

Atominės elektrinės saugą veikiančių ekstremalių vėjų tikimybinis vertinimas

Robertas Alzbutas^{1,2},

Kristina Kupčiūnienė¹,

Svetlana Lysak^{2,3}

¹ Lietuvos energetikos institutas,
Branduolinių įrenginių saugos
laboratorija, Breslaujos g. 3,
LT-44403 Kaunas
El. paštas: robertas@mail.lei.lt

² Kauno technologijos universitetas,
Fundamentaliųjų mokslų fakultetas,
Studentų g. 50, LT-51368 Kaunas

³ Vilniaus Gedimino technikos
universitetas, Fundamentinių mokslų
fakultetas, Saulėtekio al. 11,
LT-110223 Vilnius

Ekstremalių išorinių įvykių, kažkiek turinčių įtakos AE saugai, modeliavimas yra aktualus norint įvertinti jų riziką ir siekiant išvengti saugai svarbių sistemų pažeidimų. Šių įvykių atsiradimo tikimybės įvertinamos naudojant statistikos duomenis bei tikimybinis modelius. Taip pat naudojama Lietuvos energetikos institute plėtojama rizikos ir jautrumo analizės metodika. Ši metodika visų pirma yra susijusi su tikimybinio modeliavimu ir vadinamoju geriausio įverčio skaičiavimu bei neapibrėžtumo analize.

Šiame straipsnyje pateikiama bendra ekstremalių išorinių įvykių atrinkimo ir analizės metodologija. Kaip atskiro ekstremalaus įvykio tikimybinio vertinimo pavyzdys straipsnyje detaliau nagrinėjamas vienas ekstremalių išorinių įvykių – tai ekstremalus vėjas. Šis įvykis gali padaryti labai daug žalos ne tik vėjo elektrinėms, bet ir kitoms, su vėju nesusijusioms, techninėms konstrukcijoms. Norint įvertinti ekstremalaus vėjo įtaką AE saugai atlikta įvykio atsiradimo tikimybė analizė: surinkti ir išanalizuoti statistikos duomenys, sudarytas tikimybinis modelis bei atlikta modeliavimo duomenų neapibrėžtumo ir jautrumo analizė.

Raktažodžiai: ekstremalus įvykiai, tikimybinis vertinimas, ekstremalus vėjai, jautrumo ir neapibrėžtumo analizė

1. ĮVADAS

Nors jau sprendžiami Ignalinos atominės elektrinės (AE) uždarymo klausimai, tačiau darbai siekiant branduolinės saugos užtikrinimo Lietuvoje vykdomi ir toliau. Be to, su Ignalinos AE eksploatacija ir jos uždarymu taip pat yra susiję naujų branduolinių objektų tyrimai. Viena vertus, tai panaudoto kuro saugyklos, kuriose bus saugoma vidutinio ir labai didelio radioaktyvumo atliekos ir panaudotas branduolinis kuras. Kita vertus, dėl Ignalinos AE uždarymo pastaruoju metu labai intensyviai analizuojamos galimybės statyti naują atominę elektrinę. Atliekamos įvairios mokslinės studijos, kuriose nagrinėjami ekonominiai, techniniai ir socialiniai tokio sprendimo aspektai. Vienas svarbiausių tikslų yra branduolinės jėgainės sauga, kuri siejasi ne tik su AE galimu poveikiu aplinkai, bet ir su aplinkos, t. y. galimų ekstremalių įvykių, poveikiu AE ir šio poveikio tikėtumu.

Daugumos veikiančių reaktorių, tarp jų ir Ignalinos AE, aktyviosios zonos pažeidimo dažnis turi būti mažesnis, nei vienas įvykis per 100 000 metų. Šiam vienam svarbiausių AE saugos rodiklių ir, bendruoju atveju, visų branduolinių objektų rizikai gali turėti įtakos ne tik pavojingi vidiniai įvykiai, bet ir branduolinių objektų aplinkoje galimi tokie įvykiai, kaip katastrofiniai gamtos reiškiniai arba žmogaus veiklos sąlygotos didelės avarijos. Prie tokių nuo AE darbo nepriklausančių, vadinamųjų išorinių įvykių galima priskirti lėktuvo kritimą ant AE pastatų ar šalia jų. Taip

pat galima išskirti ekstremalius kritulius bei potvynius, išorinį gaisrą, ekstremalius vėjus ir kitus reiškinis, kurie priklausomai ir nuo branduolinės jėgainės projekto gali turėti įtakos branduolinės jėgainės saugai [1]. Kadangi atominės elektrinės rizika vertinama atsižvelgiant ne tik į vidinius, bet ir į išorinius įvykius, tai jų atsiradimo dažnio ir įtakos elektrinės saugai analizė yra ne mažiau svarbi. Tokie išoriniai įvykiai nagrinėjami atsižvelgiant į AE geografinę vietą, meteorologines ir kitas sąlygas.

Ekstremalių išorinių įvykių, galbūt turinčių įtakos AE saugai, modeliavimas yra aktualus norint įvertinti jų riziką ir siekiant išvengti saugai svarbių sistemų pažeidimų. Šių įvykių atsiradimo tikimybės įvertinamos naudojant statistikos duomenis bei tikimybinis modelius. Taip pat naudojama Lietuvos energetikos institute plėtojama įvykių rizikos ir jautrumo analizės metodika [2]. Ši metodika pirmiausia yra susijusi su tikimybinio modeliavimu ir vadinamoju geriausio įverčio skaičiavimu bei neapibrėžtumo analize.

Šiame straipsnyje pateikiama bendra ekstremalių išorinių įvykių atrinkimo ir analizės metodologija. Kaip atskiro ekstremalaus įvykio tikimybinio vertinimo pavyzdys straipsnyje nuodugniau nagrinėjamas vienas ekstremalių išorinių įvykių – tai ekstremalus vėjas, galintis padaryti labai daug žalos ne tik vėjo elektrinėms, bet ir kitoms, su vėju nesusijusioms, techninėms konstrukcijoms. Norint įvertinti ekstremalaus vėjo įtaką AE saugai pirmiausia atliekama įvykio atsiradimo tikimybė anali-

zė: surenkami ir analizuojami statistikos duomenys, sudaromas tikimybinis modelis bei atliekama modeliavimo duomenų neapibrėžtumo ir jautrumo analizė.

2. EKSTREMALIŲ IŠORINIŲ ĮVYKIŲ ATRINKIMAS IR ANALIZĖS METODOLOGIJA

Plėtojant statistikos duomenų apdorojimo bei galimų įvykių tikimybių vertinimo ir tyrimo metodologijas yra laikomasi tokių principų:

- Taikomi tik tie tyrimų metodai, kurie nurodomi tarptautinės atominės energijos agentūros (TATENA) dokumentuose [2] ar oficialiose tikimybinės saugos analizės (TSA) ataskaitose;

- Statistikos duomenų analizei bei išorinių įvykių tikimybių įvertinimui taikomi tik gerai žinomi, patikrinti statistiniai ir tikimybiniai metodai.

Kiekviena AE saugos analizė pradedama nuo inicijuojančių įvykių analizės. Pagal apibrėžimą, kurį pateikia TATENA [2], inicijuojantis įvykis yra toks įvykis, kuris AE kiek galint sukuria įvykių seką, sąlygojančią reaktoriaus aktyviosios zonos pažeidimą. Saugos analizės metu reikia įvertinti tokių įvykių atsiradimo dažnius ir jų įtaką branduolinio objekto saugai. Įprastai inicijuojančių įvykių dažniai yra skaičiuojami atsižvelgiant į tai, kiek kartų per metus įvyksta toks įvykis, tačiau tai nėra taip paprasta retų įvykių atveju.

Bendruoju atveju inicijuojančių įvykių analizė susideda iš tokių aštuonių žingsnių:

1. Inicijuojančių įvykių identifikavimas;
2. Kiekvieno inicijuojančio įvykio parametrų nustatymas;
3. Atrankos analizė pagal poveikį;
4. Detali atrankos analizė pagal dažnius;
5. Detalus parametrizavimas;
6. Pavojaus analizė;
7. Jautrumo analizė;
8. Dokumentacija.

Prieš apibrėžiant pradinį inicijuojančių įvykių, kurie gali turėti įtakos bendrai Ignalinos AE rizikai, sąrašą, reikia analizuoti visus galimus, AE pavojingus, įvykius. Bendras tokių įvykių sąrašas yra rekomenduojamas TATENA reguliuojančiame dokumente 50-SG-S9 [3] ir NRC dokumente (NUREG/CR-2300 [4]). Inicijuojančio įvykio dažnis ir įtaka priklauso nuo AE geografinės padėties, regiono geologinių ir hidrometeorologinių sąlygų, pramonės bei karinių objektų santalkos regione, įvairaus tipo transporto intensyvumo bei kitų žmogaus veiklų. Paprastai išorinių inicijuojančių įvykių sąrašas dalijamas į dvi grupes – gamtos jėgų sukelti įvykiai ir įvykiai, susiję su žmogaus veikla.

Gamtos jėgų sukelti įvykiai:

- atmosferoje vykstantys išoriniai įvykiai (stiprūs vėjai, viesulai, liūtys, ekstremalūs temperatūrų pokyčiai, sausros, žaibai, rūkas, meteoritų kritimas);

- išoriniai įvykiai, vykstantys ant žemės arba po žeme (žemės drebėjimas, žemės sluoksnių judėjimas, vulkanų išsiveržimas, dirvožemio įgriuvos, krantų erozija);

- išoriniai gaisrai (aplink AE teritoriją esančių miškų gaisrai, durpynų gaisrai).

Išoriniai įvykiai, susiję su žmogaus veikla:

- sprogimas (dujų, kuro, amunicijos, cheminių ir kt. medžiagų sprogimas);

- transporto avarijos (orlaivio nukritimas, automobilių ar vandens kelių transporto avarijos, traukinių avarijos);

- avarijos, susijusios su pavojingų medžiagų transportavimu (transporto, gabenančio sprogstančias, nuodingas, radioaktyvias, lengvai užsidegančias medžiagas);

- pramoninių ir karinių objektų avariniai įvykiai (sprogimas, techninių konstrukcijų griūtis, toksinių ir nuodingų medžiagų emisijos į aplinką, amunicijos sprogimas, neautorizuoti raketų šūviai, avarijos, susijusios su dujų ar mazuto vamzdžių laidojimu);

- diversijos ir terorizmo aktai.

Norint išskirti tuos išorinius įvykius, kurių įtaka saugumui yra reikšmingiausia, paprastai naudojami TSA atlikimo procedūrose aprašyti įvykių atrankos kriterijai [4]. Išoriniai įvykiai yra neįtraukiami į tolesnę detalią analizę, jeigu jie tenkina bent vieną iš kriterijų:

- 1 kriterijus. Įvykiai, kurie yra nustatyti projektuojant AE ir įtraukti į projektinių avarijų analizę arba yra analogiški minėtiems įvykiams, bet mažiau pavojingi;

- 2 kriterijus. Įvykio dažnis yra žymiai mažesnis, palyginus su dažniu kitų įvykių, turinčių panašias pasekmes, arba jo pasekmės yra mažiau pavojingos nei minėtų įvykių;

- 3 kriterijus. Įvykis negali įvykti pakankamai arti AE, kad turėtų įtakos jos saugai;

- 4 kriterijus. Įvykis yra įtrauktas į kito įvykio apibrėžimą;

- 5 kriterijus. Įvykio vystymosi eiga labai lėta ir yra pakankamai laiko tam, kad būtų eliminuotas pavojaus šaltinis arba paruošta reikalinga apsauga.

Šių kriterijų naudojimas leidžia daugiau dėmesio skirti svarbiems įvykiams bei sumažinti inicijuojančių įvykių sąrašą. Pagal inicijuojančių įvykių atrankimo metodologiją yra išskiriami tokie ekstremalūs išoriniai įvykiai, turintys didelę įtaką Ignalinos AE saugai: orlaivio nukritimas; ekstremalūs vėjai; išorinis gaisras; ekstremalūs krituliai ir potvyniai.

Nepaisant to, kad ekstremalaus įvykio tikimybės įvertis gali būti labai mažas, jis turi būti nuodugnai analizuojamas, jei gali turėti labai sunkių pasekmių, pvz., lėktuvo kritimas [6]. Ekstremalus vėjas taip pat gali padaryti labai daug žalos. Nagrinėjant ekstremalaus vėjo įtaką AE rizikai, pirmiausia vertinamas įvairaus vėjo greičio tikėtinumai.

3. TIKIMYBINIS EKSTREMALIŲ VĖJŲ MODELIS

Vėjas – gamtos reiškinys, susijęs su oro judėjimu. Bendruoju atveju jis gali būti skirstomas pagal greitį, kryptį ir griovimo galią. Pagal greitį vėjo stiprumas gali būti skirstomas taip:

- silpnas vėjas – apie 5 m/s;
- vidutinis vėjas – apie 7 m/s;
- stiprus vėjas – apie 15 m/s;
- audra – apie ir daugiau kaip 23 m/s;
- uraganas – daugiau kaip 33 m/s.

Didelę įtaką vėjo stiprumui turi vietovės, kurioje stebimas vėjas, geografinės sąlygos (vietovės aukštis, reljefas ir kt.). Stipriausi vėjai kyla virš didelių lygių paviršių, pvz., didelių vandens telkinių, atvirų pakrančių erdvių ir t. t. Vėjo greitis keičiasi priklausomai nuo aukščio virš žemės paviršiaus, pvz., 100 m virš žemės vidutinis vėjo greitis gali padvigubėti, palyginus su vėjo greičiu prie pat žemės. Paprastai kuo aukščiau, tuo vėjo greitis didesnis.

Vėjo intensyvumą yra priimta vertinti pagal skales. Plačiausiai naudojamos skalės: Boforto, Safiro-Simpsono, Fudžita ir kt. [5]. Boforto skalė – tai vizualinis vėjo greičio stiprumo nustatymas, jo intensyvumas vertinamas nuo 0 iki 12 balų. Safiro-Simpsono skalė yra sudaryta iš 5 kategorijų, kuriomis vertinamas didesnis nei 33 m/s vėjo greitis. Fudžita skalės kategorijomis dažniausiai vertinami sukuriniai vėjai (viesulai).

Vėjas laikomas stichiniu, jei jo greitis pasiekia 30 m/s, katastrofiniu – jei jo greitis pasiekia 35 m/s. Tokie ir stipresni vėjai yra laikomi ekstremaliais. Ekstremalių vėjų sąvoka apima stiprius vėjus arba uraganus, viesulus, cikloninius vėjus ir pan. Tikėtinausi ekstremalūs vėjai, kurie gali turėti įtakos AE Lietuvoje, yra stiprūs vėjai ir vėjo sukuriniai, t. y. viesulai.

Stiprių vėjų įtakos AE rizikos tyrimui pirmiausia būtina įvertinti įvairių vėjų atsiradimo tikimybes, t. y. įvairių vėjo greičių tikimybes. Dažniausiai tikimybė, kad vėjo greitis neviršys tam tikro ekstremalaus dydžio, apibrėžiama pirmojo tipo ekstremalių reikšmių (Gumbelio) pasiskirstymo funkcija, o jos parametrai yra nustatomi statistiškai:

$$F(x) = e^{-e^{-(x-\mu)/\sigma}}; \quad (1)$$

čia μ – dažnio parametras, σ – nuokrypio parametras. Šie parametrai apskaičiuojami taip:

$$\mu = \bar{X} - \gamma\sigma, \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{s\sqrt{6}}{\pi}; \quad (3)$$

čia \bar{X} – vėjo greičių imties vidurkio įvertis, konstanta $\gamma = 0,5772$ yra Eulerio skaičius, s – vėjo greičių imties standartinio nuokrypio įvertis. Taip sudaryto modelio parametrai apskaičiuojami remiantis meteorologiniais duomenimis.

Ekstremalių vėjų atsiradimo tikimybės įvertinimui naudojamas Gumbelio skirstinio funkcijos papildinys, kitaip vadinamas garantijų funkcija, kuri parodo tikimybę, kad vėjo greitis X bus didesnis už tam tikrą ribinį dydį x :

$$G(x) = P(X > x) = 1 - F(x); \quad (4)$$

$$G(x, \mu, \sigma) = 1 - e^{-e^{-(x-\mu)/\sigma}}. \quad (5)$$

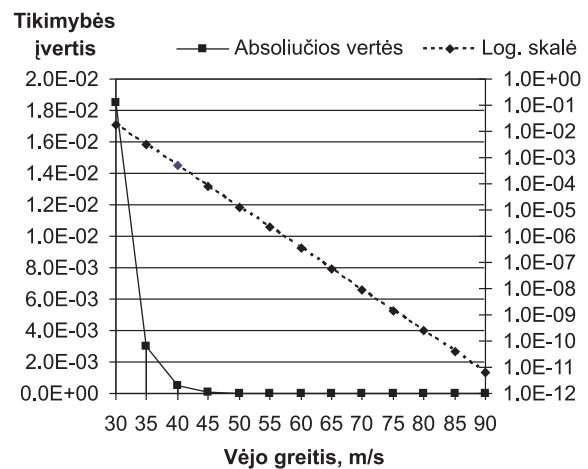
Kadangi tolesnis tyrimas siejamas su vidurkio ir standartinio nuokrypio įverčiais, tai galutinė ekstremalaus vėjo Gumbelio tikimybinio modelio išraiška įgyja tokį pavidalą:

$$G(x, \bar{X}, s) = 1 - e^{-e^{-\left(\frac{x - \bar{X} - 0,5772 \frac{\sqrt{6}}{\pi}}{s}\right)}}. \quad (6)$$

Skaičiavimams naudojami vėjo greičio duomenys yra gauti iš Lietuvos hidrometeorologijos tarnybos. Imama 2003–2007 metų kiekvieno mėnesio maksimali vėjo greičio reikšmė. Tokiu būdu 5-iems metams gaunama 12 maksimumų ir apskaičiuojamas jų vidurkis bei standartinis nuokrypis. Naudojant pritaikytą modelį, apskaičiuojama, kokia yra tikimybė, kad per metus atsiras didesnis nei 30–90 m/s vėjas (1 lentelė), ir nubraižomas atitinkamas tikimybių kitimo grafikas (1 pav.).

1 lentelė. Stichinio, katastrofinio ir dar ekstremalesnių vėjų tikimybė per metus

Vėjo greitis m/s	Tikimybė per metus
30	$1,85 \cdot 10^{-2}$
35	$3,04 \cdot 10^{-3}$
40	$4,95 \cdot 10^{-4}$
45	$8,06 \cdot 10^{-5}$
50	$1,31 \cdot 10^{-5}$
55	$2,13 \cdot 10^{-6}$
60	$3,47 \cdot 10^{-7}$
65	$5,65 \cdot 10^{-8}$
70	$9,20 \cdot 10^{-9}$
75	$1,50 \cdot 10^{-9}$
80	$2,44 \cdot 10^{-10}$
85	$3,96 \cdot 10^{-11}$
90	$6,45 \cdot 10^{-12}$



1 pav. Ekstremalių vėjų atsiradimo per metus tikimybės įvertis

4. EKSTREMALIŲ VĖJŲ MODELIAVIMO NEAPIBRĖŽTUMO IR JAUTRUMO ANALIZĖ

Pagrindinės ekstremalaus vėjo charakteristikos (pvz., greitis) yra matuojamos tiesiogiai, todėl dėl tyrimo metu nesukontroliuojamų trikdžių susidaro matavimo prietaisų ir kt. paklaidos. Bendroju atveju paklaidos vertinamos matuojamų dydžių nukrypimus laikant atsitiktiniais dydžiais.

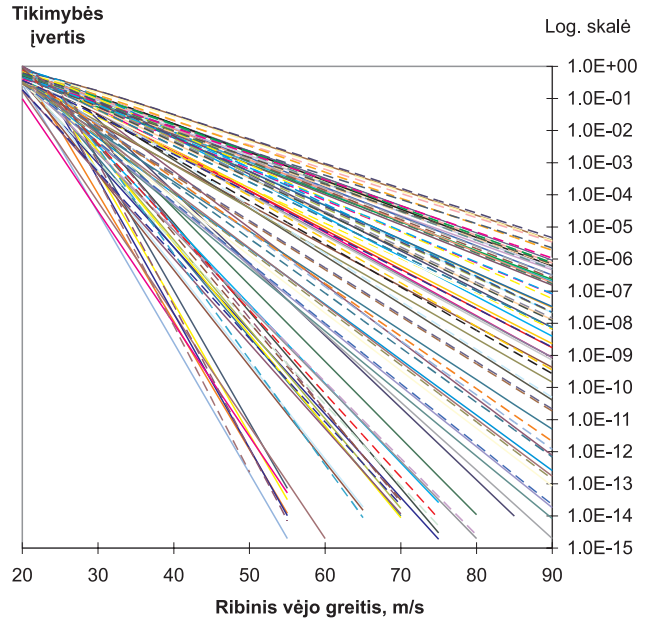
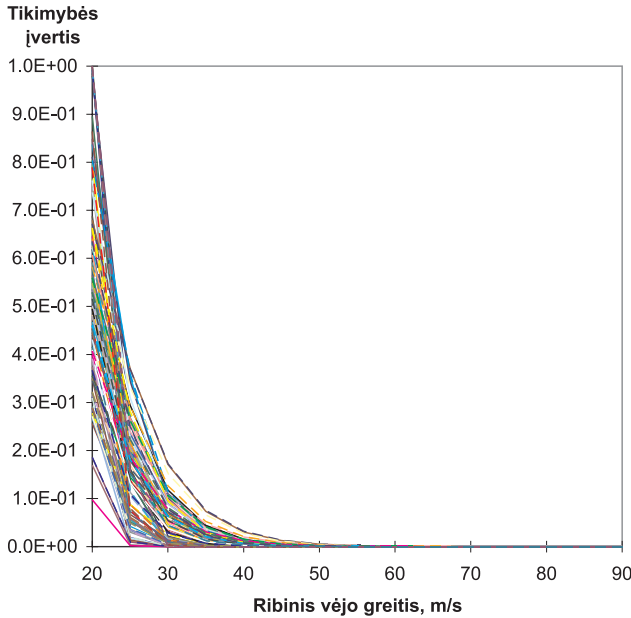
Matuojamiems dydžiams gali turėti įtakos geografinė padėtis, t. y. kurioje vietovėje ir kuriame aukštyje yra stebimas vėjo greitis. Be to, didelės įtakos turi oro sąlygos – kiekvieną kartą jos būna vis kitokios. Matuojant vėjo greitį ypač svarbus yra laikas, t. y. matavimo periodiškumas ir trukmė. Vėjo greitis gali kisti kiekvieną akimirką, todėl nustatant vidutinį ar maksimalų greitį šių dydžių paklaidos priklauso ne tik nuo matavimo tikslumo, bet ir nuo stebėjimų skaičiaus ir vertinamos stebėjimų trukmės.

Dėl minėtų priežasčių nagrinėjami dydžiai nėra 100 % tikslūs. Be to, atitinkamų modelio parametrų netikslumai įtakos turi ribotas duomenų kiekius, skaičiavimų netikslumai, aproksimacijos ir kt. Tai sąlygoja, jog ir tikimybinio modelio rezultatai, t. y. tikimybių įverčiai, nėra visiškai tikslūs.

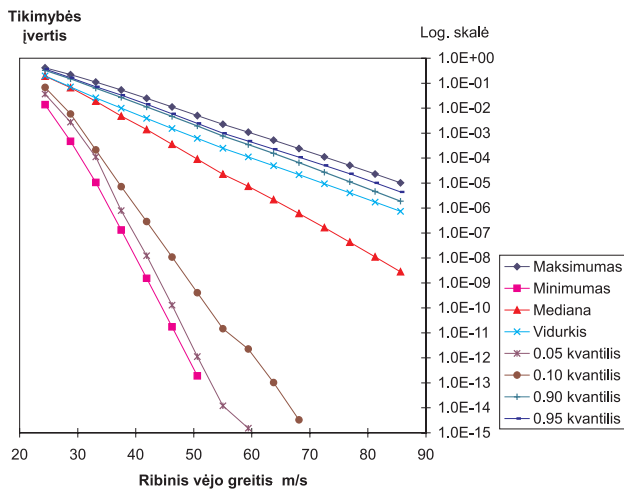
Atsižvelgiant į galimus tikimybinio modelio rezultatų netikslumus buvo atlikta neapibrėžtumo ir jautrumo analizė [8, 9].

2 lentelė. Ekstremalių vėjų tikimybinio modelio parametų reikšmės

#	Parametrai	Rėžiai		Vidurkis	Standart. nuokrypis	Skirstinys
		Min.	Maks.			
1	\bar{X}	17,6	24,4	20,63	2,04	Normalusis
2	s	1,14	7,54	2,87	1,59	Lognormalusis



2 pav. Ekstremalių vėjų tikimybių kreivės



3 pav. Ekstremalių vėjų tikimybių įverčių statistinės charakteristikos

Šiam tikslui buvo taikoma programinė įranga SUSA (Software System for Uncertainty and Sensitivity Analysis) [9].

Neapibrėžtumo ir jautrumo analizei naudojamų dviejų parametų reikšmės pateiktos 2 lentelėje.

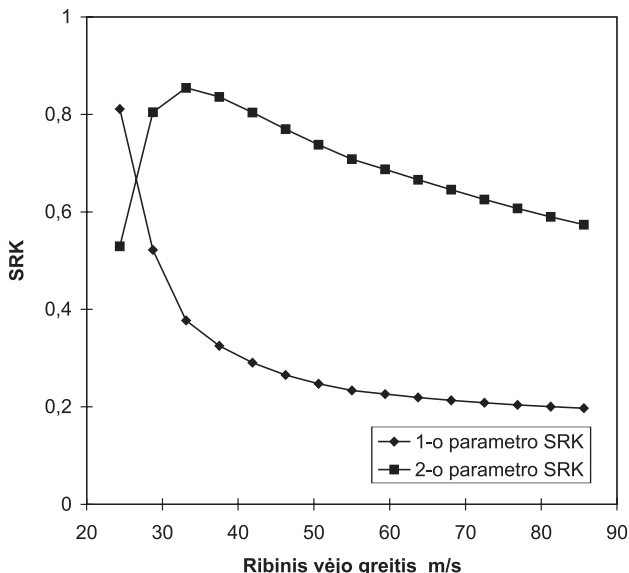
Remiantis Vilksio formule ir taikant plėtojamą neapibrėžtumo ir jautrumo analizės metodiką [9], kiekvienam vėjo lygiui modeliavimui kiekis buvo pasirinktas toks, kad rezultato neapibrėžtumą būtų galima įvertinti taikant 0,95 pasiklovimo lygmenį. Iš viso sumodeliuoti 8 vėjo lygiai su skirtingais tam lygiui ribinio vėjo greičiais: 20, 30, ..., 90 m/s. Kiekvienam lygiui i gautas įvertis tikimybės, kad vėjo greitis bus didesnis nei tą lygį nusakantis ribinis vėjo greitis x_i .

Taikant aprašytą analizės metodiką [9], kiekvienam vėjo lygiui modeliuota 100 skirtingų galimų variantų, turint 100 skirtingų parametų porų, t. y. kiekvienam vėjo lygiui skaičiuojant tikimybės įvertį naudota 100 skirtingų \bar{X} ir s reikšmių, kurios pasiskirsčiusios pagal 2 lentelėje nurodytus tikimybinis skirstinius. Modeliavimo rezultatai vaizduojami tikimybių kitimo grafike, kuriame pateikiami su 100 skirtingų parametų porų kiekvienam vėjo lygiui gauti įverčiai (2 pav.). Absoliučių verčių ir logaritmėje skalėje pavaizduotos 100 kreivių vizualiai parodo, koks gali būti neapibrėžtumas.

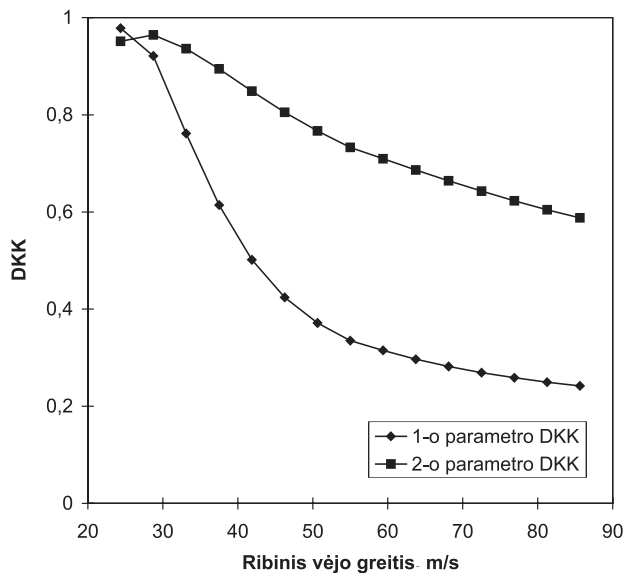
2 pav. matyti, kad tikimybės įverčio kitimas labai priklauso nuo ribinio vėjo greičio kitimo. Aiškesnis vaizdas susidaro išskyrus tam tikras kreives: maksimalių, minimalių, vidutinių, medianų ir kvantilių įverčių grafikus (3 pav.). Akivaizdu, kad esant nedideliame vėjo greičiui absoliutinis tikimybių įverčių galimas nukrypimas yra gana didelis, tačiau didėjant greičiui įverčių reikšmės sparčiai mažėja.

Rezultatų jautrumą pradinių parametų neapibrėžtumui geriausiai atspindi tokie jautrumo rodikliai, kaip regresijos ir koreliacijos koeficientai [10]. 4 pav. yra pavaizduotas dviejų modelio parametų standartizuotų regresijos koeficientų kitimas dėl ekstremalaus vėjo greičio. Kol vėjo greitis yra apie 20 m/s, modelio rezultatai, t. y. vėjo greičio tikimybės įverčiai, didesnę įtaką turi vėjo greičio vidurkis, tačiau jau pasiekus apie 30 m/s ribą situacija pasikeičia ir pradeda vyrauti standartinis nuokrypis. Tokiu būdu standartizuotas regresijos koeficientas padidėja, tuo tarpu vidurkio įtaka sumažėja ir didėjant vėjo greičiui šis koeficientas artėja prie nulio.

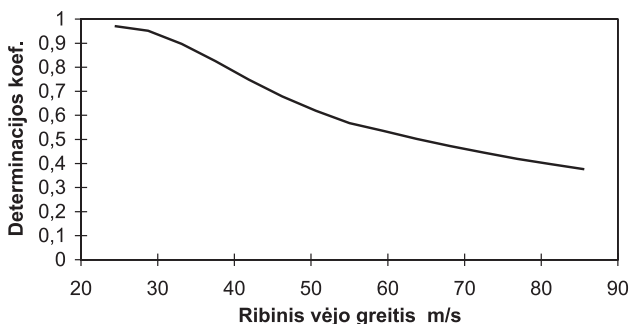
Apskaičiuoti parametų dalinės koreliacijos koeficientai taip pat patvirtina padarytas išvadas apie parametų įtaką rezultatui (5 pav.). Dalinės koreliacijos analizė naudinga tuo, kad parodo atskirų parametų ir modelio rezultato ryšio stiprumą.



4 pav. Standartizuotų regresijos koeficientų (SRK) kitimas



5 pav. Dalinės koreliacijos koeficientų (DKK) kitimas



6 pav. Determinacijos koeficiento R² kitimas

Vykdamas neapibrėžtumo ir jautrumo analizę vienas svarbiausių koeficientų yra determinacijos koeficientas, kuris parodo, kurių modelio rezultatų sklaidos dalį galima modeliuoti taikant tiesinę regresiją. 6 pav. yra parodytas determinacijos koeficiento kitimas esant skirtingiems vėjo greičiams. Kai vėjo greitis yra ne didesnis nei 30 m/s, tai iki 90 % tikimybinio modelio neapibrėžtumų gali būti nusakyti taikant regresinį modelį. Didėjant vėjo greičiui, įvertintas determinacijos koeficientas mažėja, o tai

rodo, jog regresinis modelis vis silpniau nusako parametų ir rezultato neapibrėžtumo sąryšį. Taip yra dėl didėjančios santykinės modelio parametų reikšmių sklaidos ir mažėjančio faktinės informacijos kiekio didėjant vėjo greičiui.

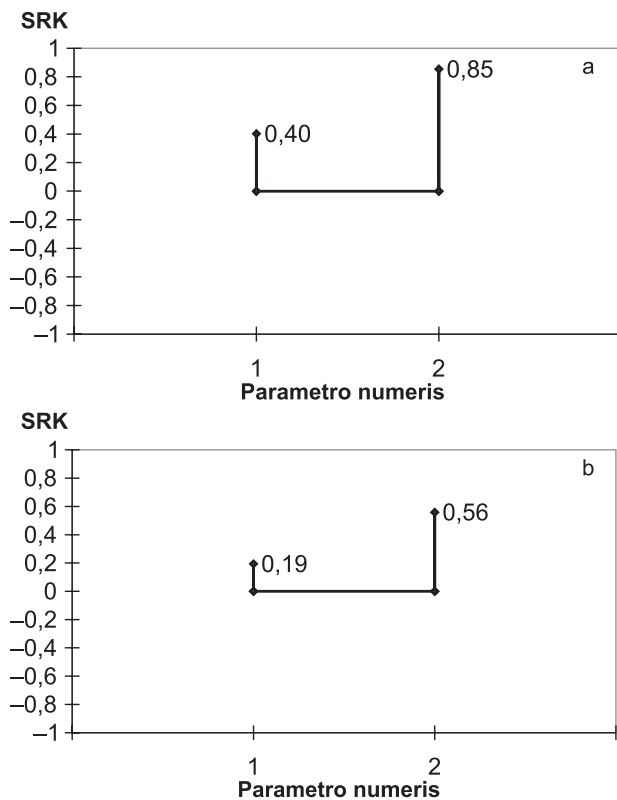
Atliekant neapibrėžtumo ir jautrumo analizę buvo nagrinėti tokie ekstremalūs vėjai, kurių greitis kas 10 m/s kinta nuo 20 iki 90 m/s. Taikant panašią metodiką galima modeliuoti ir tuos vėjo lygius, kurie siejasi su ekstremaliųjų vėjų Fudžita skale, t. y. kai vertinamas vėjo greitis didesnis nei 30 m/s, 40 m/s, 50 m/s, 60 m/s, 75 m/s ir 90 m/s.

Analogiškai prieš tai darytai analizei atlikta analizė su 6 skirtingais vėjo lygiais ir gauti vidutiniai ekstremaliųjų vėjo greičių įverčiai, šių rezultatų jautrumo priklausomybės nuo pradinųjų parametų rodikliai bei nustatytos rezultatų neapibrėžtumo ribos.

Rezultatų neapibrėžtumui nusakyti tolerancijos intervalas apibrėžtas taip, jog 95 % galimų reikšmių į šį intervalą pateks su 0,95 pasikliovimo lygmeniu. Tolerancijos intervalo rėžiai, nustatomi atsižvelgus į reikšmių ekstremumus, šiuo atveju atitinka

3 lentelė. Ekstremaliųjų vėjų modelio statistinės charakteristikos

Įverčiai su (0,95; 0,95) tolerancijos intervalu	Min.	Maks.	Vidurkis	Standartinis nuokrypis	Skirstinys	(0,05; 0,95) kvantilinio intervalo rėžiai
$P_{30'} X > 30 \text{ m/s}$ vėjo tikimybė per metus	$2,80 \cdot 10^{-5}$	$1,73 \cdot 10^{-1}$	$4,46 \cdot 10^{-2}$	$4,38 \cdot 10^{-2}$	Beta	Apatinis: $2,95 \cdot 10^{-4}$ Viršutinis: $1,18 \cdot 10^{-1}$
$P_{40'} X > 40 \text{ m/s}$ vėjo tikimybė per metus	$2,46 \cdot 10^{-9}$	$3,17 \cdot 10^{-2}$	$5,16 \cdot 10^{-3}$	$6,99 \cdot 10^{-3}$	Beta	Apatinis: $1,95 \cdot 10^{-8}$ Viršutinis: $1,89 \cdot 10^{-2}$
$P_{50'} X > 50 \text{ m/s}$ vėjo tikimybė per metus	$2,17 \cdot 10^{-13}$	$5,47 \cdot 10^{-3}$	$6,69 \cdot 10^{-4}$	$1,12 \cdot 10^{-3}$	Beta	Apatinis: $1,28 \cdot 10^{-12}$ Viršutinis: $2,67 \cdot 10^{-3}$
$P_{60'} X > 60 \text{ m/s}$ vėjo tikimybė per metus	0	$9,32 \cdot 10^{-4}$	$9,33 \cdot 10^{-5}$	$1,82 \cdot 10^{-4}$	Beta	Apatinis: 0 Viršutinis: $4,07 \cdot 10^{-4}$
$P_{75'} X > 75 \text{ m/s}$ vėjo tikimybė per metus	0	$6,54 \cdot 10^{-5}$	$5,27 \cdot 10^{-6}$	$1,21 \cdot 10^{-5}$	Beta	Apatinis: 0 Viršutinis: $3,01 \cdot 10^{-5}$
$P_{90'} X > 90 \text{ m/s}$ vėjo tikimybė per metus	0	$4,59 \cdot 10^{-6}$	$3,16 \cdot 10^{-7}$	$8,26 \cdot 10^{-7}$	Beta	Apatinis: 0 Viršutinis: $1,87 \cdot 10^{-6}$



7 pav. Standartiniai regresijos koeficientai (SRK), kai: a – vėjo greitis ≥ 30 m/s, b – vėjo greitis ≥ 90 m/s

nagrinėtos imties dydžio minimalią ir maksimalią įvykio atsiradimo per metus tikimybės reikšmę (3 lentelė).

Įvykio, kad X m/s greičio vėjas bus didesnis už tam tikrą ribinį vėjo greitį (30, 40, ... [m/s]), tikimybės įverčio, t. y. įvykio dažnio minimumas, maksimumas, vidurkis, standartinis nuokrypis ir kitos tikimybinio modelio statistinės charakteristikos yra pateiktos 3 lentelėje. Viršutinis ir apatinis nagrinėjamos imties (0,05; 0,95) kvantilinio intervalo režiai yra nustatyti remiantis klasikiniiais statistiniais skaičiavimais. Tuomet, pavyzdžiui, viršutinį režį nusakantis 0,95 kvantilis parodo, kad tikimybė, jog nagrinėjamas įvykio dažnis bus mažesnis už šį kvantilį, yra 0,95. Visais skirtingų vėjų lygių, t. y. vėjų ribinių greičių, atvejais suskaičiuotus nagrinėto įvykio dažnius geriausiai apibūdina Beta skirstinys.

Naudojant statistinę analizę taip pat įvertinti jautrumo rodikliai, kurie apibūdina ekstremalių vėjų pradinių sąlygų ir modelio parametru įtaką tikimybinio modelio rezultatams. Pavyzdžiui, jautrumo rodikliai (standartiniai regresijos koeficientai) gauti, kai vėjo greitis didesnis kaip 30 m/s ir 90 m/s (7 pav.), atitinkamai parodo, kad pirmuoju atveju ($X \geq 30$ m/s) rezultatui didesnę įtaką turi abu parametrai, lyginant su atveju, kai vertinamas didesnis greitis ($X \geq 90$ m/s). Abiem atvejais 2-asis tikimybinio modelio parametras (standartinis nuokrypis) turi didesnę įtaką rezultatui nei 1-asis parametras (vidurkis).

Išvados apie parametru reikšmingumą ir rezultatų jautrumą yra gautos naudojantis tiesine nagrinėjamo modelio aproksimacija. Tiesinės aproksimacijos ir sudaryto modelio atitikimo lygis nusakomas determinacijos koeficientu R^2 , kurio reikšmė nagrinėjama atvejais lygi atitinkamai 0,9 ir 0,4.

Bendruoju atveju iš jautrumo analizės rezultatų matyti, kurie parametrai turi didžiausią įtaką nagrinėjamo ekstremalaus įvykio tikimybės įverčiui. Nagrinėtu atveju tikimybinio modelio rezultatus labiausiai veikia 2-asis parametras s – ekstremalių vėjų statistikos duomenų sklaidos parametras.

5. APŽVALGA IR IŠVADOS

Nagrinėjant ekstremalius įvykius, kurie kiek galint turi įtakos AE saugai, pirmiausia iš bendro įvairių įvykių sąrašo, vartojant nustatytus kriterijus, yra atrenkami reikšmingiausi išoriniai įvykiai. Tada atliekamas nuodugnesnis atrinktų ekstremalių įvykių tikimybinis modeliavimas ir analizė.

Šiame straipsnyje pateiktas detalus ekstremalių vėjų tikimybinis vertinimas ir analizė susideda iš matematinio modelio sudarymo, statistikos duomenų atrinkimo bei neapibrėžtumo ir jautrumo analizės. Nustatyti dažniai, t. y. įverčiai tikimybės, kad vėjo greitis per metus pasieks ar viršys tam tikras ekstremalias vertes. Naudojant neapibrėžtus duomenis tikimybės geriausiu įverčiu buvo laikomas vidutinis dažnis. Įverčio neapibrėžtumas nusakytas (0,95; 0,95) tolerancijos intervalu bei 0,05 ir 0,95 lygmens kvantiliais.

Atsižvelgiant į duomenų neapibrėžtumą nustatytas įvykio, kad vėjo greitis per metus pasieks ar viršys 30 m/s, tikimybės įvertis yra lygus $4,46 \cdot 10^{-2}$. Tai rodo, kad Lietuvoje per 100 metų vidutiniškai galimi maždaug 4 uraganiniai (stichiniai) ar stipresni vėjai. Tikimybės, kad vėjo greitis per metus pasieks ar viršys 60 m/s, t. y. tikimybės, kad vėjas bus kur kas ekstremalesnis, įverčio 0,05 lygmens kvantilis tampa labai artimas 0. Tačiau tikimybės įverčio vidurkis, netgi dar didesnis kaip 90 m/s vėjo greičio atveju, yra ženklus ir siekia $3,16 \cdot 10^{-7}$. Kadangi AE aktyviosios zonos pažeidimo dažnis turi būti mažesnis nei $1 \cdot 10^{-5}$, o didelio ir staigaus radioaktyviųjų medžiagų išmetimo dažnis mažesnis nei $1 \cdot 10^{-7}$, tai tokio ypač ekstremalaus vėjo kuo dažnesnis atsiradimas yra svarbus vertinant AE saugą.

Visais atvejais nustatytą ekstremalaus vėjo tikimybės įvertį geriausiai apibūdina Beta skirstinys, o jautrumo analizė rodo, kad ekstremalaus vėjo greičio tikimybės įverčio vertes ir jų neapibrėžtumą labiau veikia ne greičio vidurkis, bet standartinis nuokrypis.

Gauta 2008 11 20

Priimta 2008 12 11

Literatūra

1. Alzbutas R., Maioli A. Risk zoning in relation to risk of external events (application to IRIS design) // International Journal of Risk Assessment and Management. 2008. Vol. 8. No. 1/2. P. 104–122.
2. Alzbutas R., Augutis J., Urbonas R. Risk and sensitivity analysis in relation to external events // Proceedings of International Conference Nuclear Energy in Central Europe 2001, Portorož, Slovenia, September 10–13. Slovenia, 2001. P. 1–14.
3. Treatment of eternal hazards in probabilistic safety assessment for nuclear power plants // Safety Series. 1995. No. 50. P. 7.

4. Site evaluation for nuclear installations, Safety Requirements, Safety Standards Series No. NS-R-3. IAEA, Vienna, 2003.
5. Procedures of Performance Probabilistic Safety Assessment // NUREG/CR-2300. US NRC, 1983.
6. Alzbutas R., Kupčiūnienė K., Adlytė R., Augutis J. Lėktuvo kritimo ant Ignalinos AE tikimybės vertinimas atsižvelgiant į duomenų neapibrėžtumą // Energetika. 2007. Nr. 1. P. 1–9.
7. Galvonaitė A. ir kt. Lietuvos klimatas. Vilnius: Lietuvos hidrometeorologijos tarnyba, 2007.
8. Hofer E. Sensitivity analysis in the context of uncertainty analysis for computationally intensive models // Computer Physics Communications. 1999. Vol. 117. P. 21–34.
9. Glaeser H. GRS method for uncertainty and sensitivity evaluation of code results and applications // Science and Technology of Nuclear Installations. 2008. Article ID 798901. P. 7.
10. Krzykacz B., Hofer E., Kloos M. A software System for uncertainty and sensitivity analysis of results from computer models // Proceedings of International Conference PSAM-II, 2. San Diego, CA, 1994. P. 20–25.
11. Čekanavičius V., Murauskas G. Statistika ir jos taikymai. Vilnius: TEV, 2002. D. II.

Robertas Alzbutas, Kristina Kupčiūnienė, Svetlana Lysak

PROBABILISTIC ASSESSMENT OF EXTREME WINDS LIKELY INFLUENCING THE SAFETY OF AN NPP

Summary

The simulation of extreme external events likely influencing the safety of a nuclear power plant has an important significance for evaluating their risk and for avoiding damages of the systems important for the safety. The probability of such events is estimated using statistical data and probabilistic models. Additionally, the methodology being developed at the Lithuanian Energy Institute is used. It includes risk analysis and sensitivity analysis. This methodology is primarily based on the probabilistic modelling and the so-called best estimate calculation along with the analysis of uncertainty.

The paper presents the general methodology of selection and analysis of extreme external events. As an example of an extreme external event probabilistic analysis, extreme wind is examined in more detail.

This event can do enormous damage not only to wind power plants, but also to other not wind-related constructions. To estimate the influence of extreme wind on the safety of a nuclear power plant, first of all the probabilistic analysis of the event occurrence is performed: statistical data are assembled and analysed, a probabilistic model is built, and the modelling data uncertainty and sensitivity are analysed.

Key words: extreme events, probabilistic assessment, extreme winds, uncertainty and sensitivity analysis

Робертас Алзбутас, Кристина Купчюнене, Светлана Лисак

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ВЕТРОВ НА БЕЗОПАСНОСТЬ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Резюме

Моделирование экстремальных внешних событий, которые могут влиять на безопасность атомной электростанции (АЭС), имеет важное значение для оценки риска их возникновения и для обеспечения бесперебойной работы систем безопасности АЭС. Для оценки вероятности или частоты появления таких событий используются статистические данные и вероятностные модели. Также используется развиваемая в Литовском энергетическом институте методология анализа риска и чувствительности. Эта методология прежде всего связана с вероятностным моделированием, так называемой оптимальной оценкой и с анализом неопределенности.

В работе представлена общая методология отбора и анализа экстремальных внешних событий. Как типический пример вероятностного анализа отдельного экстремального события в работе детально рассматривается одно из экстремальных внешних событий – экстремальный ветер. Последний может нанести огромный ущерб не только ветровым электростанциям, но и другим, не связанным с ветром техническим конструкциям. Чтобы оценить влияние экстремального ветра на безопасность атомной электростанции, прежде всего осуществляется вероятностный анализ появления события: собираются и анализируются статистические данные, строится вероятностная модель и для данных моделирования применяется анализ неопределенности и чувствительности.

Ключевые слова: экстремальные события, вероятностная оценка, экстремальные ветры, анализ чувствительности и неопределенности