

RBMK-1500 reaktoriaus neutroninės-fizikinės charakteristikos vykdant aktyviosios zonos modifikacijas 2004–2009 m.

Andrius Slavickas,

Raimondas Pabarčius,

Aurimas Tonkūnas

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

Branduolinių reaktorių aktyviosios zonos saugą apibūdina neutroninės-fizikinės charakteristikos, nusakančios reaktoriaus elgseną kintant eksploatuojamo reaktoriaus būsenai tiek įprastų, tiek avarinių režimų metu. Pagal šias charakteristikas galima įvertinti reaktorių saugą bei ją turinčių užtikrinti priemonių efektyvumą reguliuojant aktyviojoje zonoje išsiskiriančios šilumos energijos kiekį. Pastarąjį dešimtmetį Ignalinos AE eksploatuojamuose RBMK-1500 reaktoriuose, siekiant pagerinti saugą ir šias charakteristikas, buvo modernizuojama aktyvioji zona. Naujos konstrukcijos valdymo-reguliavimo strypai ir didesnio įsodrinimo kuras su išdegančiu sugėrikliu buvo diegiami į aktyviąją zoną. Šio tyrimo metu taikant QUABOX / CUBBOX-HYCA programinį paketą buvo atlikti neutroninių-fizikinių charakteristikų skaičiavimai kintant aktyviosios zonos kuro įkrovai bei naudojamų valdymo-reguliavimo strypų konstrukcijai aktyviojoje zonoje. Remiantis šio tyrimo rezultatais buvo nustatyta aktyviosios zonos modernizacijos įtaka neutroninėms-fizikinėms charakteristikoms.

Raktažodžiai: RBMK-1500 modeliavimas, reaktyvumo koeficientai, reaktyvumo efektai, branduolinių reaktorių aktyviosios zonos modernizacija

ĮVADAS

Saugos gerinimo programos Ignalinos AE įgyvendinamos nuo RBMK reaktorių eksploatacijos pradžios. Po avarijos, įvykusios Černobylio AE eksploatuotame RBMK-1000 reaktoriuje, imtasi priemonių RBMK reaktorių saugai Ignalinos AE užtikrinti. Buvo padidinta operatyvinė reaktyvumo atsarga bei diegiami papildomi sugėrikliai aktyviojoje zonoje. Pastarąjį dešimtmetį Ignalinos AE buvo vykdoma 1-ojo ir 2-ojo energijos blokų reaktorių aktyviųjų zonų modernizacija, panaudojant naują urano–erbio kurą bei naujos konstrukcijos valdymo-reguliavimo strypus. Branduolinio reaktoriaus aktyviojoje zonoje vykstantys neutroniniai-fizikiniai procesai yra vertinami reaktyvumo koeficientais ir efektais. Šios charakteristikos nusako reaktoriaus elgseną tiek jo eksploatacijos, tiek avarinių režimų metu. Dėl atliekamos modernizacijos Ignalinos AE reaktoriaus aktyviosios zonos sudėtis nuolat keitėsi, atitinkamai keitėsi ir aktyviosios zonos ypatybės, kurios apibrėžiamos minėtomis charakteristikomis.

Lietuvos energetikos instituto (LEI) branduolinių įrenginių saugos specialistai atliko neutroninių-fizikinių charakte-

ristikų skaičiavimus kintant modernizuojamos aktyviosios zonos įkrovos kuru ir valdymo-reguliavimo strypais sudėčiai. Šis tyrimas atliktas taikant QUABOX / CUBBOX-HYCA (Q/C-H p/p) programinį paketą [1]. Q/C-H p/p pradėtas taikyti GRS mbH kompanijos tik Vakarų šalių suslėgto vandens reaktoriams, tačiau LEI ir GRS darbuotojų pastangomis buvo pritaikytas RBMK tipo reaktoriams. Nuo 1995 metų Q/C-H p/p buvo naudojamas Ignalinos AE reaktoriaus aktyviojoje zonoje vykstančių pereinamųjų bei stacionariųjų procesų analizei. Visi pradiniai duomenys, reikalingi neutronų kinetikos ir termohidrauliniams skaičiavimams atlikti, buvo paimti iš Ignalinos AE informacijos surinkimo sistemos (ISS) TITAN duomenų bazių, kuriose yra sukaupti duomenys apie reaktoriaus galią, kuro išdegimą bei šilumnešio debitą individualiuose technologiniuose kanaluose, reaktoriaus valdymo ir apsaugos sistemos (RVAS) strypų įleidimo gylį ir t. t.

Šiame straipsnyje pateikti neutroninių-fizikinių charakteristikų tyrimų rezultatai keičiantis aktyviosios zonos sudėčiai Ignalinos AE aktyviosios zonos modernizacijos metu. Remiantis gautais rezultatais galima vertinti, kokią įtaką reaktoriaus saugai turi atlikta tam tikra modernizacija bei

kurios neutroninės-fizikinės charakteristikos labiausiai veikiamos keičiantis kuro įkrovos sudėčiai aktyviojoje zonoje ar diegiant į aktyviąją zoną naujos konstrukcijos valdymo-reguliavimo strypus. Ignalinos AE 1-ojo bloko reaktorius sustabdytas 2004 m. pabaigoje, todėl šiai studijai, kuri apima taikytas naujausias priemones 2004–2009 m., pasirinktas 2-ojo bloko reaktorius.

REAKTORIAUS NEUTRONINĖS-FIZIKINĖS CHARAKTERISTIKOS

1 lentelėje pateiktas pagrindinių neutroninių-fizikinių charakteristikų, taikomų įvertinti Ignalinos AE eksploatuojamo RBMK-1500 reaktoriaus saugą, sąrašas. Charakteristikos skirstomos į dvi grupes: reaktyvumo koeficientus ir efektus bei RVAS strypų ir jų sistemų efektyvumus. Reaktyvumo koeficientai ir efektai apibrėžia, kokią įtaką reaktyvumo kitimui turi įvairūs aktyviosios zonos parametrai bei veiksniai. Tuo tarpu RVAS strypų ir sistemų efektyvumai įvertina RVAS strypų ir sistemų gebėjimą kompensuoti perteklinį reaktyvumą ir taip reguliuoti neutronų srautą. Lentelėje taip pat nurodytos pateiktų charakteristikų eksploatacinės ribos Ignalinos AE 2-ojo bloko reaktoriaus įrenginiui, kai reaktorius yra darbinės būsenos [2].

Galios ir garo reaktyvumo koeficientai yra vieni svarbiausių charakteristikų, pagal kurias vertinama RBMK-1500 reaktoriaus sauga. Garo reaktyvumo koeficientas α_g nusako reaktyvumo pokytį, tenkantį vienetiniam garo dalies pokyčiui aktyviojoje zonoje. Garo reaktyvumo koeficientas RBMK reaktoriams yra teigiamas, taigi didėjant garo daliai reaktyvumas auga. Galios reaktyvumo koeficientas α_w nusako reaktyvumo pokytį, tenkantį vienetiniam galios pokyčiui. Kadangi RBMK reaktoriams galios reaktyvumo koeficientas yra neigiamas, tai didėjant reaktoriaus galiai reaktyvumas mažėja. Šie reaktyvumo koeficientai iš kitų charakteristikų išsiskiria tuo, kad yra nustatomi dvejopai: atliekant matavimus bei apskaičiuojami naudojant programinius paketus [3, 4]. Tuo tarpu kitų charakteristikų vertės yra nustatomos tik naudojant programinius paketus. α_g ir α_w vertėms įvertinti modeliuojamos staciona-

rios aktyviosios zonos būsenos panaudojant Ignalinos AE ISS TITAN duomenų bazes. α_g skaitinė vertė randama įvertinant reaktyvumo skirtumus tarp aktyviosios zonos būsenos su realia šilumnešio entalpija ir aktyviųjų zonų būsenų su dirbtinai pakeista šilumnešio entalpija. α_w skaitinė vertė apskaičiuojama pagal reaktyvumo skirtumą tarp aktyviosios zonos būsenų su ISS TITAN duomenų bazėje nurodyta realia reaktoriaus galia ir su 50 MW sumažinta reaktoriaus galia.

Kita su reaktoriaus sauga susijusi charakteristika yra daugkartinės ir priverstinės cirkuliacijos kontūro nuvandeninimo efektas α_{DPCK} , kuris apibrėžia reaktyvumo pokytį, sukeltą praradus šilumnešį technologiniuose kanaluose. Atskirai išskirtas RVAS nuvandeninimo efektas α_{RVAS} , kadangi RVAS kanalai turi nepriklausomą (nuo DPCK) aušinimo kontūrą, užtikrinantį RVAS strypų aušinimą, jei sutrinka šilumnešio tiekimas į technologinius kanalus su kuro rinklėmis. Šių nuvandeninimo efektų skaitinės vertės apskaičiuojamos pagal reaktyvumo skirtumą, kai aušinimo kanalai yra su vandeniu ir be vandens.

Aktyviojoje zonoje medžiagos yra veikiamos labai aukštų temperatūrų. Didėjant ar mažėjant temperatūrai keičiasi tų medžiagų savybės, pasireiškia įvairiausi veiksniai. Visi šie temperatūriai efektai turi įtakos neutronų daugėjimo koeficientui, aktyviosios zonos reaktyvumui ir t. t. Temperatūriai kuro α_T ir grafito α_C reaktyvumo koeficientai apibrėžia reaktyvumo pokyčius, sąlygotus kuro ir grafito temperatūros pokyčių. α_T skaitinė vertė RBMK-1500 reaktoriui neigiama, o α_C – teigiama. Taigi kuro temperatūros augimas turi įtakos reaktyvumo mažėjimui, tuo tarpu grafito temperatūros augimas, priešingai, – reaktyvumo didėjimui. Skaitinės šių temperatūrių koeficientų vertės apskaičiuojamos įvertinant reaktyvumo pokytį, tenkantį vienetiniam temperatūros pokyčiui tarp aktyviosios zonos būsenų su realia ir 50 MW sumažinta reaktoriaus galia.

Kita svarbi RBMK-1500 reaktoriaus neutroninių-fizikinių charakteristikų grupė yra RVAS strypų ir sistemų efektyvumai, kurie apibūdina RVAS strypų ir sistemų efektyvumą reaktorių eksploatuojant įprastų ir avarinių režimų metu. Skaičiuojant neutronines-fizikines charakteristikas yra įvertinami suminis RVAS ir jos posistemų (greitos avarinės apsaugos (GAA), ava-

1 lentelė. Pagrindinės neutroninės-fizikinės charakteristikos

Žymėjimas	Charakteristika	Ribos [2]
Reaktyvumo koeficientai ir efektai		
α_g	Garų reaktyvumo koeficientas	$(-1,0-1,0) \beta_{ef}$
α_w	Galios reaktyvumo koeficientas	$(-4 - -1) \cdot 10^{-4} \beta_{ef} / MW$
α_{DPCK}	DPCK nuvandeninimo efektas	$1,0 \beta_{ef}$
α_{RVAS}	RVAS aušinimo kontūro nuvandeninimo efektas	$3,0 \beta_{ef}$
α_T	Temperatūris kuro efektyvumo koeficientas	$(-3,7; -3,5) \cdot 10^{-3} \beta_{ef} / ^\circ C$
α_C	Temperatūris grafito reaktyvumo koeficientas	$(0; 10) \cdot 10^{-3} \beta_{ef} / ^\circ C$
RVAS strypų ir sistemų efektyvumai		
α_{ERVAS}	Suminis RVAS strypų efektyvumas	$\geq 15 \beta_{ef}$
α_{EGAA}	Suminis greitos avarinės apsaugos strypų efektyvumas	$(1,8; 3,6) \beta_{ef}$
α_{EAA}	Suminis avarinės apsaugos sistemos strypų efektyvumas	$\geq 4,7 \beta_{ef}$
α_{EGGM}	Suminis greito galios mažinimo sistemos strypų efektyvumas	$\geq 11,4 \beta_{ef}$
α_{RR}	Vidutinis rankinio reguliavimo strypo efektyvumas	$(0,06; 0,14) \beta_{ef}$

2 lentelė. Reaktyvumo koeficientų ir efektų kitimas 2,6 % įsodrinimo urano–erbio kuro diegimo Ignalinos AE metu

$N_{\text{ŠIR}} 2,0 \%$	129	124	119	114	109	105	100
$N_{\text{ŠIR}} 2,4 \%$	1 027	965	903	841	779	717	656
$N_{\text{ŠIR}} 2,6 \%$	500	567	634	701	768	834	900
$\alpha_{\varphi} \beta_{\text{ef}}$	0,96	0,90	0,85	0,81	0,75	0,71	0,64
$\alpha_{\omega} 10^{-4} \beta_{\text{ef}}$	-3,03	-3,07	-3,11	-3,13	-3,16	-3,18	-3,22
$\alpha_{\text{DPC}} \beta_{\text{ef}}$	0,32	0,29	0,25	0,23	0,19	0,16	0,12
$\alpha_{\text{RVAS}} \beta_{\text{ef}}$	2,04	2,04	2,04	2,03	2,03	2,03	2,02
$\alpha_T 10^{-3} \beta_{\text{ef}}$	-2,57	-2,57	-2,57	-2,56	-2,56	-2,56	-2,57
$\alpha_C 10^{-3} \beta_{\text{ef}}$	4,09	3,99	3,89	3,92	3,83	3,72	3,52

rinės apsaugos (AA) bei greito galios mažinimo (GGM)) suminiai efektyvumai. Visų efektyvumų skaitinės vertės apskaičiuojamos įvertinant reaktyvumų skirtumus tarp aktyviųjų zonų būsenų su atitinkamos sistemos strypais, visiškai ištrauktais iš aktyviosios zonos bei visiškai įleistais į aktyviąją zoną. Vidutinis rankinio reguliavimo strypo efektyvumas apskaičiuojamas įvertinus reaktyvumo tarp aktyviosios zonos būsenų su visiškai ištrauktais ir visiškai įleistas strypais aktyviojoje zonoje, kuris tenka vienam strypui, skirtumą.

DIDESNIO ĮSODRINIMO URANO–ERBIO KURO NAUDOJIMAS

Reaktoriaus galios reguliavimas laikomas priimtiniu, kai reaktyvumo koeficientų visuma yra neigiamas dydis. Tokiu atveju, kylant temperatūrai, didėjant garo daliai aktyviojoje zonoje ar reaktoriaus šiluminei galiai, reaktyvumas mažėja. Tokie reaktoriai laikomi veikiančiais stabiliai. Tuo tarpu RBMK reaktoriui vienas reaktyvumo koeficientų turi teigiamą vertę – tai garo reaktyvumo koeficientas α_{φ} . Garo reaktyvumo skaitinė vertė nusako, kaip greitai keičiasi reaktoriaus galia keičiantis garo daliai aktyviojoje zonoje. Kadangi dėl padidėjusios reaktoriaus galios išskiriama daugiau garo, tai reaktoriuose su didele garo reaktyvumo koeficiento reikšme gali sparčiai augti galia ir dar labiau daugėti garo. Taigi reaktoriuose su teigiamu garo reaktyvumo koeficientu gali susidaryti sąlygos sparčiam nekontroliuojamam galios augimui.

Po avarijos Černobylio AE 1986 m. imtasi taikyti priemonės mažinti garo reaktyvumo koeficientą Ignalinos AE eksploatuojamuose RBMK-1500 reaktoriuose. Apie 50 technologinių kanalų kuro rinklės buvo pakeistos papildomais sugėrikliais. Tai padėjo sumažinti garo reaktyvumo koeficiento vertę nuo 4 iki 1 β_{ef} . Nuo RBMK-1500 reaktorių eksploatacijos pradžios juose buvo naudojamos šilumą išskiriančios rinklės (ŠIR) su 2,0 % įsodrinimo U^{235} kuru. Nuo 1995 m. pradėta naudoti didesnio įsodrinimo urano (2,4 %) kurą su išdegančiu erbio (masinė erbio dalis 0,41 %) sugėrikliu (EŠIR). 2001 ir 2005 m. į aktyviąją zoną pradėta diegti EŠIR su atitinkamai 2,6 % (masinė erbio dalis 0,5 %) ir 2,8 % (masinė erbio dalis 0,6 %) įsodrinimo urano–erbio kuru. EŠIR su urano–erbio kuru, naudojamos aktyviojoje zonoje, leido atsisaikyti papildomų sugėriklių, kurie sąlygavo nepageidaujamą neutronų praradimą. Tai leido padidinti kuro išdegimo gylį bei pagerinti ekonominius reaktoriaus rodiklius. Naudojant

EŠIR taip pat pavyko sumažinti garo reaktyvumo koeficientą ir galios reaktyvumo neigiamą vertę.

Skaitiniam tyrimui įvertinti EŠIR su 2,6 % įsodrinimo urano–erbio kuro diegimo į aktyviąją zoną įtaką reaktoriaus neutroninėms-fizikinėms charakteristikoms buvo pasirinkta Ignalinos AE ISS TITAN duomenų bazė, kurioje užfiksuota 2-ojo bloko reaktoriaus būseną 2003 m. vasario 21 d. Tuo metu aktyviojoje zonoje 500 technologiniuose kanaluose buvo patalpintos 2,6 % įsodrinimo urano–erbio kuro rinklės. Siekiant įvertinti 2,6 % įsodrinimo urano–erbio kuro naudojimo įtaką neutroninėms-fizikinėms charakteristikoms EŠIR su 2,6 % įsodrinimo urano–erbio kuro skaičius buvo didinimas iki 900 (2 lentelė). Kad charakteristikų vertės atspindėtų realią aktyviosios zonos įkrovos kuru sudėties kitimo įtaką, reaktoriaus galia (4 200 MW) ir kuro išdegimas (11,28 MW paros/kg) nebuvo keičiami.

Neutroninių-fizikinių charakteristikų vertės esant skirtingai aktyviosios zonos įkrovai kuru pateiktos 2 lentelėje. Lentelėje pateiktos tik reaktyvumo koeficientų ir efektų vertės, kadangi RVAS strypų ir sistemų efektyvumai neturi kokio nors didesnio tiesioginio priklausomumo nuo aktyviosios zonos įkrovos kuru sudėties (efektyvumų vertės kinta nežymiai arba visai nekinta). Pagal gautus rezultatus matyti, kad aktyviosios zonos įkrovos kuru sudėtis turi įtakos garo ir galios reaktyvumo koeficientams, DPCK nuvandeninimo efektui bei temperatūrai grafito koeficientui. Teigiamų α_{φ} ir α_C verčių mažėjimas lemia geresnę reaktoriaus saugą, kadangi augant garo daliai aktyviojoje zonoje bei grafito temperatūrai reaktyvumas padidės kur kas mažiau. Neigiamo α_{ω} koeficiento absoliučios vertės didėjimas rodo, kad reaktyvumas didėjant reaktoriaus galiai mažės labiau nei atveju prieš modernizuojant aktyviąją zoną. Dėl šių trijų koeficientų kitimo reaktoriaus saugos lygis padidėja, kadangi tai padidina reaktoriaus stabilumą ir savireguliaciją. Mažėjanti α_{DPC} vertė rodo mažesnę reaktyvumo augimą praradus šilumnešį į aktyviąją zoną. Esant mažesniai DPCK nuvandeninimo efektui teigiamas reaktyvumo prieaugis yra mažesnis, todėl reaktoriaus apsaugos sistemoms tenka mažiau reguliuoti reaktyvumo prieaugį. α_{RVAS} ir α_T vertės kintant aktyviosios zonos įkrovos kuru sudėčiai kito nežymiai. Gauti rezultatai patvirtino, kad įdiegus EŠIR su 2,6 % įsodrinimo urano–erbio kuru pagerėjo reaktoriaus neutroninės-fizikinės charakteristikos.

Siekiant įvertinti EŠIR su 2,8 % įsodrinimo urano–erbio kuro diegimo į aktyviąją zoną įtaką reaktoriaus charakteristi-

3 lentelė. Reaktyvumo koeficientų ir efektų kitimas diegiant 2,8 % įsodrinimo urano–erbio kurą I gnalinos AE

$N_{\text{EŠIR}} 2,0 \%$	62	51	42	32	23	18	13
$N_{\text{EŠIR}} 2,4 \%$	39	36	34	30	27	25	25
$N_{\text{EŠIR}} 2,6 \%$	1 198	1 159	1 114	1 068	1 020	967	909
$N_{\text{EŠIR}} 2,8 \%$	361	414	470	530	590	650	713
$\alpha_{\varphi} \beta_{\text{ef}}$	0,64	0,61	0,58	0,53	0,48	0,45	0,41
$\alpha_{\omega} 10^{-4} \beta_{\text{ef}}$	-3,39	-3,39	-3,40	-3,43	-3,46	-3,48	-3,50
$\alpha_{\text{DPC}} \beta_{\text{ef}}$	0,27	0,25	0,23	0,19	0,16	0,14	0,11
$\alpha_{\text{RVAS}} \beta_{\text{ef}}$	1,69	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70
$\alpha_{\text{I}} 10^{-3} \beta_{\text{ef}}$	-2,62	-2,61	-2,61	-2,61	-2,61	-2,61	-2,61
$\alpha_{\text{c}} 10^{-3} \beta_{\text{ef}}$	4,01	3,95	3,93	3,84	3,72	3,67	3,64

koms buvo pasirinkta ISS TITAN duomenų bazė, kurioje užfiksuota 2-ojo bloko reaktoriaus būseną 2007 m. birželio 1 d. Tuo metu aktyviojoje zonoje buvo 361 2,8 % įsodrinimo EŠIR. Vidutinis kuro išdegimas aktyviojoje zonoje, palyginti su 2003 m. vasario 21 d. aktyviosios zonos būseną, padidėjo beveik 2 MW paros/kg, kadangi dėl panaudoto didesnio įsodrinimo EŠIR padidėjo iškraunamo kuro išdegimo gylys. Atliekant tyrimą buvo sumodeliuotos tarpinės aktyviosios zonos būsenos 2,8 % įsodrinimo EŠIR skaičių didinant iki 713. Priimta, kad reaktorius dirba nominalia 4 200 MW galia.

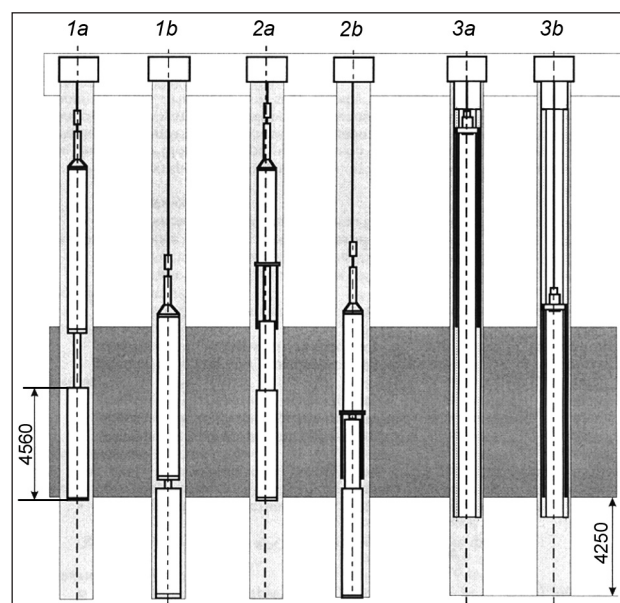
Neutroninių-fizikinių charakteristikų vertės esant skirtingai aktyviosios zonos įkrovai kuru pateiktos 3 lentelėje. Kaip ir EŠIR su 2,6 % įsodrinimo urano–erbio kuru diegimo atveju, α_{φ} , α_{ω} , α_{DPC} ir α_{c} vertės mažėja, o tai rodo, kad dėl atliekamos modernizacijos diegiant didesnio įsodrinimo kurą su išdegančiu absorberiu erbiu gerėja reaktoriaus saugos charakteristikos.

NAUJOS KONSTRUKCIJOS STRYPŲ NAUDOJIMAS

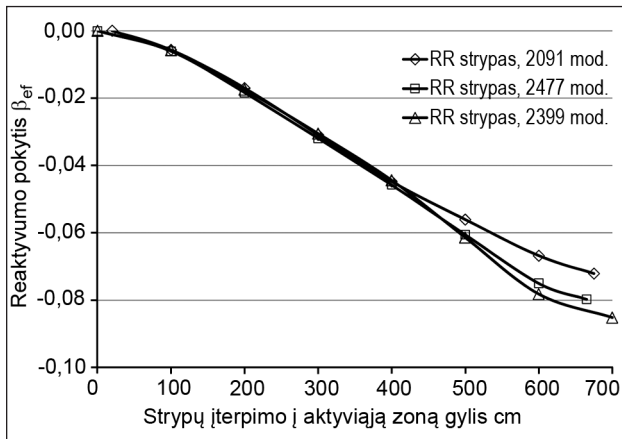
Reaktoriaus neutroninės galios reguliavimas yra viena pagrindinių priemonių užtikrinant saugią branduolinių reaktorių eksploataciją. RBMK-1500 reaktoriuje neutroninę galios kontrolę atlieka reaktoriaus valdymo ir apsaugos sistema, kurią sudaro valdymo-reguliavimo strypai, įdiegti į 211 RVAS kanalų. RVAS funkcija – reaktoriaus galios reguliavimas įprastų režimų metu ir reaktoriaus sustabdymas susidarius avarinėms sąlygoms. Reaktoriaus galios profilio pasiskirstymas valdomas įleidžiant arba ištraukiant valdymo-reguliavimo strypus, kurie absorbuoja neutronus aktyviojoje zonoje. RVAS kanalai turi nepriklausomą nuo DPC aušinimo kontūrą, kad būtų užtikrintas patikimas RVAS veikimas. Valdymo-reguliavimo strypai yra skirstomi į tris grupes: rankinio reguliavimo (RR), sutrumpinti valdymo (SVS) ir greitos avarinės apsaugos (GAA) [5]. Rankinio reguliavimo strypai į aktyviąją zoną yra įterpiami iš viršaus ir skirti reguliuoti radialinį neutronų srautą. Tuo tarpu sutrumpinti rankinio reguliavimo strypai į aktyviąją zoną yra įterpiami iš apačios, jų neutronus absorbuojančios strypo dalys yra trumpesnės (~4 m) ir jie skirti reguliuoti ašinį neutronų srautą. Greitos avarinės apsaugos strypai skirti sparčiam reaktoriaus galios mažinimui ir jie sudaryti tik iš neutronus absorbuojančios medžiagos (kitų strypų konstrukcijos sudėtingesnės).

Vanduo absorbuoja neutronus, todėl netekus vandens RVAS kanaluose padidėja reaktyvumas. Siekiant sumažinti šį reaktyvumo prieaugį, kai RVAS prarandamas vanduo, senesnės konstrukcijos strypai buvo keičiami naujos konstrukcijos strypais. Nuo 1995 m. senos konstrukcijos rankinio reguliavimo strypai (2091 modifikacija) keičiami naujesnės konstrukcijos valdymo-reguliavimo strypais (2477), kurie turi efektyvų absorbuojantį gaubtą. Pakeitus 2091 modifikacijos RR strypą 2477 modifikacijos strypu vandens kiekis RVAS kanale per aktyviosios zonos aukštį sumažėjo nuo 16 iki 8 litrų. Nuo 2004 m. į RVAS kanalus diegiami 2399 modifikacijos RR strypai, kurie vandens kiekį RVAS kanale sumažino iki 3 litrų. 1 paveiksle pavaizduoti 2091 (1a, 1b), 2477 (2a, 2b) ir 2399 (3a, 3b) modifikacijų RR strypai. Strypai pavaizduoti padėtyse, kai jie yra visai pakelti iš aktyviosios zonos (a) ir visai įleisti į ją (b).

2 paveiksle pavaizduotas reaktyvumas, kai skirtingų modifikacijų RR strypai yra įterpiami į aktyviąją zoną. Įvertinant reaktyvumo skirtumus, kai RR strypas yra visai ištrauktas iš aktyviosios zonos ir visai įterptas į aktyviąją zoną, 2399 modifikacijos strypo efektyvumas bus didesnis už 2477 ir 2091 modifikacijų strypų efektyvumą.



1 pav. 2091, 2477 ir 2399 modifikacijų RR strypai



2 pav. 2 091, 2 477 ir 2 399 modifikacijų RR strypų efektyvumas

Siekiant įvertinti 2477 modifikacijos RR strypų keitimo 2399 modifikacijos RR strypais tikslumą skaitiniam tyrimui pasirinkta aktyviosios zonos būseną, užfiksuota ISS TITAN duomenų bazės Ignalinos AE 2-ajame bloke 2006 m. balandžio 4 d. Tuo metu aktyviojoje zonoje buvo 103 ir 28, atitinkamai 2477 ir 2399 modifikacijų, RR strypai. Buvo sumodeliuotos tarpinės aktyviosios zonos būsenos, kurioms esant 21 strypas (2477 mod.) buvo pakeistas 2399 modifikacijos strypais. 2091 modifikacijos RR strypų skaičius tyrimo metu

nebuvo keičiamas. Šioms aktyviosios zonos būsenoms buvo apskaičiuotos neutroninės-fizikinės charakteristikos, kurios pateiktos 4 lentelėje. Priimta, kad reaktorius dirba nominalia 4 200 MW galia.

Remiantis 4 lentelės duomenimis galima teigti, kad atlikus aktyviosios zonos modernizaciją, kurios metu 2477 modifikacijos RR strypai buvo keičiami 2399 modifikacijos strypais, iš reaktyvumo koeficientų ir efektų labiausiai yra veikiamas RVAS aušinimo kontūro nuvandeninimo efektas. Dėl šio efekto skaitinės vertės sumažėjimo mažėja reaktyvumo prieaugis, kurį sukelia vandens praradimas RVAS kanaluose. Vidutinis RR strypo efektyvumas ρ_{RR} kinta nedaug ($0,001 \beta_{ef}$), tuo tarpu visos RVAS efektyvumas ρ_{RVAS} išauga $0,15 \beta_{ef}$. Taip pat padidėjo Greito galios mažinimo (GGM) ir Avarinės apsaugos (AA) sistemų, kurių sudėtyje yra RR strypai, efektyvumas, atitinkamai $0,14$ ir $0,25 \beta_{ef}$. Šis prieaugis padidina RVAS sistemų ir strypų potencialą reguliuoti reaktorių bei leidžia adekvačiai reaguoti į avarines situacijas. Greitos avarinės apsaugos sistemos efektyvumas yra vienintelė charakteristika, kurios skaitinė vertė sumažėjo įdiegus naujos konstrukcijos strypus. Pažymėtina, kad šioje sistemoje nėra RR strypų. Padidėjus kitų sistemų efektyvumui šios GAA sistemos efektyvumas nepakito, taigi šios sistemos poveikis bendrame reaktoriaus reguliavimo kontekste sumažėjo.

4 lentelė. Ignalinos AE 2-ojo bloko neutroninės-fizikinės charakteristikos 2477 mod. strypus keičiant 2399 mod. strypais

N_{2477}	103	99	95	91	87	82
N_{2399}	28	32	36	40	44	49
$\alpha_p \beta_{ef}$	0,66	0,66	0,66	0,67	0,67	0,68
$\alpha_w 10^{-4} \beta_{ef}$	-3,28	-3,28	-3,28	-3,28	-3,28	-3,28
$\alpha_{DPCR} \beta_{ef}$	0,22	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23
$\alpha_{RVAS} \beta_{ef}$	1,84	1,81	1,79	1,77	1,75	1,72
$\alpha_T 10^{-3} \beta_{ef}$	-2,55	-2,56	-2,56	-2,56	-2,56	-2,56
$\alpha_C 10^{-3} \beta_{ef}$	3,65	3,63	3,62	3,62	3,60	3,58
$\rho_{RVAS} \beta_{ef}$	20,95	20,98	21,01	21,03	21,06	21,10
$\rho_{GGM} \beta_{ef}$	17,03	17,05	17,08	17,11	17,13	17,17
$\rho_{EGAA} \beta_{ef}$	2,52	2,51	2,50	2,50	2,49	2,49
$\rho_{IAA} \beta_{ef}$	8,62	8,65	8,68	8,71	8,74	8,77
$\rho_{IRR} \beta_{ef}$	0,108	0,108	0,108	0,108	0,109	0,109

5 lentelė. Ignalinos AE 2-ojo bloko neutroninės-fizikinės charakteristikos 2091 mod. strypus keičiant 2399 mod. strypais

N_{2091}	16	14	12	10	8	6	4
N_{2399}	49	51	53	55	57	59	61
$\alpha_p \beta_{ef}$	0,68	0,68	0,68	0,69	0,69	0,69	0,70
$\alpha_w 10^{-4} \beta_{ef}$	-3,28	-3,28	-3,28	-3,28	-3,28	-3,27	-3,27
$\alpha_{DPCR} \beta_{ef}$	0,23	0,23	0,23	0,24	0,24	0,24	0,25
$\alpha_{RVAS} \beta_{ef}$	1,72	1,67	1,62	1,59	1,56	1,52	1,48
$\alpha_T 10^{-3} \beta_{ef}$	-2,56	-2,56	-2,57	-2,57	-2,56	-2,56	-2,56
$\alpha_C 10^{-3} \beta_{ef}$	3,58	3,54	3,48	3,50	3,50	3,53	3,50
$\rho_{RVAS} \beta_{ef}$	21,10	21,13	21,16	21,21	21,25	21,29	21,33
$\rho_{GGM} \beta_{ef}$	17,17	17,20	17,23	17,27	17,31	17,35	17,40
$\rho_{EGAA} \beta_{ef}$	2,49	2,48	2,47	2,46	2,46	2,45	2,45
$\rho_{IAA} \beta_{ef}$	8,77	8,77	8,76	8,76	8,76	8,76	8,76
$\rho_{IRR} \beta_{ef}$	0,109	0,109	0,109	0,110	0,110	0,110	0,111

6 lentelė. Ignalinos AE 2-ojo bloko neutroninės-fizikinės charakteristikos 2004–2009 m.

AE ISS TITAN DB	E MW - d/kg	Galia MW	$N_{\text{ŠIR}} \cdot 2,0\%$	$N_{\text{EŠIR}} \cdot 2,4\% / 2,6\% / 2,8\%$	$N_{2091} / N_{2477} / N_{2399}$	$\alpha_{\text{p-ef}}$	$\alpha_{\text{w}} \cdot 10^{-4} \beta_{\text{ef}}$	$\alpha_{\text{DPAK}} \beta_{\text{ef}}$	$\alpha_{\text{RMS}} \beta_{\text{ef}}$	$\alpha_{\text{T}} \cdot 10^{-3} \beta_{\text{ef}} / ^\circ\text{C}$	$\alpha_{\text{C}} \cdot 10^{-3} \beta_{\text{ef}} / ^\circ\text{C}$	$\rho_{\text{RMS}} \beta_{\text{ef}}$	$\rho_{\text{GMA}} \beta_{\text{ef}}$	$\rho_{\text{RR}} \beta_{\text{ef}}$
2004 10 19	11,78	2 030	128	536/991/0	16/127/4	0,73	-3,78	0,36	1,70	-3,19	5,16	20,7	2,40	0,107
2004 12 03	11,74	3 590	127	501/1 029/0	16/127/4	0,62 (0,68 ± 0,12)*	-3,70 (-2,4 ± 0,2)*	0,28	1,94	-2,72	4,28	21,4	2,44	0,108
2005 04 06	11,95	4 060	135	322/1 200/0	16/127/4	0,72 (0,72 ± 0,12)*	-3,65 (-2,3 ± 0,2)*	0,21	2,06	-2,52	3,90	20,6	2,40	0,108
2005 08 19	12,29	4 050	113	174/1 369/0	16/127/4	0,60 (0,55 ± 0,13)*	-3,52 (-2,5 ± 0,2)*	0,26	2,00	-2,53	3,77	20,7	2,40	0,109
2006 01 27	12,43	4 045	73	113/1 273/200	16/103/28	0,42 (0,57 ± 0,16)*	-3,67 (-2,4 ± 0,2)*	0,17	1,82	-2,69	3,55	21,0	2,44	0,109
2006 04 04	12,69	4 150	58	90/1 313/200	16/103/28	0,61 (0,67 ± 0,12)*	-3,45 (-2,1 ± 0,2)*	0,20	1,85	-2,63	3,60	21,0	2,49	0,108
2007 06 01	13,24	3 990	62	39/1 198/361	16/103/28	0,64 (0,77 ± 0,21)*	-3,40 (-2,1 ± 0,2)*	0,29	1,70	-2,66	4,24	21,3	2,53	0,109
2007 08 08	13,34	2 350	57	36/1 192/372	16/82/49	0,62 (0,77 ± 0,13)*	-3,60 (-2,9 ± 0,2)*	0,57	1,74	-3,07	6,20	20,2	2,40	0,107
2008 01 22	13,38	4 132	36	47/1 070/504	4/82/61	0,43 (0,54 ± 0,08)*	-3,5 (-2,2 ± 0,2)*	0,20	1,39	-2,60	4,30	21,6	2,54	0,110
2008 04 11	13,70	4 044	31	47/1 019/559	4/82/61	0,53 (0,54 ± 0,08)*	-3,4 (-2,2 ± 0,2)*	0,30	1,44	-2,60	4,30	21,7	2,57	0,112
2009 02 12	14,08	4 114	14	37/692/912	4/82/61	0,73	-3,473	0,41	1,50	-2,67	4,10	21,9	2,59	0,113

* Ignalinos AE eksperimentiškai išmatuotos vertės.

Siekiant įvertinti 2091 modifikacijos RR strypų keitimą 2399 modifikacijos RR strypais skaitiniam tyrimui pasirinkta aktyviosios zonos būsena, užfiksuota ISS TITAN duomenų bazės Ignalinos AE 2-ajame bloke 2006 m. balandžio 4 d. Modeliavimas atliktas įvertinant papildomą 21 strypo (2477 mod.) pakeitimą 2399 modifikacijos strypais. Taigi tuo metu aktyviojoje zonoje buvo 16 ir 49, atitinkamai 2091 ir 2399 modifikacijų, RR strypai. Taip pat sumodeliuotos tarpinės aktyviosios zonos būsenos, kurioms esant beveik visi 2091 modifikacijos strypai buvo pakeisti 2399 modifikacijos strypais. 2477 modifikacijos RR strypų skaičius šio tyrimo metu nebuvo keičiamas.

Strypų modifikacijos metu labiausiai kito RVAS aušinimo kontūro nuvandeninimo efektas (5 lentelė). Vidutinis RR valdymo strypo efektyvumas išaugo nežymiai, tik 0,002 β_{ef} . Padidėjo RVAS ir GGM sistemų efektyvumas, tačiau GAA ir AA sistemų efektyvumas sumažėjo. AA apsaugos sistemos efektyvumo sumažėjimą galima paaiškinti tuo, kad 2091 modifikacijos strypai nepriklauso AA sistemai. Kadangi GAA ir AA sistemų dalis į reaktoriaus reguliavimą sumažėjo kitų sistemų efektyvumui išaugus, tai sistemų (GAA ir AA) efektyvumas sumažėjo. Taigi keičiant senesnės konstrukcijos strypus naujesniais buvo nustatytas tiek RR strypų, tiek visos RVAS efektyvumo padidėjimas. Šis prieaugis pakelia RVAS sistemų ir strypų potencialą reguliuoti reaktorių bei leidžia adekvačiai reaguoti į avarines situacijas.

MODERNIZACIJOS APIBENDRINIMAS

6 lentelėje pateikta neutroninių-fizikinių charakteristikų kaita 2004–2009 m. Ignalinos AE 2-ojo bloko reaktoriuje. Visos charakteristikos nustatytos modeliuojant realias aktyviosios zonos būsenas, užfiksuotas ISS TITAN duomenų bazėse. 2004 m. RBMK-1500 reaktoriaus aktyviojoje zonoje dar nebuvo naudojamos EŠIR su 2,8 % įsodrinimo urano–erbio kuru, tačiau jau buvo eksploatuojamos EŠIR su 2,6 % įsodrinimo urano–erbio kuru. Modernizuojant RBMK-1500 ŠIR su 2,0 % įsodrinimo ir EŠIR su 2,4 % įsodrinimo kuru buvo keičiamos EŠIR su 2,6 % ir 2,8 % įsodrinimo kuru. Planinių reaktoriaus įrenginio remontų metu 2091 ir 2477 modifikacijų RR strypai buvo keičiami 2399 modifikacijos RR strypais. Aktyviosios zonos būseną apibrėžia ne tik aktyviosios zonos kuro įkrova ir naudojamų strypų tipai, bet ir kitos neutroninės-fizikinės charakteristikos. Todėl apskaičiuotų charakteristikų kaita (6 lentelė) dėl aktyviosios zonos kompleksinės modernizacijos nėra tokia tolygi, kaip apibūdinta anksčiau.

Dėl didesnio įsodrinimo urano–erbio kuro panaudojimo padidėjo iš aktyviosios zonos išimamų kuro rinklių išdegimas. Todėl vidutinis per aktyviąją zoną kuro išdegimas nuo 2004 m. išaugo daugiau nei 2,5 MW paros/kg. Remiantis gautais rezultatais ir 6 lentelėje pateiktais duomenimis galima teigti, kad dėl didesnio įsodrinimo urano–erbio kuro pagerėjo ne tik saugos charakteristikos, bet ir ekonomiškumas, nes pasiekiamas didesnis kuro išdirbis. Ilgiau išlaikant kurą aktyviojoje zonoje garo reaktyvumo koeficiento vertė padidėja, todėl eksploatuojant reaktorių su didesnio įsodrinimo urano–erbio kuru garo reaktyvumo koeficientas realiai sumažėja ne taip žymiai, kaip parodyta anksčiau.

IŠVADOS

Remiantis šiame darbe atliktais tyrimais galima teigti, kad panaudojus EŠIR su 2,6 % ir 2,8 % įsodrinimo urano–erbio kuru RBMK-1500 aktyviojoje zonoje 2004–2009 m. pagerėjo reaktoriaus neutroninės-fizikinės

charakteristikos. Dėl garo reaktyvumo ir temperatūrio grafito koeficientų verčių mažėjimo bei neigiamos galios reaktyvumo koeficiento vertės didėjimo pagerėjo reaktoriaus sauga ir stabilumas. Naudojant didesnio išodrinimo urano–erbio kurą sumažėjo ir DPCK nuvandeninimo efektas.

RBMK-1500 aktyviojoje zonoje 2091 ir 2477 modifikacijų rankinio reguliavimo strypus pakeitus 2399 modifikacijos strypais sumažėjo RVAS nuvandeninimo efektas. Naujos konstrukcijos strypų efektyvumas yra didesnis nei senos konstrukcijos strypų, todėl visos RVAS efektyvumas išaugo.

Reaktoriaus neutroninių-fizikinių charakteristikų pokyčiai rodo, kad reaktoriaus sauga modernizavus aktyviąją zoną padidėjo. Ne tik išaugo reaktoriaus stabilumas, savireguliacija ir reguliavimo efektyvumas, bet ir sumažėjo reaktyvumo prieaugis, kai nutrūko aktyviosios zonos aušinimas.

Gauta 2010 12 11
Parengta 2011 03 25

Literatūra

1. QUABOX / CUBBOX-HYCA Manual. GRS, 1993.
2. Ignalinos AE bloko Nr. 2 RĮ pasas Nr. 2004/2.
3. Pabarcus R., Tonkunas A., Listopadskis N. Determination of RBMK-1500 reactor passport characteristics. *Kerntechnik*. 2008. Vol. 73(1–2). P. 18–25.
4. Pabarcus 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.
5. Almenas K., Kaliačka A., Ušpuras E. *Ignalina RBKM-1500. A Source Book*. Kaunas: Lithuanian Energy Institute, 1998.

Andrius Slavickas, Raimondas Pabarčius, Aurimas Tonkūnas

CHANGES OF NEUTRON-PHYSICAL CHARACTERISTICS OF RBMK-1500 REACTOR DURING ITS MODIFICATION IN 2004–2009

Summary

Neutron power control is the key to the reactor operation. The reactivity coefficients and effects are the main measures to estimate the reactor control and safety. These characteristics outline the reactor behaviour during its usual exploitation and in accident events. Reactor safety and implements to ensure it are estimated

by these parameters. The reactivity coefficients and effects quantify the effect exerted by various parameters (e. g., graphite fuel temperature, amount of steam) on the core neutron activity. Many modifications of the RBMK-1500 reactor core at the Ignalina NPP were made during the last decade. The reactor core modifications such as load of more enriched fuel with a burnable absorber and the new construction of control rods improved the reactivity coefficients. The neutron-physical parameters of various reactor core states under various fuel loads and with new-construction control rods were calculated using QUABOX / CUBBOX-HYCA software. Changes of the reactivity coefficients and their effects are quantified in this paper.

Key words: RBMK reactor modeling, reactivity coefficients and effects, reactor core modernization

Андрюс Славичкас, Раймондас Пабарчюс, Ауримас Тонкунас

ИЗМЕНЕНИЕ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕАКТОРА РБМК-1500 ПРИ МОДИФИКАЦИИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ В 2004–2009 ГГ.

Резюме

Безопасность активной зоны ядерного реактора оценивается нейтронно-физическими характеристиками, которые определяют поведение реактора при изменении состояния эксплуатируемого реактора во время штатных и аварийных режимов работы. По этим характеристикам можно оценить безопасность реактора, а также эффективность средств по обеспечению безопасности и регулированию энерговыделения в активной зоне реактора. С целью поднять уровень безопасности и оптимизировать эти характеристики в последнее десятилетие на реакторах РБМК-1500, эксплуатируемых на Игналинской АЭС, проводилась модернизация активной зоны: в нее внедрялись стержни регулирования новой конструкции, а также топливо повышенного обогащения с выгорающим поглотителем эрбий. Во время данного исследования с помощью п/п QUABOX / CUBBOX-HYCA проведены расчеты нейтронно-физических характеристик при изменении состава активной зоны реактора. На основании результатов данного исследования оценено влияние модернизации на величины нейтронно-физических характеристик реактора.

Ключевые слова: моделирование РБМК-1500, коэффициенты реактивности, эффекты реактивности, модернизация активной зоны ядерного реактора