra būtinas rengiant kiekvienos vėjo elektrinės prijungimo projektà.

Generatoriø paleidimui uþsitasus, susidaro pavojinga labai þemos átampos bûklė, todėl po tam tikro laiko, saugant parko elektrines nuo gedimø, paleidimas turi bûti nutrauktas arba taip pakeistas, kad bûtø atstatyta leistina átampa.

4.3. Vėjo elektrinės aktyviosios galios kitimas

Vėjo elektrinės puèiant vėjui generuojama aktyvioji galia labai nepastovi. Lietuvoje naudojamosi kaimyninèiose dalyse (Danijoje) atliktais vėjo elektrinės generuojamos galios kitimo matavimais [6].

Vėjo elektrinės galios kitimas gali bûti iðreikðtas daþniniu spektru (9 pav.). Pirmiausia vėjui puèiant elektrinės stiebas iðlinksta ir vėl atsitiesia. Svarbu, kad nebûtø rezonanso. Stiebø konstrukcijose turi bûti numatytos tokio rezonanso slopinimo priemonës. Ki-

tos spektro smailės susijusios su vėjo elektrinės besisukančios mechaninės sistemos virpesiais.

Vėjo elektrinių prijungimo taisyklėse plačiai apibūdintas generuojamosios aktyviosios galios ir dažnio valdymas. Kiekviena tiek pavienė, tiek parko vėjo elektrinė turi atitikti Lietuvos elektros energetikos sistemos automatinio generacijos valdymo nuostatus. Tai reiškia, kad visos vėjo elektrinės turi turėti aktyviosios galios generavimo ir dažnio valdymo sistemas, valdomas iš perdavimo ar skirstomojo tinklo dispečerinio centro.

Reguluoti vėjo elektrinių parko ar net atskiros elektrinės galią iš tinklo operatoriaus dispečerinio valdymo centro būtina dėl šių priežasčių:

- perdavimo tinkle atsijungus vienai iš energiją priimanėms linijoms ir saugant kitas linijas nuo perkrovos, o sistemą – nuo avarijos, didžiausia leistinoji generavimo riba (MW) turi būti mažinama;
- tinklo nepažeidimo atveju, siekiant užtikrinti vėjo elektrinių darbo pastovumą, parko galia turi būti mažinama;
- galios mažinimo valdymo signalą gali sukelti elektrinės prijungimo taške pasikeitęs dažnis ir (arba) būtina valdyti tarptautinių sujungimo linijų srautus.

Reikalavimas valdyti generuojamąją galią, sekant tinklo dažnio vertę, iš pastovaus greičio vėjo elektrinės konstrukcijos savo ruožtu reikalauja turėti aktyvią galios valdymo priemonę: keisti vėjarašio menėio pokrypio kampą (Pitch Control). Tačiau iš esmės tai yra greičio netekimo valdymas (Active stall Control) ir jo galimybės yra nedidelės. Todėl, kai vėjo elektrinių parką sudaro aktyviai valdomos, tačiau galinčios pasyviai arba aktyviai netekti greičio elektrinės, t. y. pastovaus greičio vėjo elektrinės su asinchroniniu generatoriumi, parko galią privalu valdyti atskiras vėjo elektrines paėiliui atjungiant, o vėliau jas vėl įjungiant. Tai būtina atlikti jungtuvais per kelias sekundes.

Jei elektrinei ar parkui perdavimo tinklo operatorius nurodė valdyti dažną vėjo elektrinės arba parko valdymo įrenginiai turi keisti nurodytos generuojamos galios vertę pagal perdavimo tinklo dažnio vertę. Tokiais atvejais dažnio valdymo komandos tapo viršesnės už vėjo elektrinės valdymo pagal nurodytą galią komandas.

4.4. Ilgalaikio vėjo elektrinės aktyviosios galios kitimo ir galios balanso valdymas

Perdavimo tinklo operatoriumi labai svarbūs staigūs, bet trunkantys kelias ir keliolika minučių generuojamosios galios kryžiai ir po jų taip pat staigūs generavimo didėjimai.

Turi būti numatyta galimybė kiekvienos vėjo elektrinės generuojamos galios leistinąją ribą ir galios kitimo greitį bet kada keisti iš operatoriaus dispečerinio valdymo punkto. Tiek mažinant generavimą, tiek grąžinant į įprastą galios generavimo lygį būtina

iš atitinkamo operatoriaus dispečerinio punkto valdyti reguliavimo greitį ir ją pasirinkti nuo 10 iki 100% vardinės galios per minutą.

Įprastai didinant vėjo elektrinių parko galią (tiek vėjui pradėjus pūsti, tiek vėjo greičiui toliau didėjant), reikia numatyti didžiausią leistinąją galios didėjimo (MW/min) greitį. Būtina valdyti vėjo elektrinių parko generavimą taip, kad jo galia būtų ne didesnė už generavimo leistinąją ribą (MW). Ribinės elektros sistemos reikimo valdymo parametrų vertės, pasikeitus elektros sistemos rezervinių elektrinių galioms ir jų panaudojimo elektros rinkoje kainoms, perdavimo tinklo operatorius turi teisę keisti.

Vėjo elektrinių parko generavimo leistinąją ribą turi nurodyti perdavimo tinklo operatorius, pasisėdamas iš dispečerinio punkto iš vėjo elektrinių parko dispečerinį punktą atitinkamą signalą, arba ta riba turi būti nustatyta pagal elektrinės prijungimo tašką, vietinio dažnio ir (arba) štampos vertes.

4.5. Vėjo elektrinės štaka štampos kokybei

Prie bendrojo naudojimo elektros tinklo prijungtos vėjo elektrinės sukelia štampos kokybės užtikrinimo problemą. Bendrojo naudojimo 0,4 ir 10 kV elektros tinkluose, prie kurių prijungiamos vėjo elektrinės reikia įvertinti:

- tinklo štampos kitimo ribas,
- staigiuosius štampos pokyčius,
- įprastinės veiklos sukeltą štampos pulsavimą,
- perjungimų sukeltą štampos pulsavimą,
- harmonines štampos bei sroves.

Vėjo elektrinės savo skleidžiamais trikdžiais taip pat veikia nuotolinio ryšio (telefono) linijas ir aukštosios štampos oro linijų aukštojo dažnio kanalų aparatūrą. Vėjo elektrinėms keliami jų trikdžius ribojantys reikalavimai.

4.6. Vėjo elektrinės harmonikoms keliami reikalavimai

Jei vėjo elektrinėje įrengtas ir prie elektros tinklo tiesiai prijungtas asinchroninis generatorius ir jokių dažnio keitiklių, nuolatinės srovės linijų ar intarpų nėra, harmoninės srovės, kaip rodo patirtis, yra menkos, ir visada atitinka standartų reikalavimus.

Jei vėjo elektrinės generatorius prie elektros tinklo yra prijungtas per dažnio keitiklius ar per nuolatinės srovės linijas ar intarpus, gali susidaryti dideli harmoninių srovių ir štampos lygiai, todėl harmonikoms keliami reikalavimai turi būti kruopščiau patikrinti.

Mūsų nagrinėjamu atveju visi vėjo elektrinių parko generatoriai yra asinchroniniai su trumpai jungtu rotoriumi ir tiesiogiai prijungti prie elektros tinklo.

5. IŠVADOS

1. Tinkamai parinkti vėjo elektrinių tipą, prijungimo vietą ir galią, atspindėti jų savybes bei įvertinti sta-

tinius ir dinامينius elektros tinklo parametrus yra mokslinė, techninė ir technologinė problema, kuri sprendžiama, naudojant esamą sistemą su jau patatytomis vėjo elektrinėmis matavimų apibendrinimais, o skaičiavimams atlikti taikomi matematiniai modeliai.

2. Iš paskelbtų darbų analizės matyti, kad siekiant paprastumo modeliuojant vėjo elektrinės mechaninę dalį, dažnai apsiribojama vienos ekvivalentinės masės modeliu, o elektrinė dalis – generatorius ir elektros tinklas modeliuojami panaudojant Thevenino matematiną modelį, tačiau vėjo elektrinės mechaninės dalies dviejų ekvivalentinių masių matematinis modelis kartu su elektrinės dalies treios–penktos eilės Thevenino matematinio modeliu kur kas tiksliau atspindi realius procesus nagrinėjamos sistemoje.

3. Matematinio modeliavimo būdu buvo ištirta vėjo elektrinių parko generuojamos galios variacijos koeficiento priklausomybė nuo vėjo elektrinių skaičiaus ir iždėstymo.

4. Vėjo elektrines jungiant á elektros energetikos sistemą reikia sprásti á duos elektros kokybės klausimus:

- reaktyviosios galios suvartojimo kompensavimas;
- vėjo elektrinės viršáampiai ir dideli kryžiai;
- vėjo elektrinės aktyviosios galios kitimas;
- ilgalaikio vėjo elektrinės aktyviosios galios kitimo ir galios balanso valdymas;
- vėjo elektrinės átaka átampos kokybei.

5. Vėjo elektrinių parko indėlis á átampos pokyčius ir jos mirgėjimą bei harmonikas prijungimo taške remiasi srovės ir (arba) galios matavimais ir átampų skaičiavimais, kurie yra atliekami pagal perdavimo tinklo operatoriaus pateiktą schemą varžas. Skaičiavimo metodai turi būti pritaikyti kiekvienam vėjo elektrinių parkui ir jo elektrinių sujungimo schemai atskirai [8].

Gauta 2005 03 03

Literatūra

1. Cidras J., Feijoo A. E. A Linear Dynamic Model for Asynchronous wind Turbines With Mechanical Fluctuations // IEEE Transaction on Power Systems. August 2002. Vol. 17. No. 3. P. 681–687.
2. Pidre J. C., Carrillo C. J., Feijoo Lorenzo A. E. Probabilistic model for mechanical power fluctuations in asynchronous wind parks // IEEE Transaction on Power Systems. May 2003. Vol. 18. No. 2. P. 761–768.
3. Petru T., Thiringer T. Modeling of wind turbines for power system studies // IEEE Transaction on Power Systems. November 2002. Vol. 17. No. 4. P. 1132–1139.
4. Salman S. K., Teo A. L. J. Windmill modeling consideration and factors influencing the Stability of a grid-connected wind power-based embedded generator // IEEE Transaction on Power Systems. May 2003. Vol. 18. No. 2. P. 793–802.
5. Kundur P. Power System Stability and Control. McGraw-Hill, 1994. P. 1167.
6. Sorensen P., Hansen A., Janosi L. et al. Simulation of Interaction between Wind Farm and Power System. Riso National Laboratory, Roskilde, 2001. P. 66.
7. Thiringer T. Power quality measurements performed on a low-voltage grid equipped with two wind turbines // IEEE Transaction on Energy conversion. September 1996. Vol. 11. No. 3. P. 601–606.
8. Vėjo elektrinių prijungimo prie Lietuvos elektros energetikos sistemos techninės taisyklės. Vėjo elektrinių savybių ir jų valdymo techniniai reikalavimai. AB Lietuvos energija. 2003 10 16.

Tomas Bendikas, Antanas Nemura

THE MATHEMATICAL MODEL OF FIXED-SPEED WIND TURBINE FARM

Summary

The right choice of windmill type, connection place, power size and rate statistic and dynamic parameters of a power system is a scientific, technical and technological problem. Existing systems with windmill measurement summation are used to tackle the problem. Mathematical models are used for calculation.

The single lumped mass windmill drive train model is used most often. However, the simplified two-mass model with the 3th–5th number Thevenin mathematical model gives better results. The drive train model consists of the inertia of both the turbine and the generator. The connecting shaft is modeled as a spring and a damper.

Key words: mathematical modelling, power quality, rotary spring, wind power plant, wind speed measurements

Томас Бендикас, Антанас Немура

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПАРКА ВЕТРОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ПОСТОЯННОЙ СКОРОСТИ

Резюме

Правильный подбор типа ветровой электростанции (ВЭ), место ее подключения и мощность, оценка статических и динамических особенностей электросети являются научной, технической и технологической задачей. Для ее решения используем обобщенные измерения существующих систем с ВЭ, а для подсчета – математические модели.

С целью уменьшить сложность задачи для моделирования механической части ВЭ применяется модель одной эквивалентной массы, а в электрической части – генератор и электрическую сеть моделируем с помощью математической модели Thevenin, но из результатов видно, что модель двух эквивалентных масс, наряду с математической

моделью Thevenin третьего–пятого порядка гораздо точнее изображает реальные процессы в изучаемых системах.

Однако в опубликованных работах имеется очень мало данных о моделировании парка ВЭ, учитывая пружинное вращательное действие вала ветровой

турбины. В настоящей работе сделана попытка заполнить этот пробел.

Ключевые слова: качество электроэнергии, математическое моделирование, вращательная пружинность, ветровая электростанция, измерения скорости ветра