

SKYSČIO LYGIO VALDYMO SISTEMOS TYRIMAS

Dominykas BEIŠTARAS

Vilniaus technologijų ir dizaino kolegija
El. paštas d.beistasaras@vtdko.lt

Santrauka. Nagrinėjamas skysčio lygio valdymo sistemos imitacinių modelių sudarymas, analizuojamos dinaminės charakteristikos. Valdymo sistema sudaryta iš skaliariniu būdu valdomos dažninės elektros pavaros su neraiškiosios logikos reguliatoriumi, vandens rezervuaro ir išcentrinio siurblio. Sudaryti rezervuaro, siurblio ir reguliatoriaus *Simulink* modeliai. Atlikus imitacijas gauta nedimensinė siurblio charakteristika, apibūdinanti siurblio veikimą, esant bet kokiam sukimosi greičiui. Nustatyta, kad sistemoje su neraiškiosios logikos reguliatoriumi vožtuvas yra atidaromas greičiau nei sistemoje su proporcingu integraliniu (PI) reguliatoriumi, ir todėl sumažinama rezervuaro pripildymo trukmė.

Reikšminiai žodžiai: skysčio lygis, išcentrinis siurblys, neraiškioji logika, reguliatorius.

Įvadas

Skysčio lygio valdymo sistemos yra naudojamos katilinėse, maisto ir gėrimų pramonėje, farmacijoje, vandens valymo įrenginiams, chemikalų rezervuarams, užtvankų vandens lygiui palaikyti, atominėse jėgainėse, saunose, baseinuose, pirtyse ir pan.

Pastaruoju metu ieškoma naujų būdų skysčio lygiui valdyti, nes naudojant proporcinguosius integralinius (PI) reguliatorius valdymo kokybė tėra vidutiniška. Siekiant pagerinti sistemos dinamines charakteristikas, vis dažniau naudojami neraiškiosios logikos reguliatoriai (Lisauskas, Rinkevičienė 2010; Valiulis 2005).

Neraiškioji logika gali būti įdiegta technikos įtaisais ir programinėje įrangoje, taip pat mišrioje sistemoje. Ji suteikia galimybę gana paprastai gauti tikslų ir aiškų rezultatą, kai sistemos įėjime pateikiami ne visi, dviprasmiški, netikslūs duomenys ar triukšmingi signalai.

Neraiškiosios logikos valdymo metodai palaipsniui tampa įprastomis darbinėmis procesų modeliavimo ir valdymo priemonėmis. Sukurta daug įvairių programų paketų, kurie patogioje programinėje įrangoje leidžia gana paprastai įgyvendinti neraiškiųjų aibių metodų algoritmus (Lisauskas 2012).

Darbe aprašomi sudaryti vandens rezervuaro, siurblio, pavaros, sukančios siurblių, ir neraiškiosios logikos reguliatoriaus imitaciniai *Simulink* modeliai. Pateikiama sistemos nedimensinė slėgio aukščio ir debito charakteristika ir dinaminės rezervuaro pripildymo, naudojant PI ir neraiškiosios logikos reguliatorius, charakteristikos.

Skaliarinio valdymo dažninė elektros pvara

Taikant skaliarinį valdymą įtampos ir tinklo dažnio santykis U/f turi būti keičiamas proporcingai. Siekiant palaikyti pastovų variklio sukuriamą magnetinį srautą Φ , keičiant statoriaus maitinimo įtampos dažnį, proporcingai turi būti keičiama įtampa.

Statoriaus įtampa U_s ir sukimo elektromagnetinis momentas T_e išreiškiami taip:

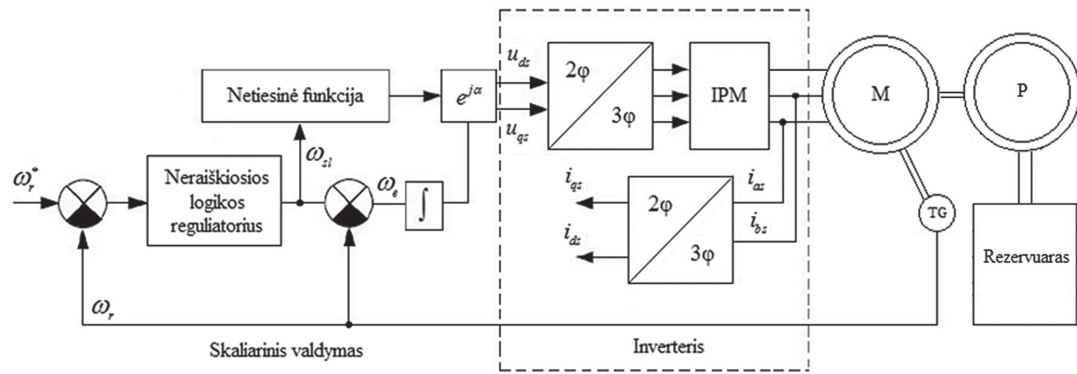
$$U_s = I_m \sqrt{R_s^2 + (\omega_e L_m)^2 + \left(\frac{\omega_e R_r}{\omega_{sl}} \right)^2}, \quad (1)$$

$$T_e = 3 \left[\frac{p}{2} \right] \frac{R_r}{s \omega_e} \times \frac{U_s^2}{\left[(R_s + R_r / s)^2 + \omega_e^2 (L_m)^2 \right]}, \quad (2)$$

čia I_m – įmagnetinimo reaktyvioji srovė; R_s – aktyvioji statoriaus varža; R_r – rotoriaus apvijos redukuotoji induktyvioji varža; ω_e – variklio maitinimo įtampos kampinis dažnis; ω_{sl} – slydimo greitis; s – slydimas; L_m – abipusis induktyvumas; p – polių skaičius.

Skaliarinio valdymo siurblio pvara ir jos greičio grįžtamasis ryšys pavaizduota 1 pav.

Pavaros skaliarinio valdymo dalyje palaikomas pastovus įtampos ir dažnio santykis. Asinchroninio variklio greitis reguliuojamas neraiškiosios logikos reguliatoriumi. Variklis maitinamas sinusine įtampa (Lisauskas 2012).



1 pav. Skaliarinio valdymo siurblio pavaros funkcinė schema

Fig. 1. Scalar control pump drive block diagram

Variklio energija siurbliui perduodama per movą. Esant tokiam perdavimui, siurblio sūkių skaičius lygus variklio sūkių skaičiui.

Išsamiau skaliarinės pavaros kompiuterinio modelio sudarymą tyrė J. Kriaučiūnas ir L. Kerpė (2013).

Rezervuaro ir siurblio imitacinių modelių sudarymas

Esant pastoviam skysčio tankiui, rezervuaro pripildymo procesas išreiškiamas lygtimi

$$\frac{A dh}{dt} = Q_{in} - Q_{out}, \quad (3)$$

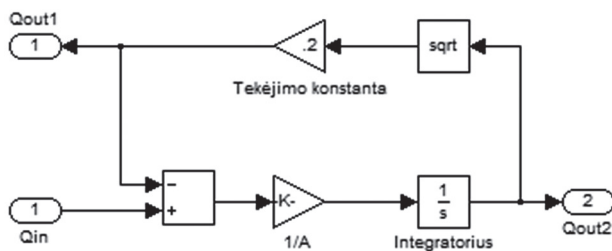
čia A – rezervuaro pagrindo plotas; h – skysčio aukštis rezervuare; Q_{in} – į rezervuarą įtekančio skysčio debitas; Q_{out} – iš rezervuaro ištekančio skysčio debitas, kai $Q_{out} = k\sqrt{h}$; k – skysčio tekėjimo konstanta.

Sudarytas rezervuaro imitacinis modelis pateiktas 2 pav.

Sistemoje naudojamo išcentrinio siurblio sukuriamas slėgis apibūdinamas formule

$$H = p - \rho gh, \quad (4)$$

čia p – siurblio sukuriamas slėgis; ρ – tankis; g – laisvojo kritimo pagreitis.



2 pav. Vandens rezervuaro Simulink imitacinis modelis

Fig. 2. Simulink model of water tank

Siurblio debito ir slėgio priklausomybės nuo sūkių greičio, t. y. siurblio proporcingumo, dėsniai užrašomi taip:

$$Q_2 = Q_1 \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right); \quad (5)$$

$$H_2 = H_1 \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2, \quad (6)$$

čia Q_1 – debitas, kai sūkių greitis yra ω_1 ; Q_2 – debitas, kai sūkių greitis yra ω_2 ; H_1 – slėgis, kai sūkių greitis yra ω_1 ; H_2 – slėgis, kai sūkių greitis yra ω_2 ; ω_1 – siurblio sūkių greitis, esant pradinei nuostato vertei; ω_2 – siurblio sūkių greitis, pakeitus nuostato vertę.

Kintant išcentrinio siurblio sūkių skaičiui, keičiasi ir jo parametrai. Norint išsamiai aprašyti siurblio veikimą, esant bet kokiam sūkių greičiui, slėgis, debitas ir momentas buvo sumažinti iki nedimensinių dydžių: slėgio ψ , debito ϕ ir momento τ koeficientų (Skawinski 2010):

$$\psi = \frac{H}{0,5\rho(\omega r)^2}, \quad (7)$$

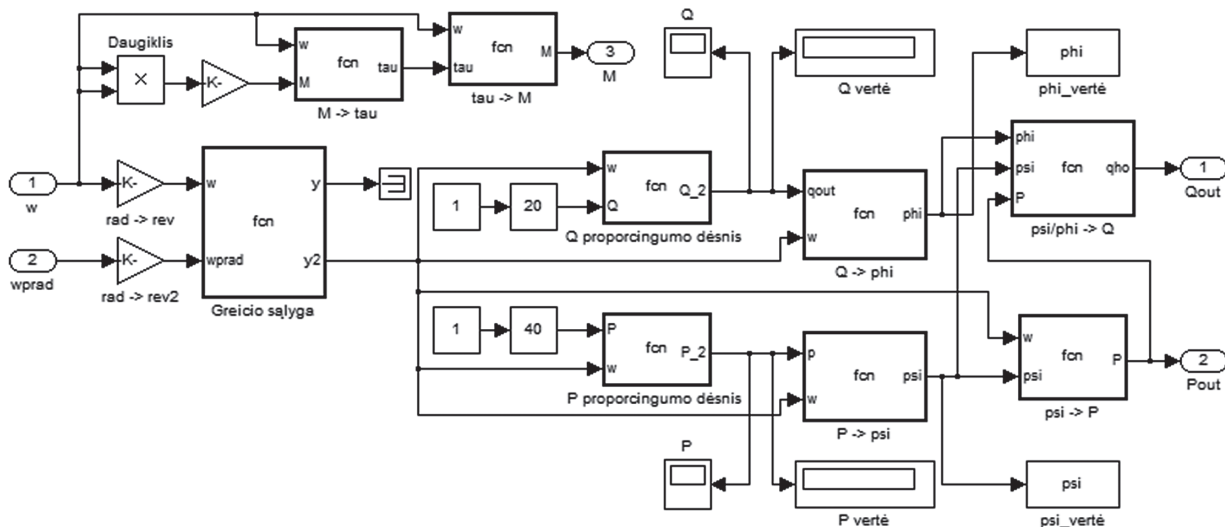
$$\phi = \frac{Q}{\omega v}; \quad (8)$$

$$\tau = \frac{M}{0,5\rho(\omega r)^2}, \quad (9)$$

čia r – siurblio siurbliaračio skersmuo; ω – siurblio sūkių greitis; v – ekvivalentinė tūrinė konstanta, lygi maksimalaus debito ir maksimalaus greičio santykiui:

$$v = \frac{Q_{max}}{\omega_{max}}. \quad (10)$$

Pagal (4–10) išraiškas sudarytas siurblio imitacinis Simulink modelis pateiktas 3 pav. Darbe imituoti naudojamas Lowara FHF serijos 4 kW išcentrinis siurblys. Norint siurbli panaudoti bendrame skysčio lygio valdymo sistemos modelyje, nedimensiniams dydžiams pritaikoma atvirkštinė transformacija.



3 pav. Išcentrinio siurblio imitacinis Simulink modelis
Fig 3. Simulink model of centrifugal pump

Neraiškiosios logikos reguliatorius

Regulatoriaus projektavimas pradedamas apibrėžiant įėjimo kintamųjų skaičių neraiškiosios logikos išvadų sistemos redagavimo lentelėje. Darbe taikomi du įėjimo kintamieji – greičio paklaida e ir jos išvestinė Δe .

Greičio paklaida e nusakoma formule

$$e = \omega_r^* - \omega_{gr.r.}, \quad (11)$$

čia ω_r^* – sūkių greičio nuostato signalas; $\omega_{gr.r.}$ – grįžtamojo ryšio signalas.

Tada apibrėžiamos įėjimo ir išėjimo priklausomybės funkcijos ir sudaroma taisyklių lentelė.

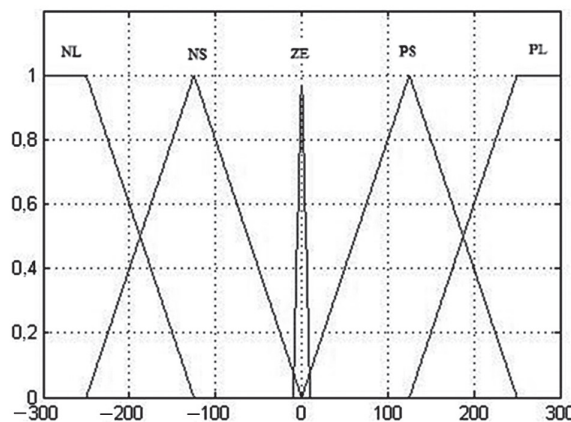
Neraiškiosios logikos reguliatoriaus įėjimo signalų e ir Δe priklausomybės funkcijos pavaizduotos 4 pav., o reguliatoriaus išėjimo signalo priklausomybės funkcijos – 5 pav.

Priklausomybės funkcijos žymimos taip: NL – neigiamoji didelė, NM – neigiamoji vidutinė, NS – neigiamoji maža, ZE – nulinė, PS – teigiamoji maža, PM – teigiamoji vidutinė, PL – teigiamoji didelė.

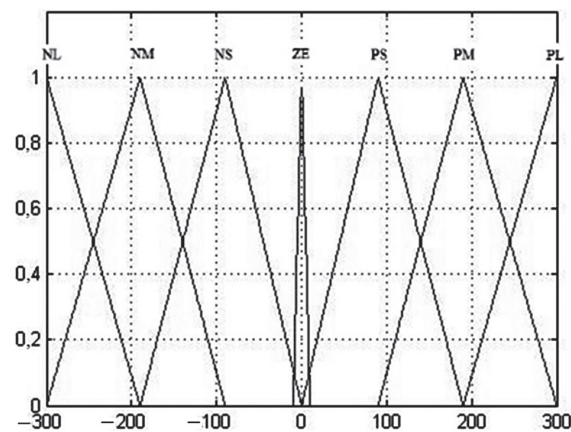
Taisyklių lentelė konfigūruojama atsižvelgiant į žinomas asinchroninio variklio valdymo savybes. Formuojamos *jei...*, ir *jei..., tai...* taisyklės. Jos yra apibrėžiamos taip: jei neraiškiosios logikos reguliatoriaus vieno įėjimo vertė yra ... ir kito įėjimo vertė yra ..., tai valdymo signalas (regulatoriaus išėjimo vertė) yra ... (Lisauskas 2012, Ross 2004).

Neraiškiosios logikos reguliatoriaus lingvistinės taisyklės pateiktos 1 lentelėje.

Neraiškiojo reguliatoriaus kompiuterinis modelis pateiktas 6 pav. Papildomi stiprinimo koeficientai taikomi reguliatoriui optimizuoti.



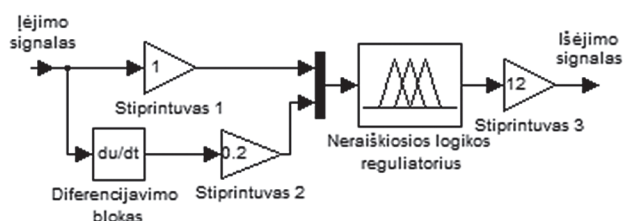
4 pav. Neraiškiosios logikos reguliatoriaus įėjimo signalų (e , rad/s ir Δe) priklausomybės funkcijos
Fig. 4. Fuzzy logic controller input (e , rad/s and Δe) membership functions



5 pav. Neraiškiosios logikos reguliatoriaus išėjimo signalo (U/V) priklausomybės funkcijos
Fig. 5. Fuzzy logic controller output (U/V) membership functions

1 lentelė. Neraiškiosios logikos reguliatoriaus lingvistinės taisyklės
Table 1. Fuzzy logic controller linguistic rule table

Δe e	NL	NS	ZE	PS	PL
NL	ZE	PL	ZE	PL	ZE
NS	NS	ZE	ZE	PL	ZE
ZE	NS	NL	ZE	PL	PS
PS	ZE	NL	PL	ZE	PS
PL	ZE	NL	PS	NL	ZE



6 pav. Neraiškiosios logikos reguliatoriaus Simulink modelis

Fig. 6. Simulink model of Fuzzy logic controller

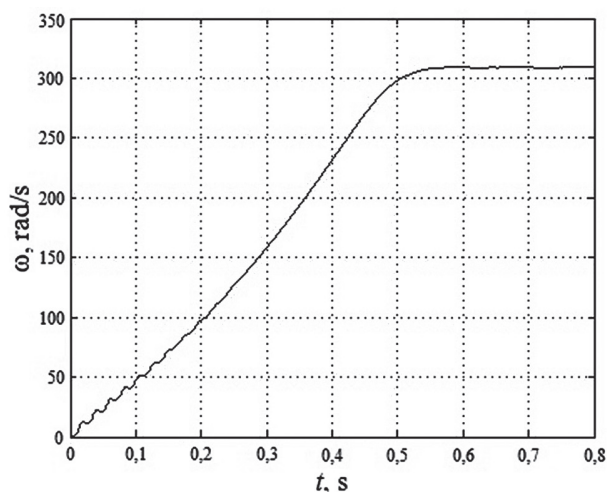
Imitacijos rezultatai

Nagrinėjamo siurblio variklio techniniai duomenys pateikti 2 lentelėje. Variklio dinaminė greičio charakteristika – 7 pav.

2 lentelė. Asinchroninio variklio parametrai

Table 2. Parameters of induction motor

Parametras	Vertė
Vardinė įtampa, V	400
Dažnis, Hz	50
Vardinė srovė, A	7,9
Galia, kW	4
Greitis, aps./min.	2890
Galios koeficientas	0,88
Vardinis momentas	7,9



7 pav. Variklio greičio dinaminė charakteristika

Fig. 7. Speed response of the induction motor

Nusistovėjusi variklio greičio vertė $\omega = 309$ rad/s, pasiekama, kai $t = 0,6$ s.

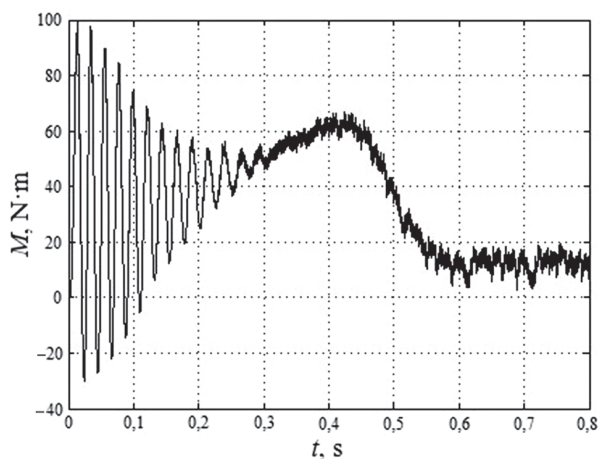
Variklio elektromagnetinio momento dinaminė charakteristika pateikta 8 pav.

Išcentrinio siurblio darbo režimas atitinka ventiliatoriaus apkrovą (Rinkevičienė, Petrovas 2009), kuriai veikiant maitinimo šaltinio įtampos amplitudė turi būti atvirkščiai proporcinga maitinimo tinklo dažnio kvadratui. Apkrovos charakteristika pateikta 9 pav.

Nusistovėjusi apkrovos momento vertė $M_{st} = 12,34$ N·m pasiekama, kai $t = 0,6$ s.

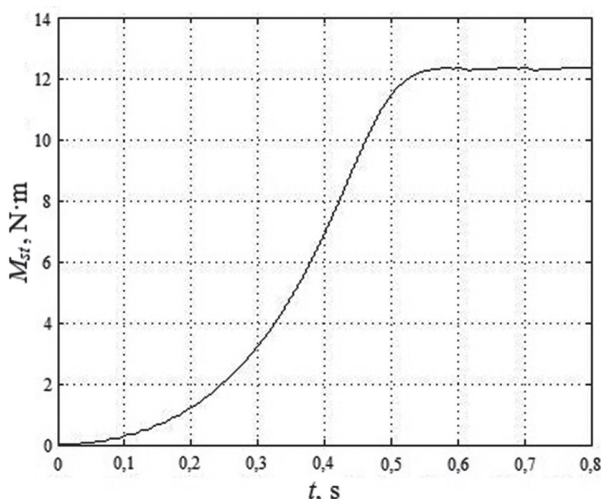
Siurblio $H = f(Q)$ charakteristikos, esant skirtingiems dažniams, pavaizduotos 10 pav.

Charakteristikos žymi staigų kryptį, posvyris 25–30 %. Tokio tipo siurblių slėgis didėjant debitui greitai mažėja.



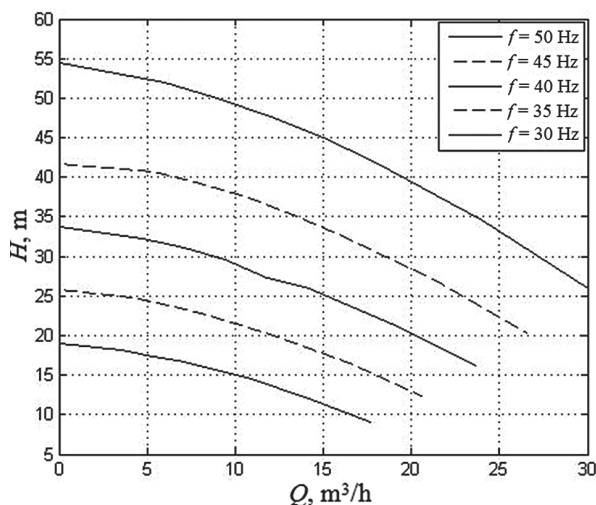
8 pav. Variklio elektromagnetinio momento dinaminė charakteristika

Fig. 8. Motor torque dynamic characteristic



9 pav. Apkrovos momento dinaminė charakteristika

Fig. 9. Load torque dynamic characteristic



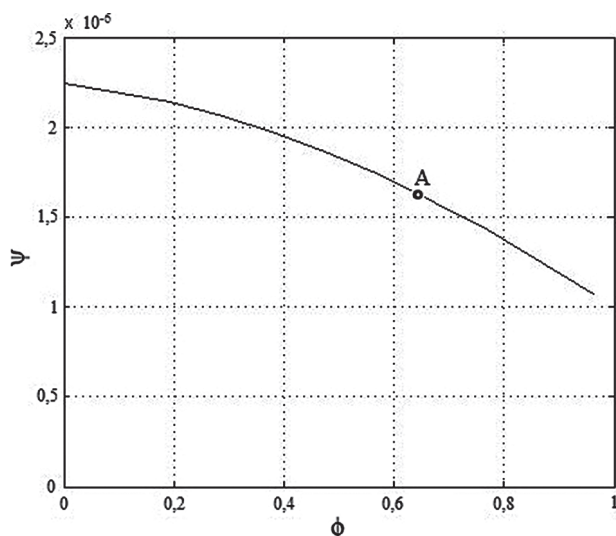
10 pav. Siurblio $H = f(Q)$ charakteristikos
Fig. 10. Pump $H = f(Q)$ characteristics

Nedimensinė siurblio charakteristika pateikta 11 pav. Darbinį sistemos tašką A atitinka $\psi = 0,642$ ir $\phi = 1,649 \cdot 10^{-6}$ slėgio bei debito nedimensinių dydžių vertės. Šiame taške siurblio slėgis prilygsta vamzdymo pasipriešinimams. Didinant debitą, siurblio slėgis dėl hidraulinių nuostolių sumažėja tiek, kad nebeįstengia kompensuoti vamzdymo hidraulinio pasipriešinimo (Aviles 2009).

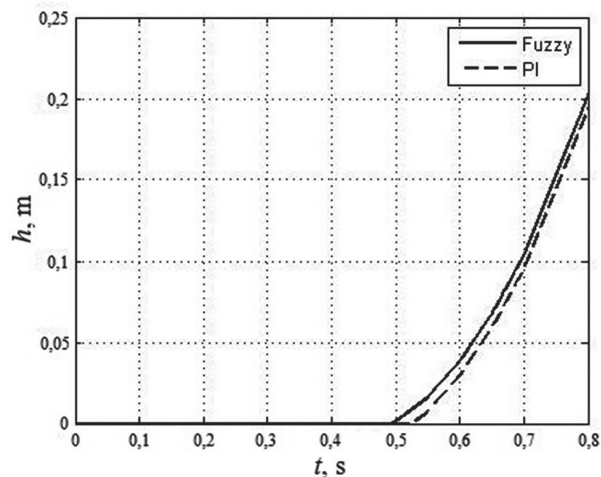
Rezervuaro pripildymo charakteristika naudojant PI ir neraiškiosios logikos reguliatorius pateikta 12 pav.

Pradinis vandens lygis rezervuare yra $h = 0$ m, siurblio debitas $Q = 0$ m³/h, slėgio aukštis $H = 54,4$ m.

Vožtuvas atidaromas varikliui pasiekus nustatytą greitį, kai $t = 0,49$ s, naudojant neraiškiosios logikos reguliatorių ($t = 0,52$ s), kai reguliatorius PI.



11 pav. Nedimensinė siurblio charakteristika
Fig. 11. Pump dimensionless characteristic



12 pav. Rezervuaro pripildymo dinaminės charakteristikos
Fig. 12. Dynamic characteristics of the reservoir filling

Debitas didinamas iki darbinį tašką atitinkančios vertės $Q = 20$ m³/h, esant greičiui $\omega = 309$ rad/s. Slėgio aukštis mažinamas iki $H = 40$ m.

Pasiekus darbinį tašką, kai $t = 0,70$ s, palaikomas pastovus debitas ir slėgio aukštis. Charakteristika įgauna tiesinį pobūdį.

Pasiekus pageidaujamą vandens lygį rezervuare $h = 0,2$ m, siurblys automatiškai išsijungia.

Išvados

1. Sudaryti skysčio lygio valdymo sistemos rezervuaro išcentrinio siurblio ir neraiškiosios logikos reguliatoriaus imitaciniai *Simulink* modeliai sistemos dinamikai tirti.
2. Išcentrinio siurblio veikimo režimas atitinka ventiliatoriaus apkrovą. Nusistovėjusi apkrovos momento vertė $M_{st} = 12,34$ N·m pasiekama, kai $t = 0,6$ s. Asinchroninio variklio greitis $\omega = 309$ rad/s.
3. Gautos siurblio $H = f(Q)$ charakteristikos yra staigiai krintančios. Tokio tipo siurblių slėgis didėjant debitui greitai mažėja.
4. Gauta nedimensinė siurblio charakteristika, apibūdinanti siurblio veikimą esant bet kokiam sukimosi greičiui. Darbinį tašką atitinkančios slėgio ir debito nedimensinės vertės yra $\psi = 0,642$ ir $\phi = 1,649 \cdot 10^{-6}$.
5. Rezervuaro pripildymo charakteristika gauta didinant debitą nuo 0 iki $Q = 20$ m³/h, kai greitis $\omega = 309$ rad/s. Pasiekus darbinį tašką, debitas ir slėgis palaikomi pastovūs. Charakteristika įgauna tiesinį pobūdį.
6. Sistemoje su neraiškiosios logikos reguliatoriumi vožtuvas yra atveriamas greičiau ($t = 0,49$ s) nei sistemoje su PI reguliatoriumi ($t = 0,52$ s). Todėl naudojant neraiškiosios logikos reguliatorių sumažinama rezervuaro pripildymo trukmė.

Literatūra

- Aviles, R. 2009. *Energy conservation in water and wastewater treatment facilities*: WEF Manual of practice No. 32. Alexandria, Virginia: WEF Press. 370 p.
- Kriauciūnas, J.; Kerpė, L. 2013. Skaliariniu būdu valdomos dažninės elektros pavaros imitacinis tyrimas, *Mokslas – Lietuvos ateitis* 5(2): 109–114. <http://dx.doi.org/10.3846/mla.2013.20>
- Lisauskas, S. 2012. *Šiuolaikinės elektros pavaros*: mokomoji knyga. Vilnius: UAB TEV. 100 p. <http://dx.doi.org/10.5755/e01.9786094330971>
- Lisauskas, S.; Rinkevičienė, R. 2010. Model of ventilation system drive with fuzzy controller, *Electronics and Electrical Engineering* 10(106): 13–16.
- Rinkevičienė, R.; Petrovas, A. 2009. Modelling of frequency controlled induction drive with ventilator type load, *Electronics and Electrical Engineering* 6(94): 69–72.
- Ross, T. 2004. *Fuzzy logic with engineering applications*. 2nd ed. University of New Mexico: John Wiley & Sons, Ltd. 652 p.
- Skawinski, G. 2010. *Fuel pump motor-drive systems for more electric aircraft*: Doctoral dissertation. University of Bath. 235 p.
- Valiulis, G. 2005. Skysčio lygio valdymas taikant fuzzy logiką, *Elektronika ir elektrotechnika* 8(64): 65–68.

RESEARCH OF LIQUID LEVEL CONTROL SYSTEM

D. Beištaras

Abstract

This paper presents liquid level control system model and analysis of dynamic characteristics. The system consists of scalar controlled induction motor drive, fuzzy logic controller, water tank and centrifugal pump. Simulink models of water tank, pump and controller are presented. The simulation of the system shows that the use of fuzzy logic controller reduces valve opening time and reservoir filling time.

Keywords: liquid level, centrifugal pump, fuzzy logic, controller.