

# Kintamųjų sūkių hidroagregato integravimo į energetikos sistemą galimybės

**Rimantas Pranas Deksnys,**

**Darius Ališauskas**

*Elektros sistemų katedra,  
Kauno technologijos universitetas,  
Studentų g. 48,  
LT-51367 Kaunas  
El. paštas: darius.alisauskas@gala.net*

Remiantis klasikinės elektrotechnikos teorijos pagrindais ir šiuolaikiniais mokslo laimėjimais mikroprocesorinių ir informacinių technologijų srityje, galima tobulinti kintamųjų sūkių hidroagregato žadinimo valdymo sistemos struktūrą pasitelkus erdvinę vektorinę moduliaciją. Kintamųjų sūkių hidroagregato srovių, įtampų ir elektromagnetinių srautų vektorių dedamosioms nustatyti ir galios grandinės analizei taikoma ekvivalentinė schema Parko  $d$  ir  $q$  koordinatėse. Šio tipo hidroagregatui universalus matematinio modelio principai aprašomi diferencialinių lygčių sistemomis. Hidrogeneratoriaus stacionarių bei pereinamųjų vyksmų statoriaus ir rotoriaus grandinių srovių ir įtampų pasiskirstymų nustatymui taikant Kalmano filtro metodą suformuluojama judesio lygties sąlyga. Kompiuterinio imitavimo principais nustatoma pradinės sąlygos ir konvergavimo kriterijai, o gaunamų parametrų reikšmių grafiniam vaizdavimui naudojama vienkriterinės regresijos metodika.

**Raktažodžiai:** kintamųjų sūkių hidroagregatas, žadinimo valdymo sistema, generatoriaus režimas, siurblio režimas, Kalmano filtras, vyksmų dinamika

## ĮVADAS

Elektros energetikos sistemos (EES) dažnio ir galios valdymo, galios rezervavimo efektyvumui didinti, sistemos stabilumui bei elektros energijos kokybei užtikrinti naudojamos modernios, taip pat kuriamos naujos technologijos ir įrenginiai visų rūšių galios rezervams padidinti. Tai labai aktualu elektros energetikos sistemoms su maža apkrova ir didelės galios generuojančiais šaltiniais. Nurodytam tikslui pasiekti reikia analitiškai įvertinti sistemos struktūrą ir topologiją bei fundamentiniais ir eksperimentiniais tyrimais patvirtinti arba paneigti analizuojamų uždavinių rezultatus.

Asinchroninių mašinų fundamentiniais pagrindais sukurtas kintamųjų sūkių hidroagregatas su pažangia žadinimo valdymo technologija jau 20 metų sėkmingai funkcionuoja Japonijos ir Europos elektros energetikos sistemose [1]. Palyginus su įprastiniais sinchroniniais hidroagregatais, kintamųjų sūkių hidroagregatai greičiau paleidžiami, iki 10 % padidėja naudingumo koeficientas tiek generatoriaus, tiek siurblio režimuose. Tai leidžia efektyviai prisitaikyti prie EES kintančios apkrovos grafiko bei atitikti jos galios valdymo ir rezervavimo reikalavimus [2]. Tačiau tokio tipo hidroagregatai paleidimo metu pareikalauja daug reaktyviosios galios. Šios problemos sprendimui taikomos

pažangios žadinimo valdymo sistemos su erdvinės vektorinės moduliacijos algoritmu, kurios leidžia kintamųjų sūkių hidroagregatą efektyviai valdyti ir užtikrinti reaktyviosios galios poreikį nepaisant EES galios koeficiento.

Lietuvos elektros energetikos sistemos galimybių tyrimų studijoje [2] galių valdymui numatyta iki 2020 m. išplėsti Kruonio HAE dviem moderniais kintamųjų sūkių hidroagregatais (po 250 MW kiekvienas). Tačiau tikslingam ir racionaliam šios plėtros įgyvendinimui reikia sudaryti hidroagregato ir jo žadinimo valdymo sistemos matematinis modelius bei išsamiai ištirti stacionariųjų ir pereinamųjų režimų technines ir hidrotechnines sąlygas įvairiose avarinėse situacijose, nustatyti parametrų priklausomumus nuo vidinių bei išorinių veiksnių ir apibrėžiant kitimo ribas.

Šiame straipsnyje pateikta kintamųjų sūkių hidroagregato universalus matematinis modelis ir tiriami hidroagregato elektriniai, mechaniniai ir hidroenergetiniai pereinamieji vyksmai.

## Hidroagregato žadinimo valdymo sistemos struktūra ir jos modernizavimo galimybės

Kintamųjų sūkių hidroagregato (KSH) žadinimo valdymo sistema yra sudėtingos konstrukcijos įrenginys, kuris sudarytas iš tokių pagrindinių elementų kaip galios transformatorius,

puslaidininkinių galios elementų keitiklis, kondensatorių baterija ir stebėjimo bei valdymo blokas. Šis blokas, atsižvelgus į funkcines galimybes, paprastai realizuojamas mikroprocesorinėmis technologijomis [3]. Palyginus su įprastinėmis žadinimo valdymo sistemų struktūromis, ši sistema yra brangi, tačiau be jos naujo tipo hidroagregatas negali veikti. Reikia įvertinti ir sistemos suderinamumą su relinės apsaugos ir automatikos, dispečerinio valdymo sistema (DVS) ir kitomis telemetrijos sistemomis. Taigi būtina vertinti ir ilgalaikes investicijas į kintamųjų sūkių hidroagregato bei jo žadinimo valdymo sistemos plėtrą ir modernizavimą.

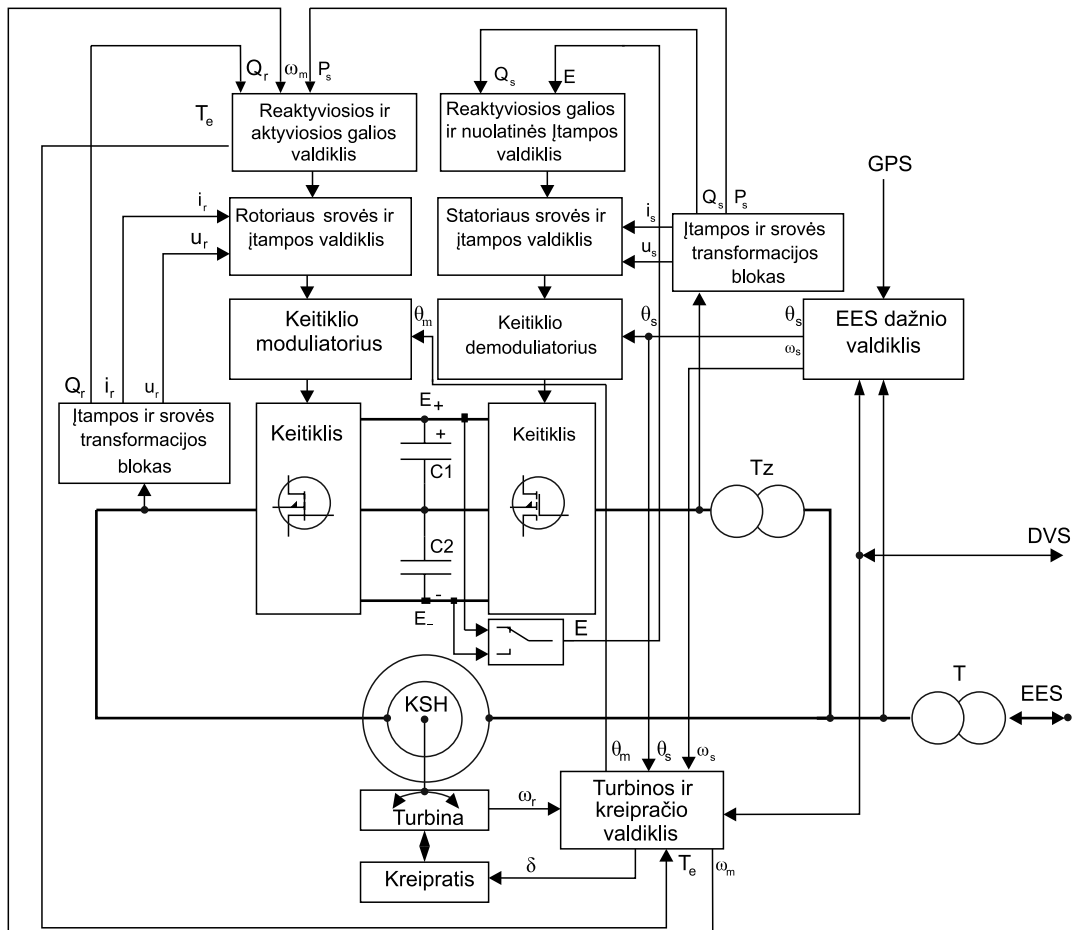
Užsienio šalių patirtis leidžia preliminariai numatyti žadinimo valdymo sistemos struktūrą, jos funkcines ir skaidymo į posistemes galimybes bei, įvertinus kiekvienos grandies ar bloko konkrečią paskirtį, aprašyti matematiškai. Statoriaus ir rotoriaus posistemių funkcinės galimybės realizuojamos mikroprocesorinėmis technologijomis (mikrovaldikliais) ir matematiškai aprašomos proporcingojo integralo (PI) blokineis struktūromis, kurių perdavimo funkcijos operatorinė forma yra:

$$W(s) = \frac{e^{-\tau s} (K_i + K_p s)}{s}; \quad (1)$$

čia  $s = j\omega$  – Laplaso operatorius,  $K_i$  – integravimo koeficientas,  $K_p$  – proporcingumo koeficientas,  $\tau$  – delsos laikas.

Agregato žadinimo valdymo sistemos struktūra turi analogiškas valdymo grandis, kurios palaiko valdomų vyksmų vientisumą bei sistemos stabilumą ir patikimumą. Žadinimo valdymo struktūrinė schema (1 pav.) sudaryta iš srovės, įtampos, reaktyviosios ir aktyviosios galių, dažnio sinchronizavimo valdiklių ir matuojamų parametru transformacijos blokų. Funkcinės struktūros, turinčios grįžtamuosius ryšius su rotoriaus ir statoriaus galios grandinėmis ir turbinos bei kreipračio mechanika, glaudžiai sąveikauja tarpusavyje ir užtikrina sistemos patikimą darbą. KSH sinchronizacijos su EES pagrindinis veiksnys yra žadinimo valdymo sistemos suderinamumas. Šiam tikslui sistema turi keitiklio demoduliatorių ir moduliatorių, kurie pagal nustatytą algoritmą valdo galios elementus sinchronizuodami vyksmus su EES dažniu [3].

Modernizuojant žadinimo valdymo sistemą, galima taikyti visuotinės padėties nustatymo sistemą (GPS), kuri suderina žadinimo valdymo sistemos darbą su bendra EES valdymo sistema ir leidžia operatyviai valdyti dažnio bei fazės nuokrypius, nepaisant to, kokiū darbo režimu KSH dirba. EES aktyviosios ir reaktyviosios galių poreikis lemia, kokiū



1 pav. KSH žadinimo valdymo sistemos struktūra

darbo režimu – generatoriaus, siurblio ar sinchroninio kompensatoriaus KSH dirbs. KSH darbą bet kuriuo režimu sąlygoja skirtingi energetiniai parametrai. Be to, dėl keitiklių ir inverterių netiesinių puslaidininkinių galios elementų išskyla didelė srovių ir įtampų aukštesnių harmonikų atsiradimo tikimybė. Todėl, be LC filtrų taikymo, tikslinga didinti puslaidininkinių galios elementų komutacijos dažnį, kuris priklauso nuo elemento vidinės technologinės specifikos, sertifikuotų darbo režimų parametrų bei charakteristikų ir yra lygus:

$$f_k = \frac{f_n + f_k}{2}; \quad (2)$$

čia  $f_n$  – nešantysis dažnis,  $f_s$  – EES dažnis.

Nustatytu algoritmu taikant vektoriškos moduliacijos principą keitliklio pusėje atsiranda galimybė didinti moduliacijos laipsnį nuo 3 iki 6 įtampos lygio siekiant gauti rotoriaus grandinėje kokybiškesnius parametrus [3]. Tačiau dėl to daugėja puslaidininkinių galios elementų, tampa sudėtingesnis sistemos valdymo algoritmas bei brangsta technologija.

### Kintamųjų sūkių hidroagregato galios grandinės matematinis modelis

Remiantis asinchroninių mašinų fundamentiniais elektrotechnikos dėsniais, KSH rotoriaus ir statoriaus galios grandinės schemas tiriamuosius parametrus galima transformuoti į erdvinę Parko koordinačių sistemą ir aprašyti diferencialinių lygčių sistema [4]:

$$\begin{cases} \vec{u}_{ds} = \vec{i}_{ds} r_s + \frac{d\vec{\Psi}_{ds}}{dt} + j\omega_s \vec{\Psi}_{qs} \\ \vec{u}_{qs} = \vec{i}_{qs} r_s + \frac{d\vec{\Psi}_{qs}}{dt} + j\omega_s \vec{\Psi}_{ds} \\ \vec{u}_{dr} = \vec{i}_{dr} r_r + \frac{d\vec{\Psi}_{dr}}{dt} - j(\omega_s - p\omega_r) \vec{\Psi}_{qr} \\ \vec{u}_{qr} = \vec{i}_{qr} r_r + \frac{d\vec{\Psi}_{qr}}{dt} - j(\omega_s - p\omega_r) \vec{\Psi}_{dr} \end{cases} \quad (3)$$

KSH statoriaus ir rotoriaus galios grandinių diferencialinių lygčių pagrindu galima sudaryti lygčių matricinę formą:

$$\begin{bmatrix} \vec{u}_{ds} \\ \vec{u}_{qs} \\ \vec{u}_{dr} \\ \vec{u}_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(r_s + \frac{d}{dt} L_s\right) & \omega_s L_s & \frac{d}{dt} L_m & \omega_s L_s \\ -\omega_s L_s & \left(r_s + \frac{d}{dt} L_s\right) & -\omega_s L_s & \frac{d}{dt} L_m \\ \frac{d}{dt} L_s & (\omega_s - p\omega_r) L_m \left(r_r + \frac{d}{dt} L_r\right) & (\omega_s - p\omega_r) L_r & \\ -(\omega_s - p\omega_r) L_m & \frac{d}{dt} L_s & -(\omega_s - p\omega_r) L_r & \left(r_r + \frac{d}{dt} L_r\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{i}_{ds} \\ \vec{i}_{qs} \\ \vec{i}_{dr} \\ \vec{i}_{qr} \end{bmatrix}; \quad (4)$$

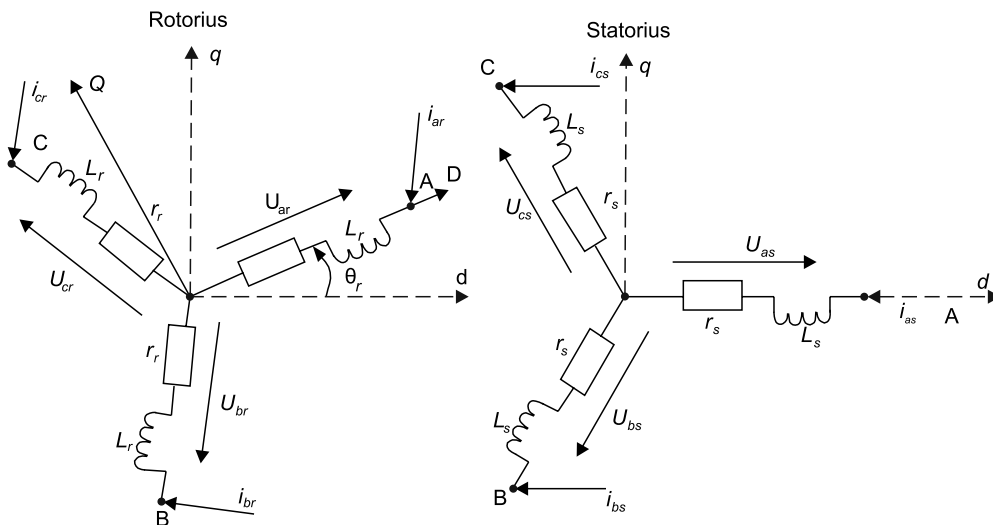
čia  $p$  – polių porų skaičius;  $\vec{i}_s, \vec{i}_r$  – statoriaus ir rotoriaus srovės vektoriai;  $\vec{u}_s, \vec{u}_r$  – statoriaus ir rotoriaus įtampų vektoriai;  $\vec{\Psi}_s, \vec{\Psi}_r$  – statoriaus ir rotoriaus elektromagnetinio srauto vektoriai;  $r_s, r_r$  – statoriaus ir rotoriaus aktyviosios varžos;  $L_m$  – tarpusavio induktyvumas;  $L_s, L_r$  – statoriaus ir rotoriaus induktyvumai;  $\omega_s, \omega_r$  – statoriaus ir rotoriaus kampiniai dažniai.

Labai svarbu nustatyti rotoriaus ir statoriaus parametrus ir suderinti su žadinimo valdymo sistema, kuri turi palaikyti reikiamą rotoriaus padėties mechaninį  $\theta_r$  ir slydimo  $\theta_m$  kampus ir rotoriaus grandinės įtampos  $u_r$  fazės kampą (2 pav.). Rotoriaus slydimo kampas nustatomas kaip statoriaus elektrinio ir rotoriaus mechaninio kampų skirtumas

$$\theta_m = \theta_s - \theta_r; \quad (5)$$

čia  $\theta_s$  – statoriaus elektrinis kampas;  $\theta_r$  – rotoriaus padėties mechaninis kampas;  $\theta_m$  – rotoriaus slydimo kampas.

Taikant teorinės elektrotechnikos grafų teorijos pagrindus ir Kalmano filtro metodiką, galima nustatyti statoriaus  $\vec{i}_s, \vec{u}_s$  ir rotoriaus  $\vec{i}_r, \vec{u}_r$  srovių ir įtampų erdvinį vektorių ryšį bei, įtraukiant papildomą tikimybinį kintamąjį koeficientą  $\xi$  ir tyrimo metu stiprinant arba slopinant tiriamuosius parametrus, įvertinti susidarancias paklaidas. Šio filtro struktūra yra Cauchy'o skaitmeninio filtro analogija ir lygi [5]:



2 pav. KSH fazinė ekvivalentinė schema

$$\frac{d}{dt} \vec{i} = A\vec{i}(t) + B\vec{u}(\tau) + \xi(\tau); \quad (6)$$

čia  $A$  ir  $B$  – galios grandinių parametrus aprašančios matricos;  $\xi$  – tikimybinis paklaidos koeficientas su vienetine matrica;  $t$  – laiko akimirksnis,  $\tau = t_0 - t$  – delsa.

(6) lygties sprendinys leidžia gauti tokią formulę:

$$\vec{i}(t) = e^{A(t)} \vec{i}(t) + \int_0^t \left( e^{A(t-\tau)} B \vec{u}(\tau) + \xi(\tau) \right) d\tau. \quad (7)$$

Pagal nustatytus statoriaus  $\vec{i}_s$ ,  $\vec{u}_s$  ir rotoriaus  $\vec{i}_r$ ,  $\vec{u}_r$  srovių ir įtampų vektorius konkrečiam laiko akimirksniui  $t$  nustatomas elektromagnetinis sukimo momentas:

$$T_e = p \frac{3}{2} L_m (\vec{i}_{qs} \vec{i}_{dr} - \vec{i}_{ds} \vec{i}_{qr}). \quad (8)$$

Taikant antrąjį Niutono dėsnį ir įvertinant rotoriaus trinties koeficientą, galima sudaryti judesio lygtį:

$$J \frac{d^2 \theta_r}{dt^2} = T_m + T_e + D \omega_m; \quad (9)$$

čia  $T_m = \frac{P_v}{\omega_m}$  – turbinos mechaninis sukimo momentas;

$P_v$  – potenciali vandens galia;  $T_e$  – elektromagnetinis sukimo momentas;  $D$  – mechaninės trinties koeficientas.

Judesio (9) lygtį išreiškus matricine forma ir pritaikius Kalmano filtro struktūrą [5] bei įvertinus (6) lygtį, gaunama:

$$\frac{d}{dt} \theta_r = A \theta_r(t) + B + \xi(\tau); \quad (10)$$

čia  $A$  ir  $B$  – judesio lygties matematinę struktūrą aprašančios matricos.

Išsprendus (10) lygtį, gaunama išraiška:

$$\theta_r(t) = e^{A(t)} \theta_r(t) + \int_0^t \left( e^{A(t-\tau)} B + \xi(\tau) \right) d\tau. \quad (11)$$

Pasiūlyto KSH galios grandinių matematinio modelio pagalba galima nustatyti statoriaus  $\vec{i}_s$ ,  $\vec{u}_s$  ir rotoriaus  $\vec{i}_r$ ,  $\vec{u}_r$  srovių ir įtampų vektorius ir rotoriaus padėties mechaninio kampo  $\theta_r$  parametrų priklausomybes nuo laiko, taip pat nustatyti hidroagregato stacionarių ir pereinamųjų vyksmų dinamiką.

#### Vidinių ir išorinių veiksmų įtakos nustatymo metodika

Vidinių hidroenergetinių ir išorinių EES veiksmų įtakai KSH galios grandinėms nustatyti taikoma Kalmano filtro metodika, o žadinimo valdymo sistemai – automatinio valdymo teorijos pagrindais paremta matematinė blokinė struktūra bei integruojamos proporcingojo integralo grandys (1). Matematiškai imituojant paleidimą, KSH ir žadinimo valdymo sistemai suformuluojama vienetinė šuolinė Hevisaido funkcija, kuri Laplaso transformacijoje turi eksponentinį dėsnį:

$$\vec{u}_{s(r)}(t) = \begin{cases} 0, & \text{kai } t < 0 \\ \vec{u}_{s(r)}(t), & \text{kai } t \geq 0 \end{cases}; \quad (12)$$

čia  $\vec{u}_{s(r)}(t)$  – statoriaus ir rotoriaus įtampų dedamosios išreikštos Hevisaido funkcija.

KSH ir jo žadinimo valdymo sistemai matematiškai imituojant numatytus šuoliškus dinaminis pereinamuosius vyksmus, suformuluojama impulsinė Dirako delta funkcija:

$$\delta_{s(r)}(t) = \begin{cases} 0, & \text{kai } t \neq 0 \\ \infty, & \text{kai } t = 0 \end{cases}; \int_{-\infty}^{+\infty} \delta_{s(r)}(t) dt = 1; \quad (13)$$

čia  $\delta_{s(r)}(t)$  – Dirako delta funkcija kintamųjų sūkių hidroagregatui.

Suformulavus KSH žadinimo valdymo sistemos standartines poveikio funkcijas ir dėsningumus, nustatomos sistemos elektrinės, mechaninės ir hidroenergetinės pradinės sąlygos. KSH paleidimo imitavimui pradinės laiko ir rotoriaus srovės sąlygos yra priimtos  $t = 1$  s ir  $\vec{i}_r = 0$ . Pereinamojo vyksmo tyrimui nustatoma rotoriaus galios grandinės srovės konvergavimo kriterijus, srovės vektoriaus  $\vec{i}_r$ , reaktyviosios galios  $Q$ , kondensatorių C1 ir C2 nuolatinės įtampos  $E$  vertės (1 pav.).

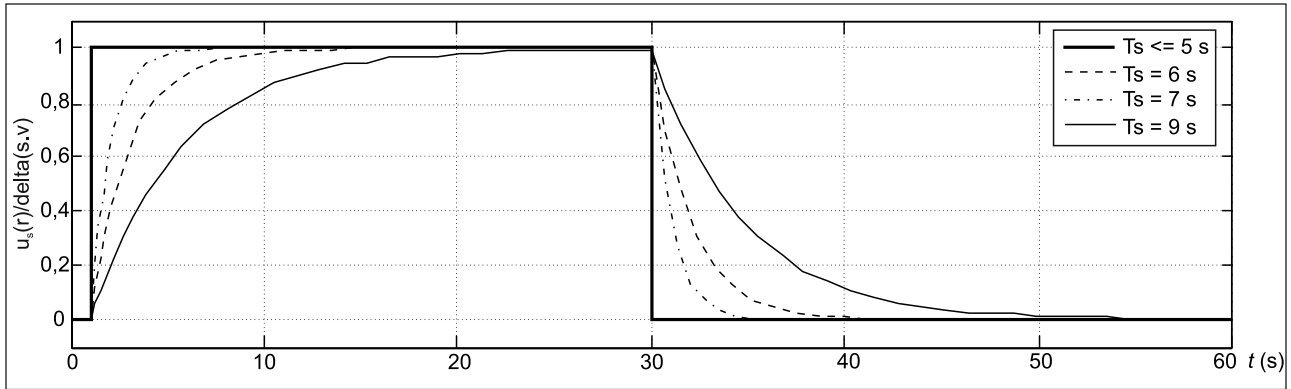
Nustačius rotoriaus galios grandinės srovės pradines sąlygas, suderinami visos sistemos vidiniai ir išoriniai veiksniai. Vidinių veiksmų nustatymui imituojami KSH valdymo sistemos darbo režimai. Statoriaus  $\vec{i}_s$ ,  $\vec{u}_s$  ir rotoriaus  $\vec{i}_r$ ,  $\vec{u}_r$  srovių ir įtampų vektoriai, elektromagnetinio sukimo momentas  $T_e$  arba aktyvioji galia  $P_s$  bei nuolatinės įtampos  $E$  parametrai antrinėse valdymo grandinėse suderinami PI grandimis (1) išraiškos pagalba. Nuolatinė įtampa  $E$  ir rotoriaus mechaninės padėties kampas  $\theta_r$  yra nulemtas sukimosi kryptimi ir pradinėmis sąlygomis, o konvergavimo kriterijus apskaičiuojamas (7) ir (11) formulėmis, parenkant integravimo žingsnį  $t - \tau$  ir taikant Kalmano filtrą.

Išorinių veiksmų poveikis yra susietas su KSH sistemos funkcionavimu ir turi įtakos EES dažniui  $f_s$ , įtampai  $u_s$  ir aktyviosios  $P_s$  bei reaktyviosios  $Q_s$  galių vertėms, dirbant siurblio, generatoriaus ir sinchroninio kompensatoriaus režimais.

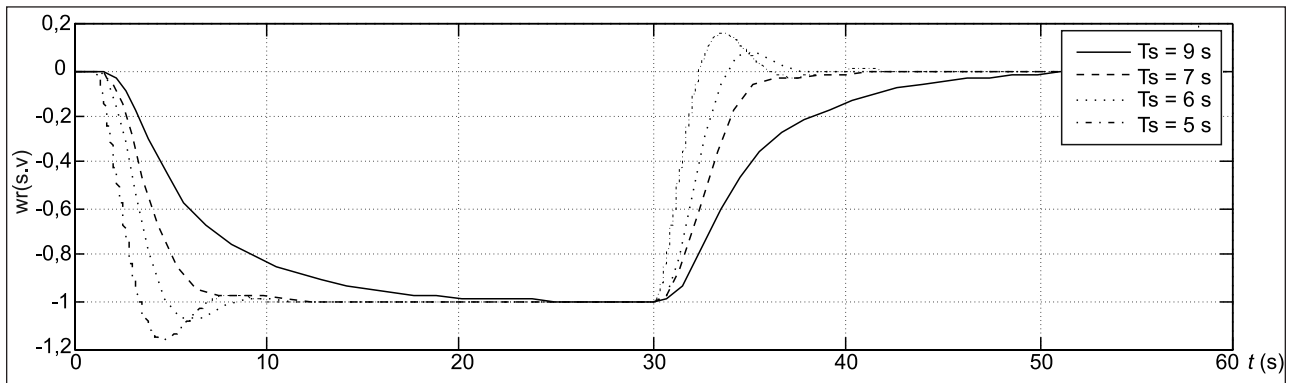
Vidinių veiksmų poveikis yra susietas su hidroturbinos charakteristikomis, kreipračio padėties kampo  $\delta$  parametrais ir turi įtakos žadinimo valdymo sistemai [6]. Vidinių veiksmų įtaka KSH pereinamiesiems vyksmams nustatoma, įvertinus turbinos ir vandentakio laiko pastoviąsias ir mechaniką, valdymo procedūras ir laiko delną (3 pav.).

Kompiuterinio imitavimo metu, suderinus visos žadinimo valdymo sistemos grandžių funkcionavimą, keičiant kreipračio atidarymo kampą  $\delta$  ir laiko pastoviąsias nuo 5 iki 9 s, nustatomos KSH rotoriaus mechaninių apskukų (4 pav.), aktyviosios galios (5 pav.) ir vandens potencinės galios (6 pav.) charakteristikos.

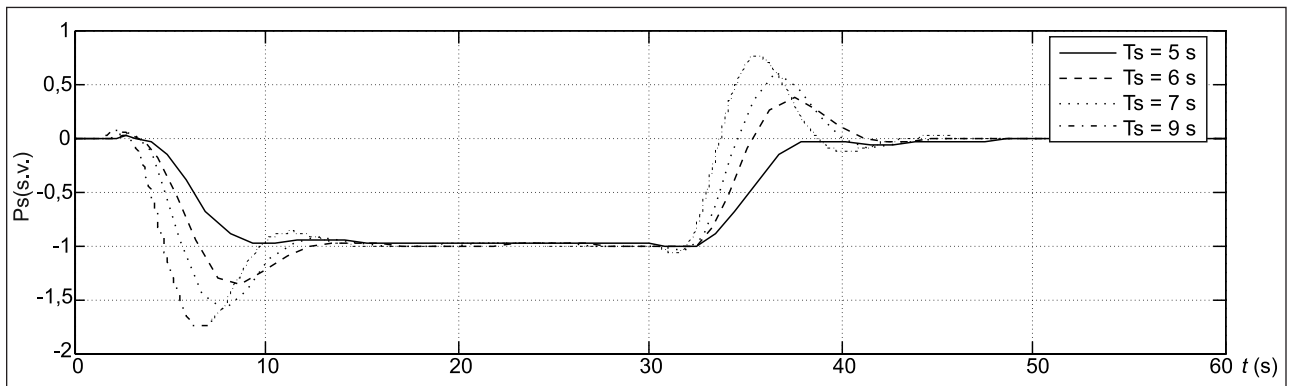
Tyrimais nustatyta, kad KSH aktyviosios galios kitimo greitį galima pasiekti 3,75 MW per 1 ms (5 pav.). Tai rodo, kad KSH galią gali valdyti labai greitai dideliame diapazone ir operatyviai reaguoti į galios poreikį EES ne tik generatoriaus, bet ir siurblio režimuose.



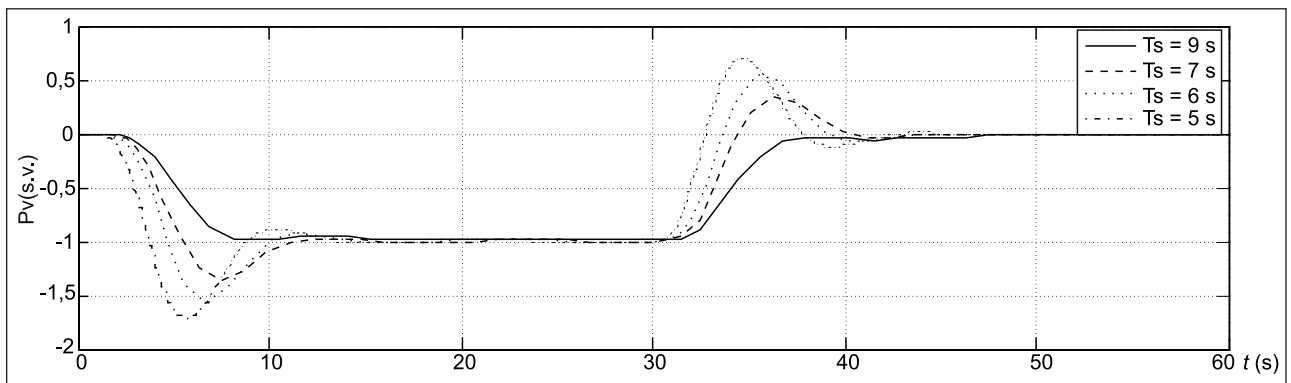
3 pav. Valdymo funkcijos ir kreipračio padėties kampo  $\delta$  grafinės charakteristikos



4 pav. Rotoriaus mechaninių sūkių  $\omega_r$  grafinės charakteristikos



5 pav. Aktyviosios galios  $P_s$  grafinės charakteristikos



6 pav. Vandens potencinės galios  $P_v$  grafinės charakteristikos

## IŠVADOS

1. Pasiūlytas kintamųjų sūkių hidroagregato universalus matematinis modelis elektriniams, mechaniniams ir hidroenergetiniams pereinamiesiems vyksmams tirti.

2. Kintamųjų sūkių hidroagregatas gali adekvačiai reaguoti į elektros energetikos sistemos aktyviosios galios poreikį 3,75 MW/ms greičiu ir užtikrinti pirminį galios rezervą.

3. Efektyvus aktyviosios galios valdymas užtikrinamas kreipračio padėties kampo, vandens debito ir rotoriaus sūkių keitimu.

4. Kintamųjų sūkių hidroagregatą galima valdyti labai greitai nesukeliant hidraulinių smūgių.

Gauta 2011 07 28

Priimta 2011 08 18

## Literatūra

1. Suul J. A., Uhlen K. *Variable Speed Pumped Storage Hydropower for Integration of Wind Energy in Isolated Grids – Case Description and Control Strategies*. 2009.
2. Deksnys R. P., Radziukynas V. ir kt. *Vėjo elektrinių plėtros galimybių analizės*. Užsakovas LEO LT. Tyrimo (sutartis Nr. 79-09/8540) ataskaita. Kaunas, 2009. 340 p.
3. Sapin A. et al. *Doubly-fed Asynchronous Machine with 3-level VSI for Variable Speed Pump Storage*. Swiss Federal Institute of Technology Electromechanics and Electrical Machines Laboratory, Switzerland, 2003.
4. Nagura O. et al. *Hitachi's Adjustable-speed Pumped-storage System Contributing to Prevention of Global Warming*. Japan, 2007.
5. Meziane S., Toufouti R., Benalla H. *Nonlinear Control of Induction Machines Using an Extended Kalman Filter*. Algeria, 2008.
6. Lung J.-K. et al. *Modeling and Dynamic Simulations of Doubly Fed Adjustable-speed Pumped Storage Units*. Taiwan, 2007.

Rimantas Pranas Deksnys, Darius Ališauskas

## POSSIBILITIES OF INTEGRATING A VARIABLE SPEED UNIT INTO THE POWER SYSTEM

### Summary

An excited control system with the spatial structure of the vector modulation of a variable-speed pumped storage unit can be improved based on the classical theory of electrical engineering and modern achievements of science in microprocessor and information technology. The equivalent Park circuit within the  $d$  and  $q$  coordinates is applied to perform a power circuit analysis of the variable-speed unit and to define the components of vectors of currents, voltages and electromagnetic flows. The principles of a universal mathematical model for this unit are described by differential equations, matrix systems. To establish the distribution of current and voltages within the circuits of the stator and rotor of the unit in stationary and transient processes, the Kalman filter method is applied and

the terms of the equation of motion are formulated. The initial conditions and convergence criteria are defined by applying principles of computer simulation, and a single-criterion regression method is used for the graphic display of the generated parameter values.

**Key words:** variable speed pumped storage unit, excited control system, regime of generator, regime of pump, Kalman's filter, dynamics of processes

Римантас Пранас Декснис, Дарюс Алишаускас

## ВОЗМОЖНОСТИ ИНТЕГРАЦИИ ГИДРОАГРЕГАТА ПЕРЕМЕННОЙ СКОРОСТИ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ

### Резюме

На основе классической теории электротехники и современных достижений науки в областях микропроцессорной и информационной технологии можно усовершенствовать структуру системы возбуждения и управления гидроагрегата переменной скорости с применением пространственной векторной модуляции. Для анализа цепей мощности гидроагрегата переменной скорости применяется эквивалентная схема в  $d$  и  $q$  координатах Парка, позволяющая определить вектора токов, напряжений и электромагнитных потоков. Принципы универсальной математической модели для гидроагрегата такого типа могут быть описаны дифференциальными уравнениями. В целях определения токов и напряжений в цепях статора и ротора гидроагрегата в стационарных и переходных процессах применяется метод фильтра Калмана и формулируются условия для уравнений движения. Принципами компьютерного моделирования определяются начальные условия и критерии конвергенции процессов, а для графического отображения получаемых значений параметров применяется метод регрессионного анализа.

**Ключевые слова:** гидроагрегат переменной скорости, система возбуждения и управления, режим генератора, режим насоса, фильтр Калмана, динамика процессов