Ignalinos AE galios ir garo reaktyvumo koeficientų dinaminis modeliavimas

Andrius Slavickas,

Raimondas Pabarčius,

Aurimas Tonkūnas

Lietuvos energetikos institutas, Branduolinių įrenginių saugos laboratorija, Breslaujos g. 3, LT-44403 Kaunas El. paštas: andriussl@mail.lei.lt Galios ir garo reaktyvumo koeficientai yra naudojami įvertinti bet kokios atominės elektrinės reaktoriaus ypatybes. Šie reaktyvumo koeficientai yra nustatomi dvejopai: atliekant eksperimentinius matavimus ar juos apskaičiuojant programiniais paketais. Šio tyrimo metu buvo atliktas Ignalinos AE atliekamų galios ir garo reaktyvumo koeficientų eksperimentinių matavimų (dinaminių procesų) modeliavimas. Tyrimo metu, pasinaudojus realiomis duomenų bazėmis bei taikant QUABOX / CUBBOX-HYCA programinį paketą, buvo atliktas jėgainėje vykdytų eksperimentų skaitinis tyrimas. Remiantis šio skaitinio tyrimo rezultatais buvo nustatyti RBMK-1500 reaktoriaus aktyviosios zonos būsenas apibūdinantys galios ir garo reaktyvumo koeficientai. Gauti rezultatai palyginti su eksperimentiniais duomenimis.

Raktažodžiai: RBMK-1500 modeliavimas, garo reaktyvumo koeficientas, galios reaktyvumo koeficientas

1. ĮVADAS

Branduolinio reaktoriaus aktyviojoje zonoje vykstančių neutroninių-fizikinių procesų ypatybės yra įvertinamos reaktyvumo koeficientais. Šie koeficientai nusako reaktoriaus elgseną tiek jo eksploatacijos, tiek galimų avarinių režimų metu. Tai labai svarbu įvertinant AE saugą visos eksploatacijos metu iki galutinio įrenginio uždarymo. Vieni svarbiausių, ypač kalbant apie Ignalinos AE eksploatuojamus RBMK-1500 tipo reaktorius, yra galios ir garo reaktyvumo pokyčiai, kurie apibrėžiami atitinkamais reaktyvumo koeficientais. Pastarąjį dešimtmetį Ignalinos AE vykdoma 2-ojo bloko reaktoriaus aktyviosios zonos modernizacija, kuri apima naujo urano-erbio kuro bei naujos konstrukcijos valdymo-reguliavimo strypų panaudojimą. Baigus Ignalinos AE 1-ojo bloko eksploataciją, dalis jame buvusio kuro yra perkraunama į 2-ojo bloko reaktorių. Dėl šių modifikacijų 2-ojo bloko reaktoriaus aktyviosios zonos sudėtis nuolat keičiasi, atitinkamai keičiasi aktyviosios zonos ypatybės, kurios, kaip minėta, apibrėžiamos reaktyvumo koeficientais.

Ignalinos AE galios ir garo reaktyvumo koeficientai įprastai nustatomi dvejopai: atliekant eksperimentinius matavimus ar juos apskaičiuojant programiniais paketais. Patogiausia ir greičiausia reaktyvumo koeficientus įvertinti atlikus dviejų stacionarių reaktoriaus būsenų (bazinė ir sutrikdyta) modeliavimą [1, 2], tačiau tai neatspindi realių aktyviojoje zonoje vykstančių fizikinių procesų. Eksperimentinis būdas yra tikslesnis, tačiau jis imlus laikui, tam reikia skirti papildomas lėšas bei tai yra tiesiogiai susiję su branduolinės saugos užtikrinimu matavimų metu. Šio tyrimo tikslas buvo sumodeliuoti Ignalinos AE vykdomus eksperimentinius galios ir garo reaktyvumo koeficientų matavimus (realūs dinaminiai procesai), palyginti modeliavimo rezultatus su eksperimentiškai išmatuotais bei įvertinti programinio paketo tinkamumą atliekant panašius skaitinius tyrimus, kurie aktualūs vykdant numatytą Ignalinos AE 2-ojo bloko reaktoriaus aktyviosios zonos modernizaciją. Tyrimo metu Ignalinos AE vykdomam reaktoriaus charakteristikų modeliavimui taikytas QUABOX / CUBBOX-HYCA programinis paketas (toliau Q / C-H p / p) [3].

Ignalinos AE garo ir galios reaktyvumo koeficientų matavimai atliekami vienas po kito, $\alpha_{_{0}}$ nustatymui panaudojant $\alpha_{_{0}}$ matavimo metu gautus duomenis. Galios reaktyvumo koeficientas α_{o} nusako reaktyvumo pokytį, tenkantį vienetiniam galios pokyčiui. Šis koeficientas susijęs su aktyviosios zonos komponentų temperatūra, ksenono koncentracija, kuro tabletėje vykstančiais procesais (Doplerio efektu) ir garo kiekio pokyčiais aktyviojoje zonoje, tačiau tik du pastarieji turi didesnę įtaką jo skaitinei reikšmei. Galios reaktyvumo koeficientas, apskaičiuotas pagal stacionarias aktyviosios zonos būsenas (statiniai skaičiavimai), ne visai tinkamai įvertina pereinamuosius procesus, kadangi pasikeitus galiai ne visų aktyviosios zonos komponentų temperatūra keičiasi vienodai. Todėl vertinant reaktoriaus galios reguliavimo galimybes, patartina remtis dinaminiu galios reaktyvumo koeficientu, nustatytu dinaminio modeliavimo metu. Ignalinos AE eksploatuojamame reaktoriuje galios reaktyvumo koeficientas yra neigiamas, taigi didėjant reaktoriaus galiai reaktyvumas mažėja.

Garo reaktyvumo koeficientas α_{ϕ} nusako reaktyvumo pokytį, tenkantį vienetiniam garo dalies pokyčiui. Garo kiekis aktyviojoje zonoje tiesiogiai priklauso nuo reaktoriaus galios lygio. Daugumoje Vakarų šalių eksploatuojamų reaktorių šis koeficientas yra neigiamas, t. y. didėjant galiai bei garo kiekiui aktyviojoje zonoje reaktyvumas mažėja. Tačiau RBMK tipo reaktoriams šis koeficientas yra teigiamas. Reaktoriai, turintys teigiamą garo reaktyvumo koeficientą, yra nestabilūs juos eksploatuojant maža galia, todėl jie gali patirti spartų nekontroliuojamą galios augimą.

Skaitmeninė a reikšmė nusako, kaip greitai keičiasi reaktoriaus galia keičiantis garo kiekiui aktyviojoje zonoje. Kadangi galios didėjimas lemia padidėjusį garo išskyrimą, tai reaktoriuose su dideliu teigiamu garo reaktyvumo koeficientu galimas spartus galios augimas, kuris lems dar didesnį garo išskyrimą. Taigi tokiuose reaktoriuose galimi staigūs pereinamieji procesai, kurie yra sunkiai valdomi. Avarija Černobylio AE eksploatuotame RBMK-1500 reaktoriuje įvyko būtent ir dėl didelės teigiamos a reikšmės, o tai turėjo įtakos reaktoriaus nestabilumui esant mažai reaktoriaus galiai. Avarijos priežastimi taip pat buvo netinkama valdymo strypų konstrukcija, kuri turėjo įtakos garo reaktyvumo padidėjimui valdymo ir apsaugos sistemos strypus suleidus į aktyviąją zoną. Siekiant ištaisyti projektavimo klaidas po Černobylio AE avarijos buvo imtasi priemonių RBMK reaktorių saugai užtikrinti. Buvo padidinta operatyvinė reaktyvumo atsarga, įdiegti papildomi sugėrikliai, įdiegta greitaeigė avarinė apsauga bei pradėti naudoti naujos konstrukcijos valdymo strypai. Nurodytos bei taikytos kitos priemonės Ignalinos AE eksploatuojamame reaktoriuje leido sumažinti garo reaktyvumo koeficientą iki $(0,4-0,8) \beta_{eff}$

2. NAGRINĖJAMOS BŪSENOS

Q / C-H p/p programinis paketas pradėtas vystyti GRS mbH kompanijoje išskirtinai suslėgtojo vandens reaktoriams. Lietuvos energetikos instituto ir GRS darbuotojų pastangomis šis programinis paketas buvo pritaikytas RBMK tipo reaktoriams. Šiuo metu Q / C-H p/p yra naudojamas Ignalinos AE branduolinio reaktoriaus aktyviojoje zonoje vykstančių pereinamųjų ir stacionariųjų procesų analizei. Programinis paketas susideda iš neutronų kinetikos (QUABOX-CUBBOX) ir termohidraulinės (HYCA) dalių. Q / C-H p/p buvo naudojamas ir šiame darbe. RBMK-1500 reaktoriaus aktyviosios zonos modelis apima 2488 technologinius kanalus, iš kurių 1661 skirtas kuro rinklėms, papildomiems sugėrikliams ar vandens kolonoms patalpinti. Jame sumodeliuoti 211 valdymo ir apsaugos sistemos strypų. Technologinių kanalų parametrai, reikalingi programinio paketo neutronų kinetikos bei termohidrauliniams skaičiavimams atlikti, yra pateikti Ignalinos AE TITAN duomenų bazėse. Duomenų bazėse sukaupti duomenys apie reaktoriaus galią, aktyviosios zonos įkrovą, kuro kanalų išdegimą bei šilumnešio debitą, valdymo ir apsaugos sistemos strypų koordinates, jų įleidimo gylį ir t. t. Taigi pasinaudojus TITAN duomenų baze galima modeliuoti realią Ignalinos AE eksploatuojamo reaktoriaus aktyviosios zonos būseną.

Skaitiniam tyrimui pasirinktos 2007 m. sausio 23-iosios ir 2008 m. sausio 22-osios Ignalinos AE 2-ojo bloko reaktoriaus būsenos. Šiomis dienomis buvo atliekami galios ir garo reaktyvumo koeficientų matavimai. Pagrindiniai duomenys, aprašantys šias būsenas, pateikti 1 lentelėje. Ignalinos AE eksploatuojamame reaktoriuje kuras nuolat perkraunamas, todėl 2007 ir 2008 m. aktyviosiose zonose kuro sudėtis skiriasi. 2008 m. aktyviosios zonos reaktoriaus vidutinis kuro išdegimas yra mažesnis, kadangi 294 reaktoriaus technologiniai kanalai yra pakrauti panaudotomis kuro rinklėmis iš 2004 m. pabaigoje sustabdyto 1-ojo bloko reaktoriaus. 2008 m. aktyviosios zonos įkrova išsiskiria ir tuo, kad 12 senesnių, 2091 modifikacijos, rankinio reguliavimo strypų yra pakeisti naujesniais, 2399 modifikacijos, strypais. Skirtinga kuro ikrova bei kuro išdegimas, skirtinga valdymo ir apsaugos sistemos strypų sudėtis apibrėžia skirtingas aktyviosios zonos būsenas, kurios atitinkamai apibūdinamos skirtingomis galios ir garo reaktyvumo koeficientų reikšmėmis.

3. GALIOS REAKTYVUMO KOEFICIENTO TYRIMAS

3.1. Galios reaktyvumo koeficiento eksperimentinis matavimas bei nustatymo metodika

2007-01-23 bei 2008-01-22 buvo atliekami Ignalinos AE eksploatuojamo RBMK-1500 reaktoriaus aktyviosios zonos galios ir garo

	2007-01-23 [4]	2008-01-22 [5]
1. Reaktoriaus galia MW	4090	4100
2. Vidutinis išdegimas Mw para / rinklei	1413	1479
3. Operatyvinė reaktyvumo atsarga RR strypai	54,7	56,4
4. Vandens debitas per aktyviąją zoną m³/h	42600	42560
5. Kuro kanalų kiekis vnt.	1658	1657
Kuras su 2,0 % įsodrinimu vnt.	68	36
Kuras su 2,4 % įsodrinimu + Er vnt.	49	47
Kuras su 2,6 % įsodrinimu + Er vnt.	1287	1070
Kuras su 2,8 % įsodrinimu + Er vnt.	254	504
6. Papildomų sugėriklių kiekis vnt.	2	4
7. Vandens kolonų kiekis vnt.	1	0
8. Valdymo ir apsaugos sistemos strypai vnt.	211	211
2091 modifikacijos rankinio reguliavimo strypai vnt.	16	4
Sutrumpinto valdymo strypai vnt.	40	40
Greitos avarinės apsaugos strypai vnt.	24	24
2477 modifikacijos rankinio reguliavimo strypai vnt.	82	82
2399 modifikacijos rankinio reguliavimo strypai vnt.	49	61

1 lentelė. Nagrinėtos aktyviosios zonos būsenos

reaktyvumo koeficientų eksperimentiniai matavimai. Matavimo metu buvo išjungtos visos reaktoriaus apsaugos sistemos, išskyrus antrąją automatinio reguliavimo sistemą (AR-2). Ši automatinio reguliavimo sistema (4 strypai) palaiko vidutinę reaktoriaus galią bei numatytą radialinį galios pasiskirstymą ir tai stabilizuoja neutronų srauto pasiskirstymą aktyviojoje zonoje. Šios sistemos strypai automatiniame režime reaguoja į galios pokyčius, todėl pagal indikatorių rodmenis yra ištraukiami arba įtraukiami į aktyviąją zoną. Prieš atliekant matavimus visų 4 sistemos strypų įleidimo į aktyviąją zoną gylis buvo 370 cm.

Galios reaktyvumo koeficiento matavimo metu visi 4 automatinio reguliavimo strypai rankiniu valdymu per 1,2 s (aktyviosios zonos būsenai 2007-01-23) ar per 1,6 s (aktyviosios zonos būsenai 2008-01-22) buvo suleisti į aktyviąją zoną iki 401 cm. Strypų įleidimas inicijuoja pereinamąjį procesą, kurio metu pasikeičia reaktoriaus galia ir reaktyvumas. Per trumpą laiką reaktoriaus galia sumažėja nuo 4077 MW iki 3992 MW ir nuo 4107 MW iki 4011 MW, atitinkamai aktyviosios zonos būsenoms 2007-01-23 ir 2008-01-22. Iki 5–10 s nuo strypų judėjimo pradžios stebimas reaktyvumo ir galios kritimas, nepaisant to, kad strypai nebejuda. Po to prasideda lėtesnis reaktyvumo ir galios didėjimas, kol 30 sekundę nuo strypų judėjimo pradžios galios ir reaktyvumo lygis stabilizuojasi. Reaktoriaus galia α_{ω} matavimo pabaigoje pasiekia 3990 MW (būsenai 2007-01-23) bei 4008 MW (būsenai 2008-01-22). Matavimo metu užregistruoti galios kitimai pateikti 1 (a) ir 2 (a) paveiksluose.

Galios reaktyvumo koeficiento reikšmei apskaičiuoti Ignalinos AE taikomos šios išraiškos [6]:

$$\alpha_{\omega} = -\frac{\varsigma_{\rm B}}{\Delta W_{\star}};\tag{1}$$

$$\varsigma_{\rm B} = \varsigma_{\rm B}' \left(\frac{1}{1 - \frac{\Delta W_{\rm T} \cdot \Psi}{\Delta W_{\rm I}}} \right); \tag{2}$$

čia ΔW_1 – reaktoriaus galios nuo eksperimentinio matavimo pradžios iki pabaigos skirtumas; ΔW_T – reaktoriaus galios pokytis praėjus 1,2 s (būsenai 2007-01-23) ar 1,6 s (būsenai 2008-01-22) po eksperimentinio matavimo pradžios. Šis dydis nurodo reaktoriaus galios skirtumą nuo strypų judėjimo pradžios iki jų judėjimo pabaigos; Ψ – aktyviosios zonos būseną bei pereinamąjį procesą apibūdinantis rodiklis, kurio reikšmė aktyviosios zonos būsenoms 2007-01-23 ir 2008-01-22 atitinkamai lygi 0,0484 ir 0,0638 [6]; ς'_B – automatinio reguliavimo sistemos strypų efektyvumas, kai jie juda 370–401 cm atkarpoje; ς_B – reaktyvumo pokytis, įvertinus galios pasikeitimus bei Ψ . Visi eksperimentinio galios reaktyvumo koeficiento matavimo duomenys ir nustatyti dydžiai aktyviosios zonos būsenoms 2007-01-23 ir 2008-01-22 pateikti 2 lentelėje.

3.2. Skaitinės galios reaktyvumo koeficiento reikšmės nustatymas

Nustatant reaktoriaus pasines charakteristikas, tarp jų ir α_{o} , atliekami statiniai skaičiavimai. Tuo atveju taikomas supaprastintas metodas, pasirenkant dvi stacionarias aktyviosios zonos būsenas: reali aktyviosios zonos būsena su TITAN duomenų bazėje nurodyta reaktoriaus galia bei aktyviosios zonos būsena, kai reaktoriaus galia 50 MW mažesnė nei nurodyta TITAN duomenų bazėje. Skaitinė galios reaktyvumo koeficiento reikšmė randama

įvertinus reaktyvumo pokytį, kuris atsiranda aktyviajai zonai pereinant iš vienos būsenos į kitą, tenkantį 50 MW reaktoriaus galios pokyčiui:

$$\alpha_{\omega} = \frac{\varsigma(2) - \varsigma(1)}{50 \text{ MW}}; \tag{3}$$

čia $\zeta(1)$ – realios aktyviosios zonos būsenos reaktyvumas, $\zeta(2)$ – aktyviosios zonos būsenos su sumažinta reaktoriaus galia reaktyvumas.

Ignalinos AE eksploatuojamame reaktoriuje 2007-01-23 ir 2008-01-22 eksperimentiškai nustatyta galios reaktyvumo koeficiento reikšmė buvo $-2,2 \pm 0,2 \cdot 10^{-4} \beta_{eff}$ / MW [4, 5]. Tuo tarpu šio skaitinio tyrimo metu nustatyta, kad galios reaktyvumo koeficiento reikšmės yra $-2,5 \cdot 10^{-4} \beta_{eff}$ / MW ir $-2,6 \cdot 10^{-4} \beta_{eff}$ / MW, atitinkamai 2007-01-23 ir 2008-01-22 būsenoms. Kaip matyti, Q / C-H p/p skaitinių tyrimų metu nustatytos galios reaktyvumo koeficiento reikšmės yra didesnės už eksperimentiškai išmatuotas, nes taikant šį supaprastintą metodą nėra atkartojami reaktoriaus aktyviojoje zonoje realiai vykstantys procesai (lokalinė neutronų peturbacija strypams judant, aktyviosios zonos komponentų temperatūrų pokyčiai ir pan.). Todėl šio tyrimo tikslas buvo sumodeliuoti Ignalinos AE vykdomą α_{o} eksperimentą, įvertinant aktyviojoje zonoje vykstančius pereinamuosius procesus.

Modeliuojant Ignalinos AE atliktus eksperimentinius galios reaktyvumo koeficientų matavimus (dinaminius procesus) pereinamieji procesai aktyviojoje zonoje buvo inicijuoti 4 automatinio reguliavimo strypus įleidžiant į aktyviąją zoną nuo 370 cm į 401 cm gylį. Kaip ir eksperimentinio matavimo metu, skaitinio tyrimo rezultatai rodo, kad įleisti strypai sukelia neigiamą reaktyvumo pokytį (1 (*b*) pav. ir 2 (*b*) pav.), todėl reaktoriaus ga-



1 pav. Reaktoriaus galios (*a*) ir reaktyvumo (*b*) kitimas (aktyviosios zonos būsenai 2007-01-23, α_{a} eksperimentas)



2 pav. Reaktoriaus galios (*a*) ir reaktyvumo (*b*) kitimas (aktyviosios zonos būsenai 2008-01-22, eksperimentas)

lia sumažėja (1 (*a*) pav. ir 2 (*a*) pav.). 2007-01-23 ir 2008-01-22 eksperimentinių matavimų metu buvo nustatyti šiek tiek didesni reaktyvumo ir galios pokyčiai. Kadangi α_{ω} įvertina reaktyvumo pokytį, tenkantį vienetiniam galios pokyčiui, tai vertinant reaktyvumo ir galios pokyčių santykius galima teigti, kad eksperimentiniai ir sumodeliuoti pokyčiai tarpusavyje koreliuoja. Didesnius reaktyvumo ir galios pokyčius eksperimentinio matavimo metu galima aiškinti lokaliniu neutronų persiskirstymu, kuris atsiranda TITAN duomenų bazių duomenis pritaikius Q / C-H p/p. Dėl lokalinio neutronų persiskirstymo aplink automatinio reguliavimo strypus jų efektyvumas sumažėja, todėl skaitinio tyrimo metu strypus įleidus stebimas mažesnis reaktyvumo ir reaktoriaus galios pokytis, palyginus su eksperimentiniais matavimais.

Skaitiniam galios reaktyvumo koeficiento įvertinimui taikyta ta pati metodika, kaip ir Ignalinos AE (žr. 2.1 skyrių). Automatinio reguliavimo strypų efektyvumas randamas, įvertinant dviejų stacionarių aktyviosios zonos būsenų reaktyvumo skirtumą:

$$\zeta'_{\rm B} = \zeta(1) - \zeta(2);$$
 (4)

2 lentelė. Galios reaktyvumo koeficiento įvertinimo duomenys ir rezultatai

čia $\varsigma(1)$ – aktyviosios zonos būsenos reaktyvumas, kai automatinio reguliavimo strypai įleisti 370 cm į aktyviąją zoną; $\varsigma(2)$ – reaktyvumas, kai automatinio reguliavimo strypai įleisti 401 cm į aktyviąją zoną. Tada taikant (1) ir (2) išraiškas buvo apskaičiuoti galios reaktyvumo koeficientai. Eksperimentinio matavimo duomenys ir dinaminio skaitinio tyrimo rezultatai pateikti 2 lentelėje.

Dinaminio skaitinio tyrimo metu nustatyta galios reaktyvumo koeficiento reikšmė yra $-3,0 \cdot 10^{-4}\beta_{eff}$ / MW. Ši α_{ω} reikšmė patenka į leistinas reaktoriaus eksploatacijos ribas (Ignalinos AE 2-ojo bloko reaktoriaus įrenginio galios reaktyvumo eksploatacijos ribos yra $-(1-4) \cdot 10^{-4} \beta_{eff}$ / MW [7]). Įvertinus skaičiavimo rezultatų neapibrėžtumą (analogiškų p/p skaičiavimų paklaida yra ~25 % [8]) apskaičiuotos galios reaktyvumo koeficientų reikšmės artimos eksperimentiškai nustatytoms (2 lentelė).

Pažymėtina, kad α_{ω} reikšmė, apskaičiuota statinių skaičiavimų metu (t. y. $\alpha_{\omega} = -(2,5-2,6) \cdot 10^{-4} \beta_{eff}$ / MW), yra artimesnė eksperimentiškai nustatytai nei gautai modeliuojant vykdytus eksperimentus, t. y. dinaminių skaičiavimų metu. Tačiau, kaip minėta, α_{ω} ir α_{φ} matavimai atliekami kartu, ir tik modeliuojant eksperimentinius matavimus atsižvelgiama į aktyviojoje zonoje vykstančius procesus. Todėl šio darbo tolesniame etape, nustatant α_{φ} , buvo panaudoti būtent α_{ω} dinaminio skaičiavimo metu gauti duomenys.

4. GARO REAKTYVUMO KOEFICIENTO TYRIMAS

4.1. Garo reaktyvumo koeficiento eksperimentinis matavimas bei nustatymo metodika

2007-01-23 ir 2008-01-22 taip pat buvo atliekami Ignalinos AE eksploatuojamo RBMK-1500 reaktoriaus aktyviosios zonos garo reaktyvumo koeficiento eksperimentiniai matavimai. Matavimo metu, kaip ir galios reaktyvumo koeficiento matavimo metu, buvo išjungtos visos reaktoriaus apsaugos sistemos, išskyrus antrąją automatinio reguliavimo sistemą. Prieš atliekant matavimus visi 4 automatinio reguliavimo strypai buvo suleisti 370 cm į aktyviąją zoną.

Garo reaktyvumo koeficiento matavimas susideda iš dviejų etapų: pirmojo, kurio metu vandens debitas į aktyviąją zoną padidinamas 400 t/h, bei antrojo, kurio metu vandens debitas sumažinamas 400 t/h. Iš viso atliekami 3 tokie vandens debito į aktyviąją zoną didinimo / mažinimo ciklai. Kiekvieno etapo metu apskaičiuojama garo reaktyvumo koeficiento reikšmė. α_{ϕ} reikšmė aktyviajai zonai randama apskaičiavus garo reaktyvumo koeficientų reikšmių kiekviename vykdytų ciklų vidurkį.

Garo reaktyvumo koeficiento pirmojo matavimo etapo metu vandens debitas į aktyviąją zoną buvo padidintas 400 t/h. Dėl padidėjusio šalto vandens kiekio garo dalis aktyviojoje zonoje sumažėjo. Tai taip pat sąlygojo reaktyvumo ir reaktoriaus galios

	2007-01-23		2008-01-22	
	Ignalinos AE [4]	Q / Q-H p/p	Ignalinos AE [5]	Q / Q-H p/p
Ψ	0,0484		0,0638	
$\Delta W_1 MW$	87	69	99	82
$\Delta W_T MW$	85	62	96	76
$\rho_{B}\beta_{eff}$	-0,019	-0,018	-0,020	-0,022
ς' _β β _{eff}	-0,020	-0,019	-0,022	-0,023
α_ β_#/ MW	- 2,2 · 10 ⁻⁴	-3,0 · 10 ⁻⁴	- 2,2 · 10 ⁻⁴	-3,0 · 10 ⁻⁴

		2007-01-23 būsena [4], $\beta_{e\!f\!f}$	2008-01-22 [5], β _{eff}
1 ciklas	– 400 t/h	0,73	0,57
	+ 400 t/h	0,61	0,45
2 ciklas	– 400 t/h	0,65	0,67
	+ 400 t/h	0,49	0,50
3 ciklas	– 400 t/h	0,67	0,56
	+ 400 t/h	0,40	0,46
Vidutinė o	α _φ reikšmė	0,59 ± 0,12	$0,54 \pm 0,08$

3 lentelė. Garo reaktyvumo koeficiento matavimų duomenys

mažėjimą. Automatinio reguliavimo sistema, siekdama reaktoriaus galią grąžinti į pradinį lygį, atitinkamai perstūmė valdymo strypus aktyviojoje zonoje. Strypų judėjimas sukėlė galios ir reaktyvumo pokyčius. Garo reaktyvumo koeficiento matavimo antrojo etapo metu vandens debitas į aktyviąją zoną buvo sumažintas 400 t/h. Dėl sumažėjusio šalto vandens tiekimo į aktyviąją zoną sumažėjo garo dalis aktyviojoje zonoje bei reaktyvumas. Eksperimentiniai duomenys apie reaktyvumo kitimą α_{ϕ} matavimo metu pateikti 3–6 pav.

Galios reaktyvumo koeficiento reikšmei apskaičiuoti eksperimentinio matavimo metu Ignalinos AE taikomos šios išraiškos [6]:

$$\alpha_{\phi} = \frac{\Delta\varsigma}{\Delta\phi}; \tag{5}$$

$$\Delta \varsigma = \Delta \varsigma_{\rm AR} - \Delta P \cdot \alpha_{\omega}; \tag{6}$$

čia $\Delta \phi$ – garo dalies aktyviojoje zonoje pokytis, $\Delta \zeta$ – reaktyvumo pokytis eksperimentinio matavimo metu. Reaktyvumo pokytis α_{o} matavimo metu susideda iš reaktyvumo pokyčio dėl auto-



Garo reaktyvumo koeficiento reikšmė atitinkamai aktyviosios zonos būsenai gaunama apskaičiavus visų eksperimentiškai nustatytų garo reaktyvumų koeficientų vidurkį. Aktyviosios zonos būsenos 2007-01-23 garo reaktyvumo koeficiento reikšmė yra 0,59 β_{eff} o aktyviosios zonos būsenos 2008-01-22 – 0,54 β_{eff} Galios reaktyvumo koeficiento eksperimentinio matavimo duomenys pateikti 3 lentelėje.

4.2. Skaitinės garo reaktyvumo koeficiento reikšmės nustatymas

Nustatant reaktoriaus pasines charakteristikas, tarp jų ir α_{φ} , atliekami statiniai skaičiavimai. Tuo atveju taikomas supaprastintas metodas. Skaitinio tyrimo metu naudojamos stacionarios



3 pav. Reaktyvumo (*a*) ir garo dalies (*b*) kitimas pirmojo α_{ϕ} matavimo etapo (+ 400 t/h) metu (aktyviosios zonos būsenai 2007-01-23, α_{ϕ} eksperimentas)



4 pav. Reaktyvumo (*a*) ir garo dalies (*b*) kitimas antrojo α_{ϕ} matavimo etapo (– 400 t/h) metu (aktyviosios zonos būsenai 2007-01-23, α_{ϕ} eksperimentas)



5 pav. Reaktyvumo (*a*) ir garo dalies (*b*) kitimas pirmojo α_{ϕ} matavimo etapo (+ 400 t/h) metu (aktyviosios zonos būsenai 2008-01-22, α_{a} eksperimentas)

4 lentelė. Garo reaktyvumo koeficientų įvertinimo reikšmės

	2007-01-23 [4]		2008-01-22 [5]	
	Ignalinos	Q / Q-H	Ignalinos	Q/Q-H
	AE	p/p	AE	p/p
+ 400 t/h	0,67 β _{eff}	0,57 β _{eff}	0,56 β _{eff}	0,56 β _{eff}
– 400 t/h	0,40 β _{eff}	0,23 β _{eff}	0,46 β _{eff}	0,45 β _{eff}

aktyviosios zonos būsenos, kurios apibrėžiamos skirtingu šilumnešio srautu per aktyviąją zoną. Q / C-H p/p šilumnešio srauto pokytis (temperatūra) buvo modeliuojamas keičiant šilumnešio entalpiją ± 2 %. Garo reaktyvumo koeficiento reikšmė nustatoma pagal šias išraiškas:

$$\begin{aligned}
\alpha_{\phi 1} &= \frac{\zeta(0) - \zeta(1)}{\phi(0) - \phi(1)}, \\
\alpha_{\phi 2} &= \frac{\zeta(0) - \zeta(2)}{\phi(0) - \phi(2)}, \\
\alpha_{\phi 3} &= \frac{\alpha_{\phi 1} + \alpha_{\phi 2}}{\phi(0) - \phi(2)}.
\end{aligned}$$
(7)

čia $\zeta(1), \zeta(2)$ bei $\varphi(1), \varphi(2)$ – aktyviųjų zonų būsenų su pakeista šilumnešio entalpijos reikšme reaktyvumai bei garo dalys jose. $\zeta(0)$ bei $\varphi(0)$ – aktyviosios zonos būsenos su realia šilumnešio entalpijos reikšme reaktyvumas bei garo dalis joje. Kiekvienai perturbuotai aktyviosios zonos būsenai buvo apskaičiuojamas garo reaktyvumo koeficientas ($\alpha_{\varphi_1}, \alpha_{\varphi_2}$) bei nustatyta vidutinė α_{ω} reikšmė.

2

Taikant šį supaprastintą metodą aktyviosios zonos būsenoms 2007-01-23 ir 2008-01-22 statinių skaičiavimų metu nustatytos



6 pav. Reaktyvumo (*a*) ir garo dalies (*b*) kitimas pirmojo α_{ϕ} matavimo etapo (– 400 t/h) metu (aktyviosios zonos būsenai 2008-01-22, α_{ϕ} eksperimentas)

garo reaktyvumo koeficiento reikšmės yra atitinkamai 0,38 $\beta_{\rm eff}$ ir 0,48 $\beta_{\rm eff}$ Kaip matyti, rezultatų atitikimas yra patenkinamas.

Q/C-H p/p modeliuojant Ignalinos AE atliktus eksperimentinius galios reaktyvumo koeficiento matavimus (dinaminiai skaičiavimai) pereinamieji procesai aktyviojoje zonoje buvo inicijuoti padidinant vandens debitą į aktyviąją zoną. Kaip ir eksperimentinio matavimo metu, tai sąlygojo galios bei reaktyvumo pokyčius, kurių kompensavimui pagal automatinio reguliavimo sistemos logiką buvo inicijuotas valdymo strypų perstūmimas. Garo reaktyvumo koeficiento eksperimentinio matavimo modeliavimui buvo pasirinktas 3-iasis eksperimentinio matavimo ciklas (žr. 3 lentelę). Garo dalies aktyviojoje zonoje kitimas pereinamųjų procesų metu pateiktas 3 (b) pav. ir 4 (b) pav. (būsenai 2007-01-23) bei 5 (b) pav. ir 6 (b) pav. (būsenai 2008-01-22). Reaktyvumo kitimas eksperimentinio matavimo ir jo dinaminio skaitinio tyrimo metu pateiktas 3 (a) pav. ir 4 (a) pav. (būsenai 2007-01-23) bei 5 (a) pav. ir 6 (a) pav. (būsenai 2008-01-22). Kaip matyti, skaitinio tyrimo rezultatai atkartoja dinaminį procesą. Tuo patvirtinama, kad Q / C-H p/p realiai modeliuoja aktyviojoje zonoje vykstančius pereinamuosius procesus. Skirtumą tarp skaitinių reaktyvumo reikšmių galima paaiškinti skirtingu lokaliniu neutronų persiskirstymu matavimo ir modeliavimo metu.

Skaitiniam galios reaktyvumo koeficiento įvertinimui taikyta ta pati metodika, kaip ir Ignalinos AE. Taikant (5) ir (6) išraiškas buvo apskaičiuoti garo reaktyvumo koeficientai, kurių palyginimas su eksperimentiškai nustatytomis reikšmėmis pateiktas 4 lentelėje. Kaip matyti, skaitinio tyrimo rezultatų atitikimas eksperimentiškai išmatuotai α_{ϕ} reikšmei yra geras. Dinaminio α_{ϕ} skaičiavimo rezultatai geriau atitinka eksperimentinius duomenis nei gauti taikant supaprastintą metodiką (t. y. statinių skaičiavimų metu). Kadangi aktyviosios zonos būsenos 2008-01-22, kurios įkrova apibūdinama didesniu kiekiu didesnio įsodrinimo kuro, pereinamųjų procesų modeliavimo metu gautos artimesnės eksperimentinėms α_{ϕ} reikšmės, tad galima teigti, kad Q / C-H p/p gali būti naudojamos ateityje patikimai įvertinant α_{ϕ} kitimą esant būsimoms Ignalinos AE įkrovoms.

5. IŠVADOS

Tyrimo metu atliktas dviejų realių Ignalinos AE 2-ajame bloke eksploatuojamo RBMK-1500 reaktoriaus aktyviosios zonos būsenų (2007-01-22, 2008-01-23) eksperimentinių galios ir garo reaktyvumo koeficientų matavimų modeliavimas. Skaitinis tyrimas atliktas panaudojant QUABOX / CUBBOX-HYCA programinį paketą, jo metu buvo įvertinti aktyviojoje zonoje vykstantys pereinamieji procesai bei α_{ϕ} ir α_{ω} eksperimentų metu atsirandančios neutronų lauko peturbacijos.

Dinaminio skaitinio tyrimo metu nustatyti galios reaktyvumo koeficientai patenkinamai atitinka eksperimentiškai išmatuotas koeficientų reikšmes. Kadangi analogiškų programinių paketų skaičiavimų neapibrėžtis ~25 %, šio skaitinio tyrimo metu gautos α_{ω} reikšmės patenka į paklaidų intervalą. Tai leidžia tvirtinti, kad skaitinio tyrimo rezultatai gali būti panaudoti vertinant reaktoriaus galios pokyčius atliekamų ir būsimų aktyviosios zonos modernizacijų metu.

Skaitinio tyrimo rezultatai parodė, kad nustatytos α_{ϕ} reikšmės gerai (vidutinė paklaida ~16 %) koreliuoja su eksperimento metu išmatuotomis. Gautas labai geras (2–7 % paklaida) α_{ϕ} sutapimas su išmatuotomis koeficiento reikšmėmis būsenai, kai aktyviojoje zonoje patalpintas didesnis kiekis kuro rinklių su didesniu kuro įsodrinimu.

Sudarytas Q / C-H skaitinis modelis pakankamai gerai ir realiai įvertina pereinamuosius procesus, vykstančius RBMK-1500 reaktoriaus aktyviojoje zonoje α_{ϕ} ir α_{ω} matavimų metu. Sudarytas ir patikrintas skaitinis modelis gali būti naudojamas ateityje, tiksliau ir sparčiau apskaičiuojant ar analizuojant RBMK-1500 reaktorių charakteristikų kaitą aktyviosios zonos modernizacijos procese.

> Gauta 2008 11 11 Priimta 2009 01 06

Literatūra

- Pabarcius R., Tonkunas A., Listopadskis N. Determination of RBMK-1500 reactor passport characteristics // Kerntechnik. 2008. Vol. 73(1–2). P. 18–25.
- Pabarcius R., Tonkunas A., Bubelis E., Clemente M. Uncertainty and sensitivity analysis of void reactivity and power reactivity coefficients in an RBKM-1500 reactor core // Kerntechnik. 2005. Vol. 70(3). P. 114–119.
- 3. QUABOX / CUBBOX HYCA manual, GRS, 1993.
- Акт измерения и динамических характеристик реактора 2 блока 2007-01-23, ПТОап-1147–646.

- Акт измерения и динамических характеристик реактора 2 блока 2008-01-22, ПТОап-1147–712.
- Обоснование разрешенных диапазонов паспортных характеристик РУ. Разработка процедуры контроля соответствия значений паспортных параметров установленными пределами, ТАСпд-1245–68421.
- 7. Ignalinos AE bloko Nr. 2 RJ pasas Nr. 2004/2.
- Инструкция по контролю соответствия значений паспортных параметров реакторной установки установленным пределам, ПТОзд-1212–3в3.

Andrius Slavickas, Raimondas Pabarčius, Aurimas Tonkūnas

DYNAMIC MODELLING OF THE IGNALINA NPP POWER AND HEAT REACTIVITY COEFFICIENTS

Summary

The fast power and void reactivity coefficients are applied to characterize the RBMK-1500 reactor exploitation at the Ignalina NPP. These reactivity coefficients are estimated during measurements at the Ignalina NPP. The paper deals with the modelling of the fast power and void reactivity coefficient measurements (transient processes). The simulation of these transients was performed using the TITAN database of the reactor core and QUABOX / CUBBOX-HYCA software. The fast power and void reactivity coefficients for chosen RBMK-1500 reactor core states were evaluated. The modelling results were compared with the measurement data.

Key words: RBMK reactor modelling, fast power reactivity coefficient, void reactivity coefficient

Андрюс Славицкас, Раймондас Пабарчюс, Ауримас Тонкунас

ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МОЩНОСТНОГО И ПАРОВОГО КОЭФФИЦИЕНТОВ РЕАКТИВНОСТИ ИГНАЛИНСКОЙ АЭС

Резюме

Для оценки эксплуатации реактора РБМК-1500 Игналинской АЭС (ИАЭС) используются мощностной и паровой коэффициенты реактивности. Эти коэффициенты определяются во время проведения измерений на ИАЭС. Во время представленного анализа выполнено моделирование экспериментальных измерений (динамические процессы) по определению мощностного и парового коэффициентов реактивности. Используя информацию, заложенную в базах данных ТИТАН, а также применяя программный пакет QUABOX / CUBBOX-HYCA, смоделированы реальные состояния активных зон реактора и выполнен численный анализ проведенных измерений. На основе полученных результатов анализа были определены характерные для этих состояний мощностной и паровой коэффициенты реактивности реактора РБМК-1500. Полученные результаты расчета сопоставлены с экспериментальными данными.

Ключевые слова: моделирование РБМК-1500, мощностной коэффициент реактивности, паровой коэффициент реактивности