

Branduolinio reaktoriaus valdymo ir apsaugos sistemos modeliavimas

Evaldas BUBELIS (LEI), Narimantas LISTOPADSKIS (KTU),
Raimondas PABARČIUS (LEI)

el. paštas: evaldas@isag.lei.lt, narlis@ktu.lt, raimis@isag.lei.lt

Įvadas

Šio straipsnio tikslas – pristatyti Ignalinos AE RBMK-1500 reaktoriaus valdymo ir apsaugos sistemos logikos modeliavimą programų pakete QUABOX/CUBBOX-HYCA. Šio programų paketo pagalba modeliuojami įvairūs pereinamieji bei avariniai procesai, vykstantys branduolinės jėgainės reaktoriaus aktyviojoje zonoje, todėl atliekant saugos įvertinimą svarbu turėti pilnai sumodeliuotą ir tiksliai atkartojančią realią reaktoriaus valdymo ir apsaugos sistemos veikimą logiką. Straipsnyje supažindinama su QUABOX/CUBBOX-HYCA programų paketu, RBMK-1500 reaktoriaus valdymo ir apsaugos sistema bei jos veikimo algoritmu, aprašytos matematinio modeliavimo ypatybės, pateikti dviejų avarinių situacijų modeliavimo rezultatai bei jų sulyginimas su kitų autorių analogiškais skaičiavimo rezultatais.

Programų paketas QUABOX/CUBBOX-HYCA

Trimatis neutroninių-fizikinių procesų modeliavimo programų paketas QUABOX/CUBBOX-HYCA originaliai buvo sukurtas Vokietijos firmos GRS mbH darbuotojų ir pritaikytas modeliuoti pereinamuosius bei avarinius procesus, vykstančius vakarietišku LWR tipo reaktorių aktyviojoje zonoje [1, 2, 3]. Tačiau pradedant nuo 1995 m. šis programų paketas buvo adaptuojamas ir validuojamas, vykdant neutroninius-fizikinius RBMK-1500 reaktoriaus aktyviosios zonos ir joje vykstančių procesų skaičiavimus. Pagrindinės programų paketo QUABOX/CUBBOX-HYCA neutroninės-fizikinės dalies ypatybės yra: minėtas programų paketas skaičiavimo eigoje sprendžia dviejų greitųjų bei šešių vėluojančių neutronų grupių difuzijos lygtis, naudodamas polinominės aproksimacijos metodus vienmatėje, dvimatėje bei trimatėje geometrijoje, taiko nodalinę aktyviosios zonos sudalijimą bei klasikinę neutronų charakteristikų homogenizacijos procedūrą elementariame reaktoriaus aktyviosios zonos tūryje. Pagrindinės programų paketo QUABOX/CUBBOX-HYCA termohidraulinės dalies (HYCA) ypatybės yra: minėtas programų paketas skaičiavimo eigoje sprendžia masės, energijos ir impulso tvermės lygtis vienfaziam ir dvifaziam šilumnešio srautui, naudodamasis skysčio tekėjimo ir fazių slydimo koreliacijomis; savyje turi kuro rinklės modelį, paralelinį kuro kanalų modelį, bei užtikrina ryšį tarp kurio rinklių, modeliuojamų neutroninėje-fizikinėje programų paketo dalyje, bei atitinkamų kuro

kanalų, modeliuojamų termohidraulinėje jo dalyje. Įvadiniai duomenys programų paketui QUABOX/CUBBOX-HYCA pateikiami keturiuose failuose: pagrindiniame faile, RBMK interfeiso faile, duomenų bazėje bei medžiagų makroskopinių skerspjūvių bibliotekoje. Pagrindinis failas susideda iš dviejų dalių: neutroninės-fizikinės ir termohidraulinės. Pirmojoje dalyje aprašoma reaktoriaus aktyviosios zonos geometrija, aktyviosios zonos neutroniniai-fizikiniai parametrai, reikalingi sprendžiant neutronų pernešimo bei difuzijos lygtis, įvairių efektų atbulinio ryšio bei reaktoriaus valdymo ir apsaugos sistemos parametrai. Antrojoje dalyje aprašomi paralelinių kuro kanalų parametrai bei jų medžiagų fizikinės charakteristikos. RBMK interfeiso faile aprašoma duomenų bazės nuskaitymo procedūra, kuro kanalų bei reaktoriaus valdymo ir apsaugos sistemos (RVAS) valdymo strypų geometrija, naudojamos medžiagos, RVAS logikos valdymas, bei kiti RBMK reaktoriaus specifiniai parametrai. Duomenų bazėje pateikiama informacija iš Ignalinos AE informacinės skaičiavimo sistemos apie reaktoriaus aktyviosios zonos užkrovimą, kuro rinklių išdegimą, šilumnešio srautus kuro kanaluose, įvairių aktyviosios zonos komponentų išsidėstymą (koordinatės), RVAS valdymo strypų įleidimo gylius ir t.t. Medžiagų makroskopinių skerspjūvių bibliotekoje pateikiama informacija apie visų reaktoriaus aktyviojoje zonoje naudojamų medžiagų makroskopinius skerspjūvius. Visi šie keturi failai yra naudojami atliekant statinius bei dinامينius RBMK-1500 reaktoriaus aktyviosios zonos neutroninius-fizikinius skaičiavimus programų paketu QUABOX/CUBBOX-HYCA.

Reaktoriaus valdymo ir apsaugos sistema bei jos veikimo logika

Ignalinos AE yra eksploatuojami du verdančio vandens daugiakanaliniai grafitiniai RBMK-1500 reaktoriai [4, 5]. Tai yra trečios kartos RBMK tipo reaktoriai. Iš viso buvusioje Tarybų Sąjungos teritorijoje buvo pastatyti tik du tokie reaktoriai, kurie daugeliu savo savybių yra panašūs į kitus šio tipo reaktorius. Tai vieno aušinimo kontūro, susidedančio iš dviejų aušinimo kilpų, reaktoriai. Kuro rinklės talpinamos atskiruose kuro kanaluose. Lėtiklio funkciją reaktoriuje atlieka grafito blokai. Reaktoriuje naudojamas žemo sodrinimo urano dioksido kuras, o kuro rinklių perkrovimas vykdomas reaktoriui dirbant normalios eksploatacijos režime. RBMK-1500 reaktoriai yra priskiriami vertančio tipo reaktoriams. Aušinantis vanduo, pratekėdamas per reaktoriaus aktyviają zoną užverda ir dalinai išgaruoja. Garo-vandens mišinys patenka į būgnus-separatorius, kur atseparuotas garas toliau paduodamas į garo turbinas. Atidurbęs garas kondensuojamas, patenka į deaeratorius ir maitinimo siurblių pagalba vėl paduodamas atgal į būgnus separatorius. Iš ten pagrindinių cirkuliacinių siurblių pagalba vėl keliauja į reaktoriaus aktyviają zoną, kur, ją aušindamas, vėl užverda ir dalinai išgaruoja.

Kad reaktorius būtų saugiai eksploatuojamas, nepakanka jo tik efektyviai aušinti, bet reikia ir valdyti grandininę branduolių skylimo reakciją aktyviojoje zonoje. Šiam tikslui tarnauja reaktoriaus valdymo ir apsaugos sistema (RVAS). Ji skirta valdyti reaktorių ir užtikrinti jo saugią eksploataciją visuose reaktoriaus darbo režimuose, įskaitant ir avarinius. Tai saugos sistema, ypač svarbi eksploatuojant RBMK-1500 reaktorių. Atlikdama savo užduotį, RVAS naudojasi valdymo strypais, kurie yra valdomi RVAS logikos pagal signalus ateinančius ir radialinių bei ašinių aktyviosios zonos viduje esančių detektorių bei šoninių jonizacinių kamerų. Šiuo metu Ignalinos AE

yra diegiama antroji stabdymo sistema, kuri buvo sukurta jau egzistavusios RVAS pagrindu, padalijant visus valdymo strypus į dvi dalis. Viena dalis valdymo strypų vykdyt greito avarinio reaktoriaus stabdymo (AZ) funkciją, kita dalis – normalaus reaktoriaus stabdymo (BSM) funkciją. RVAS logikoje abi valdymo strypų dalys yra valdomos pagal dviejų radialinių detektorių grupių, vienos ašinių detektorių grupės bei keturių šoninių jonizacinių kamerų grupių generuojamus signalus. AZ funkcijos vykdyme dalyvauja 24 greito reagavimo valdymo strypai bei 49 rankinio reguliavimo valdymo strypai, kurie kartu priklauso ir BSM funkcijai. BSM funkcijos vykdyme dalyvauja visi RVAS valdymo strypai išskyrus 24 greito reagavimo valdymo strypus. Iš viso RVAS disponuoja 211 valdymo strypais, iš kurių 24 – greito reagavimo valdymo strypai, 40 – sutrumpinto sugėriklio valdymo strypai, 147 – rankinio reguliavimo strypai.

RVAS apima visą reaktoriaus darbo diapazoną, t.y. reaktoriaus galios kitimą nuo (0,3–100)% nominalaus galingumo. Diapazone nuo 10 iki 100% nominalaus galingumo, RVAS remiasi radialinių bei ašinių detektorių generuojamais signalais. Radialiniai detektoriai pagal maitinimą skirstomi į šešias grupes. Ašiniai detektoriai reaktoriaus aktyviojoje zonoje išdėstyti 20 kanalų ir kiekviename kanale yra po 8 daviklius. Diapazone nuo 0,3 iki 10% nominalaus galingumo, RVAS remiasi keturių grupių šoninių jonizacinių kamerų, patalpintų biologinės apsaugos vandens rezervuare, generuojamais signalais.

Diapazone nuo 10 iki 100% nominalaus galingumo, RVAS veikia šios apsaugos: lokalinis avarinis reguliavimas (LAR), lokalinė avarinė apsauga (LAZ), avarinė apsauga pagal galingumo padidėjimą (AZM) bei avarinė apsauga pagal reaktoriaus periodo sumažėjimą (AZSR). Visa RVAS kontroliuojama reaktoriaus aktyvioji zona yra suskirstyta į 12 LAR-LAZ zonų. Kiekvienoje LAR-LAZ zonoje yra 6 radialiniai LAR detektoriai ir 12–15 radialinių LAZ detektorių. Minėti 6 LAR detektoriai kiekvienoje LAR-LAZ zonoje generuoja signalus, pagal kuriuos yra valdomas vienas LAR valdymo strypas, reguliuojantis reaktoriaus galingumą lokalinėje LAR-LAZ zonoje, bei 2 LAZ strypai, kurių įleidimo greitis yra dvigubai didesnis negu LAR strypo. Aukščiau minėti 12–15 LAZ detektorių kiekvienoje LAR-LAZ zonoje generuoja signalus, kuriais remiantis RVAS vykdo reaktoriaus apsaugos funkciją – neutronų srautui LAR-LAZ zonoje padidėjus 10% ir tą neutronų srauto padidėjimą užfiksavus dviems LAZ detektoriams, esantiems vienoje LAR-LAZ zonoje ir priklausantiems skirtingoms maitinimo grupėms, generuojamas AZ-6 signalas toje zonoje. Taip pat dirba ir ašiniai detektoriai esantys 20 RVAS kanalų, kurie irgi vykdo tik apsaugos funkciją. AZ-6 signalas šiuo atveju yra generuojamas dviejų ašinių detektorių kanalų, priklausančių vienai LAR-LAZ zonai. Jei reaktoriaus galingumas yra didesnis nei 50% nominalaus galingumo, AZ-6 signalas paverčiamas AZ-3 signalu ir reaktoriaus galingumas yra mažinamas 2% nuo nominalaus galingumo per sekundę greičiu iki reaktoriaus galia pasieks 50% nominalaus galingumo. Jei reaktoriaus galingumas yra mažesnis nei 50% nominalaus galingumo, remiantis sugeneruotu AZ-6 signalu reaktoriaus galingumas yra mažinamas 1% nuo nominalaus galingumo per sekundę greičiu iki tol, kol AZ-6 signalas toje LAR-LAZ zonoje dings. Avarinė apsauga pagal galingumo padidėjimą (AZM) remiasi keturių grupių šoninių jonizacinių kamerų, patalpintų biologinės apsaugos vandens rezervuare, generuojamais signalais. BSM signalas generuojamas tuo atveju, jei reaktoriaus galia padidėja 240MW ir tą galingumo padidėjimą fiksuoja dvi

šoninės jonizacinės kameros (iš keturių) (priklausančios antrajam daviklių komplektui). AZ signalas generuojamas tuo atveju, jei reaktoriaus galia padidėja 480MW ir tą galingumo padidėjimą fiksuoja šoninės jonizacinės kameros, priklausančios dviems iš trijų šoninių jonizacinių kamerų grupėms (priklausančioms pirmajam daviklių komplektui). Avarinė apsauga pagal reaktoriaus periodo sumažėjimą (AZSR) remiasi taip pat tų pačių keturių grupių šoninių jonizacinių kamerų generuojamais signalais. BSM signalas generuojamas tuo atveju, jei reaktoriaus periodas sumažėja mažiau kaip 40 s ir tą periodo sumažėjimą fiksuoja dvi šoninės jonizacinės kameros (iš keturių) (priklausančios antrajam daviklių komplektui). AZ signalas generuojamas tuo atveju, jei reaktoriaus periodas sumažėja mažiau kaip 20 s ir tą periodo sumažėjimą fiksuoja šoninės jonizacinės kameros, priklausančios dviems iš trijų šoninių jonizacinių kamerų grupėms (priklausančioms pirmajam daviklių komplektui).

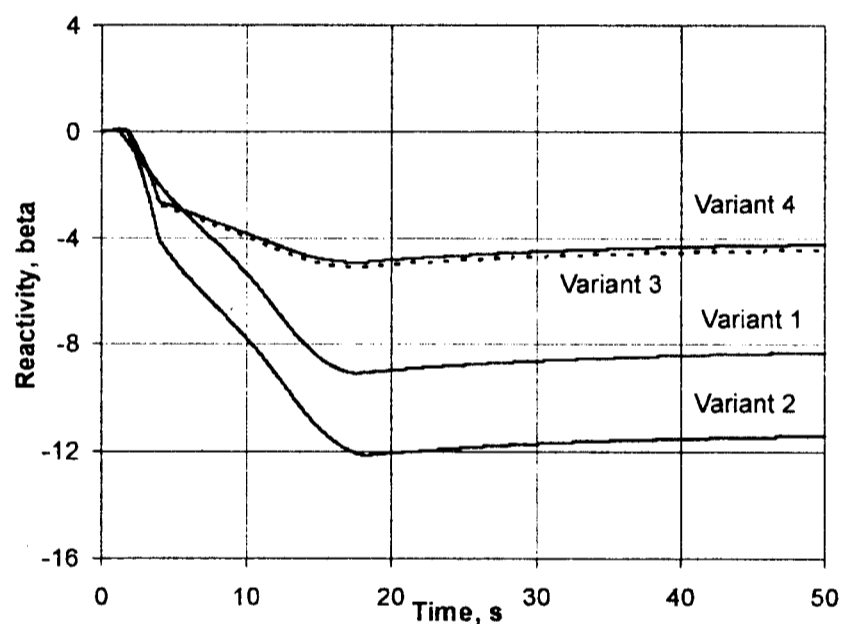
Diapazone nuo 0,3 iki 10% nominalaus galingumo, RVAS veikia šios apsaugos: pirmoji (AR-1) bei antroji (AR-2) avarinio reguliavimo sistemos, avarinė apsauga pagal galingumo padidėjimą (AZM) bei avarinė apsauga pagal reaktoriaus periodo sumažėjimą (AZSP – diapazone nuo 0,3 iki 5% nominalaus galingumo, bei AZSR – diapazone nuo 5 iki 10% nominalaus galingumo). Kiekvienai avarinio reguliavimo (AR) sistemai priklauso po keturis RVAS valdymo strypus, kurie yra valdomi keturių šoninių jonizacinių kamerų generuojamų signalų. Minėti AR strypai gali judėti kiekvienas atskirai (kiekvienas valdomas savos šoninės jonizacinės kameros) arba visi kartu (valdomi pagal bendrą keturių šoninių jonizacinių kamerų generuojamą signalą). Abiem atvejais AR strypai pradeda judėti kai neutronų srautas fiksuojamas šoninių jonizacinių kamerų pakinta vienu procentu. Jei AR strypams nepavyksta sumažinti vis didėjančio neutronų srauto, tai tada kiekvienam AR strypui šią užduotį įvykdyti padeda 2 LAZ strypai, kurių įleidimo greitis yra dvigubai didesnis negu AR strypų. Avarinė apsauga pagal galingumo padidėjimą (AZM) remiasi keturių grupių šoninių jonizacinių kamerų, patalpintų biologinės apsaugos vandens rezervuare, generuojamais signalais. BSM signalas generuojamas tuo atveju, jei reaktoriaus galia padidėja 48MW ir tą galingumo padidėjimą fiksuoja dvi šoninės jonizacinės kameros (iš keturių), priklausančios antrajam daviklių komplektui. AZ signalas generuojamas tuo atveju, jei reaktoriaus galia padidėja 96MW ir tą galingumo padidėjimą fiksuoja šoninės jonizacinės kameros, priklausančios dviems iš trijų šoninių jonizacinių kamerų grupėms, priklausančioms pirmajam daviklių komplektui. Avarinė apsauga pagal reaktoriaus periodo sumažėjimą (AZSP) remiasi taip pat tų pačių keturių grupių šoninių jonizacinių kamerų generuojamais signalais. BSM signalas generuojamas tuo atveju, jei reaktoriaus periodas sumažėja mažiau kaip 40 s ir tą periodo sumažėjimą fiksuoja dvi šoninės jonizacinės kameros (iš keturių), priklausančios antrajam daviklių komplektui. AZ signalas generuojamas tuo atveju, jei reaktoriaus periodas sumažėja mažiau kaip 20 s ir tą periodo sumažėjimą fiksuoja šoninės jonizacinės kameros, priklausančios dviems iš trijų šoninių jonizacinių kamerų grupėms, priklausančioms pirmajam daviklių komplektui.

Aukščiau aprašyta RVAS logika buvo sumodeliuota FORTRAN paprogramėse ir prijungta prie QUABOX/CUBBOX-HYCA programų paketo, kas įgalino modeliuoti prognozuojamus pereinamuosius procesus galinčius įvykti Ignalinos AE 2-jo bloko reaktoriuje ir patikrinti RVAS logikos veikimą, jau įdiegus antrąją stabdymo sistemą. Žemiau pateiksime keletą iliustracinių tokių skaičiavimų pavyzdžių naudojant

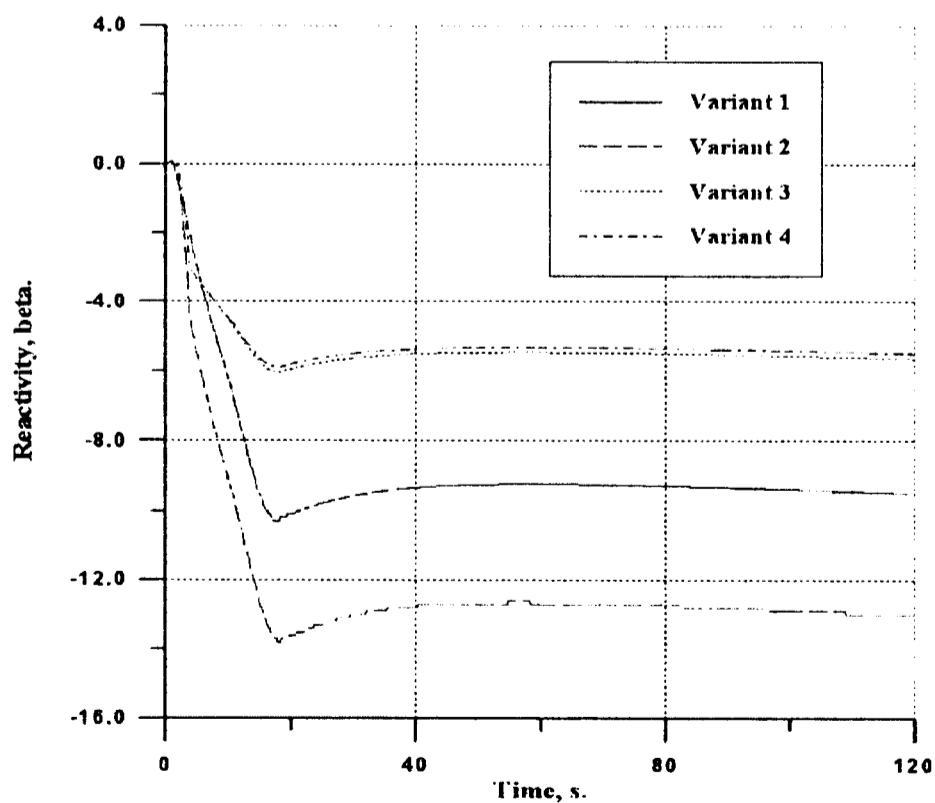
QUABOX/CUBBOX-HYCA programų paketą bei gautų skaičiavimo rezultatų sulyginimą su analogiškais skaičiavimo rezultatais, gautais naudojantis programų paketu STEPAN/KOBRA Rusijos moksliniame centre „Kurčiatovo institutas“.

RVAS logikos patikra

Kad įsitikinti QUABOX/CUBBOX-HYCA programų pakete sumodeliuotos RVAS logikos teisingumu, buvo atlikta pakankamai daug pereinamųjų, tame tarpe ir avarinių, procesų skaičiavimų. Čia pateikiami skaičiavimai dviejų hipotetinių pereinamųjų procesų: netrukdomo ir pilno 12 LAR strypų ištraukimo bei pilno 40 sutrumpinto sugėriklio valdymo strypų iškritimo iš reaktoriaus aktyviosios zonos. Šių įvykių tikimybė yra labai maža, tačiau norint pagrįsti reaktoriaus eksploatacijos saugą, įdiegus antrąją stabdymo sistemą, buvo nagrinėjami netgi tokie atvejai, galintys turėti rimtos įtakos reaktoriaus saugai. 12 LAR strypų kaip paprastai vykdo neutronų srauto pokyčių reguliavimą lokalinėse LAR-LAZ zonose reaktoriaus aktyviojoje zonoje. Šių strypų pilnas ir netrukdomas ištraukimas iš aktyviosios zonos atima galimybę reguliuoti neutronų srauto pokyčius lokalinėse LAR-LAZ zonose. Reaktoriaus reaktyvumo kitimas 12 LAR strypų ištraukimo iš aktyviosios zonos proceso metu pavaizduotas 1 pav. Jame



a)

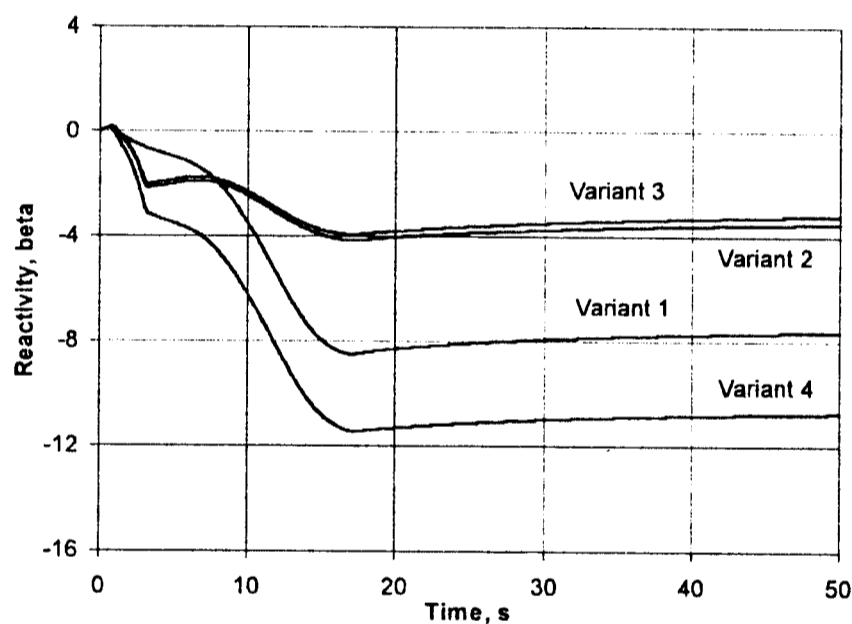


b)

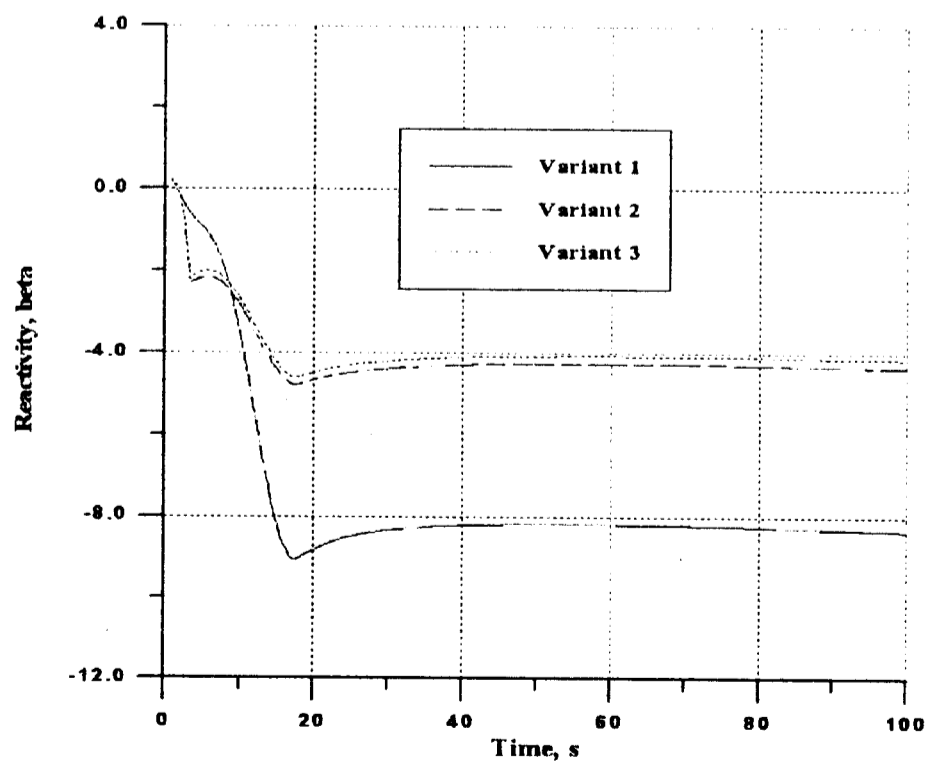
1 pav. Reaktoriaus reaktyvumo kitimas 12 LAR strypų ištraukimo iš aktyviosios zonos proceso metu (a) QUABOX/CUBBOX-HYCA; b) STEPAN/KOBRA).

pavaizduota minėto pereinamojo proceso eiga kai: 1) reaktorius stabdomas pagal 2-jo daviklių komplekto sugeneruotą BSM signalą, 2) reaktorius stabdomas pagal 1-jo ir 2-jo daviklių komplektų sugeneruotus AZ ir BSM signalus, 3) reaktorius stabdomas pagal 1-jo daviklių komplekto sugeneruotą AZ signalą, 4) reaktorius stabdomas pagal 1-jo daviklių komplekto sugeneruotą AZ signalą, kai reaktoriaus stabdymo procese atsako pats efektyviausias valdymo strypas.

Kitas modeliuotas pereinamasis procesas – tai pilnas 40 sutrumpinto sugėriklio valdymo strypų iškritimas iš reaktoriaus aktyviosios zonos. Šie 40 strypų priklauso BSM sistemai, todėl BSM sistemos efektyvumas reaktoriaus stabdymo metu bus mažesnis. Nutrūkus elektros energijos tiekimui, sutrumpinto sugėriklio valdymo strypai lieka savo pozicijose, o visi kiti RVAS valdymo strypai, veikiami žemės traukos, sukrenta į reaktoriaus aktyviają zoną. Sutrumpinto sugėriklio valdymo strypai iš reaktoriaus aktyviosios zonos gali iškristi tik tuo atveju, jei atsakys šių 40 strypų fiksavimo mechanizmai, praradus elektros energijos tiekimą. Tada minėti strypai, veikiami žemės traukos taip pat leisis žemyn ir jų sugėriklis bus išvestas iš aktyviosios zonos. Reaktoriaus reaktyvumo kitimas 40 sutrumpinto sugėriklio valdymo strypų iškritimo iš aktyviosios zonos proceso metu pavaizduotas 2 pav. Jame pavaizduota minėto perei-



a)



b)

2 pav. Reaktoriaus reaktyvumo kitimas 40 sutrumpinto sugėriklio valdymo strypų iškritimo iš aktyviosios zonos proceso metu (a) QUABOX/CUBBOX; b) STEPAN/KOBRA).

namojo proceso eiga kai: 1) reaktorius stabdomas tik pagal BSM signalą, 2) reaktorius stabdomas tik pagal AZ signalą, 3) reaktorius stabdomas tik pagal AZ signalą, kai reaktoriaus stabdymo procese atsako pats efektyviausias valdymo strypas, 4) reaktorius stabdomas pagal sugeneruotus AZ ir BSM signalus.

Abiem nagrinėtais atvejais reaktorius yra saugiai sustabdomas netgi AZ ir BSM sistemoms dirbant atskirai. Saugos kriterijai, taikomi tokiems procesams, nėra viršijami. Skaičiavimo rezultatų sulyginimas rodo, kad RVAS logika, sumodeliuota programų pakete QUABOX/CUBBOX-HYCA, jau įdiegus antrąją stabdymo sistemą, gerai atitinka jos suveikimą, atspindimą programų paketo STEPAN/KOBRA skaičiavimo rezultatuose.

Išvados

Straipsnyje aprašyta Ignalinos AE RBMK-1500 reaktoriaus valdymo ir apsaugos sistemos logika, kuri buvo įdiegta į programų paketą QUABOX/CUBBOX-HYCA. Skaitinio tyrimų rezultatų analizė parodė, kad sumodeliuota RVAS logika adekvati aprašytai techninėje literatūroje. QUABOX/CUBBOX-HYCA skaičiavimo rezultatai palyginti su STEPAN/KOBRA modeliavimo rezultatais ir išitikinta, kad RVAS veikimo seka ir pobūdis analogiški, patikrai parinkto sumodeliuoto pereinamojo proceso eiga sutampa. Programų paketą QUABOX/CUBBOX-HYCA papildžius aprašyta RVAS logika galima bus patikimai modeliuoti prognozuojamus pereinamuosius procesus, galinčius įvykti Ignalinos AE reaktoriuose.

Literatūra

1. S. Langenbuch, W. Maurer, W. Werner, Coarse mesh flux expansion method for the analysis of space-time effects in large LWR cores, *Nuclear Science and Engineering*, **63**, 437–356 (1997).
2. S. Langenbuch, W. Maurer, W. Werner, High-order schemes for neutron kinetics calculation based on a local polynomial approximation, *Nuclear Science and Engineering*, **64**, 508–516 (1997).
3. *QUABOX/CUBBOX-HYCA Manual*, GRS (1993).
4. K. Almenas, A. Kaliatka, E. Uspuras, *Ignalina RBMK-1500. A Source Book*, Extended and updated version, Lithuanian Energy Institute, Kaunas (1998).
5. *Safety Analysis Report for INPP, Unit 2*, INPP (2002).

SUMMARY

E. Bubelis, N. Listopadskis, R. Pabarčius. Simulation of nuclear reactor control and protection system

Ignalina NPP RBMK-1500 reactor control and protection system (RCPS) logic, which was implemented in code QUABOX/CUBBOX-HYCA, is described in the paper. Analysis of numerical simulation results shows, that logic of RBMK-1500 RPSS is adequate to logic as described in technical literature. Simulation results obtained by code QUABOX/CUBBOX-HYCA were compared with simulation results obtained using STEPAN code. The conclusion was made that RCPS operation sequences and response are analogical. The complement the code QUABOX/CUBBOX-HYCA with full realistic RCPS logic allows to simulate the transient processes and accidents, which have place in the reactor core of Ignalina nuclear power plant.

Keywords: reactor, control and protection system, RBMK, simulation.