

RBMK-1500 reaktoriaus atsargos koeficiento iki ribinio leistino kuro kanalo galingumo skaičiavimo algoritmo patobulinimas

Vaidas Matuzas,

Vytis Kopustinskas,

Juozas Augutis

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

Ignalinos AE informacinės skaičiavimo sistemos eksploatacijos metu stebimi atsargos koeficiento iki ribinio leistino kuro kanalo galingumo pagal tiesinę apkrovą reikšmės šuoliniai pokyčiai, nesusiję su technologiniais reaktoriaus darbo režimo pasikeitimais. Šie pokyčiai susiję su energijos išsiskyrimo netolygumo koeficiento nustatymo paklaidomis, priklausančiomis nuo energijos išsiskyrimo maksimumo padėties. Energijos išsiskyrimo forma kuro kanale dažnai turi du panašius lokalius maksimumus. Pakitus globalaus maksimumo padėčiai iš vieno lokalaus maksimumo į kitą įvyksta trumpalaikiai atsargos koeficiento šuoliniai pokyčiai, nors paties energijos išsiskyrimo maksimumo reikšmė pakinta nežymiai.

Straipsnis skirtas šio skaičiavimo algoritmo analizei siekiant nustatyti trumpalaikių šuolinių pokyčių priežastis bei identifikuoti galimus skaičiavimo algoritmo patobulinimus.

Darbe nustatytos nestabilumo priežastys ir pateikti skaičiavimo algoritmo patobulinimai konservatyviai vertinant energijos išsiskyrimo netolygumo koeficiento nustatymo paklaidą ir papildomai pritaikant antros eilės baigtinio impulsinio atsako filtrą. Patobulintas skaičiavimo algoritmas patikrintas naudojant IAE informacinės skaičiavimo sistemos momentines duomenų bazes bei atliekant bandymus IAE.

Raktažodžiai: energijos išsiskyrimas kuro kanale, energijos išsiskyrimo netolygumas, matematinis modelis.

1. ĮVADAS

Ignalinos atominės elektrinės (IAE) branduoliniame reaktoriuje RBMK-1500 daugumos vykstančių technologinių procesų analizei ir valdymui naudojama informacinė skaičiavimo sistema (ISS). Šios sistemos paskirtis – pateikti IAE operatoriams informaciją apie technologinių įrenginių bei technologinių procesų būklę bei jų parametrus. ISS pateikiama informacija tiesiogiai susijusi su reaktoriaus sauga, nes pagal ją operatoriai priima valdymo sprendimus, taip pat generuojami automatiniai reaktoriaus valdymo ir avarinio stabdymo signalai.

Dalis svarbių reaktoriaus parametrų nėra tiesiogiai matuojami, tačiau jų reikšmės ISS apskaičiuoja periodiškai pagal nustatytus algoritmus. IAE eksploatacijos pradžioje ISS perskaičiuodavo parametrų reikšmes kartą per 5 minutes. Vėliau tobulinant ISS bei didinant skaičiavimų našumą, parametrų perskaičiavimo periodo trukmė buvo ženkliai sumažinta ir šiuo metu yra 5 sekundės. Šis ISS patobulinimas yra neabejotinai reikšmingas didinant reaktoriaus saugą.

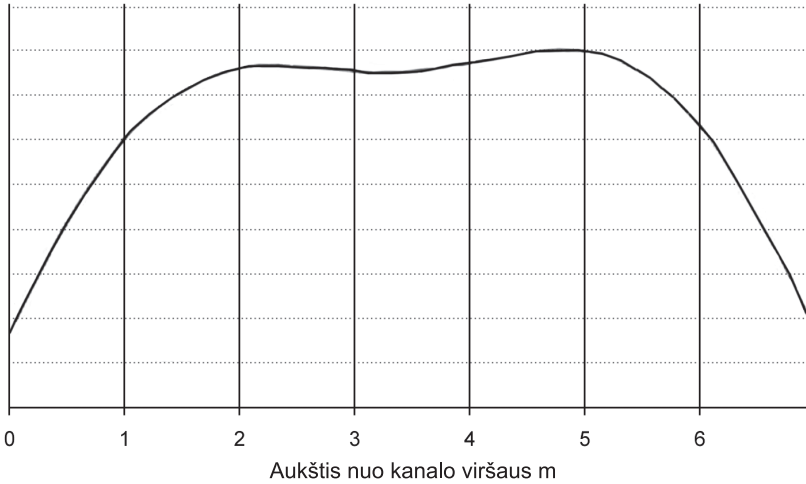
Tačiau kaip parodė eksploatacinė praktika, skaičiavimų periodo sumažinimas nulėmė kai kurių reaktoriaus parametrų skaičiavimo algoritmų pateikiamų rezultatų nestabilumus. Vienas tokių nestabilių parametrų yra atsargos koeficientas iki ribinio leistino kuro kanalo galingumo pagal tiesinę apkrovą (KZL). Kai kuriems kuro kanalams yra stebimi trumpalaikiai (3–5 perskai-

čiavimo ciklai) KZL reikšmės šuoliniai pokyčiai. Pastebėta, kad šie KZL pokyčiai nebūdavo susiję su technologiniais reaktoriaus darbo režimo pasikeitimais. Šiame darbe analizuojamos KZL skaičiavimo algoritmo nestabilumo priežastys ir pateikiamas algoritmo patobulinimas konservatyviai vertinant energijos išsiskyrimo netolygumo koeficiento nustatymo paklaidą ir papildomai pritaikant antros eilės baigtinio impulsinio atsako filtrą.

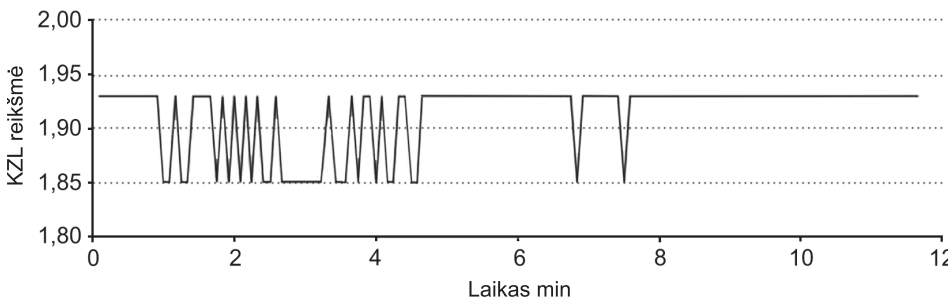
2. ENERGIJOS IŠSISKYRIMO PASISKIRSTYMAS KURO KANALE

Energijos išsiskyrimo vertikalus pasiskirstymas RBMK-1500 reaktoriaus kuro kanale apskaičiuojamas remiantis neutronų srauto daviklių duomenimis. Kadangi šių daviklių skaičius reaktoriuje yra ribotas [1], todėl energijos išsiskyrimas kiekviename kuro kanale apskaičiuojamas su paklaida, kurią ISS taip pat įvertina.

Energijos išsiskyrimo pasiskirstymas RBMK-1500 reaktoriaus kuro kanale dažniausiai turi du maksimumus. Tipiška energijos išsiskyrimo forma parodyta 1 paveiksle [2]. Tačiau kai kuriuose kuro kanaluose, ypač kurių bendrasis galingumas yra mažas, gali būti tik vienas maksimumas. Taip pat galimas trumpalaikis energijos išsiskyrimo formos pokytis, kuomet vieno skaičiavimo ciklo metu randamas vienas maksimumas, kito – jau du maksimumai, o dar po kelių ciklų stebimas vėl tik



1 pav. Energijos išsiskyrimo RBMK-1500 kuro kanale tipinis pasiskirstymas



2 pav. Tipiškas KZL reikšmės nestabilumo pavyzdys

vienas maksimumas. Maksimalios reikšmės stabilumą ypač apsunkina situacija, kuomet energijos išsiskyrimo pasiskirstymas turi beveik horizontalią tiesę kuro kanalo viduryje. Tokiu atveju labai didelė tikimybė, kad įvairiuose skaičiavimo cikluose maksimumas bus apskaičiuojamas skirtingose tiesės vietose. Tipiškas KZL reikšmės nestabilumo pavyzdys parodytas 2 paveiksle.

3. KZL SKAIČIAVIMO ALGORITMAS

Atsargos koeficiento iki ribinio leistino kuro kanalo galingumo pagal tiesinę apkrovą skaičiavimas atliekamas tokiu būdu [3, 4]:

$$KZL = \frac{q^{PD} \cdot (1 - e \cdot \sigma)}{q^{\max} \cdot (1 - e \cdot \sigma^{nom})}; \quad (1)$$

čia e – konstanta ($e = 3$);

σ^{nom} – maksimalios tiesinės apkrovos nustatymo nominali paklaida (konstanta);

σ – kuro kanalo maksimalios tiesinės apkrovos nustatymo santykinė vidutinė kvadratinė paklaida, nustatoma pagal (3) formulę;

q^{PD} – kuro kanalo ribinė leistina tiesinė apkrova, nustatoma pagal kanalo išdirbį, W/cm;

q^{\max} – maksimali kuro kanalo apkrova W/cm;

$q^{\max} = W \cdot KZ \cdot C$;

čia C – tiesinės apkrovos skaičiavimo konstanta;

W – kuro kanalo galingumas W;

KZ – energijos išsiskyrimo pasiskirstymo netolygumo koeficientas:

$$KZ = \frac{WK(z^{\max}) \cdot (H_{eff} - 2 \cdot \Delta H_{eff})}{W}; \quad (2)$$

čia $WK(z)$ – taškinis energijos išsiskyrimas kuro kanale aukštyje z (W);

z^{\max} – energijos išsiskyrimo maksimumo padėtis, aukštis nuo kuro kanalo viršaus (m);

H_{eff} – aktyviosios zonos efektyvus aukštis (konstanta);

ΔH_{eff} – efektyvus reflektoriaus pridedamasis aukštis (konstanta);

$$\sigma = \sqrt{DW + DKZ / KZ^2 + DQ + Dqk + Dqn}; \quad (3)$$

čia DW – kuro kanalo galingumo nustatymo paklaida (konstanta);

DQ – absoliučios šiluminės reaktoriaus galios nustatymo paklaida (konstanta);

Dqk – kritinio šiluminio srauto nustatymo paklaida dėl išdirbio, kuro tabletės dydžio ir skaičiavimo modelio paklaidų (konstanta);

Dqn – ribinės leistinos tiesinės apkrovos nustatymo paklaida (konstanta);

DKZ – energijos išsiskyrimo pasiskirstymo netolygumo koeficiento nustatymo paklaida:

$$DKZ = \left(\frac{H_{eff} - 2\Delta H_{eff}}{\sum_{m=1}^2 N^{2m-1} SB_m} \right) \cdot \sum_{j=1}^4 (T(z^{\max}, j) \cdot DN^{(j)}), \quad (4)$$

$$T(z, j) = \left(\sin \frac{\pi j (z + \Delta H_{eff})}{H_{eff}} \right)^2;$$

čia SB_m – normavimo koeficientas (konstanta);

$DN^{(j)}$ – radialinio energijos išsiskyrimo j -osios harmonikos koeficientas.

$DN^{(j)}$ – radialinio energijos išsiskyrimo j -osios harmonikos koeficiento nustatymo paklaida.

4. ALGORITMO ANALIZĖ

IAE ISS sistemoje *KZL* apskaičiuojamas pagal (1) formulę. Kadangi parametrai e ir σ^{nom} yra konstantos, tai apskaičiuojama *KZL* reikšmė priklauso nuo q^{PD} , q^{max} ir σ . Tačiau q^{PD} priklauso tik nuo kuro tipo bei jo išdegimo laipsnio, t. y. nesikeičia per pakankamai trumpą laiką. Dydis q^{max} nors ir priklauso nuo *KZL*, tačiau žymiai nesikeičiant energijos išsiskyrimo kanale pasiskirstymo formai, taip pat negali ženkliai keistis ir todėl neturi įtakos trumpalaikiams *KZL* pokyčiams. Šiai išvadai patvirtinti IAE buvo sukurta speciali programa, kuri pateikdavo *KZL* reikšmes prieš *KZL* šuolį ir po jo.

Todėl vienintelis dydis, kuris gali turėti įtakos *KZL* šuoliniam kitimui, yra σ , kuris apskaičiuojamas pagal (3). Šioje formulėje dydžiai DW , DQ , Dgn , Dqk yra konstantos, todėl *KZL* skaičiavimo paklaida *DKZ* gali turėti lemiamą įtaką *KZL* šuoliniam pokyčiui.

Parametras *DKZ* apskaičiuojamas pagal (4) formulę. Parametrų reikšmių stebėjimas realiame laike parodė, kad *DKZ* reikšmė gali keistis net iki 10% tarp gretimų skaičiavimo ciklų ir pagrindinę įtaką tam turi maksimumo z^{max} padėties pasikeitimas. Tolesni tyrimai parodė, kad kai kuriuose kuro kanaluose energijos išsiskyrimo pasiskirstymo forma yra tokia, jog abu lokalūs maksimumai yra panašūs ir skiriasi tik keliais procentais, todėl dėl nežymių reaktoriaus neutroninių charakteristikų pokyčių globalus maksimumas apskaičiuojamas kitoje energijos išsiskyrimo pasiskirstymo viršūnėje. Taip globaliam maksimumui keičiantis tarp viršūnių gaunamas *DKZ* reikšmės šuolinis pokytis, kuris sukelia ir *KZL* šuolinį pokytį. Kita situacija, kuomet maksimali energijos išsiskyrimo padėtis kanale nestabili, yra, kai energijos išsiskyrimo pasiskirstymas turi beveik horizontalią tiesę *KK* viduryje. Tokiu atveju labai didelė tikimybė, kad maksimumas bus apskaičiuojamas skirtingose tiesės vietose.

5. ALGORITMO MODIFIKACIJA IR PAGRINDIMAS

Algoritmo modifikacijų vertinimui sukurta programa, galinti apskaičiuoti *KZL* reikšmes naudojant realius reaktoriaus parametrų duomenų bazės duomenis. Programos apskaičiuota *KZL* reikšmė konkrečiam reaktoriaus darbo laiko momentui yra identiška IAE ISS rezultatui. Ši programa buvo naudojama išbandant įvairias *KZL* algoritmo modifikacijas. Nors neabejotinas programos trūkumas yra tai, kad *KZL* skaičiavimas galimas tik vienam laiko momentui ir ja neįmanoma sumodeliuoti tikro *KZL* šuolinio pokyčio, šios programos panaudojimas leido įvertinti algoritmo modifikacijos įtaką *KZL* reikšmei.

Viena paprasčiausių ir pirmiausiai patikrintų *KZL* skaičiavimo algoritmo modifikacijų – pakeisti funkciją $T(z, j)$ formulėje (4) į maksimalią galimą įgyti reikšmę (t. y. vienetą), tačiau skaičiavimai parodė, kad tokiu atveju *KZL* įvertinimo konservatyvumas būtų per didelis ir ši modifikacija toliau nagrinėta.

Tolesni tyrimai parodė, kad šuolinis *KZL* kitimas būtų maksimaliai panaikintas įdiegus du algoritmo patobulinimus: *DKZ* konservatyvų vertinimas ir *KZL* reikšmės glodinimas filtravimo pagalba. Šių dviejų pakeitimų analizė pateikta 5.1 ir 5.2 skyriuose.

Lentelė. *KZL* reikšmių palyginimas atsitiktinai parinktiems reaktoriaus parametrų duomenų bazės pjūviams

Nr.	Minimali <i>KZL</i> reikšmė reaktoriuje (esamas algoritmas)	Minimali <i>KZL</i> reikšmė reaktoriuje (konservatyvus <i>DKZ</i> vertinimas)
1	1,22	1,186
2	1,207	1,194
3	1,255	1,213
4	1,246	1,21
5	1,226	1,215
6	1,248	1,21
7	1,238	1,215
8	1,213	1,213
9	1,219	1,192
10	1,213	1,173

5.1. Energijos išsiskyrimo netolygumo koeficiento nustatymo paklaidos konservatyvus vertinimas

Energijos išsiskyrimo netolygumo koeficiento nustatymo paklaidos *DKZ* skaičiavimo formulę pakeičiama taip: skaičiuojamos *DKZ* reikšmės abiem maksimumo reikšmėms ir *KZL* apskaičiuojamas naudojant didesnę *DKZ* reikšmę. Taip *DKZ* koeficientas ir *KZL* koeficientas bus apskaičiuojami konservatyviau, tačiau toks pakeitimas leistų panaikinti koeficiento *KZL* trumpalaikius šuolinius pakitimus, kylančius dėl globalaus maksimumo šokinėjimo tarp dviejų viršūnių. Skaičiavimų rezultatai (lentelė) gauti su sudaryta skaičiavimų programa įvairiems reaktoriaus parametrų duomenų bazės pjūviams. Gauti rezultatai rodo, kad konservatyvus *DKZ* skaičiavimas taip pat lemia konservatyvų *KZL* skaičiavimą. Bandomieji skaičiavimai buvo atlikti su daugiau nei 40 pjūvių ir parodyta, kad skaičiavimų konservatyvumo lygis yra priimtinas, nes leistina eksploatacinė riba ($KZL = 1,15$) [5] nebuvo pasiekama.

5.2. *KZL* reikšmių glodinimas

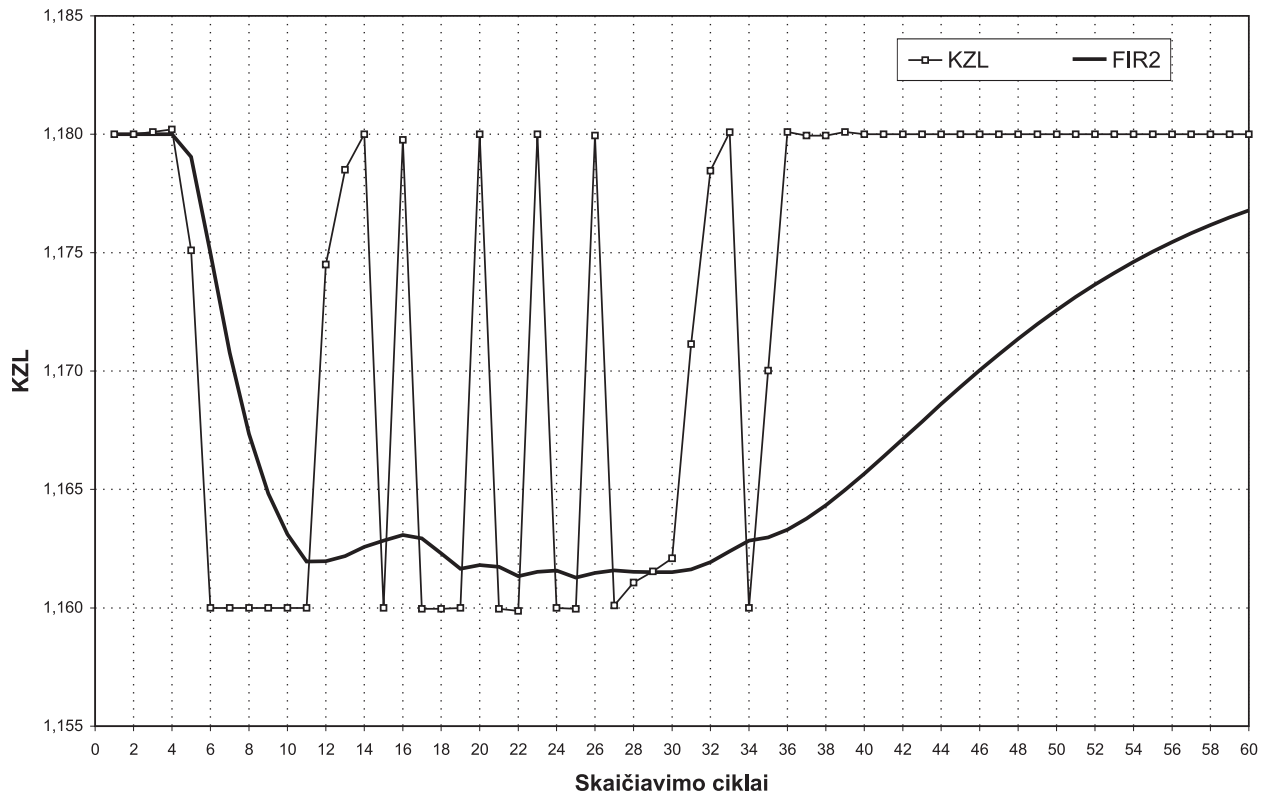
Pasiūlyta *DKZ* skaičiavimo modifikacija panaikina visus *KZL* šuolius, kurie yra sukelti globalaus energijos išsiskyrimo maksimumo padėties šokinėjimo tarp dviejų lokalaus maksimumo viršūnių. Tačiau ši modifikacija sukelia kitokio tipo šuolius, kurie atsiranda, kai energijos išsiskyrimo pasiskirstymo forma keičiasi tarp turinčios du maksimumus vieno skaičiavimo ciklo metu ir vieną maksimumą sekančio skaičiavimo ciklo metu, bei atvirkščiai. Toks energijos išsiskyrimo pasiskirstymo formos pasikeitimas sukelia analogiškus *KZL* šuolius, tačiau jie vyksta daug rečiau ir tik periferiniuose kuro kanaluose. Tokio tipo *KZL* šuolinių svyravimų sumažinimui pritaikytas *KZL* reikšmių glodinimas naudojant antros eilės baigtinio impulsinio atsako filtrą (FIR2). Šio tipo filtras buvo pasirinktas todėl, kad jis užtikrina glodinimo stabilumą ir nereikalauja didelės signalo istorijos, o tik paskutinės reikšmės. Šis filtro paprastumas yra labai svarbus įdiegiant šio filtro algoritmą Ignalinos AE ISS, nes nereikalauja saugoti didelio praeities *KZL* reikšmių masyvo.

Antros eilės baigtinio impulsinio atsako filtras aprašomas taip [6]:

$$\begin{aligned} X_0(k) &= X_0(k-1) + a(X(k) - X_0(k-1)), \\ X_F(k) &= X_F(k-1) + a(X_0(k) - X_F(k-1)); \end{aligned} \quad (5)$$

čia k – vykdomo *KZL* skaičiavimo ciklo numeris, $(k-1)$ – ankstesnio *KZL* skaičiavimo ciklo numeris;

$X(k)$ – apskaičiuota *KZL* reikšmė (pradinė);



3 pav. FIR2 filtro taikymo rezultatai modeliuojamam kuro kanalui (KZL – pradinė reikšmė; FIR2 – filtruota reikšmė)

$X_F(k)$ – filtruota KZL reikšmė;
 $X_0(k)$ – pirmo lygio filtras (tarpinis $X_F(k)$ rezultatas);
 a – filtro koeficientas.

Vienas pagrindinių visų filtrų trūkumų yra filtruoto signalo vėlavimas [7]. Kadangi KZL parametras yra svarbus reaktoriaus saugos požiūriu, didelis vėlavimas yra nepriimtinas, ypač kai tikroji KZL reikšmė mažėja. Todėl filtras (5) buvo modifikuotas, mažinant glodinimą (koeficientas a mažinamas), kai KZL mažėja, ir didinant glodinimą (koeficientas a didinamas), kai KZL didėja.

Filtro koeficiento a reikšmė buvo parinkta taip, kad nefiltruotai KZL reikšmei sumažėjus, t. y. įvykus šuoliui žemyn ir toliau nekintant, filtruota KZL reikšmė per ne ilgiau nei 6 skaičiavimo ciklus (30 sekundžių realaus laiko) sumažėtų ne mažiau nei 90% šuolio dydžio. Jeigu KZL padidėja, tuomet filtro reakcija yra mažesnė (koeficientas a didinamas 4 kartus).

FIR2 filtro taikymo rezultatai modeliuojamam kuro kanalui parodyti 3 paveiksle.

Tuo atveju, kai apskaičiuotas KZL pasiekia kritinę eksploatacinę ribą, filtravimo algoritmas atjungiamas ir parametro KZL reikšmė prilyginama $X(k)$ reikšmei, o ne filtro $X_F(k)$ reikšmei, jei $X(k) < KZL_{min}$; čia $KZI_{min} = 1,15$.

6. IŠVADOS

Šiame darbe nagrinėta Ignalinos AE RBMK-1500 reaktoriaus atsargos koeficiento iki ribinio leistino kuro kanalo galingumo pagal tiesinę apkrovą nestabilumo problema. Darbe nustatytos nestabilumo priežastys ir pateiktas skaičiavimo algoritmo patobulinimas konservatyviai vertinant energijos išsiskyrimo ne-

tolygumo koeficiento nustatymo paklaidą ir papildomai pritaikant antros eilės baigtinio impulsinio atsako filtrą. Patobulintas skaičiavimo algoritmas patikrintas naudojant IAE informacinės skaičiavimo sistemos momentines duomenų bazes bei atliekant bandymus IAE.

Gauta 2008 07 10

Priimta 2008 09 10

Literatūra

1. Almenas K., Kaliatka A., Ušpuras E. Ignalina RBMK-1500. A Source book. Kaunas: Lithuanian Energy Institute, 1998.
2. Augutis J., Ušpuras E., Liaukonis M. Ignalina NPP RBMK-1500 Gas Gap Evaluation // Nuclear Engineering and Design. 2001. Vol. 203. P. 195–207.
3. Ignalinos AE informacinės skaičiavimo sistemos algoritmų techninis aprašymas. Visaginas: IAE, 2005.
4. Ignalinos AE informacinės skaičiavimo sistemos algoritmų konstantų lentelės. Visaginas: IAE, 2005.
5. Технологический регламент по эксплуатации 2-го энергоблока Игналинской АЭС с реакторами РБМК-1500. Ignalinos AE, 2004.
6. Signal Processing Toolbox User's Guide Version 5.0. The MathWorks, Inc. 2000.
7. Oppenheim A. V., Schaffer R. W. Discrete-Time Signal Processing. Prentice-Hall, 1989.

Vaidas Matuzas, Vytis Kopustinskas, Juozas Augutis

AN IMPROVED ALGORITHM OF CALCULATING THE COEFFICIENT OF LINEAR LOAD MARGIN FOR THE RBMK-1500 REACTOR

Summary

While using the instrumentation control system at the Ignalina NPP, some short-time jumps of the coefficient of linear load margin values were indicated. These jumps were not related to the operational regime changes and were caused by errors in estimating the coefficient of energy production unevenness. The common form of energy production has two similar local maximum values. A change of global maximum location causes short-time jumps of the coefficient of linear load margin, even though the maximum value change is negligible.

This paper deals with the analysis of the calculation algorithm and the identification of possible modifications that can prevent random short-time jumps. The reasons for these disturbances are identified, and algorithm improvements are introduced and verified. The improved calculation algorithm is verified using existing databases of the I & C system and the test runs on the reserve I & C system at the Ignalina NPP.

Key words: linear energy load, load jumps, mathematical model

Вайдас Матузас, Витис Копустинскас, Юозас Аугутис

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМА РАСЧЁТА КОЭФФИЦИЕНТОВ ЗАПАСА ДО ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМОЙ МОЩНОСТИ КАНАЛА НА RBMK-1500

Резюме

В процессе эксплуатации информационно-вычислительной системы на Игналинской АЭС выявлена зависимость дисперсии коэффициента неравномерности энерговыделения по высоте над местоположением максимума энерговыделения при прочих равных условиях. Форма высотного распределения энерговыделения часто имеет два локальных максимума, что ведет к неустойчивости дисперсии неравномерности энерговыделения по высоте при изменении местоположения глобального максимума. Это вызывает кратковременные скачкообразные изменения коэффициента запаса до предельно допустимой мощности.

Целью данной статьи являются установление причин кратковременного скачкообразного изменения коэффициента запаса до предельно допустимой мощности путём анализа используемого в расчётах алгоритма, определение возможного варианта модификации в целях устранения вышеупомянутого несовершенства алгоритмов и создание усовершенствованного алгоритма расчёта.

Ключевые слова: энерговыделение в канале топлива, неравномерность энерговыделения, математическая модель