
Elektros energetikos sistemos dažnio automatinio reguliavimo centriniu kombinuotu reguliatoriumi matematinis modelis

Vitoldas Kavaliauskas

*Kauno technologijos universitetas,
Studentų g. 48-333, LT-3031 Kaunas*

Antanas Nemura

*Lietuvos energetikos institutas,
Breslaujos g. 3-249, LT-3035 Kaunas*

Elektros energetikos sistemos dažnio ir galios automatinio reguliavimo sistemos uždavinys – reikiamu tikslumu palaikyti pastovų elektros srovės dažnį bei pareikalaujamą ir generuojamą galių balansą elektros energetikos sistemoje, kai kinta apkrovos ir tarp sisteminių galių srautai. Didelėje elektros energetikos sistemoje pareikalaujamą ir generuojamą galių balansas turi būti palaikomas ne tik visos sistemos mastu, bet ir atskirose jos dalyse – valdymo rajonuose. Buvo sukurtas sistemos matematinis modelis, kuriuo bandyta nustatyti svarbiausių dydžių kitimą pereinamųjų procesų metu, taip pat pereinamojo proceso priklausomybę nuo sistemos parametrų – laiko pastoviųjų ir netiesinių elementų.

Raktažodžiai: modeliavimas, modeliavimo metodai, objekto modelis, valdikliai, energetikos sistema

1. ĮŽANGA

Dideli laimėjimai mikroprocesorių ir vizualizavimo technikos, visų pirma informacinės technologijos, srityje sąlygojo ženkliai pažangą ir pramoninės automatikos srityje. Per pastarąjį dešimtmetį iš esmės pasikeitė tiek automatizavimo technika, jos programinė įranga, tiek valdymo sistemų projektavimo metodika. Daugumą valdymo uždavinių sprendžiant programiškai, tradicinis programavimas vis labiau keičiamas objektams ir komponentams orientuotu programavimu. Taikant objektiškai orientuotą metodiką specifinis vartotojo uždavinys sprendžiamas kur kas greičiau ir racionaliau, surenkant projekte ar darbinėje aplikacijoje tam tikrą skaičių iš anksto paruoštų bet kokio sudėtingumo funkcinį blokų. Tokios metodikos pagrindu parengti projektai pasižymi vaizdumu, lankstumu ir dideliu sprendimų pakartotino taikymo kituose projektuose laipsniu.

Sudarytas modelis leidžia stebėti dažnio ir atitinkamų galių bei valdymo kintamųjų kitimą, kintant apkrovai arba esant tarp sisteminių galių srautų nuokrypoms nuo nustatytųjų, taip pat leidžia parinkti reikiamus sistemos reguliatorių parametrus bei pačių reguliatorių tipus.

Matematinis modelis realizuojamas Simulink priemonėmis, tyrimas atliekamas imitacinio modeliavimo metodu, modelyje taip pat realizuojami būtini

netiesiniai elementai – kai kurių kintamųjų apribojimai ir turbinų reguliatorių neįturtumo zonos.

2. MODELIO SUDARYMAS

Nagrinėjamos sistemos modelis atspindi tik tam tikru požiūriu svarbius aspektus, t. y. tenka naudoti atitinkamą abstrahavimo lygį praleidžiant mažiau svarbius dalykus. Modeliams sudaryti vartojama atitinkama aprašymo sistema, t. y. simbolika, semantika ir pragmatika, kurios atskiroms technikos šakoms yra standartizuojamos [1, 4].

Nuoseklumas. Projektavimas, kaip ir modeliavimas, turi būti vykdomas trimis pagrindiniais vienas po kito sekančiais etapais: formalizacija, struktūrizacija ir konstravimas.

Formalizacija suprantama kaip simbolinis planuojamų reiškinių ar objektų pavaizdavimas matematiniais modeliais, brėžiniais ar tekstinėmis – lingvistinėmis išraiškomis.

Struktūrizavimas pagerina žinių suprantamumą ir vaizdumą, šiame etape atsiranda naujų žinių, parodančių atskirų elementų ar sistemų ryšius ir tarpusavio priklausomybes.

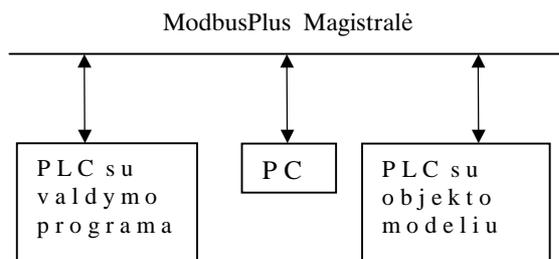
Konstravimas reikštų formalizuotų ir struktūrizuotų žinių papildymą naujomis. Tokia situacija iškyla konfigūruojant ir kombinuojant arba parametruojant esamus elementus.

Be to, būtina pažymėti, kad atliekant eksperimentus bei kuriant programinę įrangą, pasinaudojama vadinamąja inkapsuliacija. Jos esmė yra tai, kad surinkant projekte ar darbinėje aplikacijoje tam tikrą skaičių iš anksto paruoštų, nors ir labai didelio sudėtingumo, funkcinį blokų, į kurių vidaus struktūras eiliniam vartotojui nebūtina gilintis, tenka pasirūpinti, jog vartotojui ir nebūtų prieinama tokių blokų vidinės struktūros redagavimo galimybė, nes vienas iš objektams bei komponentams orientuotos metodikos reikalavimų – vartotojas turi gauti tik jam būtiną informaciją.

Apžvelgiant literatūroje nagrinėtas problemas [5–7] – valdomus objektus, su kuriais negalima eksperimentuoti dėl techninių priežasčių, bei jų modeliavimą imitacinio modeliavimo priemonėmis – arčiausiai realaus sistemos darbo būtų toks atvejis: valdymo programa instaliuojama valdiklyje (PLC), o kompiuteriu modeliuojamas pats objektas. Tenka pažymėti, kad bet kuris modelio sudarymas yra tikrovės supaprastinimas – visko aprėpti neįmanoma, tad sudarant modelį (ar modelius, kurie skiriasi savybėmis bei realizacijos būdu priklausomai nuo to, kurie parametrai ar aspektai mus domina konkrečiu laiko momentu), sąmoningai įvedami tam tikri supaprastinimai – juk svarbu ne tik modelio adekvatumas tikrovei, bet ir stebimumas valdomumas bei kitos savybės.

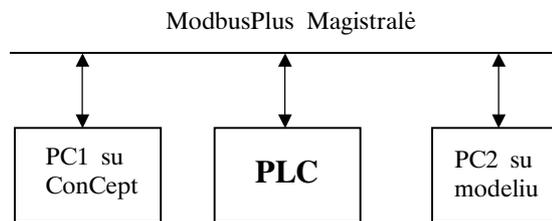
Galima struktūra, kai naudojami du valdikliai ir vienas kompiuteris. Tada viename iš valdiklių patalpina valdymo programą, o kitame – objekto modelis. Šis būdas turi privalumų ir trūkumų: teigiama tai, kad modeliuojama ir testuojama vienoje aplinkoje, o neigiama – išlaidos aparatūrai yra nepalyginamai didesnės, t. y. naudoti du valdiklius yra neleistina prabanga, be to, pavyzdžiui, ConCept aplinkoje sudarytas objekto modelis netenkina kai kurių universalumo sąlygų [5, 6]. Realiai modeliuojamas objektas bei jo valdymo algoritmas nėra homogeniniai objektai. Kita vertus, atliekant valdymo algoritmo arba modelio analizę bei testavimą visuomet pageidautina, kad šios abi dalys būtų realizuotos skirtingose platformose su skirtingais įrankiais, jau neminint būtinybės fiziškai atskirti darbinės terpes. Kaip ko gero plačiausiai žinomas ir buvo pasirinktas specifinis paketas Matlab.

Pati struktūra atrodytų taip (1 pav.):



1 pav. Valdymo algoritmo ir modelio testavimo struktūra

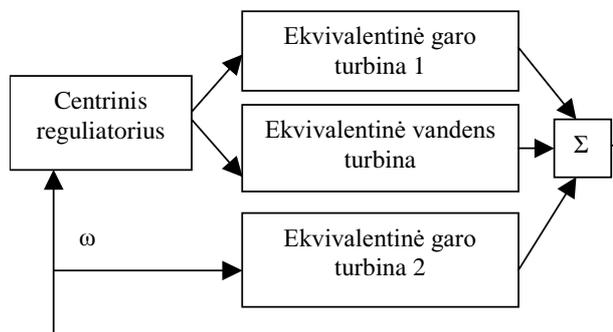
Dėl minėtų priežasčių tenka apsisototi prie atvejo, kai valdymo programa (paruošus ją pasinaudojant PLC programiniu paketu, pavyzdžiui, ConCept) patalpina valdiklyje, o kompiuteriu modeliuojamas pats objektas. Galima struktūra pateikta 2 pav.:



2 pav. Valdymo algoritmo ir modelio testavimo struktūra

Struktūrą galima ir supaprastinti, paliekant tik vieną kompiuterį (PC), kurį iš pradžių galima naudoti užkraunant valdymo programą į valdiklį (PLC), po to paleisti objekto modelį su atitinkamu adapteriu. Žinoma, patogiau naudoti du kompiuterius, tada animacijos režimu pasitelkus ConCept paketą bus galima stebėti valdiklyje vykdomą programą.

Nagrinėsime EES dažnio automatinio reguliavimo sistemą (DARS) (3 pav.). Čia pavaizduotos trys lygiagrečiai dirbančios posistemės bei centriniam punkte esantis kombinuotas regulatorius.



3 pav. EES DARS struktūrinė schema

Viršuje yra ekvivalentinio šiluminio turboagregato pirminio ir antrinio reguliavimo posistemė. Ji valdo ekvivalentinį turboagregatą su perdavimo funkcija

$$W_{T1}(p) = \frac{0,5T_{gp1}p + 1}{(T_{s1}p + 1)(T_{g1}p + 1)(T_{gp}p + 1)}; \quad (1)$$

čia T_{gp1} – garo perkaitinimo sistemos laiko pastovioji, T_{g1} – ekvivalentinės garo turbinos laiko pastovioji, T_{s1} – garo vožtuvus valdančio servo variklio laiko pastovioji.

Vidurinė pirminio ir antrinio reguliavimo grandinė valdo ekvivalentinį hidroturboagregatą, kurio perdavimo funkcija

$$W_H(p) = W_{sv3}(p) \frac{1 - T_v p}{1 + 0,5T_v p}; \quad (2)$$

$$W_{sv3}(p) = \frac{T_i p + 1}{(T_i p + 1)(T_{s3} p + \varepsilon) + \eta T_i p}; \quad (3)$$

čia T_v – turbinos laiko pastovioji,
 T_i – izodrominio grįžtamojo ryšio laiko pastovioji,
 T_{s3} – vykdančio servovariklio laiko pastovioji,
 η – izodrominio grįžtamojo ryšio stiprinimo koeficientas.

Apatinis pirminio reguliavimo kanalas yra skirtas valdyti antrąjį ekvivalentinį šiluminį turboagregatą, kurio perdavimo funkcija

$$W_{T2}(p) = \frac{0,5T_{gp2} p + 1}{(T_{s2} p + 1)(T_{g2} p + 1)(T_{g2} p + 1)}; \quad (4)$$

čia T_{gp2} – garo perkaitinimo sistemos laiko pastovioji,
 T_{g2} – ekvivalentinės garo turbinos laiko pastovioji,
 T_{s2} – garo vožtuvus valdančio servovariklio laiko pastovioji.

Turbinų velenų sukimosi galios P_{Tz} ir dažnio ω ryšį modeliuoja integruojanti grandis su perdavimo

$$\text{funkcija } W_p(p) = \frac{1}{T_J(p) + k_a} \quad [8]; \quad (5)$$

$$\text{čia } T_J = \frac{\sum_i T_{Ji} P_{vi}}{\sum_i P_{gvi}}, \quad T_{Ji} = \frac{J_i \omega_{vi}^2}{P_{vi}};$$

J_i – i -osios besisukančios masės inercijos momentas,
 ω_{vi} – vardinis sukimosi dažnis, P_{vi} – besisukančios i -osios masės vardinė galia, P_{gvi} – i -ojo generatoriaus šaltinio vardinė galia. Parametras k_a yra EES apkrovos reguliuojančio efekto koeficientas pagal galią ir išreiškiamas taip:

$$k_a = \frac{\partial P}{\partial \omega} \cdot \frac{\omega_v}{P_v}; \quad \text{čia } P_v \text{ – EES darbo taško galia (vidutinė), } \omega_v \text{ – EES darbo taško dažnis. Apytiksliai } k_a = 2 \quad [8].$$

Kiekviena garo ir vandens turbina turi savo valdymo mechanizmą TVM (turbinos garo vožtuvų valdymo mechanizmas bei vandens tiekimo aparato valdymo mechanizmas). Jis yra integruojantis arba proporcinis. Hidroturbinų pagrindinis servovariklis turi proporcinį ir lankstų (izodrominį) grįžtamąjį ryšį, o tai būtina norint turėti pakankamą ekvivalentinio hidroenergetinio agregato valdymo posistemės stabilumo atsargą. Visi ekvivalentiniai (žinoma, ir fiziniai) energetiniai agregatai turi pirminį statinį daž-

nio reguliavimą su statizmu s. Antrinių astatinių dažnio reguliavimą turi ne visi šiluminiai energetiniai agregatai, o kai kada jo neturi ir kai kurie hidroenergetiniai agregatai, todėl matematiname modelyje numatyta papildoma šiluminių turboagregatų reguliavimo grandinė be antrinio astatinio dažnio reguliavimo.

Centrinis astatinis dažnio reguliatorius yra EES dispečeriniame centre. Duomenų perdavimo linijomis jo išėjimo signalai siunčiami į konkrečius energetinių agregatų valdymo įtaisus. Šiuolaikinės turbinų valdymo sistemos yra kompiuterizuotos ir visi pirminio, antrinio bei tretinio reguliavimo signalai apdorojami specializuotame kompiuteryje arba valdiklyje, o turbinų valdymo mechanizmai iš jo gauna valdymo signalus.

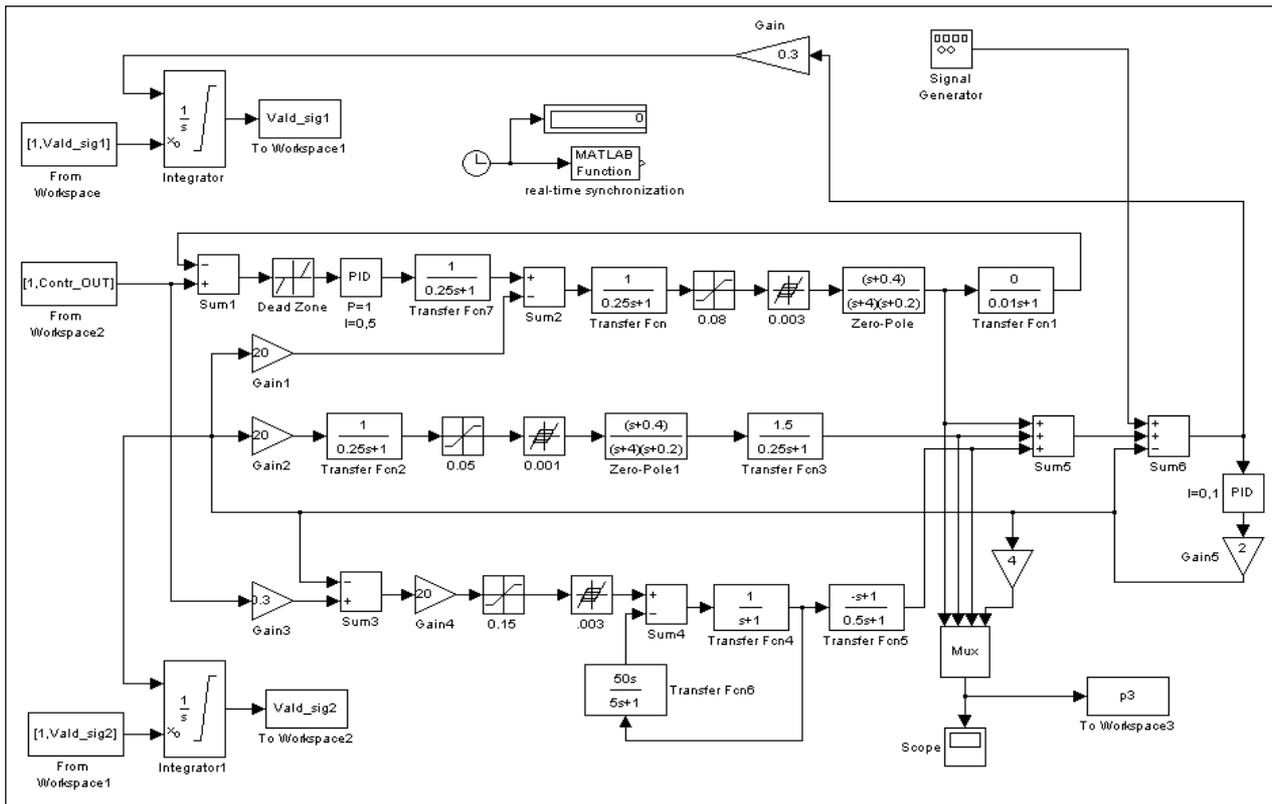
Centrinis dažnio reguliatorius dažniausiai būna PI tipo, tačiau tam tikrų privalumų turi ir PID reguliatorius, nors jo suderinimas ir sudėtingas [3]. Būtina taip parinkti centrinio reguliatoriaus parametrus, kad pereinamieji procesai dėl staigių EES apkrovos pokyčių būtų be didelių perreguliuojimų, ilgai trunkančių švytavimų ir kuo mažiau priklausytų nuo energetinių agregatų parametrų (laiko pastoviųjų ir perdavimo koeficientų) kitimo kintant agregatų apkrovoms.

Buvo sukurtas EES automatinio reguliavimo sistemos su centriniu reguliatoriumi matematinis modelis. Antrinio reguliavimo sistema yra su neryškiu (FUZZY) reguliatoriumi. Pasinaudojant modeliu, galima parinkti centrinio reguliatoriaus parametrus taip, kad DARS pereinamieji procesai atitiktų UCTE (Union for Coordination of Transmission of Electricity) reikalavimus. Naudojant neryškų (FUZZY) reguliatorių, kuris iš esmės yra daugiamatis netiesinis elementas, galima lengviau ir geriau realizuoti keliamus reikalavimus [2]:

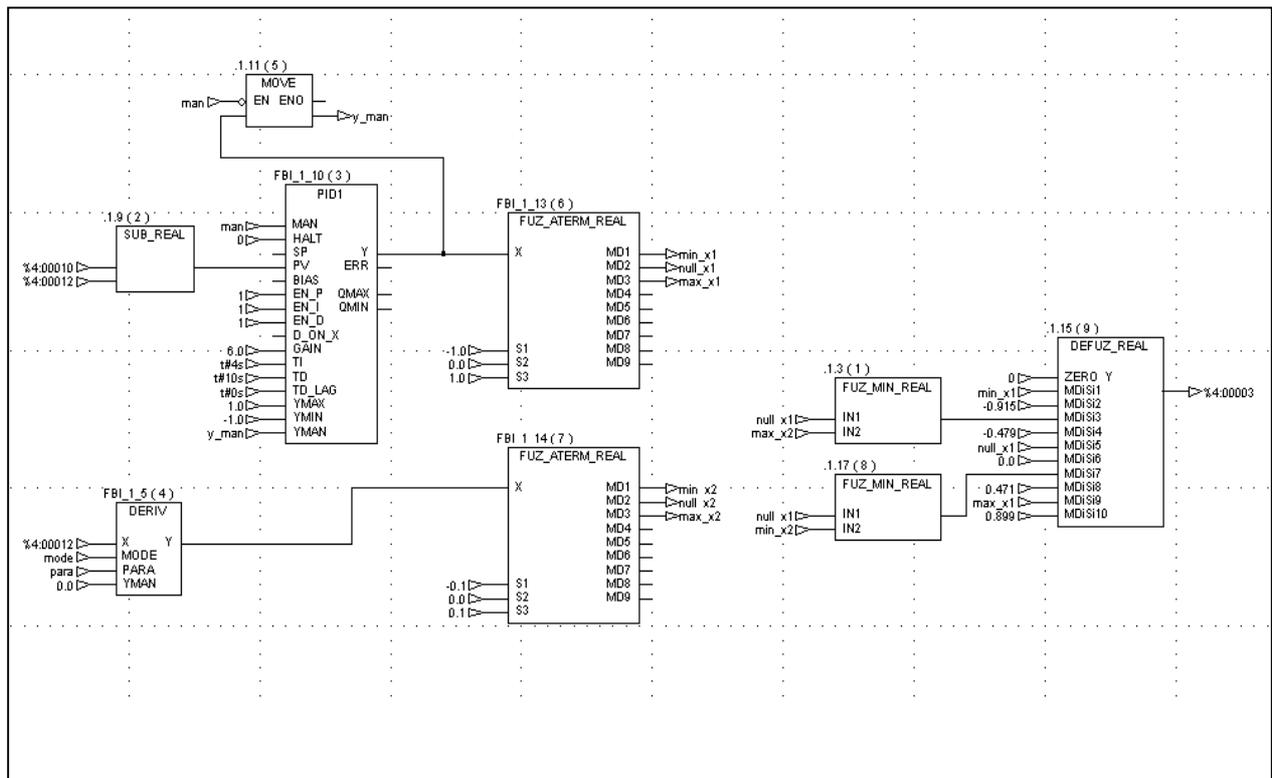
- 1) Formuoti tokius valdymo signalus, kad pereinamieji procesai būtų geros kokybės;
- 2) Reguluoti tik tada, kai reikia, be reikalo netrikdant energetinių agregatų;
- 3) Reguliavimo kokybė turi kuo mažiau priklausyti nuo turboagregatų parametrų kitimo kintant apkrovoms.

Pažymėtina, kad centrinio reguliatoriaus uždavinys dažnai gali būti sudėtingesnis – reikia palaikyti ne tik pastovų dažnį, bet ir nustatytą galios srautą kokioje nors elektros perdavimo linijoje arba kelių tarpusisteminių elektros perdavimo linijų sistemoje. Šiame straipsnyje apsiribota tik automatinio dažnio reguliavimu.

Svarbu pažymėti, kad turbinų valdymo mechanizmai su servovarikliais turi laisvumą bei nejautrumo zonas. Nejautrumo zoną galima pašalinti naudojant impulsinius reguliavimo įtaisus, tačiau mes, atsižvelgdami į realiai egzistuojančias bei praktikoje naudo-



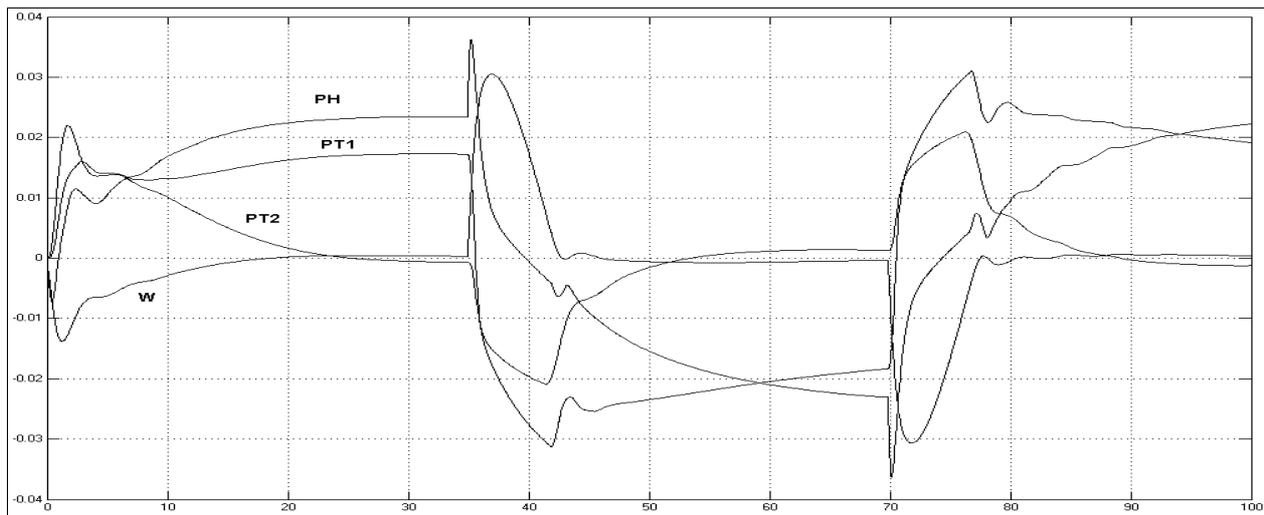
4 pav. Objekto modelis [Sudarytas MATLAB – SIMULINK priemonėmis]



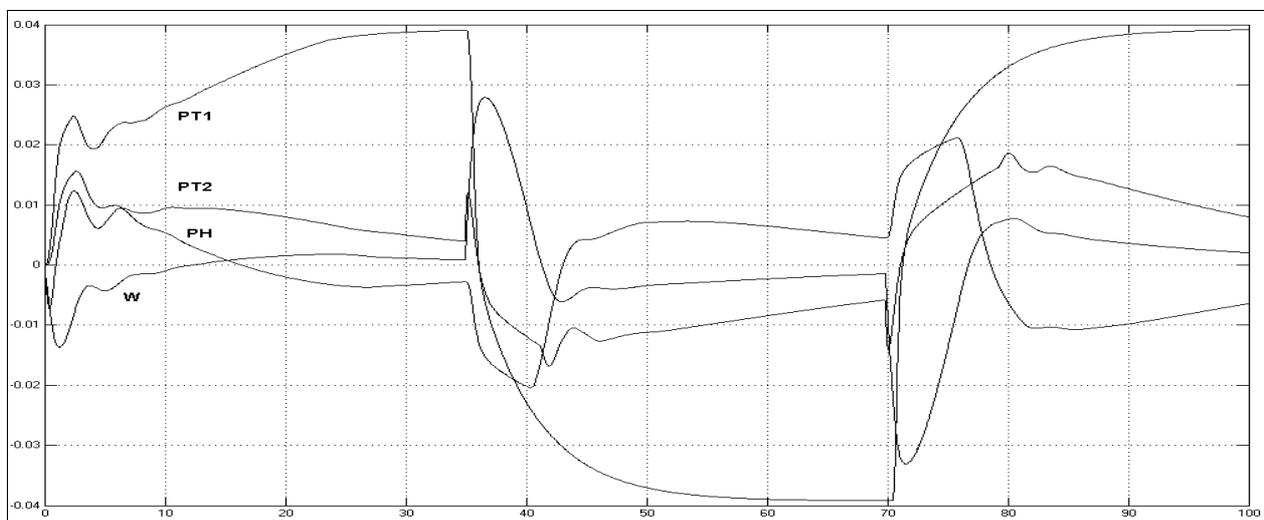
5 pav. Regulatoriaus realizavimas [Naudotas valdiklių programavimo paketas ConCEPT]

jamis sistemas, apsiribosime tolydinėmis sistemomis bei jų matematiniais modeliais.

Matematinis objekto modelis realizuojamas Simulink priemonėmis, tyrimas atliekamas imitacinio mo-



6 pav. Simulink Fuzzy



7pav. ConCEPT Fuzzy

deliavimo metodu, modelyje taip pat realizuojami būtinai netiesiniai elementai – kai kurių kintamųjų apribojimai ir jėgainių reguliatorių neįtakojamumo zonos. Centrinis reguliatorius realizuotas valdiklyje Modicon TSX Quantum.

Objekto modelio ir centrinio reguliatoriaus schemos pateikiamos 4 ir 5 paveiksluose.

Paminėtini du elektros energetikos sistemos dažnio ir galios automatinio reguliavimo sistemos tipai:

1. Pirminis ir antrinis dažnio ir galios reguliavimai vyksta veikiant neigiamam grįžtamajam ryšiui, o tretinis – ekonominis bei saugumo reguliavimas vykdomas pagal atviro kontūro schemą.

2. Pirminis, antrinis bei tretinis reguliavimai vyksta veikiant grįžtamajam ryšiui. Ši sistema sudėtinga tuo, kad reikia realiu laiku spręsti viso sisteminio tinklo režimo optimizavimo uždavinį 10–15 sekundžių intervalais.

Pirmojo tipo sistemoje tinklo režimo ir apkrovos paskirstymo tarp veikiančių agregatų optimizavimo

uždavinys sprendžiamas kas 2–10 minučių, be to, neiškyla stabilumo problemos, nes tretinio reguliavimo sistema čia yra atviro tipo.

Sudarytas modelis nagrinėja ir rodo tik pirminio ir antrinio reguliavimo sistemą.

3. PROJEKTAVIMAS IR MODELIAVIMAS CONCEPT IR MATLAB-SIMULINK APLINKOJE

Prisilaikant anksčiau minėtų objektiškumo, inkapsuliacijos ir komponentams orientuotų metodikų bei principų buvo realizuotas ir valdymo algoritmas, ir objekto modelis. Minėtos struktūros, programinės įrangos bei metodologijos apribojimai gali atrodyti kaip trūkumai, bet iš tikro taip nėra. Privalumai yra tokie: naudojantis valdikliams programuoti skirtu paketu ConCEPT, dalinai atitinkančiu standarto IEC 1131-3 reikalavimus, galima sukurti pakankamai sudėtingą valdymo algoritmą bei atlikti jo ir sistemos testavimą. Struktūrizuojant valdiklio programą nereiki-

kia jokių pakeitimų pereinant nuo modelio tyrinėjimo prie realaus objekto – pakanka įvesties ir išvesties kintamiesiems suteikti realius adresus.

Kompiuteryje instaliuoto ConCept paketo pagalba sudarytą valdymo programą pakrauname į valdiklį ir toliau patį ConCept naudojame tik stebėjimui, o Matlabo aplinkoje startuojame objekto modelį ir, numatę Simulinke norimą modeliavimo laiką bei papildomai sukongigūravę patį modelį ir duomenų mainus (dėl Simulinko specifikos, neleidžiančios ciklinio darbo, o valdiklių ideologija paremta būtent cikliniu darbu), stebime objekto modelio darbą.

Teko pasinaudoti ConCepto ir Matlabo galimybe komunuoti per DDE serverį (Wonderware Factory Suite, InTouch). Šis sprendimas visai priimtinas, nes WindowsNT sistemoje toks serveris naudojamas iš bet kurios darbo vietos pasiekti valdiklį. Pakanka turėti vieną specializuotą ModBus Plus tinklinę plokštę, kuri savo ruožtu yra santykinai labai brangi, ir specializuotą ModBus Plus tiltą. Šios įrangos visai pakako pilnaverčiam eksperimentui atlikti. Gauti rezultatai pateikiami 6 ir 7 paveiksluose.

Pažymėtina, kad reguliavimo procesas yra astatinis, o pereinamasis procesas atitinka UCTE reikalavimus.

4. IŠVADOS

Atlikus imitacinį modeliavimą, nustatyta, kad:

1. Fuzzy reguliatorius realizuoja netiesinį reguliavimo dėsnį, todėl galima pasiekti geresnę pereinamųjų procesų kokybę bei geresnę reguliavimo kokybę – reguliavimo procesas yra astatinis (nusistovėjęs dažnio nuokrypis lygus nuliui), pats pereinamasis procesas atitinka UCTE reikalavimus – bendra generuojama galia pasiekia 50% reikalingo pokyčio greičiau kaip per 5 s, o pereinamasis procesas baigiasi irgi greičiau kaip per 30 s ir praktiškai yra be švytavimų; be to, svarbiausi energetinių agregatų parametrai – laiko pastoviosios – gali pasikeisti 10 kartų, bet dėl to pereinamojo proceso pobūdis ir kokybė mažai kinta.

2. Reguliavimo kokybei didelę įtaką turi turbinos reguliatoriaus laisvumas, kurį galima imituoti arba dirbtinai įvesti, bei valdymo kintamųjų apribojimai. Didėjant laisvumui ir labiau ribojant valdymo signalus, mažėja pereinamųjų procesų svyravimai.

3. Tinkamai parinkus apribojimus ir panaudojus kombinuotą reguliatorių, galima pasiekti, kad gerai dirbtų dažnio automatinio reguliavimo sistema, lengviau ir geriau būtų realizuojami keliami reikalavimai.

4. Kuriant objekto modelį arba projektuojant valdymo sistemą reikalingas papildomas užduoties struktūrizavimas ir objektiškai orientuotas priėjimas prie objekto modelio bei valdymo algoritmo sudarymo.

5. Nagrinėtas modeliavimas Matlab paketo aplinkoje taip pat, žinoma, turi privalumų ir trūkumų, bet naudojantis juo kaip plačiai žinomu įrankiu, siekiant išvengti aplinkų homogeniškumo bei fiziškai atskirti valdymo algoritmą (šiuo atveju kombinuotą reguliatorių) ir valdomą objektą – sistemą, galima teigti, kad užsibrėžtas tikslas yra pasiekiamas.

Gauta
2001 06 22

Literatūra

1. Ahrens W., Scheurlen H.-J., Spohr G.-U. Informations – orientierte Leittechnik. Munchen; Wien: Oldenbourg, 1997.
2. Ezerskis N., Raila D. Fuzzy reguliatoriai programuojamuose valdikliuose // Automatika ir valdymo technologijos-99 / Konferencijos pranešimų medžiaga. Kaunas, 1999.
3. Ezerskis N. Valantinas R. PID reguliatorių automatinio derinimo algoritmų panaudojimas programuojamuose valdikliuose // Automatika ir valdymo technologijos-99. Konferencijos pranešimų medžiaga. Kaunas, 1999.
4. ISO 13584: Industrial Automation Systems and Integration, Parts Library. Part 20: General Resources. Part 24: Logical model of supplier library. Part 31: Geometric Programming interface. Part 42: Methodology for structuring part families, 1996.
5. Kavaliauskas V. Procesų valdymo ir modeliavimo sistemų tyrimas PLC programavimo paketo ConCept bazėje // Automatika ir valdymo technologijos-99 / Konferencijos pranešimų medžiaga. Kaunas, 1999.
6. Kavaliauskas V. Kai kurie procesų valdymo sistemų modeliavimo ir testavimo metodai // Automatika ir valdymo technologijos-98 / Konferencijos pranešimų medžiaga. Kaunas, 1998.
7. Mušič G., Matko D. Combined simulation for process control : extension of a general purpose simulation tool // Computers in Industry. 1999. N 38. P. 79–92.
8. Стернинсон Л. Д. Переходные процессы при регулировании частоты и мощности в энергосистемах. Москва, 1975. 216 с.

Vitoldas Kavaliauskas, Antanas Nemura

MATHEMATICAL MODEL OF ENERGY SYSTEM OF AUTOMATIC FREQUENCY-LOAD CONTROL WITH CENTRAL COMBINED REGULATOR

S u m m a r y

This paper presents some results of modeling and testing for process control based on the PLC programming software package ConCept and another software (includes Matlab/Simulink) and some review of process modeling. Based on a real object (state diagram) it was investigated, and on its base an object model and control program have been implemented. It is shown how to facilitate the simulation of the energy system control by using a combined regulator. Explanation of the methodology is presented, there are investigated some particular problems of applying abstract data types in systems for control technology. Some facili-

ties in designing the algorithms and advantages of this approach are shown.

Key words: methods of modeling, object model, simulation, PLC, power system

Витольдас Кавалюскас, Антанас Немура

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ
ЧАСТОТЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГОСИСТЕМЫ ПРИ
ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЦЕНТРАЛЬНОГО
РЕГУЛЯТОРА КОМБИНИРОВАННОГО ТИПА**

Р е з ю м е

В статье представляются результаты моделирования и тестирования, полученные при работе с пакетом про-

граммирования контроллеров ConSept, а также с другим программным обеспечением, в частности, Matlab/Simulink. На базе конкретной системы созданы модель объекта и алгоритм управления системой, т. е. программа промышленного контроллера Modicon TSX Quantum. Дается обзор процесса моделирования с обоснованием того, как инструменты симулирования могут быть применены в данной области. Разъясняется применяемая методика, изучаются проблемы применения данных абстрактного типа для проектирования и моделирования систем управления, а также указываются преимущества данной методики.

Ключевые слова: моделирование, методы моделирования, модель объекта, программирование контроллеров, система энергетики