

Branduolinio reaktoriaus valdymo ir apsaugos sistemos aušinimo kontūro nusausėjimo modeliavimas

Narimantas LISTOPADSKIS (KTU), Raimondas PABARČIUS (LEI),
Aurimas TONKŪNAS (LEI)

el. paštas: narlis@ktu.lt, raimis@mail.lei.lt, auris@mail.lei.lt

Įvadas

Šiame straipsnyje aprašyta programų pakete QUABOX/CUBBOX-HYCA įdiegta Ignalinos AE RBMK-1500 reaktoriaus valdymo ir apsaugos sistemos (RVAS) aušinimo kontūro nusausėjimo proceso modeliavimo logika. Minėto programų paketo pagalba modeliuojami įvairūs pereinamieji bei avariniai procesai, vykstantys RBMK-1500 reaktoriaus aktyviojoje zonoje. Atliekant reaktoriaus įrenginio saugios eksploatacijos įvertinimą visada būtina nagrinėti projektinę avariją – reaktoriaus valdymo ir apsaugos sistemos aušinimo kontūro nusausėjimą. Tuo tikslu buvo sukurtas ir į programų paketą QUABOX/CUBBOX-HYCA įdiegtas papildomas matematinis modulis. Straipsnyje pristatytas šio modulio aprašas, pateikiami patikrinamieji modeliavimo rezultatai bei jų sulyginimas su analogiškais skaičiavimo rezultatais, gautais naudojant programų paketą STEPAN/KOBRA, kuriuos atliko Rusijos mokslinio centro „Kurčiatovo institutas“ darbuotojai.

Programų paketas QUABOX/CUBBOX-HYCA

Pradžioje trimatis neutroninių-fizikinių procesų modeliavimo programų paketas QUABOX/CUBBOX-HYCA buvo sukurtas Vokietijos firmos GRS mbH darbuotojų ir pritaikytas modeliuoti pereinamuosius bei avarinius procesus, vykstančius vakarietišku PWR tipo reaktorių aktyviojoje zonoje. Tačiau pradedant 1995m. šis programų paketas buvo adaptuotas ir validuotas neutroninių-fizikinių RBMK-1500 reaktoriaus aktyviojoje zonoje vykstančių procesų skaičiavimams. Pagrindinės programų paketo QUABOX/CUBBOX neutroninės-fizikinės dalies ypatybės yra: skaičiavimo eigoje programa sprendžia dviejų greituųjų bei šešių vėluojančių neutronų grupių difuzijos lygtis, naudojant polinominės aproksimacijos metodus vienmatėje, dvimatėje bei trimatėje geometrijoje, taiko nodalinį aktyviosios zonos sudalijimą bei klasikinę neutronų charakteristikų homogenizacijos procedūrą elementariame reaktoriaus aktyviosios zonos tūryje. Pagrindinės programų paketo QUABOX/CUBBOX termohidraulinės dalies HYCA ypatybės yra: skaičiavimo eigoje naudojant skysčio tekėjimo ir fazių slydimo koreliacijas programa sprendžia masės, energijos ir impulso tvermės lygtis vienfaziam ir dvifaziam šilumnešio srautui; joje įdiegtas kuro rinklės modelis,

paralelinis kuro kanalų modelis, kas užtikrina informacinę duomenų ryšį tarp kurio rinklių, modeliujamų neutroninėje-fizikinėje programų paketo dalyje, bei atitinkamų kuro kanalų, modeliujamų termohidraulinėje jo dalyje.

2003–2004 metais programų paketas QUABOX/CUBBOX-HYCA buvo patobulintas jame įdiegiant pilnai sumodeliuotą RVAS logiką. Ši sistema skirta valdyti reaktorių ir užtikrinti jo saugią eksploataciją visuose reaktoriaus darbo režimuose, įskaitant ir avarinius. Savo funkciją valdymo ir apsaugos sistema atlieka valdymo strypų pagalba, kurie yra valdomi pagal RVAS logiką remiantis radialinių bei ašinių aktyviosios zonos viduje esančių detektorių bei šoninių jonizacinių kamerų signalais. Visi valdymo strypai suskirstyti į dvi dalis: pirmoji valdymo strypų dalis vykdo greito avarinio reaktoriaus stabdymo (AZ) funkciją, kita – greito reaktoriaus galios mažinimo (BSM) funkciją. Ankstesniame straipsnyje [1] aprašyta įdiegta į programų paketą QUABOX/CUBBOX-HYCA Ignalinos AE 2-jo bloko RBMK-1500 reaktoriaus RVAS logika buvo naudojama ir šiame darbe.

Reaktoriaus valdymo ir apsaugos sistemos aušinimo kontūro modelio aprašymas

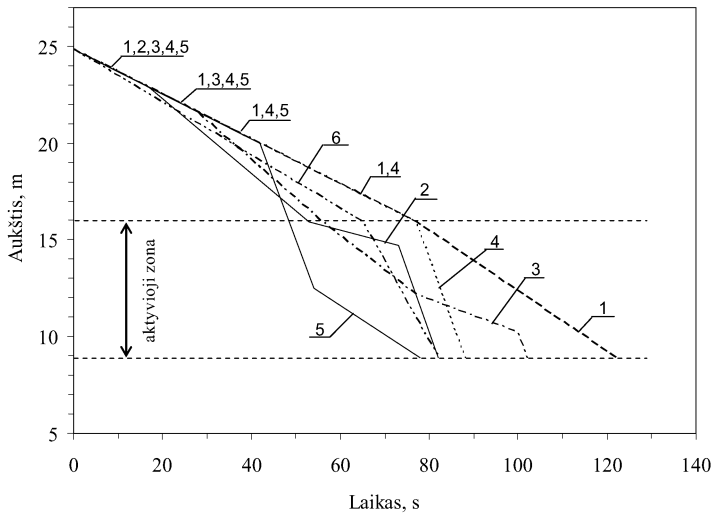
Ignalinos AE yra eksploatuojami du verdančio vandens daugiakanaliniai grafitiniai RBMK-1500 reaktoriai. Tai vieno aušinimo kontūro, susidedančio iš dviejų aušinimo kilpų, įrenginiai. Kuro rinklės talpinamos atskiruose kuro kanaluose, lėtiklio funkciją reaktoriuje atlieka grafito blokai. Ignalinos AE naudojamas žemo sodrinimo urano dioksido kuras, o kuro rinklių perkrovimas vykdomas reaktoriui dirbant normalios eksploatacijos režime. RBMK-1500 reaktoriai yra priskiriami verdančio tipo reaktoriams. Aušinantis vanduo, pratekėdamas per reaktoriaus aktyviąją zoną užverda ir dalinai išgaruoja. Garo-vandens mišinys patenka į būgnus-separatorius, kur atskirtas garas toliau paduodamas į garo turbinas. Atidirbęs garas kondensuojamas, jis patenka į deaeratorius ir maitinimo siurblių pagalba vėl paduodamas atgal į būgnus separatorius. Iš ten pagrindinių cirkuliacinių siurblių pagalba vėl keliauja į reaktoriaus aktyviąją zoną, kur, ją aušindamas, vėl užverda ir dalinai išgaruoja.

Kad reaktorių būtų saugiai eksploatuojamas, nepakanka jo vien tik efektyviai aušinti, būtina taip pat patikimai valdyti grandininę branduolių skylimo reakciją aktyviojoje zonoje. Šiam tikslui tarnauja reaktoriaus valdymo ir apsaugos sistema. 2004 metais Ignalinos AE 2-me bloke įdiegta antroji nepriklausoma stabdymo sistema. Jos aprašymas pateiktas [1].

RVAS aušinimo kontūro paskirtis – nuvesti šilumą nuo valdymo strypų, aksialinių detektorių, dalinimosi kamerų, reflektoriaus aušinimo kanalų, taip užtikrinant jų patikimą darbą. Šis kontūras yra fiziškai atskirtas nuo kitų reaktoriaus sistemų. Vanduo į RVAS kanalus paduodamas iš virš aktyviosios zonos viršuje esančio paskirstymo kolektoriaus. Esant gedimui šiame kontūre (pvz. vandens praradimas dėl giljotininio vamzdžio trūkio) RVAS sistema išduoda avarinius signalus pagal kuriuos, pirmiausia, lokalinė avarinė reguliavimo (LAR) sistema valdymo strypų manipuliavimu siekia kompensuoti perteklinio reaktyvumo pokytį, o jei tai nepavyksta, reaktorių yra priverstinai stabdomas. Avariniai signalai yra dviejų rūšių: technologiniai ir neutroniniai. Pirmieji generuojami jei vandens lygis ar slėgis viršutiniuose vandens talpose sumažėja iki kritinės ribos, antruosius inicijuoja aktyviojoje zonoje esantys neutroninio srauto kontrolės detektoriai. Kadangi QUABOX/CUBBOX-HYCA yra neutro-

ninis-dinaminis programų paketas, skirtas modeliuoti reaktoriaus aktyviojoje zonoje vykstančius reiškinius, tai šiame straipsnyje nagrinėjama tik pagal neutroninius detektorius veikianti RVAS logika bei naujai įdiegta avarinių signalų seka RVAS aušinimo kontūro nusausėjimo proceso metu. Šiuo metu tokio avarinio nusausėjimo proceso metu reaktoriaus reaktyvumas padidėja $\sim 2\beta$, kai AZ (pirmoji reaktoriaus avarinė stabdymo sistema) efektyvumas siekia $\sim 2,5\beta$. Tai dar kartą patvirtina šios avarinės situacijos pavojingumą pramoninio objekto saugai.

RVAS aušinimo kontūro nusausėjimo eiga priklauso nuo valdymo kanale esančio strypo tipo bei jo įleidimo į aktyviąją zoną gylio (1 pav.). Šiame paveiksle laiko momentu $t = 0$ s vandens lygis visuose RVAS kanaluose yra 25 metrai (valdymo kanalo aukščiausias taškas). Nusausėjimo pradžia aktyviojoje zonoje skirtinguose RVAS kanaluose skirtinga, vandens lygis juose kinta skirtingu greičiu. Tai įvyksta dėl skirtingų vandens kiekių padavimo vamzdžiuose bei kanale virš aktyviosios zonos. RVAS kanalus galima suskirstyti į keturis konstrukcinius tipus: kanalai su septynių metrų sugėrikliu ir išstūmikliu; kanalai su sutrumpintu sugėrikliu; kanalai su aksialiniais detektoriais; kanalai su greitaeigės apsaugos sistemos strypais (GASS). Pastarieji aušinami vandens plėvele, tekančia kanalo vidiniu sienelės paviršiumi (storis 1,5–2 mm). Kanalai su greitaeigės apsaugos strypais nutraukus aušinančio vandens padavimą pilnai susausėja per 2–3 s. Kitiems trims kanalų tipams nusausėjimo proceso eiga (žr. 1 pav.) priklauso nuo strypo padėties aktyviojoje zonoje. Kaip matome, greičiausiai nusausėja tie kanalai, kuriuose sutrumpinto sugėriklio strypai (SSS) pilnai įleisti į aktyviąją zoną (5 kreivė), lėčiausiai kanalai, kuriuose rankinio reguliavimo (RR) strypai pilnai ištraukti iš aktyviosios zonos (1 kreivė). Remiantis šia informacija bei ži-



1 pav. Vandens lygio kitimas RVAS kanaluose vykstant jų nusausėjimui [2]. Kanalai su pilnai įleistu RR strypu (1), su pilnai ištrauktu RR strypu (2), su aktyviosios zonos centre esančiu RR strypu (3), su pilnai įleistu SSS strypu (4), pilnai ištrauktu SSS strypu (5), su aksialiniu detektoriumi (6).

nant valdymo strypų padėtis nagrinėjamu momentu galima apskaičiuoti vandens lygį kiekviename RVAS kanale. Atliekant reaktoriaus įrenginio saugos įvertinimo studijas dažnai atliekami konservatyvūs įvertinimai, priimant pačias blogiausias avarines situacijas. Šiuo atveju tai būtų skaitiniai tyrimai, kai RVAS kanalai nusausėja vienodu maksimaliai galimu greičiu. Darbe nustatyta, kad didžiausias vandens lygio mažėjimo RVAS kanaluose greitis yra 0,2 m/s.

Visa ši aukščiau paminėta RVAS aušinimo kontūro nusausėjimo seka buvo aprašyta matematinėmis lygtimis, logika suprogramuota FORTRAN pagalba bei įdiegta programų pakete QUABOX/CUBBOX-HYCA. RBMK-1500 reaktoriaus aktyviosios zonos aukštis su viršutiniu bei apatiniu reflektoriumi yra 8 metrai, todėl skaitiniame modelyje vandens lygio kitimas RVAS kanaluose aprašytas $(0 \div 8)$ m aukščių intervale. Sumodeliuoto RVAS aušinimo kontūro nusausėjimo proceso pradžia prilyginta $t_0 = 49$ s pagal 1 pav., t.y. pirmasis pradeda nusausėti kanalas su pilnai ištrauktu SSS strypu. Vandens lygis RVAS kanaluose priklauso nuo kanale esančio strypo tipo n , strypo įleidimo į aktyviąją zoną gylio $Z(n, t)$ bei laiko t . Tai ir buvo išėities duomenys. Kadangi vandens lygio kitimas H_v RVAS kanaluose viso proceso metu ar skirtingose proceso atkarpose visada tiesinis, H_v kitimas buvo aprašytas taip:

$$H_v^i(n, t) = A \cdot t + B,$$

čia i – strypo vieta aktyviojoje zonoje (+ pilnai įleistas, – pilnai ištrauktas, c centre), n – strypo tipas (RR, SSS, GASS strypas ar aksialinis detektorius), t – laikas, A ir B parinkti aproksimacijos koeficientai. Žinant RR strypo padėtį modeliavimo metu, vandens lygis RVAS kanale apskaičiuojamas interpoliuojant H_v^-, H_v^+, H_v^c reikšmes:

$$H_v(n, t) = \frac{H_v^c(n, t) - H_v^-(n, t)}{Z^c(n) - Z^-(n)} \cdot (Z(n, t) - Z^-(n)) + H_v^-(n, t),$$

kai $Z(n, t) = [0 \div 4, 5]$ m,

$$H_v(n, t) = \frac{H_v^+(n, t) - H_v^c(n, t)}{Z^+(n) - Z^c(n)} \cdot (Z(n, t) - Z^c(n)) + H_v^c(n, t),$$

kai $Z(n, t) = [4, 5 \div 0]$ m,

čia $Z(n, t) - n$ tipo strypo įleidimo į aktyviąją zoną gylis. Vandens lygis RVAS kanale su SSS strypu apskaičiuojamas analogiškai, interpoliuojant ribines H_v^-, H_v^+ reikšmes. Tuo tarpu vandens lygio kitimas kanaluose su GASS strypais (bei aksialiniais detektoriais) aprašytas tiesine lygtimi neatsižvelgiant į strypo padėtį aktyviojoje zonoje (žr. 1 pav.).

Šis matematinis modelis įdiegtas, tikslu modeliuoti RVAS aušinimo kontūro nusausėjimą, kai vandens lygis kanaluose kinta skirtingu greičiu. Patobulintoje QUABOX/CUBBOX-HYCA versijoje taip pat numatyta galimybė atlikti skaitinius tyrimus su pastoviu 0,2 m/s nusausėjimo greičiu visuose RVAS kanaluose. Šiuo atveju vandens lygio kitimas $f(t)$ aprašytas tiesine lygtimi ir šis dėsnis galioja visiems RVAS kanalams be išimties.

Kitame skyrelyje pateikti modeliavimo rezultatai naudojant patobulintą QUABOX/CUBBOX-HYCA programų paketą su įdiegta RVAS aušinimo kontūro logika.

Testinių skaičiavimų rezultatai

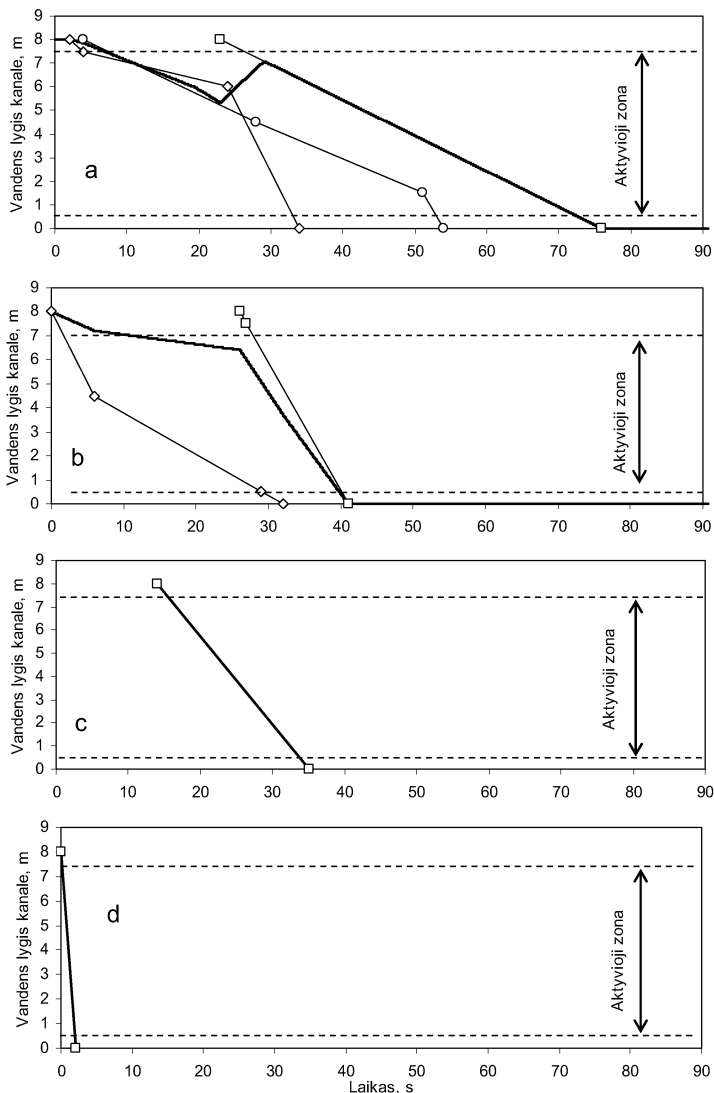
Siekiant patikrinti įdiegtą programų pakete QUABOX/CUBBOX-HYCA RVAS aušinimo kontūro nusausėjimo logiką buvo atlikti testiniai skaičiavimai. Tam panaudota reali Ignalinos AE 2-jo bloko reaktoriaus duomenų bazė. Kadangi bandymai nusausinat RVAS aušinimo kontūrą reaktorių eksploatuojant darbo režimu neatliekami (tai saugai pavojingi veiksmai) ir natūrinių matavimo duomenų nėra, tai šiuo atveju buvo palyginti skaitinio modeliavimo metu gauti rezultatai. Modeliavimo metu priimta, kad reaktoriaus valdymo ir apsaugos sistema bei visos jai priklausančios posistemės dirba kaip įprasta, be apribojimų. Taigi, jei RVAS logika inicijuoja atitinkamo stypo judėjimą, tai vandens lygis šiame kanale RVAS aušinimo kontūro nusausėjimo modeliavimo metu kinta atsižvelgiant į stypo įleidimo į aktyviają zoną gylį.

Siekiant įsitikinti įdiegtos nusausėjimo logikos korektiškumu, pirmiausia buvo palyginti vandens lygio pokyčiai kanaluose su skirtingos konstrukcijos valdymo strypais. Tam parinkti RVAS kanalai su RR, SSS, GASS strypais bei kanalas, kuriame patalpintas aksialinis detektorius. Palyginimo rezultatai, kai vandens lygis kanaluose kinta su skirtingu greičiu pateikti 2 pav.

Kaip matome, apskaičiuota vandens lygio kitimo kreivė kanale su RR strypu (2a pav.) patenka tarp ribinių referentinių [2] kreivių, nusakančių vandens lygį kanale, kai strypas yra pilnai ištrauktas, įleistas ir yra aktyviosios zonos centre. RR strypo įleidimo į aktyviają zoną gylis laiko momentu $t = 0$ s – 1,8 m. Vandens lygio kreivė kanale su SSS strypu (2b pav.) taip pat patenka tarp ribinių referentinių [2] kreivių. Šio strypo įleidimo į aktyviają zoną gylis pradiniu laiko momentu – 1,3 m. Kadangi vandens lygio kitimas kanale su GASS strypu bei kanale su aksialiniu detektoriumi aprašomas tiesine kitimo lygtimi ir nepriklauso nuo strypo padėties aktyviojoje zonoje (detektorius darbo metu nejudinamas), modeliavimo rezultatas sutapo su referentinėmis [2] vandens lygio kitimo kreivėmis (2c ir 2d pav.).

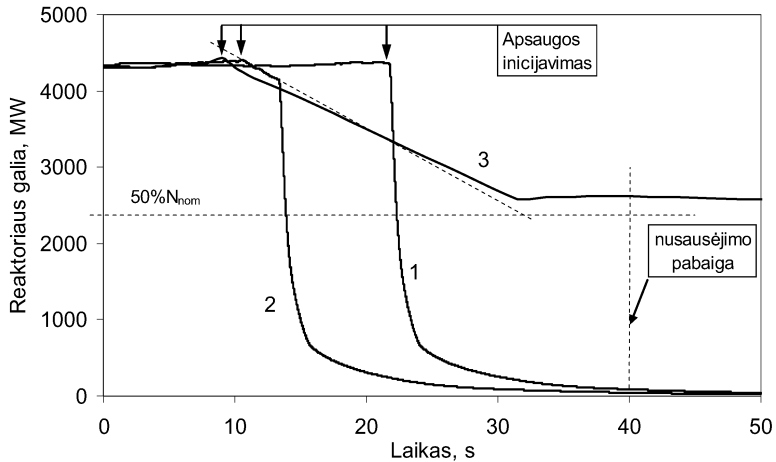
Modeliuojamo pereinamojo proceso metu su pastoviu (0,2 m/s) vandens lygio kitimu, vandens lygis visuose RVAS kanaluose kinta vienodai ir tiesiškai. Visi kanalai pilnai nusausėja vienu metu po 40s (reaktoriaus aktyviosios zonos su reflektoriumi aukštis 8m).

3 pav. pateikti QUABOX/CUBBOX-HYCA skaitinio tyrimo rezultatai (reaktoriaus galios kitimas) gauti RVAS aušinimo kontūro nusausėjimo proceso modeliavimo metu, priimant skirtingą (1 kreivė) ir vienodą (2 kreivė) vandens lygio kanaluose kitimo pobūdį. RVAS logika veikė be apribojimų. Kaip matome abiem atvejais reaktoriaus galia kinta panašiai, skiriasi tik reaktoriaus apsaugų inicijavimo laikas. Esant skirtingam nusausėjimo kanaluose pobūdžiui, AZ komanda avariniam reaktoriaus stabdymui inicijuojama 22 sekunde, tuo tarpu kai nusausėjimas vyksta vienodu greičiu 11 sekundę BSM (antroji, greito galios mažinimo) sistema išduoda signalą greitam reaktoriaus galios iki 50% N_{nom} mažinimui [1]. Vis tik reaktoriaus valdymo sistema nesugeba kompensuoti padidėjusio perteklinio reaktyvumo ir po 2 s prasideda avarinis reaktoriaus stabdymas (AZ komanda). Taigi, šis modeliavimo režimų palyginimas patvirtino, kad RVAS aušinimo kontūro nusausėjimo procesas su pastoviu 0,2 m/s greičiu yra konservatyvesnis saugos analizės metu, tačiau abiem atvejais reaktorius yra saugiai stabdomas.



2 pav. Vandens lygio kitimas RVAS aušinimo kontūro nusausėjimo metu: a) kanalas su RR strypu; b) kanalas su SSS strypu; c) kanalas su GASS strypu; d) kanalas su aksialiniu detektoriumi; [2] duomenys, kai strypas pilnai įleistas (□), ištrauktas (◇) ir yra aktyviosios zonos centre (○); — QUABOX/CUBBOX-HYCA modeliavimo rezultatas.

3 pav. taip pat pateikti analogiški (naudota ta pati Ignalinos 2-jo bloko informacinė duomenų bazė) skaičiavimo rezultatai, gauti atliekant RVAS aušinimo kontūro nusausėjimo modeliavimą su programų paketu STEPAN/KOBRA [3] bei priimant



3 pav. Reaktorius galios kitimas RVAS aušinimo kontūro nusausėjimo proceso metu, RVAS veikiant be apribojimų: QUABOX/CUBBOX-HYCA skaičiavimo rezultatai su skirtingu (1) ir pastoviu (2) vandens lygio kitimo greičiu; STEPAN/KOBRA [3] skaičiavimo rezultatai su pastoviu vandens lygio kitimo greičiu visuose kanaluose (3).

vienodą vandens lygio kitimo RVAS kanaluose greitį 0,2 m/s (3 kreivė). Ir šiuo atveju RVAS logika veikė be apribojimų. Lyginant su QUABOX/CUBBOX-HYCA (2 kreivė) ir STEPAN/KOBRA (3 kreivė) programų paketais apskaičiuotas reaktorius galios kitimo kreives matome, kad BSM komanda inicijuojama beveik tuo pačiu metu. Prasidėjęs ir iki 13-sios sekundės besitęsiantis reaktorius galios mažinimas 2% N_{nom} per sekundę greičiu [1] leidžia teigti, kad abiem atvejais RVAS aušinimo kontūro nusausėjimo modeliavimas vyksta taip pat. Kaip buvo minėta anksčiau, QUABOX/CUBBOX-HYCA atveju reaktorius valdymo sistema nesugeba kompensuoti padidėjusio perteklinio reaktyvumo, todėl 13-ją sekundę prasideda avarinis reaktorius stabdymas. To priežastis – atsiradęs papildomas detektorius signalas, kuris ir inicijuoja AZ komandą. Tuo tarpu STEPAN/KOBRA modeliavimo metu RVAS negeneruoja papildomų avarinių signalų ir reaktorius galia mažinama iki 50% N_{nom} . 3 paveiksle punktyrine linija pratęsta programų paketu QUABOX/CUBBOX-HYCA sumodeliuoto 50% N_{nom} BSM režimo atkarpa atitinka analogiškam reaktorius galios kitimui, apskaičiuotam su STEPAN/KOBRA. Galime teigti, kad RVAS aušinimo kontūro nusausėjimo modeliavimo su programų paketu QUABOX/CUBBOX-HYCA metu generuojamas papildomas avarinis signalas (jautresnis, konservatyvesnis skaičiavimas), kuris ir išskiria šias lyginamas kreives. Tai, matyt, susiję su skirtingai suprogramuota bei įdiegta nusausėjimo logika ir/ar su minėtų programų paketų specifika, modeliuojant neutroninius-fizikinius reiškinius reaktorius aktyviojoje zonoje. Vis tik, jei analizės metu nepriimama papildomai generuojamo avarinio signalo dėmesin, reaktorius galios kitimas apskaičiuotas su šiais skirtingais programų paketais yra toks pat.

Išvados

Straipsnyje aprašyta programų pakete QUABOX/CUBBOX-HYCA įdiegta Ignalinos AE RBMK-1500 RVAS aušinimo kontūro nusausėjimo proceso modeliavimo logika. Tai įgalino modeliuoti projektinius avarinius pereinamuosius procesus, kurių analizė būtina atliekant Ignalinos AE 2-jo bloko reaktoriaus saugos įvertinimą bei pagrindimą. Sumodeliuota RVAS aušinimo kanalo nusausėjimo logika buvo patikrinta, panaudojant publikuotus duomenis bei sulyginant QUABOX/CUBBOX-HYCA skaičiavimų rezultatus su analogiškais modeliavimo rezultatais, gautais naudojant programų paketą STEPAN/KOBRA. Šis palyginimas patvirtino įdiegto modelio korektiškumą bei leido padaryti išvadą, kad ši QUABOX/CUBBOX-HYCA versija gali būti naudojama Ignalinos AE 2-jo bloko saugos įvertinimo skaičiavimams atlikti. Testiniai skaičiavimai parodė, kad modeliavimo rezultatai gauti su įdiegta programų pakete QUABOX/CUBBOX-HYCA RVAS aušinimo nusausėjimo logika yra konservatyvesni (lyginant su STEPAN/KOBRA), tačiau tai nėra trūkumas atliekant branduolinio reaktoriaus saugos eksploatacijos įvertinimą.

Literatūra

1. E. Bubelis, N. Listopadskis, R. Pabarčius, Branduolinio reaktoriaus valdymo ir apsaugos sistemos modeliavimas, *Liet. Matem. Rink.*, **44**(spec. nr.), 696–702 (2004).
2. *Ignalina NPP Safety Analysis Report*, Volume 3, Task Group 5, VATTENFALL (1996).
3. *Interim Safety Justification for INPP DSS*, Section 3, Accident Analysis, Version 3C, Volume 3, Data Systems & Solutions report No. XE405-TEC040-1, January 2003.

SUMMARY

N. Listopadskis, R. Pabarčius, A. Tonkūnas. Modelling of reactor CPS cooling circuit voiding

Modelling of Ignalina NPP RBMK-1500 reactor control and protection system cooling circuit (CPSCC) voiding logic, which was implemented in code QUABOX/CUBBOX-HYCA, is described. Analysis of numerical simulation results shows, that this logic is correct, the results are comparable to analogous modelling data obtained by Russian code STEPAN/KOBRA. The improved QUABOX/CUBBOX-HYCA code version allows to simulate the CPSCC voiding for RBMK-1500 reactor operation at any power level. Together with implemented and validated full CPS operation logic it could be used for simulation of various transitional processes, which can occur in nuclear reactors of Ignalina NPP, or during analyses when the safety substantiation of reactor unit operation is performed.

Keywords: QUABOX/CUBBOX-HYCA, RBMK-1500, cooling circuit voiding, modelling of reactor.