

# Ignalinos atominės elektrinės nutrūkusio vamzdžio trenkimosi á sienà tikimybinis modeliavimas vertinant neapibrèptumà

## Robertas Alzbutas

*Lietuvos energetikos institutas,  
Branduoliniø árenginiø saugos  
laboratorija, Breslaujos g. 3,  
LT-44403 Kaunas*

*Kauno technologijos universitetas,  
Fundamentaliøjø mokslø fakultetas,  
Studentø g. 50, LT-51368 Kaunas*

## Gintautas Dundulis

*Lietuvos energetikos institutas,  
Branduoliniø árenginiø saugos  
laboratorija, Breslaujos g. 3,  
LT-44403 Kaunas*

Atsiþvelgiant á grupinio paskirstymo kolektoarius (GPK) didelà reikðmingumà Ignalinos AE saugai buvo atliktas GPK giljotininio trùkio ir paþeidimo dël nutrūkusio GPK trenkimosi á gretimà sienà pasekmiø tikimybinis modeliavimas. Monte Karlo modeliavimo metodas buvo pritaikytas nustatant deterministinio modelio funkcionavimo jautrumà bei medþiagø savybiø ir geometriniø parametrø átakà gedimo tikimybei. FORM metodu buvo ávertintos ribiniø bûsenø tikimybës. Pagal ðias ribines bûsenas sprendþiama apie suirimà sienø, kuriose yra átvirtintas GPK ir á kurias trenkiasi trùkæs GPK. RS/MCS metodas buvo taikomas siekiant iðreikþti suirimo tikimybæ kaip funkcijà, t. y. nustatyti priklausomybæ tarp trenkimosi apkrovos ir suirimo tikimybës. Gauti tikimybiniai áverèiai bei apkrovos ir suirimo tikimybës priklausomybës tyrimas patvirtina santykinai maþà tokiø sàlyginiø ávykiø tikimybæ ir kartu maþà jø rizikà.

**Raktaþodþiai:** Ignalinos AE, vamzdþio trenkimasis, tikimybinis modeliavimas, neapibrèptumø analizë

## 1. ÁVADAS

Patikimumo ir rizikos analizës metodai tokiems sudëtingiems objektams kaip atominës elektrinės (AE), intensyviai buvo plëtojami dar prieš praëjusio amþiaus devintà deðimtmetà (avarija Èernobylio AE ávyko 1986 m.), taèiau tik per pastaruosius dvideðimt metø atkreipta daugiau dëmesio á tikimybina modeliavimà ir neapibrèptumà nagrinëjant atominës elektrinės sistemø patikimumà ir rizikà.

Kadangi neapibrèptumas yra bûdingas visiems realiø sudëtingø sistemø vertinimams bei modeliavimams, todël jo neámanoma iðvengti ir AE sistemø patikimumo bei rizikos áverèiuose. Neapibrèptumas modeliams bûdingas jau vien todël, kad kiekvienas modelis yra tikrovës imitacija. Turimi AE sistemø duomenys retai bûna iðsamûs ir tinkami áprastam matematiniam modeliavimui. Be to, dël ávairiø prieþasèiø AE sistemø modeliuose panaudojami ne visi informacijos ðaltiniai. Yra þinoma, kad kartais vien dël duomenø trùkumo ir neatsiþvelgimo á esamà neapibrèptumà daromi klaidingi sprendimai.

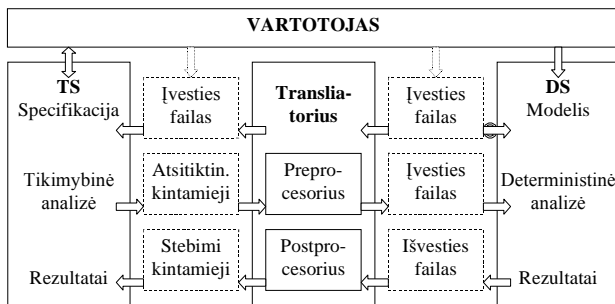
Remiantis neiðsamiais duomenimis bei netiesiogine ir subjektyvia informacija AE sistemø patikimumui kontroliuoti ir rizikai maþinti vien klasikinës statistikos nepakanka. Patikimumo ir rizikos rodikliø taikymui reikia integruoti skirtingas teorijas ir metodus.

## 2. TIKIMYBINIS MODELIAVIMAS SUJUNGIANT PROGRAMAS

Siekiant atsiþvelgti á AE sistemø atskirø parametrø tikimybina kilmæ buvo integruojami ir kuriami ne tik atskiri metodai, bet ir programinės priemonës. Egzistuojanèios deterministinio modeliavimo programos (pvz., NEPTUNE [1], RELAP5 [2]) buvo sujungtos su universaliomis tikimybiniø modeliavimo programomis (pvz., ProFES [3], SUSA [4]). Siekiant pasinaudoti egzistuojanèiomis priemonėmis (pvz., ProFES, NEPTUNE) ir naujai sukurtomis universaliomis modeliavimo priemonėmis (pvz., ADPRO [5], REPEAT [6]) buvo sudaryta programiniø priemoniø sujungimo schema (1 pav.).

Bendruoju atveju nagrinëjama deterministinio modeliavimo programinės árangos sistema, toliau þymima DS, yra naudojama analizuoti AE sistemos gedimams, avarijoms ir pasekmëms. Siekiant gauti modeliavimo tikimybinis rezultatus, deterministinis modeliavimas buvo atliekamas naudojant skirtingas atsitiktiniø kintamøjø reikðmes, kurios nustatomos tikimybiniø modeliavimo programinės árangos sistemoje, toliau þymimoje TS. Taip naudojama TS surenka DS gautus rezultatus ir atlieka tikimybina analizæ. Deterministiniai DS rezultatai turi bûti persiunèiami á tikimybiniø modeliavimo programinės árangos sistemà, kuri tada atlieka tikimybina AE sistemos gedimø ir jø pasekmiø analizæ. Tikimybina

AE sistemø analizø darbe buvo pagrãsta skirtingais modeliavimo metodais (pvz., Monte Karlo modeliavimu).



**1 pav.** Tikimybinø ir deterministinio modeliavimo programiniø árangos integracija

Ávairūs metodai darbe buvo taikomi siekiant atlikti analitiniø metodø validacijã bei didelø ir sudøtingø AE sistemø modeliavimã, kai nelengva sudaryti deterministinã modelã ir analizines aproksimacijas. Be to, sukurtos integruotos tikimybinio modeliavimo priemonø (pvz., REPEAT) buvo naudojamos ne tik vertinant sudøtingø sistemø gedimo tikimybes, rizikos rodiklius ir patikimumo parametrus, bet ir atliekant jautrumo bei neapibrøptumo analizø.

### 3. TIKIMYBINIS MODELIAVIMAS VERTINANT NEAPIBRËPTUMÀ

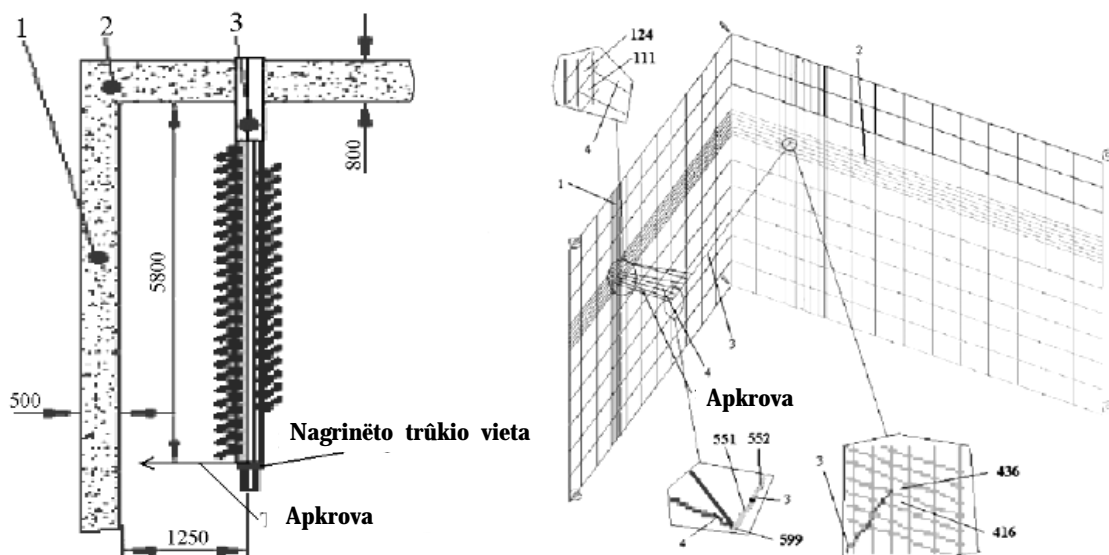
Ávairiose ðalyse atliekant AE tikimybinø saugos analizes nustatyta, kad ne tik visa reaktoriaus sistema ar atskiri jos elementai, bet ir skirtingi vamzdynø segmentai ar

atskiros vamzdynø vietos gali bûti reikðmingi rizikos poþiūriu. Trūkiø, atsiradusiø skirtinguose vamzdynø segmentuose, pasekmø dël tolesniø dinaminø efektø gali bûti labai skirtingos. Siekiant sumodeliuoti dinaminø AE sistemã ir ávertinti nutrūkusio vamzdþio sukeltø gedimø tikimybes bei rezultatø neapibrøptumã, buvo atlikta tikimybinø patikimumo analizø.

#### 3.1. Gedimø atsiradimo trūkus grupiniam paskirstymo kolektooriui scenarijai

Palyginus su kitomis AE, Ignalinos AE RBMK tipo reaktoriai turi kur kas daugiau didelø vamzdþiø. Vieno ið didelø energijos vamzdynø giljotininis trūkis gali sàlygoti gretimø vamzdynø ir pastatø struktūrø suirimã. Grupinis paskirstymo kolektoorius (GPK) yra vienas reikðmingiausiø reaktoriaus saugã veikianøiø elementø Ignalinos AE [7]. Reaktoriaus avarinio auðinimo sistemos vamzdynai yra prijungti prie GPK. Esant jo trūkiui, reaktoriaus auðinimo skystis teka pro reaktoriaus avarinio auðinimo sistemã ir GPK vamzdþius, sukurdamas naujà apkrovã. GPK po giljotininio trūkio gali judėti ir trenktis á kaimyninã GPK ar gretimã patalpos sienã [8]. Ðiame darbe atskirai nagrinėjamas giljotiniøkai trūkusio vamzdþio trenkimasis á gretimã sienã.

GPK trūkio ðaþnis, naudojamas tikimybinø saugos analizø (TSA) modelyje, yra lygus  $2,0 \cdot 10^{-5}$  per metus, o tokios avarijos, kai dar paþeidþiama aktyvioji zona, ðaþnis (sàlyginis CDF) yra lygus  $6,6 \cdot 10^{-8}$  per metus. Taèiau ðie áverèiai buvo gauti neávertintus minøtø dinaminø efektø. Ignalinos AE TSA modelyje iki ðiol dinaminiai efektai nebuvo vertinami. Dël to GPK gretimø struktūrø suirimo tyrimas buvo



**2 pav.** Trūkusio GPK vaizdas ið virøaus bei kombinuotas GPK ir betono sienø modelis. 1 – gretimã sienã, á kuriã trenkiasi GPK, 2 – GPK laikanti sienã, 3 – trūkãs GPK, 4 – GPK ir sienos kontaktinis elementas, 111, 124, 416, 436, 599, 551, 552 – tiriamieji modelio elementai

nagrinėjamas kaip tyrimas, kuris vèliau galès bûti panaudotas atliekant iðsamià Ignalinos AE dinaminio efektø analizà.

*Vamzdþio trenkimosi á gretimà sienà modelis*

Giljotiniškai trûkusio GPK vamzdþio trenkimosi á greta esanèià sienà analizei parengtas baigtinio elementø modelis pavaizduotas 2 paveiksle. Sienos paþymètos skaièiais 1 ir 2, o GPK paþymètas skaièiumi 3. Ðios sienos ir GPK yra átraukti á modelà, naudojamà GPK trenkimuisi á sienà modeliuoti.

Grupinis paskirstymo kolektorius yra 0,325 m iðorinio skersmens, 0,015 m sienos storumo bei 6 m ilgio horizontalus cilindras (vamzdþis). Atstumas tarp GPK aðinès linijos ir vidinio gretimos sienos pavirðiaus yra 1,25 m. Sienos, á kurià trenkiasi GPK, storis yra 0,5 m, o laikanèiosios sienos storis yra 0,8 m.

**3.2. Tikimybiniis vamzdþio trûkio pasekmiø ir gèdimø bûsenø vertinimas**

Atliekant sienos suirimo tikimybinaø analizà, neapibrèptos medþiagø savybès, elementø geometrijos duomenys bei apkrovos buvo laikomos atsitiktiniais dydþiais, kuriø skirstinys yra normalusis arba logaritminis normalusis. Giljotiniškai trûkusio GPK trenkimosi á sienà ir sienos suirimo tikimybinei analizei atlikti buvo pritaikytas Monte Karlo modeliavimo metodas, pirmos eilès patikimumo bei atsako pavirðiaus metodas.

*Tikimybiniø GPK analizè taikant Monte Karlo modeliavimo metodà*

Monte Karlo modeliavimo metodas (MCS) buvo taikomas siekiant iðtirti medþiagø savybiø ir geometrinio parametø neapibrèptumo poveikà bei ávertinti ribiniø bûsenø tikimybes. Neapibrèptumo analizès tikslas ðiuo atveju buvo identifikuoti ir kiekybiðkai ávertinti tuos potencialiai neapibrèptus parametrus, kurie reikðmingiausiai veikia rezultata.

Tikimybiniøje analizèje skaitiniø dydþiø neapibrèptumas buvo modeliuojamas naudojant atsitiktinius dydþius. Modelyje atsitiktiniai dydþiai buvo konstrukcijø stiprumui reikðmingos mechaninès savybès bei geometriniai parametrai.

- Neapibrèptos mechaninès savybès:
  - betonui – Puasono koeficientas, Jungo modulis, ašinio tempimo stiprumo riba;
  - armatûriniamis strypams – takumo riba;
  - vamzdþiams – Puasono koeficientas, Jungo modulis, takumo riba;
  - vamzdþiø sàveikai – kontaktinis standumas.
- Neapibrèptos geometrinès savybès:
  - gelþbetoniui – armatûrinio strypo skerspjûvio plotas;
  - vamzdþiams – sienelès storis ir spindulys.

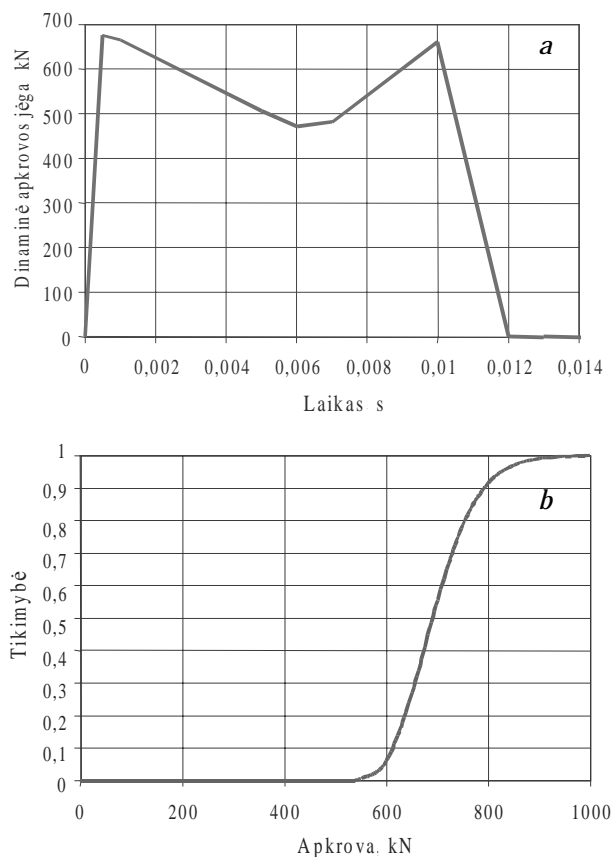
Rezultatus labiausiai veikiantys atsitiktiniai dydþiai buvo atrinkti ið didelio skaièiaus pradinio atsitiktinio dydþiø naudojant jautrumo áverèius ir pasikliautinuosius intervalus. Kad bûtø galima palyginti skirtingø parametø reikðmès, parametø jautrumo áverèiai ir

pasikliautinieji intervalai buvo sunormuoti. Atlikus jautrumo analizà nustatyta, kad reikðmingiausi sienos, á kurià trenkiasi giljotiniðkai trûkæs GPK vamzdþis, neapibrèpti modelio parametrai yra ðie: Puasono koeficientas, Jungo modulis, aðinio tempimo stiprumo riba; armatûrinio strypo takumo riba. Analogiðkai nustatyta, kad reikðmingiausi GPK vamzdþio parametrai yra: Jungo modulis, vamzdþio sienelès storis ir jo spindulys. Ðie atsitiktiniai dydþiai kartu su nominaliomis kitø dydþiø reikðmėmis buvo naudojami ir skaièiavimuose naudojant pirmos eilès patikimumo metodà (FORM) bei vadinamàjà atsako pavirðiaus ir Monte Karlo modeliavimà (RS/MCS) [9].

*Tikimybiniø GPK analizè taikant FORM ir RS/MCS metodus*

FORM metodas buvo taikytas tiriant sienos, á kurià trenkiasi GPK, ir laikanèiosios sienos suirimo tikimybà. Palyginti su MCS, FORM metodas yra tinkamesnis nagrinèjant maþesnà atsitiktiniø kintamøjø ir ribiniø bûsenø (betono, armatûrinio strypo ir GPK suirimo) kiekà. Taip yra dël to, kad tokiam pat tikslumui kaip MCS pasiekti FORM reikalauja maþesnio baigtinio elementø modelio skaièiavimo kiekio. Ðiuo atveju buvo atlikta 1419 skaièiavimø.

Giljotininio trûkio dinaminès apkrovos ir giljotiniðkai trûkusio vamzdþio sienos, á kurià trenkiasi GPK, suirimo tikimybès priklausomybès kreivei nustatyti buvo pritaikytas RS/MCS metodas. Pirmoje



**3 pav.** Giljotinio trûkio dinaminè apkrova (a) ir apkrovos sàlygota suirimo tikimybè (b)

RS/MCS analizės dalyje, siekiant gauti priklausomybės tarp atsako kintamųjų ir pradinio atsitiktinio kintamųjų funkciją, buvo taikomas atsako paviršiaus metodas. Taikant RS metodą buvo atlikta 100 skaičiavimų ir gauta modelio atsako funkcija (1). RS/MCS analizės dalyje, siekiant nustatyti gedimo tikimybę, kuri pagrąsta šia analitiškai išreikšiamą funkcija, buvo taikomas Monte Karlo metodas. Šiuo atveju buvo atlikta 1000000 skaičiavimų.

RS/MCS analizės RS skaičiavimų dalyje apkrovai modeliuoti buvo naudojamas tolygusis skirstinys. Apkrovos sklaidos intervalas buvo nuo 0 N iki maksimaliai galimos 677 kN reikšmės (pr. 3 pav. a dalį).

Nagrinėtu atveju sienos, á kurią trenkiasi giljotiniškai trūkės GPK vamzdis, suirimo tikimybė yra pagrąsta atsako kintamuoju  $y$ , kuris taikant RS metodą buvo išreikštas kaip apkrovos ir neapibrėptų parametrų funkcija:

$$y = x_0 + x_1 L_1 + x_2 L_2 + x_3 P_1 + x_4 Y_1 + x_5 U_1 + x_6 R_1 + x_7 P_2 + x_8 Y_2 + x_9 U_2 + x_{10} Y_3 + x_{11} T_3 + x_{12} M_3. \quad (1)$$

Šios funkcijos parametrai yra laikomi atsitiktiniais dydžiais:  $L_1$  ir  $L_2$  – maksimalios apkrovos reikšmės;  $P_a$  – 1-os sienos (pr. 2 pav.) Puasono koeficientas,  $Y_1$  – 1-os sienos Jungo modulis,  $U_1$  – 1-os sienos ašinio tempimo stiprumo riba,  $R_1$  – 1-os sienos armatūrinio strypo takumo riba,  $P_2$  – 2-os sienos (pr. 2 pav.) Puasono koeficientas,  $Y_2$  – 2-os sienos Jungo modulis,  $U_2$  – 2-os sienos ašinio tempimo stiprumo riba,  $Y_3$  – 3-imis paįymėto vamzdžio (pr. 2 pav.) Jungo modulis,  $T_3$  – 3-imis paįymėto vamzdžio storis,  $M_3$  – 3-imis paįymėto vamzdžio vidutinis spindulys.

Tuomet, turint atsako kintamąją  $y$ , GPK laikanėios sienos suirimas esant gniuždymui, t. y. pasiekus šios sienos betono gniuždymo stiprumo ribą ( $1,7 \cdot 10^7$  N), gali būti apibrėpta naudojant tokią nelygybę:

$$y(L_1, L_2, P_1, Y_1, U_1, R_1, P_2, Y_2, U_2, Y_3, T_3, M_3) < 1,7 \cdot 10^7. \quad (2)$$

Priklausomybės funkcija (1), kuri buvo gauta taikant RS metodą, toliau buvo naudojama atliekant MCS analizę. Apkrovos  $L_1$  ir  $L_2$  buvo kintamieji, nuo kurių priklauso suirimo tikimybė  $P_f$  išreikšta nelygybe (3). Visi kiti kintamieji, toliau įymimi  $V$ , yra neapibrėpti parametrai. Modeliuojant jie laikomi atsitiktiniais kintamaisiais.

$$P_f(L_1, L_2) = P(y(L_1, L_2, V) < 1,7 \cdot 10^7). \quad (3)$$

Šioje analizėje apkrovai buvo naudojamas normalusis skirstinys su 10% variacijos koeficientu. Medžiagų savybėms ir geometriniams parametrų buvo naudojamas logaritminis normalusis skirstinys. Formulėje (3) nominalios ir atsitiktinės medžiagų savybių ir geometrinių parametrų reikšmės buvo tos pačios, kaip ir taikant kitus metodus.

Betono gniuždymo stiprumo riba pasiekama, kai apkrova apytiksliai lygi 550 kN, o betonas suyra esant

maįdaug 950 kN apkrovai, t. y. tuo metu suirimo tikimybė tampa artima 1-ai (pr. 3 pav. b dalį). Be to, galima pastebėti, kad gedimo tikimybė, esant 677 kN apkrovai, yra 0,4, ir tai gerai atitinka rezultatus, gautus pritaikius FORM metodą.

*Tikimybinių analizės rezultatų aptarimas ir apibendrinimas*

Atlikus giljotiniškai trūkusio GPK trenkimosi á gretimą sieną tikimybinių analizę gauta, kad:

- Giljotiniškai trūkus GPK, kontakto tarp GPK ir gretimios sienos atsiradimo tikimybė lygi 0,98. Be to, esant  $1,299 \cdot 10^{-2}$  tikimybei, trenkimosi vietoje gali būti pasiekta betono stiprumo riba tempiant ir susidaryti plyšys. Šios tikimybės 90% pasikliautinis intervalas yra nuo  $1,253 \cdot 10^{-2}$  iki  $1,345 \cdot 10^{-2}$ ;

- GPK trenkimosi vietoje gretimose sienoje gali būti pasiekta armatūrinio strypo stiprumo riba, o strypo suirimo tikimybė su sąlyga, kad GPK trenkėsi á gretimą sieną, yra lygi 0,327. Be to, GPK ávirtinanėioje sienoje gali būti pasiekta armatūrinio strypo stiprumo riba, o šio strypo suirimo sąlyginė tikimybė yra lygi 0,11;

- Giljotiniškai trūkus GPK, GPK ávirtinanėioje sienoje gali būti pasiekta betono stiprumo riba gniuždant ir betonas suirs su sąlygine tikimybe, lygia  $1,261 \cdot 10^{-2}$ . Šios tikimybės 90% pasikliautinis intervalas yra nuo  $1,216 \cdot 10^{-2}$  iki  $1,306 \cdot 10^{-2}$ .

Remiantis gautais rezultatais galima padaryti išvadą, kad po GPK giljotininio trūkio ir trenkimosi á sieną GPK ávirtinanti siena bei siena, á kurią trenkiasi GPK, suirs su tikimybe, apytiksliai lygia  $1,3 \cdot 10^{-2}$ . Be to, remiantis konservatyvia TSA prielaida apie pradinio gedimo tikimybę, t. y. GPK giljotininio trūkio tikimybę, nustatyta, kad GPK trūkio sąlygota nagrinėtos sienos suirimo per metus tikimybė yra lygi  $2,52 \cdot 10^{-7}$ . Gauti áverėiai patvirtina santykinai maįpą tokių sąlyginėių ávykių tikimybę ir kartu maįpą jų riziką.

#### 4. IŠVADOS

Nustatyta, kad praktiniams uįdaviniams spręsti reikalinga ávairių tikimybinių, statistinių ir skaitmeninių modeliavimo metodų bei programinių priemonių analizė, tobulinimas, integravimas bei naujų priemonių kūrimas ir jų taikymo metodikų sudarymas. Vykiant neapibrėptumo analizę buvo atskleistas poreikis taikyti ir toliau plėtoti iš principo skirtingus metodus bei universalias modeliavimo metodikas, skirtas ávairių AE sistemų patikimumo, gedimų tikimybėi áverėiui bei rizikos rodiklių vertinimui ir neapibrėptumo analizei.

Ignalinos AE grupinio paskirstymo kolektoriaus giljotininio trūkio ir paįeidimo pasekmėi dėl nutrūkusio grupinio paskirstymo kolektoriaus trenkimosi á gretimą sieną tikimybinių analizė rodo, kad po kolektoriaus giljotininio trūkio ir trenkimosi á sieną kolektorių ávirtinanti siena bei ta siena, á kurią atsitrenkia kolektorius, suirs su tikimybe, apytiksliai lygia  $1,3 \cdot 10^{-2}$ . Be to, ávertinta, kad Ignalinos AE GPK trūkio sąlygota nagrinėtos sienos suirimo per metus tikimybė yra lygi

$2,52 \cdot 10^{-7}$ . Remiantis sudarytais tikimybiniais modeliais ir atsižvelgiant á modeliavimo neapibrëptumà buvo nustatyta sienos suirimo nuo kolektorio veikianëios apkrovos tikimybës priklausomybës kreivë. Gauti tikimybiniai áverëiai bei apkrovos ir suirimo tikimybës priklausomybës tyrimas patvirtina santykinai maþà tokiø sàlyginiø ávykiø tikimybæ ir kartu maþà jø rizikà

Gauta 2004 11 12

#### Literatûra

1. Kulak R. F. & Marchertas P. Development of a Finite Element Based Probabilistic Analysis Tool // Transaction 17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. Prague, Czech Republic, August 17–22, (CD-ROM), Paper B215, 2003.
2. Fletcher C. D. & Schultz R. R. RELAP5/MOD3 User's Guidelines, NUREG/CR-5535, Washington D. C., USA, 1992.
3. Cesare M. A. & Sues R. H. PROFES Probabilistic Finite Element System – Bringing Probabilistic Mechanics to the Desktop. American Institute of Aeronautics and Astronautics. AIAA 99–1607, 1999. P. 1–11.
4. Kloos M. & Hofer E. SUSANA the PC Version of the Software System for Uncertainty and Sensitivity Analysis of Results from Computer Models, User's Guide and Tutorial, 1999.
5. Alzbutas R. & Janilionis V. The Simulation of Dynamic Systems Using Combined Modelling // Mathematical Modelling and Analysis. Vilnius: Technika, 2000. Vol. 5. P. 7–17.
6. Alzbutas R. Methods for Reliability Parameters Estimation and Analysis Toolkit // Proc. of International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2004. P. 1440–1446.
7. Alzbutas R., Dundulis G., Kulak R. Finite Element System Modelling and Probabilistic Methods Application for Structural Safety Analysis // Proc. of the 3rd Safety and Reliability International Conference KONBiN'03. Gdynia, Poland, 2003. Vol. 3. P. 213–220.
8. Alzbutas R., Dundulis G., Kulak R. F., Marchertas P. V. Reliability Analysis of Pipe Whip Impacts // Proc. of Transaction 17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. Prague, Czech Republic, CD:M268, 2003. P. 1–8.
9. Cruse T. A. Reliability-Based Mechanical Design. 1997.

**Robertas Alzbutas, Gintautas Dundulis**

#### PROBABILISTIC SIMULATION CONSIDERING UNCERTAINTY OF RUPTURED PIPE STROKE TO THE WALL OF THE IGNALINA NUCLEAR POWER PLANT

##### Summary

A probabilistic simulation of a group distribution header (GDH) guillotine rupture and the damage

consequences resulting from the failed GDH impacting against a neighbouring wall was carried out. The Monte Carlo simulation method was used to study the sensitivity of the deterministic model response and the effect of uncertainties of material properties and geometry parameters to the probability of failure. Using the FORM method, the probability of limiting states related to failure of the support-wall and the impacted-wall was calculated. According to these limiting states the damage of wall supporting GDH and wall affected by GDH stroke was determined. The RS/MCS method was applied to express failure probability as a function and to investigate the dependence between the impact load and failure probability. The obtained probabilistic estimates and the investigation of a dependence between loads and damage probability confirm a relatively low probability and thus a low risk of such conditional events.

**Key words:** Ignalina NPP, pipe stroke, probabilistic simulation, uncertainty analysis

**Робертас Алзбутас, Гинтаутас Дундулис**

#### ВЕРОЯТНОСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРА РАЗОРВАННОЙ ТРУБЫ В СТЕНУ ИГНАЛИНСКОЙ АЭС С УЧЕТОМ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

##### Резюме

Учитывая важное значение распределительного группового коллектора (РГК) для безопасности Игналинской АЭС было выполнено вероятностное моделирование гильотинного разрыва РГК и последствий удара разорванного РГК в прилегающую стену. Чувствительность функционирования детерминистической модели, влияние свойств и геометрических параметров материалов на вероятность повреждения определены методом Монте-Карло. Методом FORM были установлены вероятности граничных состояний. По этим состояниям определялись возможные повреждения стены, удерживающей РГК, и стены, по которой нанесен удар разорванным РГК. Метод RS/MCS был применен с целью выразить вероятность повреждения как функцию, т. е. определить зависимость между нагрузкой удара и вероятностью повреждения. Полученные оценки вероятностей, а также осуществленный анализ зависимости нагрузки и вероятности повреждения подтверждают относительно низкую вероятность подобной ситуации и опасности последствий таковой.

**Ключевые слова:** Игналинская АЭС, удар трубы, вероятностное моделирование, анализ неопределенности