

Vėjo elektrinių parko informacinės sistemos variantų analizė statistinio daugiakriterinio naudingumo metodu

Antanas Nemura,

Arturas Klementavičius

Lietuvos mokslų akademija

Lietuvos energetikos institutas,

Sistemų valdymo ir

automatizavimo laboratorija,

Breslaujos g. 3, LT-44403 Kaunas

Vėjo elektrinių parkų steigėjai ir projektuotojai susiduria su parko informacinės sistemos komunikacinio varianto parinkimo problema. Iki šiol taikytos CORBA ir COM architektūros informacinės sistemos jau netenkina informacinių sistemų naudotojų poreikių. Straipsnyje nagrinėjamos vėjo elektrinių parko naujos architektūros informacinių sistemų, atitinkančių standarto **IEC 61400-25** (Vėjo turbogeneratorių sistemos. 25 dalis. Vėjo elektrinių stebėjimo ir valdymo komunikacijos) koncepciją, komunikacinių variantų savybės. Nagrinėjami 3 komunikaciniai variantai: centralizuotos topologijos, mišriosios topologijos ir skaidriosios topologijos. Pasiūlyti informacinės sistemos vertinimo kriterijai (projektavimo sąnaudų, investicijų sąnaudų, neplaninio atjungimo trukmės ir kiti). Komunikacinio varianto naudingumo nustatymas formuluojamas kaip daugiakriterinis uždavinys. Uždavinys išspręstas determinuotojo daugiakriterinio naudingumo metodu. Gautiems determinuotiesiems įverčiams patikslinti pasiūlytas naujas tikimybinis statistinis daugiakriterinis metodas, kuris grindžiamas normaliuoju skirstiniu. Jis leidžia įvertinti eksperto abejonės ir duomenų neapibrėžtumą. Parodyta metodo taikymo suformuluotam uždaviniui spręsti procedūra, aptarti gauti rezultatai – kiekvieno iš trijų komunikacinių variantų naudingumo įverčiai. Straipsnio išvada – metodas įgalina vaizdžiai ir lengvai palyginti konkurencinius projektus, variantus, strategijas ir kitas alternatyvas.

Raktažodžiai: vėjo elektrinė, kriterijus, komunikacijos variantas, daugiakriterinis naudingumas, determinuotasis metodas, statistinis metodas, normalusis skirstinys

1. ĮVADAS

Sutvarkius Lietuvos energetinių išteklių taupymo įstatyminę bazę ir pagal Europos Sąjungos direktyvas išsprendus finansavimo bei pagamintos elektros energijos supirkimo klausimus, Lietuvoje prasidėjo parengiamieji darbai vėjo elektrinių (VE) statybai. 2003 m. rudenį daugiau kaip 10 organizacijų paskelbė apie 700 MW suminės įrengtosios galios vėjo elektrinių statybos planus. VE statybos vietos dėl didesnių vėjo greičių telkiasi Lietuvos pajūryje ir netgi numatoma galimybė rengti jas pačioje jūroje.

Pagal VE statybos planą, Lietuvoje numatoma iki 2010 m. įrengti keletą vėjo elektrinių parkų (VEP), kurių bendra įrengta vardinė galia sudarys 180 MW [1].

VEP valdyti ir prižiūrėti būtinos informacinės sistemos. Tokios sistemos tampa ir perdavimo sistemos operatoriaus informacinės sistemos dalis. Ji padeda operatoriui operatyviai ir (ar) automatiškai valdyti energetikos sistemos režimus, taip pat sudaryti ir koreguoti artimiausių dienų ir valandų režimus.

Informacinių sistemų techninė pažanga verčia VEP projektuotojus ir eksploatuotojus parinkti tobulesnės architektūros informacines sistemas. Tarptautinės elektrotechnikos komisija IEC jau sukūrė naujos architektūros koncepciją, kuri apima kelis komunikacinius variantus (skiriasi komunikavimo topologijos). Kadangi kiekvienas variantas turi savo privalumų ir trūkumų, kyla poreikis palyginti variantus daugiakriteriškai, t. y. formalizuotu matematinio būdu. Daugiakriterinius uždavinius galima spręsti įvairiais metodais. Vienas iš jų – determinuotasis daugiakriterinio naudingumo nustatymo metodas su dalinėmis tiesinėmis naudingumo funkcijomis – autorių buvo pasiūlytas prieš keletą metų [2].

Šiame straipsnyje nagrinėjamas informacinės sistemos komunikacinio varianto parinkimas VEP, pagal dydį artimam tam, kuris bus statomas 3-e zonoje [1], šalia Juknaičių, netoli 110 kV elektros perdavimo linijos. Darbus atliks UAB „Alternatyvi vėjo energija“.

Parke yra 44 vienodo tipo VE, kurių kiekvienos vardinė galia lygi 0,85 MW. Bendroji VEP instaliuota vardinė galia yra 37,4 MW.

2. VĖJO ELEKTRINIŲ PARKŲ INFORMACINĖS SISTEMOS

VEP informacinė sistema skirta su vėjo elektrinių veikimu susijusiai informacijai rinkti, tvarkyti, perduoti, priimti ir pateikti (atvaizduoti). Kaip ir kiekvieną informacinę sistemą, VEP sistemą techniniu požiūriu galima laikyti susidedančią iš programinės įrangos, techninės įrangos, pirmiausia kompiuterių ir komunikacijos (ryšio) priemonių, duomenų (duomenų bazių), taip pat žmonių. Kitu – informacijos teorijos požiūriu – ją sudarys informaciniai objektai, kuriais laikomi realių objektų programiniai atvaizdai (modeliai). Informacinis objekto turinys yra realaus objekto (pvz., vienos VE, serverio, valdiklio) veikimo tikslų ir požymių formalizuotas aprašas.

Informacinės sistemos posistemiai. VEP informacinėje sistemoje galima išskirti vidaus ir išorinį posistemius. Vidaus posistemis apima parko teritorijoje esančius realius objektus, jo centras – vietinė kontrolės sistema (centrinis serveris, angl. *proxy, gateway*), kuri gali būti ir už parko ribų. Vidaus posistemyje informacijos mainai vyksta tarp vietinės kontrolės sistemos ir realių objektų. Vietinė kontrolės sistema užtikrina automatinį vidinį VE stebėjimą ir valdymą. Kiekviena VE turi integruotus elektroninius valdiklius (angl. *IED – intelligent electronic device*) arba serverį, kurie stebi ir valdo elektrinę ir jos komponentus, pastoviai renka ir saugo duomenis – išmatuotus ir dvejetainius dydžius, skaitiklių ir taimerių rodmenis, įvykius ir įvykių žurnalus, aliarmo signalus, nustatytąsias parametrų ribas ir komandas. Šie duomenys parko vidaus komunikacijos priemonėmis perduodami vietinei kontrolės sistemai, kuri juos apibendrina, archyvuoja, siunčia, jeigu reikia, elektrinėms atitinkamas valdymo komandas.

Išorinį posistemį sudaro vadinamieji išorės klientai (arba, informacinių sistemų terminologija, aktorai), kaip parko operatoriaus dispečerinis centras, perdavimo sistemos operatoriaus dispečerinis centras ir įvairių stebėtojų (kitų VEP operatorių, mokslo institucijų) centrai, komunikaciniais kanalais sujungti su parko vietine kontrolės sistema. Per šią sistemą iki šiol vykdavo ir išorės klientų informacijos mainai su **tam tikra elektrine**.

Informacinių sistemų architektūra. Informacinės sistemos architektūros ir struktūros sąvokos dažnai sutampa, tačiau architektūra labiau telkia dėmesį į informacinius ir komunikacinius sistemos komponentų ryšius, į ryšių organizavimo būdą (vadinamąjį architektūros stilių).

Išskirtini du VEP informacinių sistemų raidos etapai: 1) kol nebuvo unifikuotos informacinių sistemų komunikacinės architektūros – iki standarto **IEC 61400-25** (Vėjo turbogeneratorių sistemos. 25 dalis. Vėjo elektrinių stebėjimo ir valdymo komunikacijos) koncepcijos parengimo (iki 2002–2003 m.) [3]; 2) dabartinis, kai komunikacinė architektūra kuriama pagal minėtojo standarto koncepciją (standarto projektas dar tikslinamas). Architektūros modelis abiejuose etapuose toks pats – tai kliento–serverio architektūra. Architektūros skirtumai pasireiškia skirtinga duomenų semantika ir komunikavimo su atskira VE būdu (protokolu, taisyklėmis ir kt.).

Pirmajame etape buvo naudojamos CORBA ir COM tipų architektūros – tai paskirstyti (tam tikroje teritorijoje – parko viduje ir parko išorėje) objektai, turintys ryšius su vietine kontrolės sistema, teikiantys paslaugas arba generuojantys užklausas, operatyvinio valdymo ir tvarkymo komandas. CORBA ir COM yra panašios, bet skirtingų kūrėjų ir gamintojų. Šiose sistemose kiekviena parko elektrinė turi skirtingus integruotus elektroninius valdiklius. Kadangi elektrinių gamintojai laikėsi „savo“ standartų, tai valdikliai su vietine valdymo sistema (centrinio serveriu) komunikuoja skirtingais būdais ir turi nevienodą duomenų semantiką. Toks komunikavimas vadinamas informacijos mainais „nuosavu protokolu“ (angl. *proprietary communication protocol*).

Esant skirtingiems valdikliams, susidaro sunkumų plečiant informacinę sistemą, pvz., prijungiant prie veikiančio parko naują elektrinę, kurios nuosavas protokolas nesuderinamas su centru serveriu (gali tekti keisti programinę centrinio serverio įrangą). Nesuderinamumą kiltų ir bandant jungti į vieną informacinę sistemą kelis VEP. Perspektyvoje išorės klientas negalės tiesiogiai komunikuoti su atskira elektrine (apeidamas centrinį serverį), nes valdiklis, veikdamas nuosavu protokolu, nepriima standartinių protokolų, kuriais komunikuojama išoriniame informacinės sistemos posistemyje [3].

Dar vienas pirmojo etapo architektūros trūkumas – duomenys paprastai saugomi ir perduodami linijine struktūra, pvz., lentelių forma, todėl atsiranda funkciškai orientuotas priėjimas prie informacijos.

2003 m. Tarptautinė elektrotechnikos komisija (IEC) parengė **IEC 61400-25** standarto darbinį variantą (toliau – standartą) [3], kuriame suvienodinta duomenų semantika ir komunikacijos aspektai.

Standarte nustatyti standartiniai reikalavimai trimis centriniuose serveriuose laikomiems informaciniams modeliams (kompiuterinėms programoms). Tai:

1) parko informacijos modelis, kuriame medžio tipo hierarchijos būdu atspindimi atskiri informaciniai objektai (vėjo elektrinės). Modelio struktūra ir duomenų semantika standartizuota, nors įeities duomenys į jį patenka iš „nestandardizuotų“ valdiklių, t. y. nuosavais protokolais ir nevienodos semantikos. Informacijos modelio struktūra tinka duomenims nuskaityti ir pakeisti;

2) informacijos mainų modelis, kuris pagal išorės kliento užklausas ir valdymo komandas (įskaitant duomenų nuskaitymą ir pakeitimą) atlieka operacijas su parko informacijos modeliu. Todėl laikoma, kad informacijos modelį sudaro visos centrinio serverio teikiamos paslaugos;

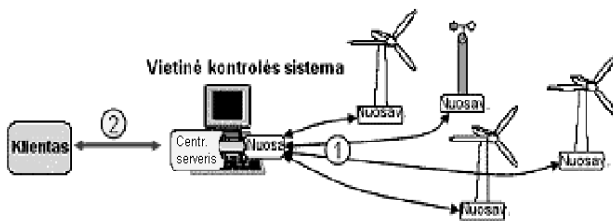
3) kliento ir centrinio serverio sąsajos (angl. *interface*) priskyrimo standartinio interneto komunikavimo protokolui modelis. Sąsają sudaro parko informacijos ir informacijos mainų modeliai.

Be to, standarte numatyta, kad naujos kartos valdikliai jau bus gaminami su standartizuotomis komunikacinėmis sąsajomis ir tokios VE galės nesunkiai būti įjungtos į informacinės sistemos komunikacinį (internetu) tinklą per šakotuvus (angl. *router*). Tai reiškia, kad prie

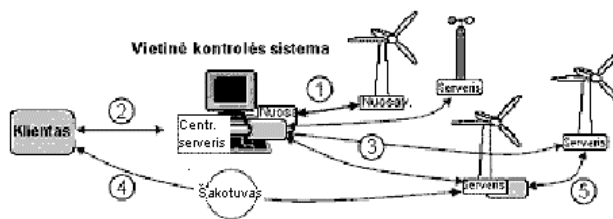
išorės klientų jos bus prijungtos tiesiogiai. Tačiau jau pastatytoms elektrinėms prie tokio tinklo prijungti teks naudoti jas pagal standartą atitinkančius centrinis serverius. Šie serveriai liks tarpininkai tarp standartinius protokolus naudojančio interneto tinklo ir nuosavą komunikavimo protokolą turinčių VE.

3. NAUJOS ARCHITEKTŪROS INFORMACINIŲ SISTEMŲ VERTINIMO KRITERIJAI

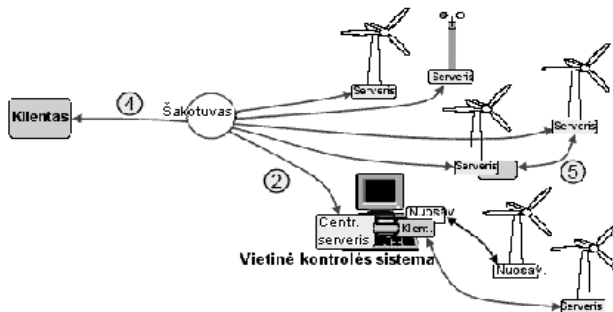
Pagal standartą **IEC 61400-25** [3] numatomi trys pagrindiniai naujos architektūros komunikacijos variantai, iliustruojami 1–3 paveiksluose.



1 pav. Naujosios architektūros centralizuota topologija. 1 – nuosavu protokolu veikiantis komunikacinis kanalas tarp VE ir centrinio serverio, 2 – komunikacinis kanalas tarp kliento ir centrinio serverio



2 pav. Naujosios architektūros mišrioji topologija. 1 – nuosavu protokolu veikiantis komunikacinis kanalas tarp VE ir centrinio serverio, 2 – komunikacinis kanalas tarp kliento ir centrinio serverio, 3 – komunikacinis kanalas tarp VE ir centrinio serverio, 4 – komunikacinis kanalas tarp kliento ir šakotuvo, 5 – komunikacinis kanalas tarp dviejų VE



3 pav. Naujosios architektūros skaidrioji (arba vientisoji) topologija. 1 – nuosavu protokolu veikiantis komunikacinis kanalas tarp VE ir centrinio serverio, 2 – komunikacinis kanalas tarp tinklo šakotuvo ir centrinio serverio, 3 – komunikacinis kanalas tarp VE ir centrinio serverio, 4 – komunikacinis kanalas tarp kliento ir šakotuvo, 5 – komunikacinis kanalas tarp dviejų VE

Naujosios architektūros centralizuotos topologijos variantas labai nedaug skiriasi nuo CORBA ir COM tipų architektūros. Išlieka aiškios ribos tarp vidinio ir išorinio posistemio, išorinis posistemis toks pats, kaip „ankstesnis“ – jame klientai ir vietinės kontrolės sistema (centrinis serveris) komunikuoja standartiniu interneto protokolu. Vidiniame posistemyje taip pat išlieka nepakitęs ankstesnis komunikavimas nuosavais protokolais. Kliento „prieiga“ prie atskiros VE duomenų tebėra centralizuota per vietinės kontrolės sistemą (centrinį serverį). Vienintelis skirtumas – centriniam serveryje įdiegta standartizuota (pagal **IEC 61400-25**) sąsaja (parko informacijos modelis kartu su informacijos mainų modeliu): joje laikoma standartizuota informacija.

Mišriosios topologijos variantas pasižymi keliais dviejų tipų elementų deriniais: 1) VE turi valdiklius arba serverius, todėl vidiniame posistemyje komunikuojama nuosavais ir standartiniais protokolais. Tokie serveriai būtų gaminami kartu su VE; 2) klientas vienas elektrines pasiekia centralizuotai (kaip ir pirmiau minėtoje topologijoje), o kitas – tiesiogiai per šakotuvą; 3) vidiniame posistemyje kai kurios VE komunikuoja ne tik su centriniu serveriu, bet ir tarpusavyje.

Skaidrioji (arba vientisoji) topologija pasižymi tuo, kad visos VE prie kliento jungiamos per šakotuvą, tačiau ne visos tiesiogiai – dalis per vietinę valdymo sistemą (centrinį serverį). Vis dėlto vidinis posistemis išlieka – centrinis serveris komunikuoja su prie jo neprijungtomis VE per šakotuvą. Šakotuvai tampa „vartais“ prieigai prie VEP objektų.

Pažymėtina, kad IEC61400-25 standartas gali būti pritaikytas bet kuriai komunikacinei topologijai, netgi vienos VE viduje intelektualių posistemų ryšiui, pvz., generatorių valdiklių [4].

Visos trys minėtųjų topologijų sistemos yra pažangios, veiksmingos ir rekomenduotinos. Tačiau esama kainos skirtumų, šiek tiek skiriasi ir jų privalumai. Todėl projektuotojui renkantis konkrečios topologijos sistemą pravartu iš anksto žinoti, kuri iš trijų yra geriausia, t. y. turi didžiausią bendrąją naudingumą (gerumą). Tai būtų „vidutinio“ pirkėjo atvejis, kai vienodai svarbios visos sistemos savybės (kaina ir kokybės požymiai) ir ieškoma topologijos, atitinkančios geriausiai subalansuotą visų savybių derinį.

Topologijų palyginimui nustatome informacinių sistemų vertinimo kriterijus:

- 1) projektavimo sąnaudos,
- 2) realizavimo sąnaudos (investicijų dydis),
- 3) eksploatacinių sąnaudos,
- 4) klaidingo darbo trukmė,
- 5) planinio atjungimo trukmė,
- 6) neplanuoto atjungimo trukmė,
- 7) plėtros ir naujų paslaugų įdiegimo galimybės.

Kiekvienos topologijos sistemai nustatomi kriterijų skaitiniai įverčiai (t.y. savybės „išmatuojamos“). Apibendrinus kriterijus pagal šiuos įverčius į vieną suvestinį kriterijų, galima gauti daugiakriterinį topologijos nau-

dingumo (gerumo, priimtimumo) įvertį. Didžiausią tokių įvertių turinti topologija laikytina naudingiausia. Jos radimo uždavinys toliau sprendžiamas taikant minėtą determinuotąjį daugiakriterinio naudingumo metodą [2] ir naują statistinį metodą, grindžiamą normaliuoju skirstiniu. Šis metodas leidžia tikimybiškai įvertinti variantų daugiakriterinius naudingumus.

4. DETERMINUOTASIS NAUJOS ARCHITEKTŪROS INFORMACINIŲ SISTEMŲ DAUGIAKRITERINIS NAUDINGUMAS

Kriterijaus projektinių reikšmių normavimas. Tariamame, kad projektuotojas ar ekspertas kriterijui j nagrinėjamame variante i ekspertiniu būdu nustato skaitinį įvertį X_{ij} , kurį vadiname projektine reikšme. Po to šias reikšmes normuoja naudingumo skalėje. Pažymėtina, kad kriterijai j , paprastai turintys skirtingą fizikinę prasmę ir matuojami skirtingais vienetais, normuojami toje pačioje naudingumo skalėje, bet kiekvienas – pagal savo naudingumo funkciją U_j . Šaltinyje [2] siūloma visas projektines reikšmes X_{ij} ($i = 1, m; j = 1, n$) normuoti dalimis tiesinėmis, mažėjančiomis arba didėjančiomis naudingumo funkcijomis U_j , kad gautieji dydžiai U_{ij} ($i = 1, m; j = 1, n$) turėtų naudingumo prasmę, būtų matuojami santykiniais vienetais intervale $[-1; 1]$; čia m – nagrinėjamų variantų (sistemų) skaičius, n – kriterijų skaičius.

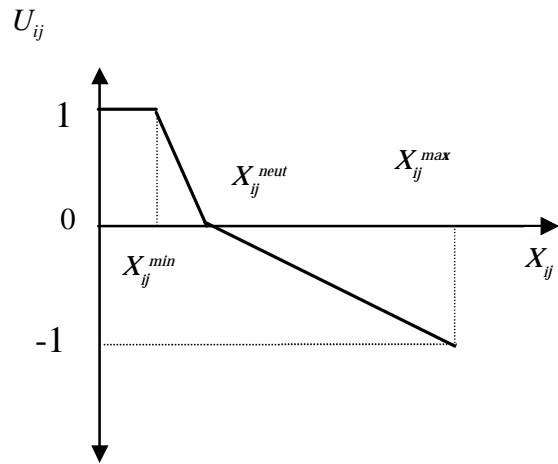
Kriterijaus naudingumo funkciją projektuotojas (ekspertas) sudaro iš tiesinių dalių pagal taškus, vadinamus kriterijaus atskaitos reikšmėmis:

- didžiausią tikėtiną reikšmę X_j^{max} ;
- mažiausią tikėtiną reikšmę X_j^{min} ;
- neutralaus (nulinio) naudingumo reikšmę X_j^{neut} .

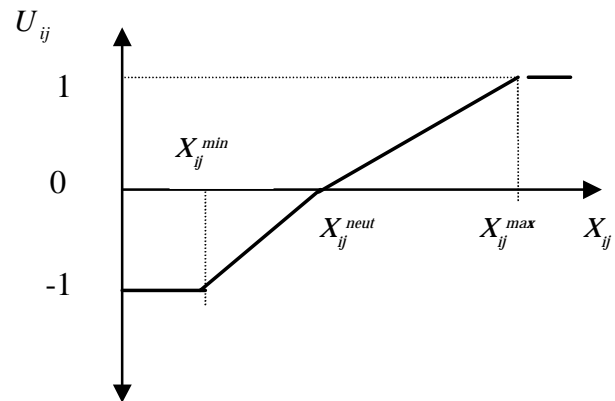
Atskaitos reikšmės nustatomos ekspertiniu būdu. Mažėjančia naudingumo funkcija (1) normuojami kriterijai, kurių didžiausia galima projektinė reikšmė $X_{ij} \geq X_j^{max}$ atitinka didžiausią galimą žalingumą $U_{ij} = -1$ (4 pav.):

$$U_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{kai } X_{ij} \leq X_j^{min}, \\ \frac{X_j^{neut} - X_{ij}}{X_j^{neut} - X_j^{min}}, & \text{kai } X_j^{min} < X_{ij} \leq X_j^{neut}, \\ \frac{X_j^{neut} - X_{ij}}{X_j^{max} - X_j^{neut}}, & \text{kai } X_j^{neut} < X_{ij} < X_j^{max}, \\ -1, & \text{kai } X_{ij} \geq X_j^{max}. \end{cases} \quad (1)$$

Didėjančia naudingumo funkcija (2) normuojami kriterijai, kurių didžiausia galima projektinė reikšmė $X_{ij} \geq X_j^{max}$ atitinka didžiausią galimą naudingumą $U_{ij} = 1$ (5 pav.):



4 pav. Kriterijaus normavimas mažėjančia naudingumo funkcija U_{ij}



5 pav. Kriterijaus normavimas didėjančia naudingumo funkcija U_{ij}

$$U_{ij} = \begin{cases} -1, & \text{kai } X_{ij} \leq X_j^{min}, \\ \frac{X_j^{neut} - X_{ij}}{X_j^{min} - X_j^{neut}}, & \text{kai } X_j^{min} < X_{ij} \leq X_j^{neut}, \\ \frac{X_j^{neut} - X_{ij}}{X_j^{neut} - X_j^{max}}, & \text{kai } X_j^{neut} < X_{ij} < X_j^{max}, \\ 1, & \text{kai } X_{ij} \geq X_j^{max}. \end{cases} \quad (2)$$

Kriterijų svarbumo normavimas. Ne visi kriterijai yra vienodai svarbūs (reikšmingi), todėl projektuotojas arba ekspertas nusistato kriterijų svarbumo (reikšmingumo) koeficientus w_j tenkinančius sąlygą:

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1, \quad 0 \leq w_j \leq 1. \quad (3)$$

Kaip matyti iš (3), šie dydžiai yra normuoti (svoriniai). Jie gaunami, normuojant kriterijų svarbumo laipsnų reitingų skalėje, pvz., 10 balų sistemoje, kurioje

svarbiausiems kriterijams ekspertas gali suteikti 10 balų svarbumo laipsnį (reitingą). Normuojama pagal sąlygą:

$$w_j = \frac{W_j}{\sum_{j=1}^n W_j}; \quad (4)$$

čia W_j – kriterijaus svarbumo laipsnis (reitingas) balais.

Determinuotasis daugiakriterinis naudingumas.

Laikant, kad visi dydžiai U_{ij} yra tiksliai įinomi ir vienas nuo kito nepriklauso (nes ir kriterijai vienas nuo kito nepriklauso), i -ojo varianto (sistemos) parinkimo daugiakriterinis naudingumas R_i ($i = \overline{1, m}$) išreiškiamas:

$$R_i = \sum_{j=1}^n w_j U_{ij}. \quad (5)$$

Kadangi $U_{ij} \in [-1; 1]$, tada ir $R_i \in [-1; 1]$. Geriausias variantas (sistema) yra tas, kurio R_i yra didžiausias. Panašiai varianto naudingumo sąvoka yra formuluojama bei komentuojama [5].

Daugiakriterinio naudingumo R_i priklausomybė nuo kriterijų projektinių reikšmių nusakytina taip:

- variantas pasiekia maksimalų („absoliutų“) naudingumą, t. y. $R_i = 1$, kai visų kriterijų projektinės

reikšmės lygios atskaitos reikšmėms X^{min} arba X^{max} taip, kad kiekvienas U_{ij} būtų maksimalus ($U_{ij} = 1$);

- variantas pasiekia maksimalų („absoliutų“) žalinumą, t. y. $R_i = -1$, kai visų kriterijų projektinės reikšmės lygios atskaitos reikšmėms X^{min} arba X^{max} taip, kad kiekvienas U_{ij} būtų minimalus ($U_{ij} = -1$);

- variantas yra „vidutinio“ naudingumo, t. y. $R_i \approx 0$, jeigu visų kriterijų projektinės reikšmės lygios atskaitos reikšmėms X^{neut} , nes ir kiekvienas U_{ij} yra „neutralaus“ naudingumo ($U_{ij} = 0$).

Informacinių sistemų determinuotojo daugiakriterinio naudingumo skaičiavimas. Centralizuotos topologijos informacinė sistema toliau laikoma pirmąja (pirmuoju variantu), mišriosios topologijos – antrąja, o skaidriosios topologijos – trečiąja. 1 lentelėje pateikiamos autorių ekspertiškai (atliekant projektuotojo, eksperto vaidmenį) parinktos visų 7 kriterijų atskaitos reikšmės, svarbumo laipsniai ir jų norminiai dydžiai (svarbumo koeficientai), 2 lentelėje – kriterijų projektinės reikšmės visoms sistemoms.

3 lentelėje pateikiami kriterijų projektinių reikšmių normavimo naudingumo skalėje rezultatai. Kriterijams X_1, \dots, X_6 taikoma mažėjanti naudingumo funkcija $U_j(1)$, nes didėjant kriterijaus projektinei reikšmei jos naudingumas mažėja (ekonominės sąnaudos, klaidingo darbo trukmė ir kt.). Kriterijui X_7 (plėtros ir naujų paslaugų įdiegimo galimybės) taikytina didėjanti funkcija (2), nes naudingesnė yra didesnė projektinė reikšmė.

1 lentelė. Informacinių sistemų vertinimo kriterijų atskaitos reikšmės ir svarbumo parametrai

Kriterijus X_j	Matavimo vienetas	Atskaitos reikšmės			Svarbumo laipsnis (reitingas) W_j	Svarbumo koeficientas w_j
		X_j^{min}	X_j^{neut}	X_j^{max}		
Projektavimo sąnaudos X_1	sant. vnt.	0,6	1,5	2,5	3	0,11
Realizavimo sąnaudos (investicijos) X_2	sant. vnt.	0,5	1,5	2,5	7	0,25
Eksplotavimo sąnaudos X_3	sant. vnt.	0,6	1,75	2,6	5	0,18
Klaidingo darbo trukmė X_4	h/met	10	18	30	2	0,07
Planinio atjungimo trukmė X_5	h/met	20	55	75	2	0,07
Neplanuoto atjungimo trukmė X_6	h/met	40	55	66	4	0,14
Plėtros ir naujų paslaugų įdiegimo galimybės X_7	balai	0	5	10	5	0,18

2 lentelė. Informacinių sistemų vertinimo kriterijų projektinės reikšmės

Kriterijus X_j	Projektinės reikšmės sistemoms (variantams) $i = 1, 2, 3$			Naudingumo funkcijos pobūdis
	X_{1j}	X_{2j}	X_{3j}	
X_1	1	1,1	1,2	mažėjanti
X_2	1	1,15	1,25	mažėjanti
X_3	1,55	1	1,1	mažėjanti
X_4	25	17	15	mažėjanti
X_5	60	40	35	mažėjanti
X_6	50	45	40	mažėjanti
X_7	5	6	8	didėjanti

3 lentelė. Nagrinėjamų topologijų informacinių sistemų kriterijų projektinių reikšmių naudingumai

Kriterijus	Projektinių reikšmių naudingumas		
	U_{1j}	U_{2j}	U_{3j}
X_{1r}	0,56	0,44	0,33
X_{2r}	0,50	0,35	0,25
X_{3r}	0,10	0,65	0,57
X_{4r}	-0,58	0,13	0,38
X_{5r}	-0,25	0,43	0,57
X_{6r}	0,33	0,67	1,00
X_{7r}	0,00	0,20	0,60

Kaip matyti 3 lentelėje, 1 sistema yra pranašesnė pagal sąnaudų kriterijus X_1 ir X_2 , bet pagal parengties kriterijus pranašesnės 2, 3 sistemos. Pagal (5) apibendrinus naudingumus U_{ij} nustatyti šie sistemų (variantų) daugiakriteriniai naudingumai R_i :

$$R_1 = 0,14,$$

$$R_2 = 0,42,$$

$$R_3 = 0,52.$$

Iš čia matyti, kad visos trys sistemos yra naudingos, geresnės už „neutraalią“ (t. y. vidutinio naudingumo) sistemą (kurios $R \approx 0$). 1 sistema aiškiai atsilieka nuo 2, 3 sistemų, kurių naudingumas panašus. 3 sistema ($R_3 = 0,52$) siekia beveik pusę „absoliučiai“ maksimalaus naudingumo ($R \approx 1$).

5. TIKIMYBINIS NAUJOS ARCHITEKTŪROS INFORMACINIŲ SISTEMŲ DAUGIAKRITERINIS NAUDINGUMAS

Projektinių reikšmių netikslumo problema. Dažnu atveju projektuotojas ar ekspertas neturi tikslių projektinių reikšmių X_{ij} ir jas nustato kaip įvertį – apytikslį, tikėtiniausią dydį. Tačiau determinuotajame modelyje „nėra vietos“ įverčio sąlygotumui, daugiareikšmiškumui, paklaidai, nes jame naudojami tik tikslūs (fiksuoti) dydžiai. Projektuotojo (eksperto) abejonėms įvertinti X_{ij} ir U_{ij} galima nustatyti kaip neryškius (Fuzzy) dydžius su trikampę priklausomybės funkcija. Daugiakriterinį variantų naudingumo metodą, pagrįstą neryškių aibių teorija, yra išnagrinėję G. Dzemyda ir V. Šaltenis [6]. Kitas būdas – taikyti tikimybinis statistinius, t. y. atsitiktinių dydžių metodus. Toliau siūlomas normaliuoju skirstiniu grindžiamas metodas, kuriame kriterijų projektinės reikšmės X_{ij} ir jų naudingumai U_{ij} nustatomi kaip normalieji atsitiktiniai dydžiai su vidurkais \bar{X}_{ij} ir \bar{U}_{ij} ir jų atitinkamais standartiniais nuokrypiais $\sigma_{xij}, \sigma_{uij}$. Kai nuokrypiai lygūs nuliui, tikimybinis statistinis modelis sutampa su determinuotuoju modeliu.

Tikimybinis statistinis daugiakriterinio naudingumo metodas. Tariama, kad projektuotojas (ekspertas) abejoja dėl kriterijaus projektinės reikšmės vienaties ir savo abejonę bando tapatinti su projektinių reikšmių iš-

sibarstymu apie jų matematinį vidurkį \bar{X}_{ij} – tikėtiniausią projektinę reikšmę. Abejonės laipsnis (vertinimo paklaida) prilyginama projektinės reikšmės standartiniam nuokrypiui, kuris reiškiamas tam tikra procentine vidurkio \bar{X}_{ij} dalimi, pvz., 5%, (kai abejonės laipsnis mažas).

Metodą sudaro šios procedūros:

1. Projektuotojas kiekvienai sistemai (variantui) nustato kiekvieno kriterijaus projektinės reikšmės X_{ij} vidurkį, kuris atitinka determinuotojo modelio tikslią projektinę reikšmę X_{ij} ;

2. Projektuotojas įvertina savo abejonės laipsnį (paklaidą) kaip procentinį dydį. Daugindamas iš jo vidurkius \bar{X}_{ij} , gauna projektinių reikšmių standartinius nuokrypius σ_{xij} ($i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}$);

3. Pagal (1) ir (2) apskaičiuojami projektinių reikšmių naudingumų vidurkiai \bar{U}_{ij} , įrašant vietoje X_{ij} jų vidurkius \bar{X}_{ij} . Atskaitos reikšmės $X_{ij}^{min}, X_{ij}^{neut}$ ir X_{ij}^{max} laikomos nustatytos tiksliai;

4. Skaičiuojami projektinių reikšmių naudingumų standartiniai nuokrypiai σ_{uij} ($i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}$):

$$\sigma_{uij} \cong \begin{cases} 0, \text{kai } \bar{X}_{ij} \leq X_{ij}^{min}, \\ \frac{\sigma_{xij}}{X_{ij}^{neut} - X_{ij}^{min}}, \text{kai } X_{ij}^{min} < \bar{X}_{ij} \leq X_{ij}^{neut}, \\ \frac{\sigma_{xij}}{X_{ij}^{max} - X_{ij}^{neut}}, \text{kai } X_{ij}^{neut} < \bar{X}_{ij} < X_{ij}^{max}, \\ 0, \text{kai } \bar{X}_{ij} \geq X_{ij}^{max}; \end{cases} \quad (6)$$

5. Skaičiuojamas sistemos (varianto) daugiakriterinio naudingumo vidurkis \bar{R}_i :

$$\bar{R}_i = \sum_{j=1}^n w_j \bar{U}_{ij}. \quad (7)$$

Kaip matyti iš (5) lygties, šis vidurkis sutampa su sistemos determinuotuoju daugiakriteriniu naudingumu R_i ;

6. Iš naudingumų standartinių nuokrypių σ_{uij} randamas i -osios sistemos (varianto) daugiakriterinio naudingumo standartinis nuokrypis:

$$\sigma_{Ri} = \sqrt{\sum_{j=1}^n \frac{w_j^2 \sigma_{Uij}^2}{n}}; \quad (8)$$

7. Su tikimybe 0,95 randamas daugiakriterinio naudingumo R_i , kuris yra normaliai pasiskirstęs atsitiktinis

dydis su vidurkiu \bar{R}_i ir standartiniu nuokrypiu σ_{R_i} , pasikliautinis intervalas [7]:

$$\bar{R}_i - 1,96 \cdot \sigma_{R_i} < R_i < \bar{R}_i + 1,96 \cdot \sigma_{R_i} \quad (9)$$

arba

$$P(\bar{R}_i - 1,96 \cdot \sigma_{R_i} < R_i < \bar{R}_i + 1,96 \cdot \sigma_{R_i}) = 0,95; \quad (10)$$

8. Norint palyginti dvi sistemas, būtina nustatyti, ar skirtumas tarp jų R_i ir R_k yra reikšmingas. Tam galima panaudoti skirtumo $\Delta_{ik} = R_i - R_k$ pasikliautinį intervalą su 0,95 tikimybe:

$$\bar{R}_i - \bar{R}_j - 1,96 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{R_i}^2 + \sigma_{R_j}^2}{2}} < \Delta_{ij} < \bar{R}_i - \bar{R}_j + 1,96 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{R_i}^2 + \sigma_{R_j}^2}{2}}. \quad (11)$$

Kai į intervalą (11) patenka ir nulis, skirtumas Δ_{ik} yra nereikšmingas. Jeigu Δ_{ik} reikšmingai skiriasi nuo nulio ir yra teigiamas, tada dydis R_i su tikimybe 0,95 yra didesnis už R_k , o jei Δ_{ik} reikšmingai skiriasi nuo nulio ir yra neigiamas, tada R_i su tikimybe 0,95 yra mažesnis už R_k .

Šis metodas yra geras tuo, kad galima įvertinti ne tik vidutinį daugiakriterinį naudingumą \bar{R}_i , bet ir jo sklaidą standartiniu nuokrypiu σ_{R_i} , pagal kurio dydį galima spręsti, kiek patikimas gautas rezultatas.

Informacinių sistemų tikimybinio daugiakriterinio naudingumo skaičiavimas. Imame atvejį, kai projektuotojas į savo nustatytas kriterijų projektines reikšmes X_{ij} ($i = 1,3; j = 1,7$), pateiktas 2 lentelėje, žiūri su abejojone, kurios laipsnį išreiškia mažų mažiausiai 5% standartiniu nuokrypiu (palankiausias atvejis) arba daugių daugiausiai 10% standartiniu nuokrypiu (nepalankiausias atvejis). Standartinių nuokrypių absoliutiniai dydžiai kriterijų matavimo vienetais suskaičiuoti 4 lentelėje, dauginant vidurkį \bar{X}_{ij} iš 0,05 ir 0,10.

Nuo 4 lentelėje pateiktų dydžių pagal (6) galima pereiti prie atitinkamų naudingumų standartinių nuokrypių σ_{uj} (5 lentelė), o nuo šių pagal (7) – prie sistemų (variantų) daugiakriterinių naudingumų standartinių nuokrypių σ_{Ri} (kriterijų projektinių reikšmių naudingumų vidurkiai \bar{U}_{ij} imami iš 3 lentelės, o kriterijų svarbumo koeficientai w_j – iš 2 lentelės), pateiktų 6 lentelėje.

Šiais nuokrypiais apibūdinama daugiakriterinių naudingumų R_1, R_2, R_3 normalioji statistinė sklaida apie vidurkius $\bar{R}_1 = 0,19, \bar{R}_2 = 0,42, \bar{R}_3 = 0,52$. Sklaida prilyginama dviem (tiksliau 1,96) standartiniams nuokrypiams σ_{Ri} , kuri garantuoja, kad daugiakriterinis naudingumas R_i pateks į šios sklaidos intervalą (pasikliautinį intervalą) su 95% tikimybe (7 lentelė) [7].

4 lentelė. Kriterijų projektinių reikšmių standartiniai nuokrypiai σ_{xij} nagrinėjamų topologijų sistemoms

Kriterijaus projektinės reikšmės X_{ij} standartinis nuokrypis	Matavimo vienetas	$\sigma_{xij} = 5\% \bar{X}_{ij}$			$\sigma_{xij} = 10\% \bar{X}_{ij}$		
		$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$
σ_{X11}	sant. vnt.	0,050	0,055	0,060	0,100	0,110	0,120
σ_{X12}	sant. vnt.	0,050	0,058	0,063	0,100	0,115	0,125
σ_{X13}	sant. vnt.	0,078	0,050	0,055	0,155	0,100	0,110
σ_{X14}	h/met	1,250	0,850	0,750	2,500	1,700	1,500
σ_{X15}	h/met	3,000	2,000	1,750	6,000	4,000	3,500
σ_{X16}	h/met	2,500	2,250	2,000	5,000	4,500	4,000
σ_{X17}	balai	0,250	0,300	0,400	0,500	0,600	0,800

5 lentelė. Kriterijų projektinių reikšmių naudingumų standartiniai nuokrypiai σ_{uij} nagrinėjamų topologijų sistemoms

Naudingumo U_{ij} standartinis nuokrypis	$\sigma_{xij} = 5\% \bar{X}_{ij}$			$\sigma_{xij} = 10\% \bar{X}_{ij}$		
	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$
σ_{u11}	0,056	0,061	0,067	0,111	0,122	0,133
σ_{u12}	0,050	0,058	0,063	0,100	0,115	0,125
σ_{u13}	0,067	0,043	0,048	0,135	0,087	0,096
σ_{u14}	0,104	0,106	0,094	0,208	0,213	0,188
σ_{u15}	0,150	0,057	0,050	0,300	0,114	0,100
σ_{u16}	0,167	0,150	0,000	0,333	0,300	0,000
σ_{u17}	0,050	0,060	0,080	0,100	0,120	0,160

6 lentelė. Nagrinėjamų topologijų sistemų daugiakriterinių naudingumų standartiniai nuokrypiai σ_{Ri}

Kai $\sigma_{xij} = 5\%$ \bar{X}_{ij}			Kai $\sigma_{xij} = 10\%$ \bar{X}_{ij}		
σ_{R1}	σ_{R2}	σ_{R3}	σ_{R1}	σ_{R2}	σ_{R3}
0,034	0,031	0,025	0,068	0,062	0,050

7 lentelė. Nagrinėjamų sistemų daugiakriterinių naudingumų R_i pasikliautiniai intervalai su 95% tikimybe

Kai $\sigma_{xij} = 5\%$ \bar{X}_{ij}			Kai $\sigma_{xij} = 10\%$ \bar{X}_{ij}		
R_1	R_2	R_3	R_1	R_2	R_3
(0,12; 0,26)	(0,36; 0,48)	(0,47; 0,57)	(0,06; 0,32)	(0,30; 0,54)	(0,42; 0,62)

8 lentelė. Nagrinėjamų sistemų daugiakriterinių naudingumų R_i statistinių skirtumų Δ_{ij} pasikliautiniai intervalai su 95% tikimybe

Kai $\sigma_{xij} = 5\%$ \bar{X}_{ij}			Kai $\sigma_{xij} = 10\%$ \bar{X}_{ij}		
Δ_{21}	Δ_{23}	Δ_{31}	Δ_{21}	Δ_{23}	Δ_{31}
(0,168; 0,295)	(-0,150; -0,039)	(0,268; 0,385)	(0,104; 0,359)	(-0,205; 0,016)	(0,209; 0,443)

Nustatytųjų pasikliautinių intervalų išsidėstymas naudingumo skalėje pavaizduotas 6 pav.

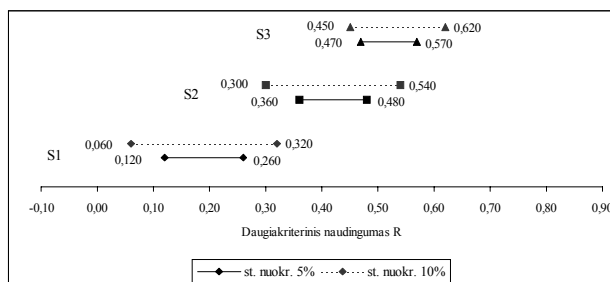
Pagal pasikliautinių intervalų išsidėstymą skirtingų topologijų sistemų naudingumus galima apibūdinti šiomis išvadomis:

1) kuo didesnio naudingumo sistema, tuo jos sklaida mažesnė: naudingumų pasikliautiniai intervalai trumpėja pereinant prie didesnio naudingumo sistemų: R_1 , R_2 ir R_3 ilgiai yra atitinkamai 0,14; 0,12; 0,10 sant. vnt., esant abejonei $\sigma_{xij} = 5\%$, ir atitinkamai 0,26; 0,24; 0,20 sant. vnt., esant $\sigma_{xij} = 10\%$;

2) centralizuota topologija (1 sistema) pasiteisina ir nepalankiausiu atveju ($R_1 = 0,06$, kai abejonė $\sigma_{xij} = 10\%$) – ji lieka truputį geresnė už „neutralią“ (nulinio naudingumo) sistemą;

3) esant mažesnei projektuotojo abejonei ($\sigma_{xij} = 5\%$), mišrioji topologija (2 sistema) ir blogiausiu atveju visada bus geresnė už centralizuotą topologiją (1 sistema), tačiau padidėjus abejonei (iki $\sigma_{xij} = 10\%$), įmanomas atvejis, kad didžiausio naudingumo 1 sistema prilygs mažiausio naudingumo 2 sistemai (jų pasikliautinių intervalų kraštai susiliečia);

4) esant mažesnei projektuotojo abejonei ($\sigma_{xij} = 5\%$), mišrioji topologija (2 sistema) gali prilygti mažiausio naudingumo skaidriajai topologijai (3 sistema) – jų pasikliautinių intervalų kraštai susiliečia, o padidėjus abejonei (iki $\sigma_{xij} = 10\%$) sistemų pasikliautiniai intervalai persidengia per pusę ilgio, taigi sistemos dažnu atveju bus lygiavertės.



6 pav. Centralizuotosios topologijos (S1), mišriosios topologijos (S2) ir skaidriosios topologijos (S3) daugiakriterinių naudingumų sklaida esant skirtingiems eksperto abejonės laipsniams (st. nuokr. – standartinis nuokrypis)

Sistemų naudingumų statistinius skirtumus įvertinti padeda (11) sąlyga (8 lentelė).

Pasikliautinio intervalo ribos reiškiamos bemačiais vienetais skaičių ašyje nuo -1 iki +1, ir kuo viena iš ribų yra arčiau šių taškų, tuo didesnis sistemų naudingumo skirtumas statistiniu požiūriu. Tarp apskaičiuotųjų intervalų tik vienas (Δ_{23}) apima 0, taigi mišrioji topologija (S2) prilygsta skaidriajai topologijai (S3), kai projektuotojo abejonė siekia $\sigma_{xij} = 10\%$. Jeigu laikoma, kad intervalo riba reikšmingai skiriasi nuo nulio tada, kai didesnė už 0,10 (arba mažesnė už -0,10), tai mažesnės projektuotojo abejonės atveju ($\sigma_{xij} = 5\%$) tarp minėtųjų topologijų atsiranda nereikšmingas skirtumas (apatinė riba -0,039). Centralizuota (S1) „priartėja“ prie mišriosios topologijos (S2) tik didesnės projektuotojo abejonės atveju ($\sigma_{xij} = 10\%$), nes intervalo riba 0,104 \approx 0,10.

6. IŠVADOS

1. Rekomenduotina Lietuvoje diegti naujosios architektūros vėjo elektrinių parkų informacines sistemas, atitinkančias standarto **IEC 61400-25** (Vėjo turbogeneratorių sistemos. 25 dalis. Vėjo elektrinių stebėjimo ir valdymo komunikacijos) reikalavimus (nors standartas dar nėra priimtas).

2. Pasiūlytasis normaliuoju skirstiniu grindžiamas tikimybinis daugiakriterinio naudingumo metodas leidžia įvertinti daugiakriterinio naudingumo sklaidą standartiniais nuokrypiais ir geriau nei determinuotasis metodas nustatyti nagrinėjamų sistemų (variantų) naudingumo skirtumus.

3. Remiantis apytiksliais išėjimo duomenimis, galima teigti, kad visos trys naujosios architektūros informacinių sistemų komunikacinės topologijos (centralizuota, mišrioji ir skaidrioji) yra efektyvios, geresnės už „vidutinio naudingumo“ sistemą, kurios daugiakriterinis naudingumas (jo vidurkis) $R \approx 0$. Mišrioji topologija beveik prilygsta skaidriajai topologijai, o centralizuotoji visada „atsilieka“ nuo mišriosios topologijos.

4. Didėjant projektuotojo ar eksperto abejonei dėl kriterijų projektinių reikšmių tikslumo, skirtumai tarp nagrinėjamų sistemų (variantų) mažėja. Rekomenduotina iširti, kokią įtaką šiems skirtumams turėtų abejonė dėl kriterijų svarbos koeficientų tikslumo.

5. Pateiktąjį metodą rekomenduotina taikyti kaip sprendimų paramos priemonę parenkant realias informacines sistemas būsimiems vėjo elektrinių parkams Lietuvoje, taip pat vykdant daugiakriterinius konkuruojančių variantų (projektų, strategijų) naudingumo vertinimus energetikos sektoriuje.

Gauta 2006 04 25

Literatūra

1. Elektros energijos, kuriai gaminti naudojami atsinaujinantis ir atliekiniai energijos ištekliai, gamybos ir pirkimo skatinimo tvarka. Patvirtinta Lietuvos Respublikos Vyriausybės 2001 m. gruodžio 5 d. nutarimu Nr. 1474 (Lietuvos Respublikos Vyriausybės 2004 m. sausio 13 d. nutarimo Nr. 25 redakcija) (Žin., 2004, Nr. 9-228).
2. Nemura A., Klementavičius A. Multi-criterion method for policy's utility assessment // Preprints of 7th IFAC Symposium on Automated Systems Based on Human Skill. Joint Design of Technology and Organization. Aachen, Germany, June 15–17, 2000. P. 235–238.
3. IEC 61400-25, Wind Turbine Generator Systems - Part 25: Communications for monitoring and control of wind power plants (1st commission draft – final to IEC), 2003 07 04.
4. Vaičiukynas E., Nemura A. Informacinių ir valdymo technologijų taikymas elektros energetikoje // Informacinių ir valdymo technologijų taikymas elektros energetikoje. Lietuvos MA Technikos skyriaus susirinkimo-konferencijos pranešimų medžiaga. 2005 m. birželio 10 d. Lietuvos energetikos institutas. P. 23–33.
5. Zavadskas E. K., Simanuskas L., Kaklauskas A. Sprendimų paramos sistemos statyboje. Vilnius: Technika, 1999. P. 236.
6. Dzemyda G., Šaltenis V. Multiple Criteria Decision Support System: Methods, User's Interface and Applications // Informatica. 1994. Vol. 5. No. 1–2. P. 31–42.
7. Wonnacott T. H., Wonnacott R. J. Introductory Statistics for Business and Economics. Second edition. 1977. P. 753.

Antanas Nemura, Arturas Klementavičius

THE ANALYSIS OF INFORMATION SYSTEM OF A WIND FARM USING THE STATISTICAL MULTI-CRITERIA UTILITY METHOD

Summary

Dealing with information systems of wind farms, promoters and designers encounter a problem of choosing the most appropriate communication variant. The information systems of CORBA and COM types still in use do not respond to the new challenges.

The paper deals with the distinctive characteristics of communication variants of information systems developed in accordance with the concept of the standard IEC 61400-25 Wind Turbine Generator Systems – Part 25: Communications for monitoring and control of wind power plants. Three communication variants are subjected to comparison: centralised topology, mixed topology and seamless topology. To evaluate an information system, the relevant

criteria have been proposed (such as design cost, investment cost, outage timescale, etc). The evaluation of utility of communication variants is formulated as a multi-criteria problem. The problem is solved by the deterministic method. Seeking to specify the deterministic estimates received, a new probabilistic-statistical multi-criteria method based on normal distribution is proposed. It allows for the “measurement” of uncertainty of expert's input estimates. The application of the method is demonstrated for the problem in question. The results of solution – the estimates of multi-criteria utility of each communication variants – are discussed. The paper concludes that the method proposed might be a good instrument for comparison of competing projects, strategies or alternatives.

Key words: wind power plant, criterion, communication variant, multiple criteria utility, deterministic method, statistical method, normal distribution

Антанас Немура, Артурас Клементавичюс

АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПАРКА ВЕТРОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ СТАТИСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ПОЛЕЗНОСТИ

Резюме

Учредители и проектировщики парков ветровых электростанций сталкиваются с проблемой выбора коммуникационного варианта информационной системы (ИС). Имеющиеся ИС типа CORBA и COM уже не соответствуют нуждам пользователей. В статье рассмотрены характерные особенности коммуникационных вариантов ИС нового типа, соответствующие концепции стандарта IEC 61400-25 (Системы ветровых турбогенераторов. Часть 25. Коммуникации для мониторинга и управления ветровых электростанций). Сравниваются три коммуникационных варианта (централизованная, смешанная и сплошная топология). Предложены критерии оценки ИС (затраты проектирования, инвестиционные расходы, продолжительность внепланового отключения и др.). Полезность коммуникационного варианта определяется как многокритериальная задача, которая решается методом детерминированной многокритериальной полезности. Для уточнения полученных детерминированных решений разработан новый метод вероятностной многокритериальной полезности, основанный на законе нормального распределения. Метод учитывает сомнения эксперта относительно критериальных значений. Описано применение метода для решения названной задачи, обсуждены полученные результаты – оценки многокритериальной полезности каждого коммуникационного варианта. В заключение делается вывод о том, что указанный метод позволяет удобно сравнивать конкурирующие проекты, варианты, альтернативы.

Ключевые слова: ветровая электростанция, критерий, коммуникационный вариант, многокритериальная полезность, детерминированный метод, статистический метод, нормальное распределение