

# Lėktuvo kritimo ant Ignalinos AE tikimybės vertinimas atsižvelgiant į duomenų neapibrėžtumą

Robertas Alzbutas<sup>1, 2</sup>,

Kristina Kupčiūnienė<sup>2</sup>,

Rūta Adlytė<sup>2</sup>, Juozas Augutis<sup>1, 3</sup>

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

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

<sup>3</sup> Vytauto Didžiojo universitetas,  
Informatikos fakultetas, Vileikos g. 8,  
LT-44404 Kaunas

Lietuvoje vis daugiau dėmesio skiriama deterministinei ir tikimybinei analizei bei Ignalinos AE saugai. Tikimybinis saugos įvertinimas Ignalinos AE aiškiai parodė, kad reikia tęsti rizikos analizę ir tobulinti saugą. Skirtingų šalių techniniai eksperimentai ir apskaičiavimai leidžia nustatyti, kad pagrindinių Ignalinos AE pastatų konstrukcijos atlaikytų krintančio lengvo lėktuvo smūgį bei gali būti sugriautos nukritus sunkiems ir kariniams lėktuvams. Ant Ignalinos AE nukritęs lengvas lėktuvas gali pažeisti kai kurias elektrinės saugai svarbias sistemas (pavyzdžiui, nutraukti išorinio elektros tiekimo linijas) bei sąlygoti kitus konstrukcijų pažeidimus. Todėl lėktuvo kritimo į Ignalinos AE zoną modeliavimas yra svarbus norint įvertinti riziką ir išvengti saugai svarbių sistemų pažeidimų. Šiame darbe tobulinamas lėktuvo kritimo tikimybės vertinimo modelis siekiant analizuoti naudojamų parametrų reikšmingumą rezultatams. Išvedama lėktuvo kritimo aplink Ignalinos AE spinduliu  $r$  tikimybės skaičiavimo formulė. Ji pritaikoma lėktuvo kritimo tikimybės skaičiavimams su atnaujintais statistikos duomenimis. Kadangi dalis pradinių sąlygų ir lėktuvo kritimo modelio parametrų nėra tiksliai žinomi arba turi skirtingas reikšmes skirtingo tipo lėktuvams, tai sudarytam modeliui buvo atlikta neapibrėžtumo analizė. Neapibrėžtumo ir jautrumo analizė leido nustatyti parametrus, turėjusius didžiausią įtaką modelio rezultatams. Išvados apie parametrų reikšmingumą ir rezultatų jautrumą yra gautos naudojantis tiesine nagrinėjamo modelio aproksimacija.

**Raktažodžiai:** tikimybinis modeliavimas, lėktuvo kritimo dažnis, jautrumo ir neapibrėžtumo analizė

## 1. ĮVADAS

Lietuvoje vis daugiau dėmesio skiriama deterministinei ir tikimybinei analizei bei Ignalinos AE saugai. Tikimybinis saugos įvertinimas Ignalinos AE aiškiai parodė, kad reikia tęsti rizikos analizę ir tobulinti saugą. Buvo sukurti tobulesni modeliai ir pritaikyti nauji analizės metodai.

Analizuojant lėktuvo ar kito skraidančio aparato (pvz., malūnsparnio, oro baliono) kritimą, nagrinėjamos atsitiktinės lėktuvų katastrofos, kai nevertinami teroristiniai veiksmai ar kita neįprasta žmonių veikla. Statistiškai analizuojamas lėktuvų kritimo ant nagrinėjamų objektų dažnis visų pirma priklauso nuo lėktuvų skraidymo šalia tų objektų intensyvumo. Sunkiau statistiškai vertinami tokie lėktuvų avarijas sąlygojantys veiksniai, kaip techninė lėktuvų būklė, ekipažo patirtis, navigacinės antžeminės technikos (pvz., radiolokatorių ar radijo švyturių), meteorologinės ir kitos sąlygos. Dėl didelio avarijas inicijuojančių veiksnių neapibrėžtumo lėktuvo kritimo modeliavimas iki šiol buvo grindžiamas konservatyviomis

prielaidomis. Tačiau šiame darbe lėktuvo kritimo tikimybės vertinimas buvo grindžiamas nauja metodika, susieta su tikimybinio modeliavimu vadinamųjų geriausių įverčių bei jautrumo ir neapibrėžtumo analize.

Lėktuvo kritimas ant Ignalinos AE sukeltų gana didelį pavojų atominės elektrinės funkcionavimui ir reaktoriaus saugai. Iš didelio aukščio krintančio lėktuvo griaunamoji jėga yra didžiulė. Be to, lėktuvo kritimas dažnai būna lydymas sprogamų ir gaisrų. Krintantis lėktuvas gali suardyti pastato stogą, sienas, viduje esančius vamzdynus, elektros variklius, transformatorius, elektros tiekimo kabelius bei kitus saugai svarbius elementus ir sistemas. Todėl bendroju atveju analizuojamas lėktuvo kritimas ne tik į reaktorių, bet ir į pakankamai didelę konservatyviai apie reaktorių apibrėžtą pavojingų pasekmių zoną.

Lėktuvo kritimo į Ignalinos AE zoną modeliavimas yra aktualus norint įvertinti riziką ir išvengti saugai svarbių sistemų pažeidimų. Šio įvykio pasirodymo tikimybės yra apskaičiuojamos naudojant statistinius duomenis bei tikimybinis modelius.

## 2. LĒKTUVO KRITIMO METODOLOGIJA

Bet kurio lėktuvo kritimas Ignalinos AE teritorijoje yra labai pavojingas visai AE, įskaitant reaktorių. Lėktuvas, krentantis iš didelio aukščio, turi didelę griaunamąją galią. Dažnai krintantis lėktuvas sukelia sprogimus ir gaisrus. Krintantis lėktuvas gali sugriauti pastatų stogus ir sienas, vamzdynus, elektros įrengimus bei reaktoriui artimas sistemas, svarbias saugumui. Analizuojant galimus pavojingus padarinius nagrinėjama aktuali zona, apibrėžianti reaktoriaus centrą 200 m spinduliu.

Analizuojant atsitiktinius lėktuvų kritimus, nėra atsižvelgiama į teroristų aktus ar kitus neįprastus žmogaus veiksmus, nes to įvertinti statistiškai neįmanoma. Statistinė lėktuvų kritimo dažnio analizė priklauso nuo skrydžių intensyvumo šalia objekto, techninės lėktuvo būklės, pilotų patirties, meteorologinių sąlygų ir kitų veiksnių.

Pradiniai duomenys, naudojami lėktuvo kritimo tikimybiniais modeliams sudaryti, yra:

- atstumai nuo Ignalinos AE iki civilinių arba karinių oro uostų;
- oro erdvės kontrolės reikalavimai bei oro koridorių išdėstymas rytinėje Lietuvos dalyje;
- Lietuvos oro uostų pateikti lėktuvų skrydžių Lietuvos oro erdvėje kiekiai;
- lėktuvų, skraidančių Lietuvos oro erdvėje, pasiskirstymas pagal tipus;
- lėktuvų, suskirstytų pagal svorį ir tipą, avarių apibendrinta pasaulinė statistika;
- aviacinių incidentų ir katastrofų kiekis.

Lėktuvų kritimo į AE teritoriją dažnių tikimybiniai modeliai priklauso nuo atstumo tarp AE ir artimiausių oro uostų [1]. Netoli Ignalinos AE didelių oro uostų nėra, pats didžiausias Lietuvos Respublikos oro uostas – Vilniaus – yra maždaug už 130 km nuo Ignalinos AE. Turint tokį atstumą iki oro uosto ir, jei oro transporto koridorius eina šalia AE, tai lėktuvo kritimo tikimybę (per metus) galima įvertinti šia formule:

$$P = P_l N_c A / W; \quad (1)$$

čia  $P_l$  – lėktuvo kritimo dažnis apskaičiuotas vienam skrydžio kilometrui;

$N_c$  – skrydžių kiekis per metus (konservatyviai skaičiuojamas 50 km spinduliu);

$A$  – nagrinėjamos teritorijos plotas (konservatyviai skaičiuojamas 0,2 km spinduliu);

$W$  – oro transporto koridoriaus plotis (18,53 km arba 10 jūrmylių).

Vakarietiškos ir tarybinės gamybos lėktuvų kritimo dažniai pateikti 1 lentelėje. Dažnis apskaičiuotas lengviems lėktuvams (iki 5700 kg ir vidutiniu skrydžio greičiu 250 km/h) bei sunkiems lėktuvams (per 5700 kg ir vidutiniu skrydžio greičiu 800 km/h).

Pažymėtina, kad Lietuvos Respublikoje lengvų, iki 5700 kg, lėktuvų kritimo dažnis kur kas didesnis nei sunkių, per 5700 kg, lėktuvų. Tačiau dauguma lengvų lėktuvų (iki 5700 kg) dažniausiai skraido netoli oro uostų ir jokios įtakos Ignalinos AE saugumui neturi. Tolesniuose skaičiavimuose naudojami sunkių lėktuvų (per 5700 kg ir vidutiniu skrydžio greičiu 800 km/h) kritimo dažniai.

Visi didesni oro keliai yra pakankamai toli nuo Ignalinos AE. Tik trys iš visų oro kelių patenka į 50 km spindulio apie AE zoną. Lietuvos navigacinės tarnybos duomenimis, tai vidutinio apkrautumo koridoriai. Kadangi daliai lėktuvų yra skiriami atskiri maršrutai ir navigacinės tarnybos nekaupia statistikos apie skrydžius atskiruose koridoriuose bei keletas 50 km spindulio zonos gretimų koridorių yra Lietuvos, Latvijos ir Baltarusijos teritorijoje, tai lėktuvo kritimo tikimybei apskaičiuoti buvo naudojamas skrydžių kiekis nuo 30000 (suapvalintas skrydžių kiekis 2005 m. Vilniaus oro uoste) iki 130000 (suapvalintas skrydžių kiekis 2005 m. Vilniaus oro erdvėje). Be to, buvo priimta konservatyvi prielaida, kad pusę šių skrydžių atliko vakarietiškos gamybos lėktuvai, pusę iš jų – tarybinės gamybos lėktuvai.

## 3. TIKIMYBINIS LĒKTUVO KRITIMO MODELIS

Bendruoju atveju, lėktuvo kritimo tikimybei apskaičiuoti, kai jo skridimo trasa yra  $s$  atstumu nuo galimos kritimo teritorijos, naudojamas toks matematinis modelis:

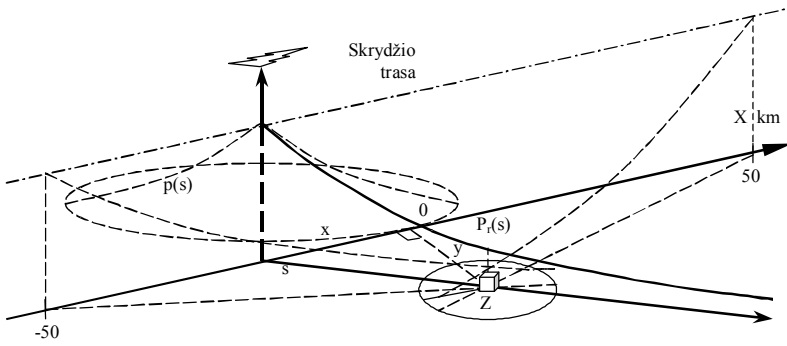
$$P(s) = P_l N_c A \frac{g}{2} e^{-gs}; \quad (2)$$

čia  $g$  – koeficientas, priklausantis nuo lėktuvo tipo, kuris apibrėžia artimo kritimo tikėtinumą [1] (keleiviniams lėktuvams  $g = 0,23$ , kariniams lėktuvams  $g = 0,63$ , kroviniams lėktuvams  $g = 1$ ).

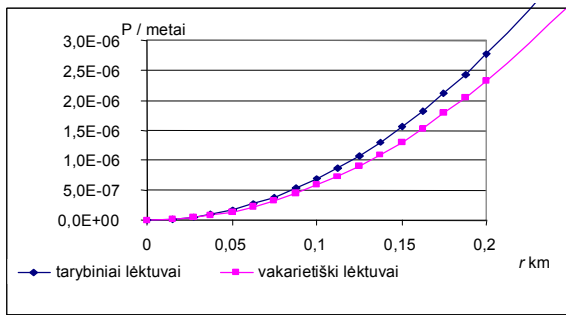
Atsižvelgus į tai, kad 10 km spindulio zonoje aplink Ignalinos AE yra draudžiami skrydžiai, žemesni nei 5950 m, reikia šiek tiek modifikuoti prieš tai pateiktą formulę. Konservatyviai vertinant laikoma, kad visi skrydžiai iš pavojingos 50 km spindulio zonos vyksta 10 km spindulio zonos pakraščiu. Kadangi keleivinių lėktuvų skrydžiai, palyginus su kitais, sudaro pagrindinį skrydžių kiekį, tai skaičiavimams naudojama  $g$  koeficiento reikšmė

1 lentelė. Vakarietiškos ir tarybinės gamybos lėktuvų kritimo dažniai

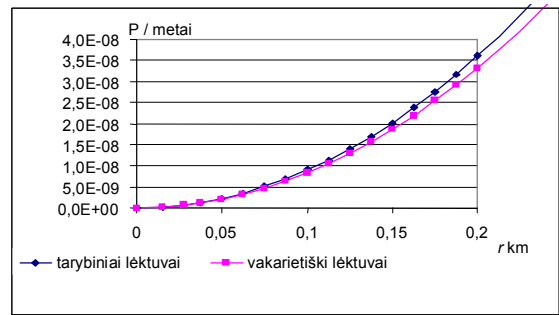
Aviacinės katastrofos dažnis / metai	Vakarietiškos gamybos lėktuvai		Tarybinės gamybos lėktuvai	
	Masė iki 5700 kg	Masė per 5700 kg	Masė iki 5700 kg	Masė per 5700 kg
1 skrydžio valandai	2,1E-05	9,0E-07	2,5E-05	1,0E-06
1 skrydžio kilometrui	8,4E-08	1,2E-09	1,0E-07	1,3E-09



1 pav. Lėktuvo kritimo tikimybės skaičiavimo modelis spinduliu  $r$  aplink Ignalinos AE

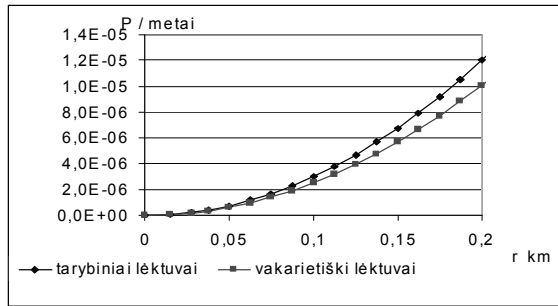


a

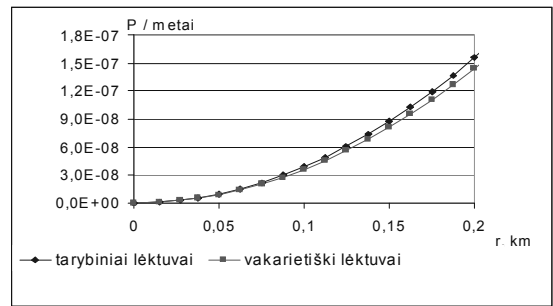


b

2 pav. Lengvų (a) ir sunkių (b) lėktuvų kritimo dažniai, esant 30000 skrydžių



a



b

3 pav. Lengvų (a) ir sunkių (b) lėktuvų kritimo dažniai, esant 130000 skrydžių

lygi 0,23, kuri yra ir konservatyviausia iš anksčiau išvardytų reikšmių. Be to, tokia koeficiento  $g$  reikšmė atitinka situaciją, kai lėktuvo kritimo tikimybė 10 km atstumu į šalį nuo skrydžio trasos yra 10 kartų mažesnė, nei lėktuvo kritimo tikimybė jo skridimo trasoje.

Modelis, leidžiantis apskaičiuoti lėktuvo kritimo tikimybę aplink Ignalinos AE spinduliu  $r$ , jei lėktuvas praranda kontrolę ir pradeda kristi atstumu  $s$  nuo zonos centro, pavaizduotas 1 paveiksle.

Šis modelis aprašomas taip:

$$P_r(s) = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty p(s) ds d\varphi = \frac{r^2 \cdot g^2 \cdot e^{-gs}}{2}, \quad (3)$$

kai

$$p(s) = \frac{g^2}{2\pi} \cdot e^{-gs} \text{ ir } \int_0^{2\pi} \int_0^\infty s \cdot p(s) ds d\varphi = 1. \quad (4)$$

Jei lėktuvas praskrenda koridoriumi 100 km kelią tiesiai, liesdamas 10 km spindulio zonos aplink AE kraštą, tada atstumas iki AE zonos centro apibrėžiamas taip:

$$s = \sqrt{x^2 + y^2}; \text{ čia } y = 10, x \in (-50, 50). \quad (5)$$

Bendroji lėktuvo kritimo teritorijoje su spinduliu  $r$  tikimybė apskaičiuojama pagal formulę:

$$P = \frac{N_c P_l r^2 g^2}{2} \int_{-D}^D e^{-g\sqrt{x^2+100}} d\sqrt{x^2+100} = N_c P_l r^2 g^2 \times \int_0^D \frac{x e^{-g\sqrt{x^2+100}}}{\sqrt{x^2+100}} dx = N_c P_l r^2 g \left( e^{-10g} - e^{-g\sqrt{D^2+100}} \right). \quad (6)$$

Naudojant pastarąją formulę galima gauti lėktuvo kritimo tikimybės skirtingo spindulio teritorijoje, kuri apima Ignalinos AE pastatų ar reaktoriaus zoną.

Norint apibrėžti rezultatų priklausomybę nuo spindulio  $r$ , buvo atlikti skaičiavimai (keičiant  $r$  reikšmę bei skrydžių kiekį skirtingiems lėktuvų tipams) (2 ir 3 pav.).

Gautos sunkių lėktuvų kritimo tikimybės yra mažesnės negu tikimybės, gautos atlikus analizę daugeliui JAV AE, esant didesniai skrydžių kiekiui.

#### 4. NEAPIBRĖŽTUMO IR JAUTRUMO ANALIZĖS METODOLOGIJA

Neapibrėžtumas yra būdingas visiems pavojų ir rizikos vertinimams, kuriuose matematiniai modeliai naudojami apibūdinant netiesiogiai stebėtą informaciją. Neapibrėžtumas visuomet egzistuoja dėl to, kad sudaromi modeliai nepilnai atspindi realybę. Apibūdinant esamą žinių apie modelio kiekvieno parametro reikšmės lygį, tiksliną naudoti visus prieinamus informacijos šaltinius ir jų pagrindu apibrėžti parametro reikšmių subjektyvų tikimybinį skirstinį [3]. Subjektyvus tikimybinis skirstinys nusako, kiek turima informacijos apie neapibrėžtą modelio parametą. Tuo atveju, kai atsiranda nauja informacija, tokie skirstiniai gali būti perskaičiuojami arba atnaujinami naudojant Bajeso teoremą. Turint modelio parametų subjektyvius tikimybinius skirstinius gali būti gaunamas modelio rezultato tikimybinis skirstinys, iš kurio įvertinami rezultatai, nustatomi pasikliautinieji intervalai ir sprendžiama, ar reikalinga papildoma informacija siekiant tolesnio neapibrėžtumo sumažinimo.

Jautrumo analizė padeda nustatyti, kurių modelio parametų neapibrėžtumą labiausiai verta mažinti, kad sumažėtų rezultato neapibrėžtumas. Jautrumo analizė yra

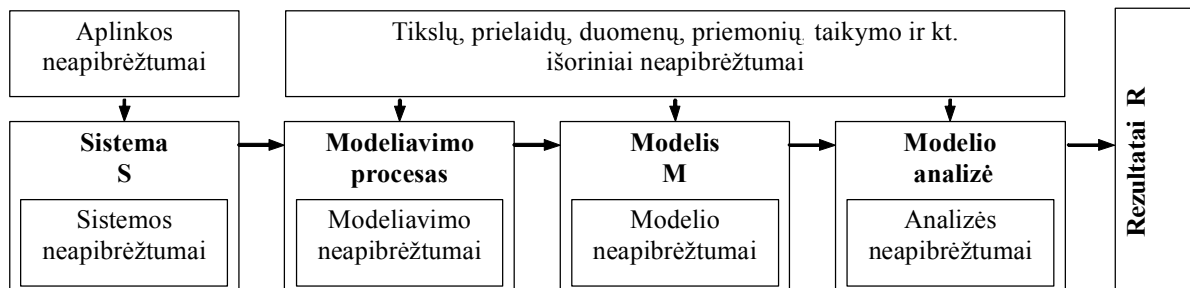
naudojama norint surasti parametrus, kurie gali turėti didžiausią įtaką rezultatui. Ji gali būti vykdoma kartu su neapibrėžtumo analize. Jautrumo analizė įgalina analizuoti pagrindinių modeliavimo prielaidų svarbą galutiniams rezultatams ir nurodo, kur, norint sumažinti rezultato neapibrėžtumą, reikia didinti parametų tikslumą.

Ne visada neapibrėžtumas yra įvertinamas tikimybiniais skirstiniais, todėl iš anksto turi būti numatyta, kaip atsižvelgti į tokią situaciją. Tam gali būti panaudoti bent du alternatyvūs būdai. Pirmasis iš jų grindžiamas standartinių modelių naudojimu ir neapibrėžtumą kompensuojančių (dažniausiai konservatyvių) prielaidų taikymu. Antrasis būdas leidžia modelių ir prielaidų įvairovę, bet reikalauja, kad būtų atliekama jautrumo analizė siekiant nustatyti, kaip kiekvienu atveju pasikeistų rezultatai ir jų pagrindu daromos išvados. Tokiu būdu, tyrimams naudojant rezultatų jautrumo analizę bei įvertinus skirtingų modelių ir prielaidų įtaką daromoms išvadoms yra priimami sprendimai.

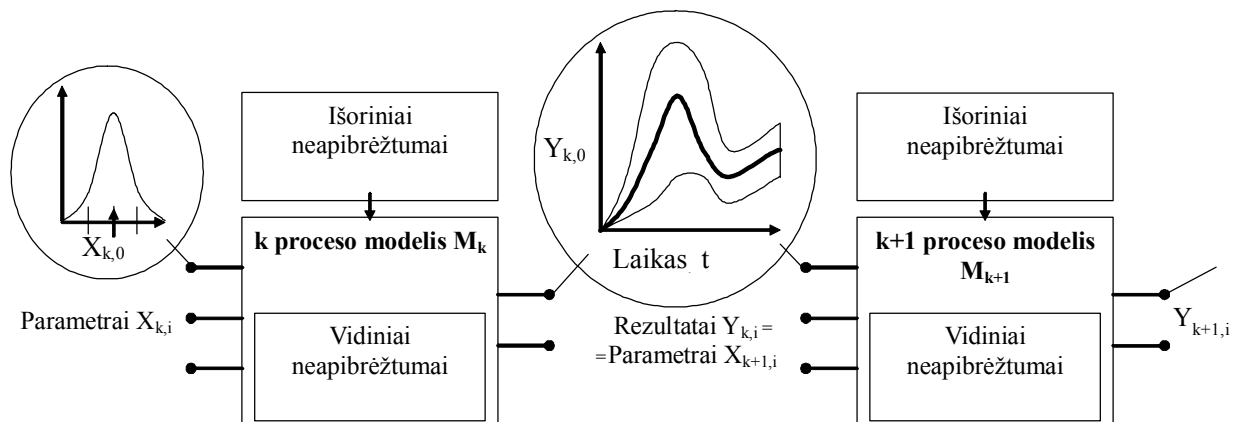
Pastaruoju metu sudėtingų sistemų modeliavimui taikomos konservatyvaus vertinimo prielaidos ir skaičiavimai keičiami į geriausias įverčias pagrįstą modeliavimą (pvz., pagrįstą vidurkais, kaip tikėtinausiomis reikšmėmis) su pateikiama rezultatų neapibrėžtumo analize. Šiuo atveju atsarga iki saugos priimtino kriterijų vertinama atsižvelgiant į rezultatų neapibrėžtumo ribas.

#### Rezultatų neapibrėžtumas ir jo vertinimas

Neapibrėžtumo analizei atlikti reikia neapibrėžtumo šaltinių identifikavimo ir jų tyrimo. Šiam tikslui palengvinti siūloma atsižvelgti į neapibrėžtumo šaltinių klasifikavimą



4 pav. Sistemos modelio rezultatų neapibrėžtumą sąlygojanti seka



5 pav. Sistemos modelio parametų tikimybiųjų pasiskirstymų įvertinimas

pagal jų atsiradimo priežastis ir potencialias pasekmes. Potencialios neapibrėžtumo pasekmės siejamos su modelio parametrams ir rezultatams taikomais priimtumo kriterijais. Neapibrėžtumo kilmė gali būti siejama su sistemos modelio parametrų reikšmių matavimo paklaidomis bei informacijos trūkumu arba natūralia, bet nevaldoma parametrų kaita. Nagrinėjant sistemos modelio rezultatų neapibrėžtumą, siūloma atsižvelgti į visą rezultatų atsiradimą sąlygojančią seką (4 pav.), kurią sudaro sistema, modeliavimo procesas, modelis ir modelio analizė.

Atsižvelgus į neapibrėžtumo valdymo galimybes, išskiriami išoriniai ir vidiniai neapibrėžtumo šaltiniai bei atitinkami modelio parametrai. Kuo mažesnės neapibrėžtumo šaltinių (kraštinių sąlygų, parametrų ir kt.) valdymo galimybės, tuo labiau jie laikomi išoriniais.

Sistemos ir jos aplinkos parametrų bei su modeliu susijusių vidinių parametrų neapibrėžtumo įtaka rezultatui gali būti įvertinta kiekybiškai. Siūlomas įvertinimo būdas yra pagrįstas sistemos modelio parametrų (kraštinių sąlygų ir kt.) vertinimu, naudojant subjektyvius tikimybinis skirstinius, bei šių skirstinių taikymu modeliuojant (5 pav.) ir modeliavimo rezultatų reikšmių statistiniu apdorėjimu.

Kiekybiškai rezultato neapibrėžtumas gali būti išreikštas rezultato reikšmių imties standartiniu nuokrypiu ar kvantiliais (pvz., 0,05 ir 0,95). Reikšmių skirstinys leidžia įvertinti vidurkį, standartinį nuokrypį, medianą, kvantilius ir kitus įverčius bei pasikliautinumo intervalus. Juos nustatyti nesunku, jeigu žinoma, koks yra skirstinys ir jo parametrai (pvz., vidurkis, dispersija ar standartinis nuokrypis). Praktiškai modelio rezultato reikšmių pasiskirstymo funkcija gali būti gaunama naudojant parametrų reikšmių subjektyvius tikimybinis skirstinius ir Monte Karlo tipo metodus. Atsižvelgiant į modelio parametrų galimas minimalias ir maksimalias reikšmes, parametrų neapibrėžtumui nusakyti gali būti naudojamas su jomis susietas standartinis nuokrypis. Normaliojo skirstinio atveju standartinis nuokrypis gali būti imamas kaip reikšmė, kuri yra tris kartus mažesnė už intervalą tarp minimumo ir maksimumo. Jeigu skirstinys nėra nupjautinis, tai tikimybė, kad parametro reikšmė priklausys šiam intervalui, yra 0,866. Jeigu skirstinys yra nupjautinis, tuomet tikimybė yra lygi vienetui.

Norint įvertinti galimą modeliavimo rezultatų neapibrėžtumą, įprastai yra apskaičiuojamas statistinės tolerancijos intervalas  $(\alpha, \beta)$  ar vienpusė tolerancijos riba [3]. Čia  $\beta$  yra pasiklovimo lygmuo, kad modelio rezultato reikšmės su tikimybe  $\alpha$  pateks į atitinkamą intervalą ar neviršys ribos (jei nagrinėjamas vienpusis apribojimas). Kitaip tariant,  $100 \cdot \alpha\%$  dydžiu nusakoma, kiek rezultato reikšmių iš visų, procentiškai apibūdins neapibrėžtumą  $100 \cdot \beta\%$  tikslumu. Pagal klasikinę statistikos metodiką, pasikliautinumo intervalų konstravimas įvertina galimą įtaką to, kad yra atliekamas tik ribotas skaičius eksperimentų. Pavyzdžiui, pagal Vilksio formulę [4], 93 eksperimentų pakanka norint gauti (0,95, 0,95) statistinės tolerancijos intervalą. Bendruoju atveju, būtinas eksperimentų skaičius  $n_1$ , norint gauti tolerancijos ribą, ir eks-

perimentų skaičius  $n_2$ , norint gauti tolerancijos intervalą, gali būti išreikšti taip:

$$n_1 \geq \ln(1 - \beta) / \ln(\alpha), \quad (7)$$

$$n_2 \geq (\ln(1 - \beta) - \ln((n_2/\alpha) + 1 - n_2)) / \ln(\alpha). \quad (8)$$

Galima pažymėti, kad mažiausias eksperimentų skaičius nepriklauso nuo neapibrėžtų parametrų ir priklauso tik nuo anksčiau pateiktų dydžių  $\alpha$  ir  $\beta$ .

### Rezultatų jautrumo analizė

Rezultatų jautrumo analizės paskirtis yra dvejopa: pirma – nustatyti sistemos modeliavimo rezultatų jautrumą nuo pradinių parametrų, antra – analizuoti pagrindinių modeliavimo prielaidų svarbą galutiniams rezultatams. Dažniausiai naudojama kiekybinė neapibrėžto rezultato jautrumo analizė [3] – tai parametrų kategorizavimas pagal jų santykinį indėlį visam rezultato neapibrėžtumui ir kiekybinis šio indėlio įvertinimas kiekvienam parametrai.

Vienas pagrindinių jautrumo analizės tikslų yra modelio rezultatų kitimo įvertinimas, kai keičiami modelio parametrai. Toks vertinimas yra svarbus siekiant:

- įvertinti modelio taikymo galimybes;
- nustatyti tuos parametrus, kurie yra reikšmingiausi norint gauti kuo tikslesnius modelio rezultatus;
- suprasti pagrindines modeliuojamos sistemos funkcionavimo priklausomybes.

Jautrumo analizės metodo pasirinkimas priklauso nuo:

- jautrumo įverčių pasirinkimo;
- norimo jautrumo įverčių tikslumo;
- modelio tyrimo sąnaudų ir kt.

Bendruoju atveju jautrumo analizė ir jos taikymas labai priklauso nuo jautrumo įverčių pasirinkimo. Dauguma jautrumo įverčių yra taikomi su matematiniais, imitaciniais ir kitais modeliais, kurie gali būti išreiškiami:

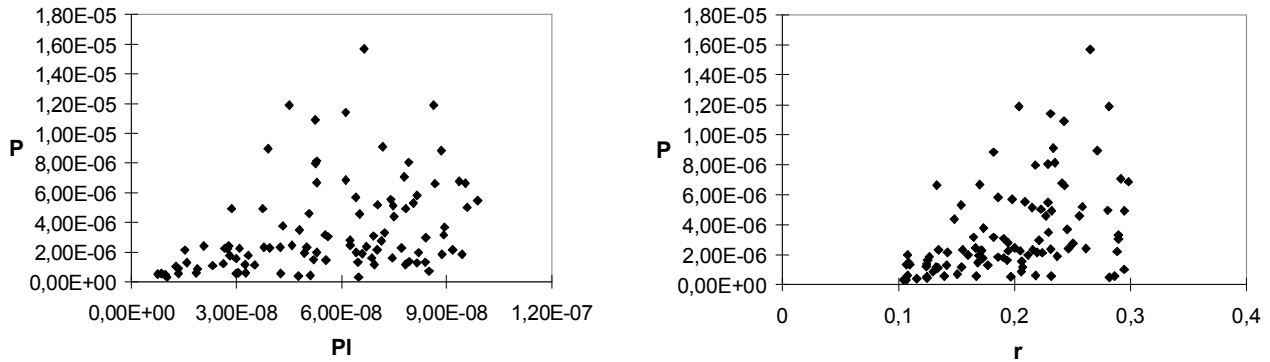
$$F(x(N), y(M)) = 0; \quad (9)$$

čia  $x - N$  dydžio parametrų aibė,  
 $y - M$  dydžio rezultatų aibė.

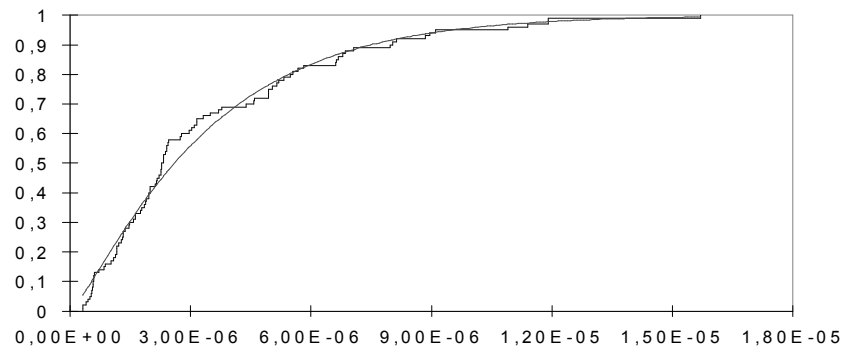
Priklausomai nuo rezultatų analizės metodikos pasirinkimo ir galimos modelio parametrų kaitos, jautrumo analizės metodai gali būti klasifikuojami į tokias rūšis:

- Bendra modelio parametrų ar struktūros kaita. Rezultatai yra suskaičiuojami esant aibe skirtingų parametrų kombinacijų arba tiesioginiams modelio struktūros (tarp jų ir detalumo) pokyčiams. Jautrumo įverčiai, kurie paprastai yra apytiksliai, šiuo atveju nustatomi naudojant be ribojimų atsitiktinai parinktas parametrų reikšmes, tarp kurių yra ir nominalios bei ekstremalios parametrų reikšmės. Vykdamas saugos analizę dažnai svarbiausi yra tie jautrumo įverčiai, kurie pagrįsti ekstremalio modelio parametrų reikšmėmis.

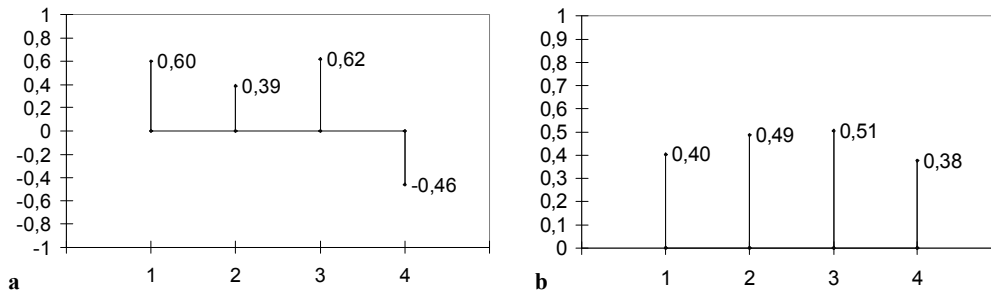
- Apibrėžtos srities jautrumo analizė. Šiuo atveju sistemos funkcionavimas tiriamas modelio parametrus keičiant iš anksto apibrėžtuose režiuose. Šie režiai dažnai parenkami atsižvelgus į nustatytų parametrų reikšmių neapibrėžtumo ribas.



6 pav. Modelio rezultatų reikšmės esant skirtingoms 1-o (a) ir 3-io (b) parametro reikšmėms



7 pav. Lėktuvo kritimo modelio rezultatų pasiskirstymas



8 pav. Standartiniai regresijos koeficientai (a) ir empiriniai koreliacijos koeficientai (b)

2 lentelė. Lėktuvo kritimo modelio parametų reikšmės

#	Parametrai	Rėžiai		Rekomend. (vidurkis)	Standart. nuokrypis	Skirstinys	Pastaba
		Min.	Max.				
Pradinės sąlygos							
1	$P_l$	1,2E-09	1,0E-07	5,1E-08	3,29E-08	Normalusis nupjautinis	Duomenų neapibrėžtumas
2	$N_c$	30 000	130 000	80 000	33 000	Normalusis nupjautinis	Duomenų neapibrėžtumas
Modelio parametrai							
3	r	0,1	0,3	0,2	0,067	Normalusis nupjautinis	Modeliavimo variacijos
4	g	0	0,46	0,23	0,15	Normalusis nupjautinis	Modeliavimo variacijos

3 lentelė. Lėktuvo kritimo modelio statistinės charakteristikos

Rezultatai su (0,95, 0,95) tolerancijos intervalu	Min.	Max.	Vidurkis	Standart. nuokrypis	Skirstinys	(0,05, 0,95) kvantilinio intervalo rėžiai
$P_l$ lėktuvo kritimo tikimybė per metus	3,19E-07	1,57E-05	3,45E-06	3,07E-06	Gama	Apatinis: 4,9E-07 Viršutinis: 9,1E-06

• Lokali jautrumo analizė. Šiuo atveju modelio rezultatų jautrumas tiriamas nežymiai įvairuojant apie vieną parametru rinkinį. Lokali jautrumo analizės rezultatai dažniausiai apibūdinami naudojant dalines išvestines esant pasirinktam parametru rinkiniui.

Jautrumo analizėje yra naudojamos tokios jautrumo priemonės, kaip standartiniai regresijos koeficientai bei koreliacijos koeficientai [12], kurie leidžia klasifikuoti parametru neapibrėžtumo įtaką rezultatui. Jeigu priklausomybė tarp neapibrėžtų parametru yra nepastebima, tai standartinės daugiamatės tiesinės regresijos visiems neapibrėžtiems parametrus koeficiento kvadratas turi tą pačią reikšmę kaip ir koreliacijos koeficiento kvadratas. Dažnai egzistuojanti priklausomybė tarp neapibrėžtų parametru atsispindi imtyje. Mažų imčių atveju yra įmanoma klaidinga koreliacija. Siekiant jos išvengti, reikia palyginti koreliacijos koeficientų ir standartinio regresijos koeficiento reikšmes.

Be to, standartinių regresijos ir dalinės koreliacijos koeficientų rezultatai yra paremti modelio tiesiškumo hipoteze. Norint patvirtinti šią hipotezę, yra svarbu apskaičiuoti vadinamąjį tiesinio regresijos modelio determinacijos koeficientą  $R^2$ , kuris parodo, kaip tiksliai tiesinės regresijos modelis nusako tikrojo rezultato  $Y$  reikšmes:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}; \quad (10)$$

čia  $\hat{y}_i$  – rezultato reikšmės  $y_i$  įvertis iš regresijos modelio.

Kuo  $R^2$  yra arčiau 1, tuo minėtų jautrumo įverčių tikslumas yra didesnis. Kitaip tariant, jei, pavyzdžiui,  $R^2 < 0,5$ , tai tokie jautrumo įverčiai, kaip koreliacijos koeficientas ar standartinis regresijos koeficientas, paaiškina santykinai mažą rezultato  $Y$  reikšmių imties dalį ir išvados apie rezultato jautrumą parametrus gali būti nekorektiškos.

## 5. MODELIAVIMO NEAPIBRĖŽTUMO IR JAUTRUMO ANALIZĖ

Kadangi dalis pradinių sąlygų ir lėktuvo kritimo modelio parametru nėra tiksliai žinomi arba skirtingos gamybos lėktuvams turi skirtingas reikšmes, tai sudarytam modeliui buvo atlikta neapibrėžtumo analizė. Taikant programinę įrangą SUSA (Software System for Uncertainty and Sensitivity Analyses) [5] toliau pateikta neapibrėžtumo ir jautrumo analizė remiasi anksčiau aprašyta metodika ir gerai žinomais tikimybinių skaičiavimų bei statistikos metodais. Neapibrėžtumo analizei naudojamų parametru reikšmės pateiktos 2 lentelėje.

Remiantis Vilksio formule ir taikoma neapibrėžtumo analizės metodika, iš viso buvo atlikta 100 skaitinių eksperimentų, imituojančių skirtingus lėktuvo kritimo atvejus. Kiekvieno eksperimento atveju visi keturi parametrai buvo keičiami nepriklausomai vienas nuo kito (pvz., lėk-

tuvo kritimo rezultatų priklausomybė nuo 1 ir 3 parametru parodyta 6 paveiksle). Tokiu modeliavimo būdu buvo gauta vidutinė lėktuvo kritimo tikimybė, rezultato jautrumo nuo pradinių parametru įverčiai bei nustatytos rezultatų neapibrėžtumo ribos.

Rezultatų neapibrėžtumas buvo nusakytas vertinant tolerancijos intervalą su 0,95 tikimybe, t. y. reikšmės į šį intervalą patenka su 0,95 pasikloivimo lygmeniu. Tolerancijos intervalas, suformuotas atsižvelgus į eksperimentų ekstremumus: 3,19E-07 ir 1,57E-05, nusako minimalią ir maksimalią lėktuvo kritimo tikimybę (3 lentelė).

Minimumas, maksimumas, vidurkis, standartinis nuokrypis ir kitos modelio statistinės charakteristikos yra pateiktos 3 lentelėje. Viršutinis ir apatinis (0,05, 0,95) kvantilinio intervalo režiai yra nustatyti remiantis klasikiniais statistikos skaičiavimais. Pavyzdžiui, viršutinį režį nusakantis 0,95 kvantilis parodo, kad tikimybė, jog rezultatas yra žemiau šio režio, yra 0,95.

Gautus rezultatus geriausiai apibūdina Gama skirstinys. Modelio rezultatų reikšmių skirstinys pavaizduotas 7 paveiksle.

Naudojant statistinę analizę gauti jautrumo įverčiai (8 pav.) apibūdina lėktuvo kritimo pradinių sąlygų ir modelio parametru įtaką modelio rezultatams.

Išvados apie parametru reikšmingumą ir rezultatų jautrumą yra gautos naudojantis tiesine nagrinėjamo modelio aproksimacija. Tiesinės aproksimacijos ir sudaryto modelio atitikimo lygis nusakomas koeficientu  $R^2$ , kuris nagrinėjamu atveju lygus 0,81. Iš jautrumo analizės rezultatų matyti, kurie parametrai gali turėti didžiausią įtaką nagrinėjamo išorinio įvykio pasirodymui. Šiuo atveju modelio rezultatus labiausiai veikia parametras  $r$  – lėktuvo kritimo zonos aplink Ignalinos AE spindulys, tačiau visų parametru įtaka rezultatams skiriasi gana nežymiai.

## 6. REZULTATAI IR IŠVADOS

Nagrinėjant lėktuvo kritimo ant Ignalinos AE modelį, buvo atlikta neapibrėžtumo ir jautrumo analizė. Nustatytos maksimali ir minimali įvykio pasirodymo per metus tikimybės yra 1,57E-05 ir 3,19E-07. Vidutinė įvykio pasirodymo per metus tikimybė lygi 3,45E-06, standartinis nuokrypis – 3,07E-06. Gautas rezultato reikšmes geriausiai apibūdina Gama skirstinys. Jautrumo analizė parodė, kad lėktuvo kritimo tikimybei didžiausią įtaką turi parametras  $r$  – lėktuvo kritimo zonos aplink Ignalinos AE spindulys.

Skirtingų šalių techniniai eksperimentai ir apskaičiavimai leidžia nustatyti, kad pagrindinės Ignalinos AE pastatų konstrukcijos išlaikytų krantančio lengvo lėktuvo smūgį bei gali būti sugriautos nukritus sunkiems ir kariniams lėktuvams. Ant Ignalinos AE 2-ojo bloko nukritęs lengvas lėktuvas gali pažeisti kai kurias sistemas, svarbias elektrinės saugai (pavyzdžiui, nutraukti išorinio elektros tiekimo linijas) bei sąlygoti kitus konstrukcijų pažeidimus. Tačiau tikimybė, kad sunkus lėktuvas nukris į pakankamai mažo spindulio reaktoriaus aktyviają zoną, yra labai maža. Vis dėlto į sudaromą pavojingų įvykių,

galinčių pažeisti skirtingas Ignalinos AE saugai svarbias sistemas, sąrašą tikslinga įtraukti lėktuvo kritimą, kaip pasekmių prasme reikšmingą inicijuojantį įvykį.

Gauta 2006 12 05  
Parengta 2007 03 22

#### Literatūra

1. Kobayashi T. Probabilistic analysis of an aircraft crash to a Nuclear Power Plant // Nuclear Engineering and Design. 1988. Vol. 110. P.207–211.
2. NUREG/CR-4550 Analysis of Core Damage Frequency, Surry Power Station, Unit 1, External Events. Sandia National Laboratories, 1986, SAND86-2084.
3. Hofer E. Sensitivity analysis in the context of uncertainty analysis for computationally intensive models // Computer Physics Communications. Elsevier Science. 1999. Vol. 117. P. 21–34.
4. Sachs L. Applied Statistics. Second edition. Springer Verlag, 1984.
5. Krzykacz B., Hofer E. and Kloos M. A software system for uncertainty and sensitivity analysis of results from computer models // Proc. Int. Conf. PSAM-II, 2, Session 063. San Diego, CA, 1994. P. 20–25.
6. Albutas R., Augutis J., Maioli A., Finnicum D. J., Carelli M. D., Petrovic B., Kling C. L., Kumagai Y. External events analysis and probabilistic risk assessment application for iris plant design // 13th International Conference on Nuclear Engineering: ICONE 13, Beijing, China, May 16–20, 2005. China, 2005. P. 1–8.
7. Dundulis G., Ušpuras E., Kulak R. Structural reliability of an Ignalina NPP building subjected to an airplane crash // Proceedings of the Structural Engineering Convection SEC 2005. Bangalore, India, December 14–16, 2005. P. 1–8.
8. Albutas R., Augutis J., Dundulis G., Ušpuras E. Probabilistic modeling of Aircraft Crash and impact on Ignalina NPP considering uncertainty. Kaunas: Lithuanian Energy Institute, 2000.
9. Albutas R., Dundulis G., Augutis J., Ušpuras E. Probabilistic modeling of aircraft crash and impact on Ignalina NPP considering uncertainty // Proceedings of the 8th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management: PSAM 8, New Orleans, Louisiana, USA, May 14–18, 2006. USA, 2006. P. 1–9.
10. Albutas R., Augutis J., Krikštolaitis R., Ušpuras E. Uncertainty and sensitivity analysis in aircraft crash modeling // The 3rd Safety and Reliability International Conference KONBiN'03: conference, proceedings, Gdynia, Poland, May 27–30, 2003. Poland, 2003. N 3. P. 267–274.
11. Albutas R., Augutis J., Urbonas R. Risk and sensitivity analysis in relation to external events // Proceedings of International Conference on Nuclear Energy in Central Europe 2001, Portorož, Slovenia, September 10–13, 2001. Slovenia, 2001. P. 1–14.
12. Čekanavičius V., Murauskas G. Statistika ir jos taikymai // TEV. Vilnius, 2002. D. II.

**Robertas Albutas, Kristina Kupčiūnienė, Rūta Adlytė, Juozas Augutis**

#### THE AIRCRAFT CRASH ON THE IGNALINA NPP PROBABILITY ESTIMATION CONSIDERING DATA UNCERTAINTY

##### Summary

Efforts to perform the deterministic and probabilistic analysis and to improve the safety of the Ignalina NPP are continuously being increased in Lithuania. Probabilistic safety estimation at the Ignalina NPP shows that it is necessary to keep on performing risk analysis and to continue improving safety. Technical experiments and calculations in different countries allow an unambiguous conclusion that the main building constructions of the Ignalina NPP would withstand the falling of light planes and can be destroyed by heavy transport or military planes. Crash of a light plane on the Ignalina NPP may damage separate systems important for the safety of the plant (for example, to break off the lines of the external electric system) and cause other accidents. Thus, the modelling of aircraft crash occurrence and its impact on the Ignalina NPP is significant in order to evaluate risk and prevent potential failure of the systems important to safety. In this work, we improve the aircraft crash probability estimation model in order to analyze the importance of the used parameters for the results. The aircraft crash probability on the territory of the NPP with the radius  $r$  may be expressed by the derived formula. This formula is used to calculate the aircraft crash probability using the most recent statistical data. As part of the initial conditions and parameters of aircraft crash models are not well-known or have different values for different types of planes, the uncertainty analysis was performed for a new model. The sensitivity analysis determines the parameters that have the greatest influence on the model results. Conclusions about the importance of the parameters and sensitivity of the results are obtained using a linear approximation of the model under analysis.

**Key words:** probabilistic modeling, aircraft crash frequency, uncertainty and sensitivity analysis

**Робертас Алзбутас, Кристина Купчиюнене, Рута Адлите, Юозас Аугутис**

#### ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ПАДЕНИЯ САМОЛЕТА НА ИГНАЛИНСКУЮ АЭС С УЧЕТОМ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ДАННЫХ

##### Резюме

В Литве все большее внимание уделяется осуществлению детерминистического и вероятностного анализа в целях повышения безопасности Игналинской АЭС. Вероятностная оценка безопасности Игналинской АЭС ясно показала, что следует продолжить анализ риска и постоянно повышать безопасность. В разных странах проведены технические эксперименты и расчеты, которые позволяют сделать однозначный вывод о том, что основные строительные конструкции Игналинской АЭС выдержат падение легких



самолетов, но могут быть разрушены тяжелыми транспортными или военными самолетами. Падение легкого самолета на второй энергоблок Игналинской АЭС может повредить отдельные системы, важные для безопасности станции (например, порвать линии внешней электросети), вызвать проектные аварии. Поэтому моделирование падения самолета на территорию Игналинской АЭС является важным при оценке риска и во избежание повреждений систем, важных для безопасности. В настоящей работе совершенствуется вероятностная модель падения самолета на основании оценки влияния используемых параметров на результаты. Вероятность падения самолета на территорию АЭС с радиусом  $r$  выражена формулой, которая используется для

расчетов вероятности падения самолета по новым статистическим данным. Поскольку часть начальных условий и параметров модели падения самолета точно не известны или имеют разные значения для разных типов самолетов, то для созданной модели осуществлен анализ неопределенности. Анализ чувствительности определяет параметры, которые оказывают максимальное влияние на результаты моделирования. Выводы о значимости параметров и чувствительности результатов получены линейной аппроксимацией созданной модели.

**Ключевые слова:** вероятностное моделирование, частота падений самолетов, анализ чувствительности и неопределенности