



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Rokas Miklušis

**NERAIŠKIŲ AIBIŲ LOGIKA PAGRĮSTŲ ADAPTYVIŲ
REGULIATORIŲ KŪRIMAS IR TYRIMAI**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

prof. habil. dr. Rimvydas Simutis

KAUNAS, 2018

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

AUTOMATIKOS KATEDRA

**NERAIŠKIŲ AIBIŲ LOGIKA PAGRĮSTŲ ADAPTYVIŲ
REGULIATORIŲ KŪRIMAS IR TYRIMAI**

Baigiamasis magistro projektas

Valdymo technologijos, 621H66001

Vadovas: prof. habil. dr. Rimvydas Simutis

(data)

(parašas)

Recenzentas: doc. dr. Virginijus Baranauskas

(data)

(parašas)

Projektą atliko: Rokas Miklušis, EMVV-6 gr.

(data)

(parašas)

KAUNAS, 2018



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Rokas Miklušis

(Studento vardas, pavardė)

Valdymo technologijos, 621H66001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Neraiškių aibių logika pagrįstų adaptyvių reguliatorių kūrimas ir tyrimai“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 18 m. _____ d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Roko Miklušio** baigiamasis projektas tema „Neraiškių aibių logika pagrįstų adaptyvių reguliatorių kūrimas ir tyrimai“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Miklušis, Rokas. Neraiškių aibių logika pagrįstų adaptyvių reguliatorių kūrimas ir tyrimai. Valdymo sistemų magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. habil. dr. Rimvydas Simutis; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Automatikos katedra.

Mokslo kryptis ir sritis: Elektros ir elektronikos inžinerija, Technologiniai mokslai

Reikšminiai žodžiai: *adaptyviosios sistemos, PI reguliatoriai, neraiškių aibių logika, procesų modeliai.*

Kaunas, 2018. 72 p.

SANTRAUKA

Šiame darbe buvo apžvelgti adaptyvių valdymo sistemų kūrimo principai, išsamiau išanalizuotos tiesioginio valdymo adaptyviosios sistemos pirmos ir antros eilės objektams su vėlavimu. Išnagrinėta kaip įvairūs objekto modelio parametrai įtakoja pereinamųjų procesų kokybę. Išanalizuota, kaip pagal pereinamojo proceso rezultatus galėtų būti derinami PI reguliatoriaus parametrai. Pasiūlyta metodika tokio derinimo realizavimui. Ši metodika išbandyta modeliavimo būdu ir sukurta neraiškių aibių logikos sistema, kuri realizuoja šią metodiką. Neraiškių aibių logikos sistema išbandyta su objektų modeliais ir parodė šios metodikos efektyvumą ir taikomumą. Metodika pritaikyta realaus objekto reguliatoriaus parametrų derinimui.

Miklušis, Rokas. Development And Investigation Of Adaptive Controllers Based On Fuzzy Logic: Master's thesis in Control systems/ supervisor assoc. prof. Rimvydas Simutis. Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Automation.

Research area and field: Electrical and Electronics Engineering, Technological Sciences

Key words: *adaptive systems, PI controller, fuzzy logic, processes models.*

Kaunas, 2018. 72 p.

SUMMARY

The research is focused on the principles of developing adaptive control systems. The analysis of direct-control adaptive systems for first and second order systems with time delay has been carried out. The effect of various object model parameters on the quality of the transient processes was taken into close consideration. It was analyzed how parameters of PI controller could be tuned according to the results of the transient process. The methodology was suggested for the realization of such tuning. This methodology has been tested by simulation and fuzzy logic system was created, which implements this methodology. Fuzzy logic system was tested with object models has shown effectiveness and applicability of this methodology. The methodology was applied to tune the parameters of real object controller.

TURINYS

LENTELIŲ SĄRAŠAS	7
PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	8
ĮVADAS	13
1 Adaptyviųjų valdymo sistemų kūrimo metodai	15
2 Neraiškių aibių logikos taikymas adaptyviųjų valdymo sistemų kūrimui.....	18
2.1 Neraiškių aibių logika pagrįstas adaptyvus PID reguliatorius skirtas PWM įtampos keitikliui	18
2.2 Savi-reguliuojančio PID tipo Fuzzy adaptyvaus reguliatoriaus skirto ŠVOK sistemai projektavimas ir simuliacija	20
2.3 Optimalus Fuzzy logika pagrįstas adaptyvusis reguliatorius skirtas DFIG vėjo turbino dažnio valdymui	27
2.4 BLDC variklio valdymas adaptyviuoju Fuzzy logika pagrįstu PID reguliatoriumi ...	27
2.5 Adaptyvusis PI reguliatorius paremtas Fuzzy logikos reguliatoriumi skirtas sinchroninio variklio greičio reguliavimui.....	27
2.6 PID reguliatoriaus stiprinimo koeficiento planavimas remiantis Fuzzy sistemomis .	28
2.7 Žiniomis pagrįstas Fuzzy reguliatorius PID parametrų derinimui	28
3 Nestacionariųjų objektų valdymo sistemų kokybės analizė kintant objekto modelio parametrams	29
3.1 Pirmos eilės objekto su vėlavimu analizė.....	29
3.2 Adaptyvios reguliavimo sistemos analizė, kai žinomi kintantys objekto parametrai.	30
3.3 Antros eilės objekto su vėlavimu analizė	44
3.4 Adaptyvios reguliavimo sistemos modeliavimas parametrų adaptavimui naudojant pereinamojo proceso duomenis (pirmos eilės objektai).....	49
3.5 Adaptyvios reguliavimo sistemos modeliavimas parametrų adaptavimui, naudojant antros eilės objekto pereinamojo proceso duomenis (antros eilės objektai).....	54
4 Neraiškių aibių logikos ekspertinė sistema PI reguliatoriaus parametrų derinimui	59
4.1 Sistemos testavimas. Pirmos eilės objektas su vėlavimu	65
4.2 Sistemos testavimas. Antros eilės objektas su vėlavimu	67
4.3 Sistemos taikymas realiam objektui	68
REZULTATAI IR IŠVADOS	71
LITERATŪRA	72

LENTELIŲ SĄRAŠAS

2.1 lentelė. Fuzzy-PD valdymo taisyklių bazė [4].....	22
2.2 lentelė. k_p taisyklių bazė [4].	24
2.3 lentelė. k_d taisyklių bazė [4].	24
2.4 lentelė. k_i taisyklių bazė [4].	24
3.1 lentelė. Regulatoriaus koeficientų kitimas kai proceso stiprinimo koeficientas kinta nuo 1 iki 6.....	33
3.2 lentelė. Regulatoriaus koeficientų kitimas kai proceso stiprinimo koeficientas kinta nuo 6 iki 1.....	34
3.3 lentelė. Regulatoriaus integravimo laiko pastoviosios kitimas kai proceso laiko pastovioji kinta nuo 4 iki 20.....	36
3.4 lentelė. Regulatoriaus integravimo laiko pastoviosios kitimas kai proceso laiko pastovioji kinta nuo 20 iki 4.....	38
3.5 lentelė. Regulatoriaus stiprinimo koeficientų kitimas kai proceso stiprinimo koeficientas kinta nuo 1 iki 6 ir proceso laiko pastovioji kinta nuo 4 iki 20.	40
3.6 lentelė. Regulatoriaus stiprinimo koeficientų kitimas kai proceso stiprinimo koeficientas kinta nuo 1 iki 6 ir proceso laiko pastovioji kinta nuo 20 iki 4.	41
3.7 lentelė. Regulatoriaus stiprinimo koeficientų kitimas kai proceso stiprinimo koeficientas kinta nuo 6 iki 1 ir proceso laiko pastovioji kinta nuo 20 iki 4.	42
3.8 lentelė. Regulatoriaus stiprinimo koeficientų kitimas kai proceso stiprinimo koeficientas kinta nuo 6 iki 1 ir proceso laiko pastovioji kinta nuo 4 iki 20.	43
3.9 lentelė. Modeliuotų procesų minimalios integruotos absoliučios paklaidos IAE. .44	
3.10 lentelė. Antros eilės sistemos regulatoriaus parametrų derinimo lentelė.	45
3.11 lentelė. Regulatoriaus koeficientų kitimas kai kinta tiriamo objekto modelio parametrai.....	48
3.12 lentelė. Objekto parametrų ribinės kitimo reikšmės, kai sistema pradeda dirbti nestabiliai (pereinamasis procesas nenusistovi iki sekančio trikdžio).	50
4.1 lentelė. Neraiškių aibių logikos, skirtos koreguoti regulatoriaus stiprinimo koeficientą, taisyklių bazė.	61
4.2 lentelė. Neraiškių aibių logikos, skirtos koreguoti regulatoriaus integralinę dedamąją, taisyklių bazė.	64

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Netiesioginio derinimo blokinė schema [2].	15
1.2 pav. Tiesioginio adaptyvaus valdymo blokinė schema.	16
2.1 pav. Neraiškių aibių logika pagrįsto PID reguliatoriaus valdomo DC-DC keitiklio schema [3].	19
2.2 pav. Išėjimo signalas be Fuzzy logikos [3].	19
2.3 pav. Išėjimo signalas su Fuzzy logika pagrįstu PID reguliatoriumi [3].	20
2.4 pav. Išėjimo signalas keičiant nuostatą [3].	20
2.5 pav. Įėjimo e priklausomybinė funkcija [4].	22
2.6 pav. Įėjimo e priklausomybinė funkcija [4].	23
2.7 pav. Išėjimo u priklausomybinė funkcija [4].	23
2.8 pav. Įėjimų e ir e priklausomybinės funkcijos [4].	24
2.9 pav. Išėjimų k_p , k_i , k_d priklausomybinės funkcijos [4].	24
2.10 pav. ŠVOK sistemos valdomos Fuzzy-PD reguliatoriaus blokinė schema [4].	25
2.11 pav. ŠVOK sistemos valdomos savi-reguliuojančio PID tipo Fuzzy adaptyviojo reguliatoriaus blokinė schema [4].	25
2.12 pav. Specialios ŠVOK sistemos valdomos savi-reguliuojančio PID tipo Fuzzy adaptyviojo reguliatoriaus algoritmas [4].	26
2.13 pav. Temperatūrų pokytis reguliuojant ją Fuzzy-PD, PID ir adaptyviuoju Fuzzy reguliatoriais [4].	26
2.14 pav. Sklendės atsidarymo laipsnis kai ją valdo Fuzzy-PD, PID ir adaptyvusis Fuzzy reguliatoriai [4].	26
3.1 pav. Tiriama proceso analizės schema Matlab/Simulink aplinkoje.	30
3.2 pav. Tiriama objekto modelio, su nekintančiais parametrais, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.	30
3.3 pav. Tiriama proceso su nekintančiais proceso parametrais analizės schema.	31
3.4 pav. Tiriama proceso modelio DEE blokas.	32
3.5 pav. Tiriama proceso modelio su nekintančiais objekto parametrais reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.	32
3.6 pav. Tiriama proceso su kintančiu proceso stiprinimo koeficientu K_{pr} (1-6) analizės schema.	33
3.7 pav. Tiriama proceso modelio su kintančiu proceso stiprinimo koeficientu K_{pr} reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.	33
3.8 pav. Tiriama proceso su kintančiu proceso stiprinimo koeficientu K_{pr} (1-6) ir pritaikytu adaptyvumu analizės schema.	34
3.9 pav. Tiriama proceso modelio su kintančiu proceso stiprinimo koeficientu K_{pr} (1-6) ir pritaikytu adaptyvumu reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.	34
3.10 pav. Tiriama proceso modelio su kintančiu proceso stiprinimo koeficientu K_{pr} (6-1) ir pritaikytu adaptyvumu reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.	35
3.11 pav. Tiriama proceso su kintančia proceso laiko pastoviaja T_{pr} (4-20) analizės schema.	35
3.12 pav. Tiriama proceso modelio su kintančia proceso laiko pastoviaja T_{pr} (4-20) reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.	36
3.13 pav. Tiriama proceso modelio su kintančia proceso laiko pastoviaja T_{pr} (4-20) ir pritaikytu adaptyvumu reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.	37
3.14 pav. Tiriama proceso modelio su kintančia proceso laiko pastoviaja T_{pr} (20-4) reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.	37

3.15 pav. Tiriamo proceso modelio su kintančia proceso laiko pastoviaja T_{pr} (20-4) ir pritaikytu adaptyvumu reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.	38
3.16 pav. Tiriamo proceso su kintančia proceso laiko pastoviaja T_{pr} (4-20) ir proceso stiprinimo koeficientu K_{pr} (1-6) analizės schema.	39
3.17 pav. Proceso laiko pastoviosios T_{pr} ir stiprinimo koeficiento K_{pr} kitimas.....	39
3.18 pav. Tiriamo proceso modelio su kintančia proceso laiko pastoviaja T_{pr} (4-20) ir stiprinimo koeficientu K_{pr} (1-6) reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.	39
3.19 pav. Tiriamo proceso modelio su kintančia proceso laiko pastoviaja T_{pr} (4-20), stiprinimo koeficientu K_{pr} (1-6) ir pritaikytu adaptyvumu reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.	40
3.20 pav. Tiriamo proceso modelio su kintančia proceso laiko pastoviaja T_{pr} (20-4), stiprinimo koeficientu K_{pr} (1-6) reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.	41
3.21 pav. Tiriamo proceso modelio su kintančia proceso laiko pastoviaja T_{pr} (20-4), stiprinimo koeficientu K_{pr} (1-6) ir pritaikytu adaptyvumu reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.	42
3.22 pav. Tiriamo proceso modelio su kintančia proceso laiko pastoviaja T_{pr} (20-4), stiprinimo koeficientu K_{pr} (6-1) reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.	43
3.23 pav. Tiriamo proceso modelio su kintančia proceso laiko pastoviaja T_{pr} (20-4), stiprinimo koeficientu K_{pr} (6-1) ir pritaikytu adaptyvumu reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.	43
3.24 pav. Tiriamo proceso modelio su kintančia proceso laiko pastoviaja T_{pr} (4-20), stiprinimo koeficientu K_{pr} (6-1) ir pritaikytu adaptyvumu reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.	44
3.25 pav. Antros eilės objekto su vėlavimu ir nekintančiais objekto parametrais analizės schema.	46
3.26 pav. Antros eilės objekto su nekintančiais parametrais reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.	46
3.27 pav. Į tiriamo objekto modelį paduodamo trikdžio vertės.	47
3.28 pav. Tiriamo objekto modelio DEE blokas.	47
3.29 pav. Antros eilės objekto su vėlavimu ir kintančiais objekto parametrais analizės schema.	48
3.30 pav. Antros eilės objekto su kintančiu objekto stiprinimo koeficientu K_{pr} (1-3) ir kintančia objekto laiko pastoviaja T_1 (1-0,3) reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.	48
3.31 pav. Antros eilės objekto su vėlavimu, kintančiais objekto ir regulatoriaus parametrais analizės schema.	49
3.32 pav. Antros eilės objekto su kintančiu objekto stiprinimo koeficientu K_{pr} (1-3), kintančia objekto laiko pastoviaja T_1 (1-0,3) ir pritaikytu adaptyvumu, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.	49
3.33 pav. A_1 , A_2 ir T koeficientų grafinio nustatymo pavyzdys [10].	50
3.34 pav. PI regulatoriaus optimalaus derinimo grafikai: a) - integravimo laiko pastoviosios pataisos koeficientų nustatymo grafikai; b) - stiprinimo koeficiento pataisos koeficientų nustatymo grafikai [10].	51
3.35 pav. Tiriamo objekto modelio reakcijos kreivė iš kurios nustatome slopimo laipsnį ir svyravimų periodą.	51
3.36 pav. Tiriamo objekto modelio, kai objekto stiprinimo koeficientas padidėja 45%, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.	52

3.37 pav. Tiriamo objekto modelio, kai objekto stiprinimo koeficientas padidėja 45% ir reguliatoriaus parametrams pritaikyti pataisos koeficientai, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.....	52
3.38 pav. Tiriamo objekto modelio, kai objekto laiko pastovioji sumažėja 33%, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.	52
3.39 pav. Tiriamo objekto modelio, kai objekto laiko pastovioji sumažėja 33% ir reguliatoriaus parametrams pritaikyti pataisos koeficientai, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.....	52
3.40 pav. Tiriamo objekto modelio, kai objekto vėlinimas padidėja 33%, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.....	53
3.41 pav. Tiriamo objekto modelio, kai objekto vėlinimas padidėja 33% ir reguliatoriaus parametrams pritaikyti pataisos koeficientai, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.	53
3.42 pav. Tiriamo objekto modelio, kai objekto vėlinimas padidėja 15% ir objekto laiko pastovioji sumažėja 20%, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.	53
3.43 pav. Tiriamo objekto modelio, kai objekto vėlinimas padidėja 15%, objekto laiko pastovioji sumažėja 20% ir reguliatoriaus parametrams pritaikyti pataisos koeficientai, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.....	53
3.44 pav. Tiriamo objekto modelio, kai objekto stiprinimo koeficientas padidėja 20% ir objekto laiko pastovioji sumažėja 20%, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai	54
3.45 pav. Tiriamo objekto modelio, kai objekto stiprinimo koeficientas padidėja 20%, objekto laiko pastovioji sumažėja 20% ir reguliatoriaus parametrams pritaikyti pataisos koeficientai, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.	54
3.46 pav. Tiriamo objekto modelio, kai objekto stiprinimo koeficientas padidėja 15% ir objekto vėlinimas padidėja 20%, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai	54
3.47 pav. Tiriamo objekto modelio, kai objekto stiprinimo koeficientas padidėja 15%, objekto vėlinimas padidėja 20% ir reguliatoriaus parametrams pritaikyti pataisos koeficientai, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.	54
3.48 pav. Tiriamo objekto modelio, kai objekto stiprinimo koeficientas padidėja 20%, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.	55
3.49 pav. Tiriamo objekto modelio, kai objekto stiprinimo koeficientas padidėja 20% ir reguliatoriaus parametrams pritaikyti pataisos koeficientai, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.....	55
3.50 pav. Tiriamo objekto modelio, kai objekto vėlinimas padidėja 20%, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.....	55
3.51 pav. Tiriamo objekto modelio, kai objekto vėlinimas padidėja 20% ir reguliatoriaus parametrams pritaikyti pataisos koeficientai, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.	55
3.52 pav. Tiriamo objekto modelio, kai objekto laiko pastovioji T1 sumažėja 30%, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.	55
3.53 pav. Tiriamo objekto modelio, kai objekto laiko pastovioji T1 sumažėja 30%, ir reguliatoriaus parametrams pritaikyti pataisos koeficientai, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.....	55
3.54 pav. Tiriamo objekto modelio, kai objekto stiprinimo koeficientas padidėja 10% ir objekto laiko pastovioji T1 sumažėja 10%, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.	56
3.55 pav. Tiriamo objekto modelio, kai objekto stiprinimo koeficientas padidėja 10%, objekto laiko pastovioji T1 sumažėja 10% ir reguliatoriaus parametrams pritaikyti pataisos koeficientai, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.....	56
3.56 pav. Tiriamo objekto modelio, kai objekto stiprinimo koeficientas padidėja 15% ir objekto laiko pastovioji T2 sumažėja 20%, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.	56

3.57 pav. Tiriamo objekto modelio, kai objekto stiprinimo koeficientas padidėja 15%, objekto laiko pastovioji T2 sumažėja 20% ir regulatoriaus parametrams pritaikyti pataisos koeficientai, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.....	56
3.58 pav. Tiriamo objekto modelio, kai objekto laiko pastovioji T1 sumažėja 20% ir objekto laiko pastovioji T2 sumažėja 20%, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.	57
3.59 pav. Tiriamo objekto modelio, kai objekto laiko pastovioji T1 sumažėja 20%, objekto laiko pastovioji T2 sumažėja 20% ir regulatoriaus parametrams pritaikyti pataisos koeficientai, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.....	57
3.60 pav. Tiriamo objekto modelio, kai objekto laiko pastovioji T1 sumažėja 10% ir objekto vėlinimas padidėja 10%, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.	57
3.61 pav. Tiriamo objekto modelio, kai objekto laiko pastovioji T1 sumažėja 10%, objekto vėlinimas padidėja 10% ir regulatoriaus parametrams pritaikyti pataisos koeficientai, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.	57
3.62 pav. Tiriamo objekto modelio, kai objekto stiprinimo koeficientas padidėja 10%, objekto laiko pastovioji T1 sumažėja 10% ir objekto laiko pastovioji T2 sumažėja 10%, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.....	58
3.63 pav. Tiriamo objekto modelio, kai objekto stiprinimo koeficientas padidėja 10%, objekto laiko pastovioji T1 sumažėja 10%, objekto laiko pastovioji T2 sumažėja 10% ir regulatoriaus parametrams pritaikyti pataisos koeficientai, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.	58
4.1 pav. Neraiškių aibių logikos PI regulatoriaus parametrų derinimo ekspertinės sistemos struktūrinė schema.....	59
4.2 pav. Įėjimo ψ priklausomybės funkcijos k_k koeficientui.....	60
4.3 pav. Įėjimo T_p priklausomybės funkcijos k_k koeficientui.....	60
4.4 pav. Išėjimo k_k priklausomybės funkcijos.....	61
4.5 pav. Neraiškių aibių logikos, skirtos koreguoti regulatoriaus stiprinimo koeficientą, erdvinė diagrama.....	62
4.6 pav. Įėjimo ψ priklausomybės funkcijos k_i koeficientui.	63
4.7 pav. Įėjimo T_p priklausomybės funkcijos k_i koeficientui.	63
4.8 pav. Išėjimo k_i priklausomybės funkcijos.....	64
4.9 pav. Neraiškių aibių logikos, skirtos koreguoti regulatoriaus integralinę dedamąją, erdvinė diagrama.....	65
4.10 pav. Tiriamo pirmos eilės objekto modelio, kai objekto parametrai nekinta, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.	66
4.11 pav. Tiriamo pirmos eilės objekto modelio, kai objekto stiprinimo koeficientas padidėja 48%, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.....	66
4.12 pav. Tiriamo pirmos eilės objekto modelio, kai objekto stiprinimo koeficientas padidėja 48% ir pritaikyta neraiškių aibių logikos sistema, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.....	66
4.13 pav. Tiriamo antros eilės objekto modelio, kai objekto parametrai nekinta, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.	67
4.14 pav. Tiriamo antros eilės objekto modelio, kai objekto stiprinimo koeficientas padidėja 40%, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.....	67
4.15 pav. Tiriamo antros eilės objekto modelio, kai objekto stiprinimo koeficientas padidėja 40% ir pritaikyta neraiškių aibių logikos sistema, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.....	68
4.16 pav. Pozicionavimo sistemos sinchroninis variklis FESTO EMMS-AS-55-S-TM.	68

4.17 pav. Pozicionavimo sistemos variklio valdiklis FESTO CMMP-AS-C5-3A-M0.	68
4.18 pav. Pozicionavimo sistemos diržinė ašis FESTO EGC-50-500-TB-KF-0H-GK.	68
4.19 pav. Tiriamo objekto reguliatoriaus parametrai.	69
4.20 pav. Tiriamo objekto pereinamieji procesai.	69
4.21 pav. Tiriamo objekto reguliatoriaus parametrai su pritaikytais korekcijos koeficientais.	70
4.22 pav. Tiriamo objekto pereinamieji procesai, kai reguliatoriaus parametrams pritaikyti pataisos koeficientai.	70

ĮVADAS

Adaptyvios valdymo sistemos naudojamos kai proceso dinaminis modelis yra nežinomas ir/arba kinta. Adaptyvių valdymo sistemų tikslas yra, išlaikyti arba pasiekti reikalingą valdymo sistemos efektyvumą. Šiam tikslui pasiekti, sistema automatiškai realiu laiku koreguoja regulatoriaus parametrus. Jeigu sistemai nėra taikomi aukšti reguliavimo kokybės reikalavimai, tada ir nežinomos dinamikos procesai gali būti sėkmingai valdomi naudojant pastovius regulatoriaus parametrus. Tačiau, kai sistemai yra taikomi aukštesni reguliavimo kokybės reikalavimai, tada reikia pasirinkti tobulesnes reguliavimo sistemas. Pastaruoju metu adaptacijos metodų tyrimai paprastai yra nukreipti į adaptyvių valdymo sistemų kūrimą ir tobulinimą. Tačiau pramonėje žymiai plačiau taikomi automatinio derinimo (angl. auto-tuning) ir stiprinimo numatymo (angl. gain scheduling) metodai.

Kai sistemos dinaminio modelio parametrai yra nežinomi bet nekinta (tam tikrame intervale) valdiklio parametrai gali būti teisingai parinkti tik žinant sistemos modelio parametrus. Šiuo atveju sistemos valdymui gali būti naudojami standartiniai regulatoriai, kurių parametrai parenkami naudojant uždaro kontūro automatinio derinimo metodus. Tokiu atveju adaptacijos poveikis mažėja bėgant laikui. Pasikeitus sistemos darbo sąlygoms adaptacijos procedūra privalo būti paleidžiama iš naujo.

Stiprinimo numatymo metodas yra taikomas sistemoms, kurių dinamikos pokyčius galima numatyti, remiantis matavimo signalais. Sistemos naudojančios šį metodą paprastai yra lengvai realizuojamos ir turi geras stabilumo charakteristikas. Projektuojant stiprinimo numatymo sistemas yra naudojamas automatinis derinimas, kad sudaryti stiprinimo numatymo priklausomybes.

Kita adaptyvių valdymo sistemų grupė apima sistemas, kurių dinaminio modelio parametrų reikšmės nenuspėjamai kinta bėgant laikui. Tokios situacijos pasitaiko dėl nematuojamų aplinkos sąlygų pasikeitimo (pvz. roboto rankos apkrova keičia dinamines sistemos charakteristikas) arba kai netiesinė sistema yra aproksimuojama tiesiniu modeliu. Tokia sistema taip pat gaunama kai sistemos parametrai keičiasi palaipsniui pavyzdžiui dėl įrenginių susidėvėjimo arba užterštumo. Tokie sistemos pasikeitimai negali būti kompensuojami naudojant stiprinimo numatymo metodą, bet gali būti įvertinti, taikant adaptacijos metodus [1]. Šiuo atveju automatinis derinimas gali būti naudojamas reguliavimo sistemos įjungimo metu, kad nustatyti pradines adaptyvaus regulatoriaus parametrų reikšmes.

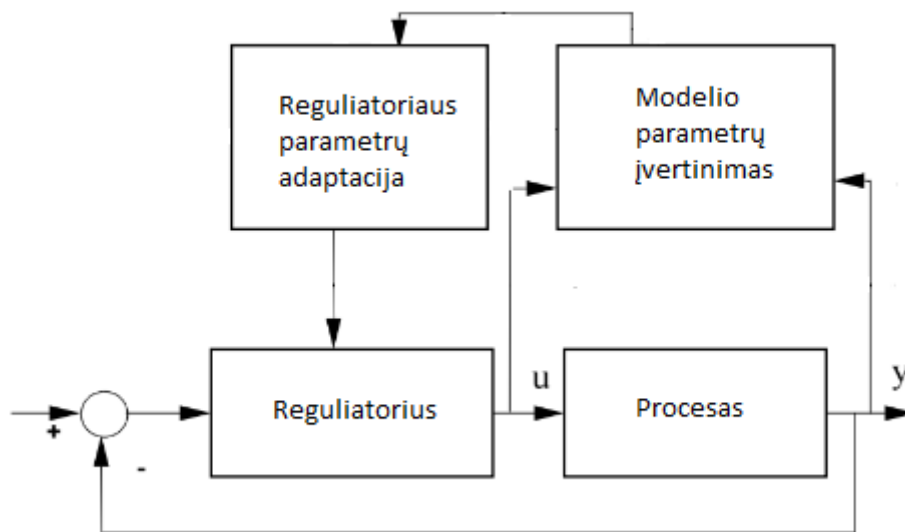
Šio magistrinio darbo tikslas yra, išanalizuoti adaptyviojo valdymo principus ir pasiūlyti tiesioginio adaptyviojo valdymo sistemą taikant neraiškių aibių logiką. Šiam tikslui pasiekti iškeliami darbo uždaviniai:

1. Išanalizuoti adaptyviojo valdymo principus ir tiesioginio adaptyviojo valdymo sistemas.
2. Atlikti literatūroje žinomų neraiškių aibių logikos sistemų taikymo adaptyviame valdyme analizę.
3. Išanalizuoti, kaip tipinių procesų modelių parametrų kitimas įtakoja valdymo sistemų kokybę.
4. Sukurti tiesioginio adaptyviojo valdymo sistemą pasitelkiant neraiškių aibių logiką ir ištirti jos veikimo efektyvumą.
5. Apibendrinti darbo rezultatus ir pateikti išvadas.

1 Adaptyviųjų valdymo sistemų kūrimo metodai

Adaptyvus reguliatorius, tai toks reguliatorius, kurio parametrai derinami nepertraukiamai, pritaikant prie proceso dinamikos ir trikdančiųjų poveikių pakeitimo. Regulatoriaus parametrai gali būti derinami netiesiogiai arba tiesiogiai įvertinamais realiuoju laiku proceso parametrais. Gali būti tiek grįžtamojo ryšio, tiek tiesioginio ryšio valdymo sistemų reguliatorių derinimo parametru adaptacija [2].

Netiesioginis derinimas dažniausiai paremtas proceso modelių naudojimu. Netiesioginio derinimo sistemos gali būti atvaizduotos apibendrinta blokine schema, pateikta 1.1 pav.



1.1 pav. Netiesioginio derinimo blokinė schema [2].

Šio tipo sistemose yra parametru įvertinimo blokas, kuris nustato proceso modelio parametrus, remdamasis proceso įėjimų ir išėjimų matavimais. Taip pat yra pavaizduotas regulatoriaus adaptacijos blokas, kuris pagal proceso modelį apskaičiuoja regulatoriaus parametrus. Modelio parametrai gali būti įvertinami rekurentiniu arba vienkartinio būdais [2].

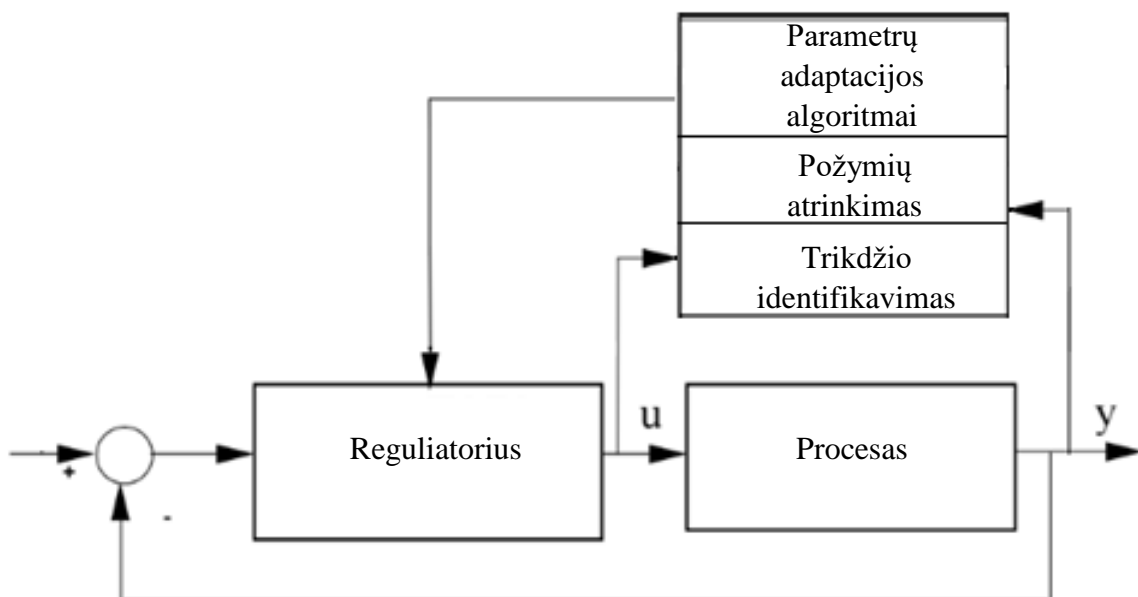
Pagrindiniai tiesioginių metodų uždaviniai yra rasti tinkamus požymius, kurie apibūdina svarbias uždarnosios sistemos savybes ir rasti tinkamus regulatoriaus parametru keitimo būdus, su kuriais įmanoma gauti tenkinamus sistemos kokybės rodiklius [2].

Dauguma PID reguliatorių, dirbančių pramonėje, suderinti rankomis. Dažnai automatikos inžinieriai parenka regulatoriaus parametrus euristiciniu metodu (paremtu ankstesnės patirties analize), stebėdami uždarnosios sistemos reakciją į šuoliškus nuostato pokyčius. Euristicinė patirtis sukaupiama, analizuojant skirtingų derinimo parametru verčių sistemos reakcijas, taip pat sistemos darbo modeliavimu pavyzdžiais. Euristicinės derinimo taisyklės gali būti sukauptos duomenų bazėse deterministinių ir neraiškių (*fuzzy* – toliau šiame magistriniame darbe neraiškių aibių sistemas

vadinsime *fuzzy* sistemomis) taisyklių forma. Šias taisykles naudoja komerciniai adaptyvūs reguliatoriai [2].

Dauguma naudojamų adaptacijos algoritmų pasyviai laukia nuostato pokyčių ar pagrindinės apkrovos trikdančiųjų poveikių. Kai tai įvyksta, įvertinami sistemos savybes apibūdinantys parametrai: slopimo laipsnis, perreguliavimas, svyravimų periodas ir statinis stiprinimo koeficientas. Remiantis įvertintais sistemos parametrais ir parinktomis derinimo taisyklėmis, nustatomi reguliatoriaus derinimo parametrai, kurie palaiko pageidaujamas sistemos kokybės rodiklius [2]. Tiesioginio adaptyvaus valdymo blokinė schema pateikta 1.2 pav.

Adaptacija tiesioginio ryšio reguliatoriams (trikdžio kompensatoriams) ypač reikalinga. Tai yra labai efektyvus metodas, kai sistemą trikdantieji poveikiai gali būti matuojami. Tiesioginio ryšio valdymo sistemoms realizuoti taip pat reikia sudaryti adekvačius proceso dinamikos modelius. Šias valdymo sistemas sunku suderinti pagal poreikį, nes operatorius paprastai negali manipuluoti adaptacijai reikalingais išoriniais trikdžiais. Norint suderinti tiesioginio ryšio reguliatorių, reikia sulaukti tinkamo trikdančiojo poveikio [2].



1.2 pav. Tiesioginio adaptyvaus valdymo blokinė schema.

Neraiški stiprinimo numatymo logika (angl. *fuzzy gain scheduling*) leidžia sukurti dėl paprastumo įdomius valdymo algoritmus. Šis valdymo metodas geriausiai tinka netiesiniams procesams, kurių netiesiškumas nedidelis, tačiau paprasti tiesiniai reguliatoriai negali užtikrinti reikiamos reguliavimo kokybės. Neraiškios logikos stiprinimo numatymo technika remiasi keletu tiesinių reguliatorių panaudojimu proceso suskaidytų būsenų erdvėje. Aukštesniojo lygio reguliatorius neraiškios logikos taisyklėmis nustato, kurio lokalinio reguliatoriaus algoritmas turi būti vykdomas. Remiantis žinomais lokalinių reguliatorių parametrais atskirų būsenos sričių aplinkoje,

neraiškios logikos reguliatorius, skirtingai nuo įprastinio stiprinimą numatančio reguliatoriaus, gali dinamiškai interpoliuoti reguliatoriaus parametrus naudojant neraiškia logiką (angl. *fuzzy logic*). Šio tipo reguliatoriui derinti naudojami lokaliniai modeliai ir taip išvengiama įprastų neraiškios logikos reguliatorių derinimo problemų. Įvairių stiprinimo numatymą naudojančių PID reguliatorių darbo modeliavimas parodė, kad reguliatoriai, paremti stiprinimo numatymu, su neraiškia logika, reguliavimo kokybės požiūriu yra pranašesni, lyginant su įprastiniais stiprinimą numatančiais reguliatoriais, ir gali būti prilyginti prie adaptyvių PID reguliatorių.

2 Neraiškių aibių logikos taikymas adaptyviųjų valdymo sistemų kūrimui

Toliau panagrinėsime plačiausiai literatūroje minimus šaltinius apie neraiškių aibių logikos taikymą adaptyviųjų reguliatorių kūrimui.

2.1 Neraiškių aibių logika pagrįstas adaptyvus PID reguliatorius skirtas PWM įtampos keitikliui

Šiame straipsnyje autoriai pateikia neraiškių aibių logika pagrįsto PID reguliatoriaus skirtą valdyti impulso pločio moduliacijos metodu veikiančią DC-DC įtampos keitiklį. Keitiklio perjungimo dažnis 100 KHz. Atliktas kompiuterinis modeliavimas tam, kad „fuzifikuoti“ (įvesti neraiškumą) įėjimus ir jų narystės funkcijas, pateikti taisykles jungiančias įėjimus ir išėjimus ir „defuzifikuoti“ (eliminuoti neraiškumą) išėjimo parametrus. Iš modeliavimo rezultatų matyti, kad neraiškių aibių logika pagrįsto PID reguliatoriaus valdymo technika suteikia robustinį valdymą netiesinei galios elektronikos kintančiai struktūrai. Iš plataus atliktų tyrimų spektro, kuriuose buvo keičiama užduotis, ir apkrovos trikdžiai, matyti jog pasiūlytas neraiškių aibių logika pagrįstas PID reguliatorius veikia geriau nei ne adaptyvusis PID reguliatorius, tai matyti iš proceso nusistovėjimo laiko, trukmės per kurį pasiektas nuostatas, bei įtampos pulsacijos išėjime [3].

Fuzzy PID (toliau FPID) reguliatorius yra naudojamas norint pasiekti geidžiamų rezultatų. Neraiškių aibių logika atlieka svarbų vaidmenį, tvarkantis su neapibrėžtumais tuo atveju kai judesių valdyme reikia priimti sprendimus.

Pagrindinė užduotis aprašoma šiame straipsnyje yra parodyti, jog tenkinantys įtampos reguliavimo rezultatai gali būti pasiekti be sudėtingų matematinių modelių. Šiam įtampos DC-DC keitikliui pritaikant PID reguliatorių, kuris yra valdomas *Fuzzy* logika.

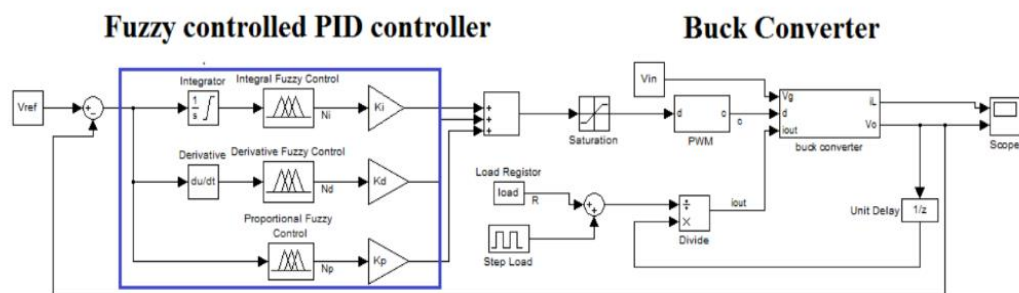
Pagrindinis šio uždavinio kriterijus yra suprojektuoti robustinį DC-DC keitiklį. Keitiklis gauna DC įtampą į įėjimą ir išduoda DC įtampą išėjime kuri yra konstanta. Išėjimo įtampa daugiausia priklauso nuo impulso pločio moduliacijos signalo, kuris naudojamas perjungti, darbinio ciklo. Tačiau, net jeigu darbinis ciklas yra sutvarkomas, išėjimo įtampa gali svyruoti nuo įvairių apkrovų pajungtų į išėjimą. Tikslas yra valdyti impulso pločio moduliacijos bangos darbinį ciklą, nepriklausomai nuo apkrovos pajungtos į išėjimą. *Fuzzy* logika yra paskirstyta į dvi dalis:

- „fuzifikavimas“ (Neraiškumo įvedimas)
- „defuzifikavimas“ (Neraiškumo eliminavimas)

Per fuzifikavimo procesą, dvi diskretinės grupės A ir B yra susiejamos viena su kita tokiam pat diapazone kaip ir pogrupiai juose. Šie pogrupiai iš abiejų pusių yra susieti su „ir“ ir „arba“ funkcijomis. Priklausomybės funkcijos apibrėžia šią idėją ir dirba pagal ją. Pogrupiai yra apibrėžiami skirtingomis formomis, tokiomis kaip trikampis, trapecija ir t.t. Kaip visuma yra gaunamas išėjimo

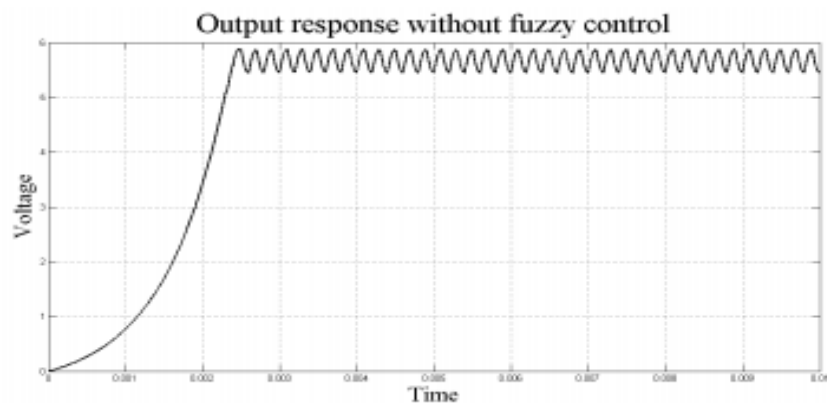
signalas per visą diapazoną. Per defuzifikavimą yra gaunamas tik vienas išėjimo taškas iš visos išėjimų kreivės. Visas kreivės plotas yra apskaičiuojamas ir tada ploto mediana yra gaunama kaip vienas išėjimo signalas. Šis procesas yra vadinamas centroido skaičiavimas [3].

Neraiškių aibių logika pagrįsto PID regulatoriaus valdomo DC-DC keitiklio schema yra pateikta 2.1 pav. Schema iš esmės yra padalinta į kelis blokus, *Fuzzy* logika pagrįstas PID reguliatorius, impulso pločio moduliacija ir keitiklis.

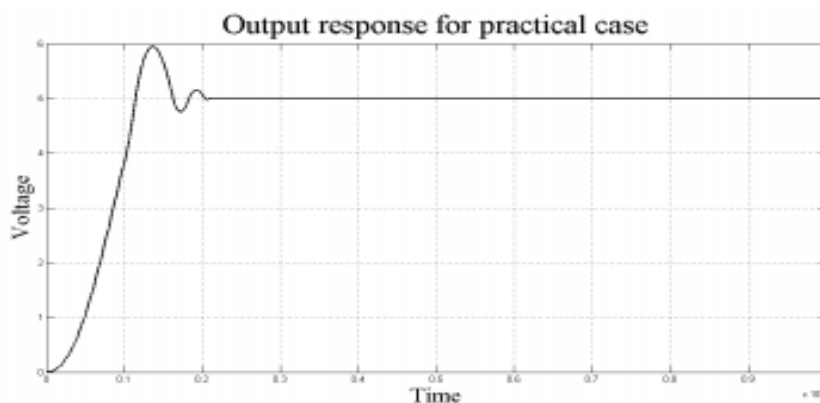


2.1 pav. Neraiškių aibių logika pagrįsto PID regulatoriaus valdomo DC-DC keitiklio schema [3].

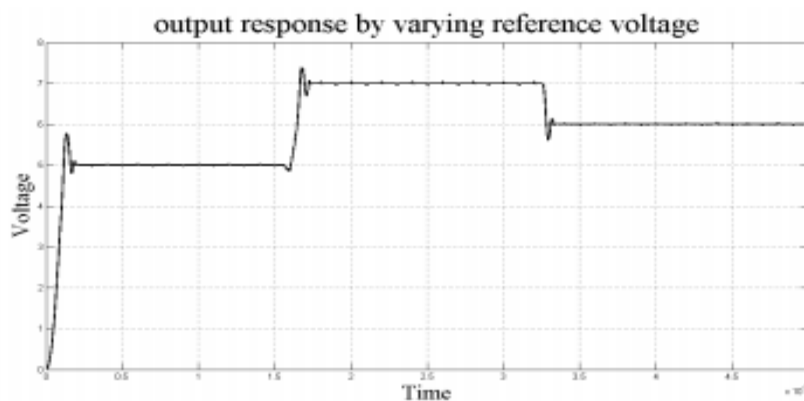
Iš 2.2 pav. matyti, kad sistemos be *Fuzzy* logikos išėjimas niekad nepasiekia norimų 5V efektyviai. Įtampos pulsacijos yra per daug akivaizdžios. 2.3 pav. matome su *Fuzzy* logika, nebeliko svyravimų. 2.4 pav. matome kaip sistema su neraiškių aibių logika pagrįstu PID reguliatoriumi reaguoja į užduoties pokyčius, kurie buvo 5V, paskui 7V ir galiausiai 6V.



2.2 pav. Išėjimo signalas be Fuzzy logikos [3].



2.3 pav. Išėjimo signalas su Fuzzy logika pagrįstu PID reguliatoriumi [3].



2.4 pav. Išėjimo signalas keičiant nuostatą [3].

2.2 Savi-reguliuojančio PID tipo *Fuzzy* adaptyvaus reguliatoriaus skirto ŠVOK sistemai projektavimas ir simuliacija

Atliekamas specialios ŠVOK (šildymo, vėdinimo, oro kondicionavimo) sistemos su dviem skirtingomis zonomis kuriose kinta debitas modeliavimas bei išmanusis valdymas. Sistemos sub-modeliai buvo gauti išvedant šilumos perdavimo iš šilumos praradimo šiuose dviejuose zonose dėl laidumo, konvekcijos, šaldymo ir ventiliatoriaus. Visi ŠVOK sistemos kintančio debito modeliai gauti naudojant MATLAB/SIMULINK programinį paketą. PID parametrai buvo gauti naudojant *Fuzzy* rinkinius. Dėl žmonių patogumo dviejų skirtingų zonų temperatūra buvo sumažinta 5 C°. Labiausiai pavykę rezultatai buvo gauti taikant savi-reguliuojantį PID tipo *Fuzzy* adaptyvųjį reguliatorių, lyginant su *Fuzzy* PD-tipo ir klasikiniu PID reguliatoriumi. Gauti rezultatai yra pateikiami grafine forma [4].

Fuzzy reguliatoriai yra plačiai naudojami kur sistemos dinamika yra arba labai sudėtinga arba rodo labai netiesines charakteristikas. *Fuzzy* valdymo schema naudinga objektams kuriems kyla problemų gaunant matematinius modelius arba objektams kurie susiduria su naudingumo charakteristikų apribojimais naudojant tradicinius tiesinius valdymo metodus. *Fuzzy* reguliatorių projektavimas yra paremtas žmonių patirtimi, tai reiškia jog valdyti sistemą nereikia matematinių modelių. Dėl šio privalumo *Fuzzy* logika pagrįstos valdymo schemas buvo įgyvendintos daugelyje

pramonės šakų. Nors *Fuzzy* buvo sėkmingai lyginamas su klasikiniiais reguliatoriais, projektavimas priklauso nuo operatoriaus patirties ir žinių, nuo lingvistinių taisyklių išsiaiškinimo. Siekiant palengvinti šių taisyklių išsiaiškinimą, *MacVicar-Whelan* pristatė keletą bendrų taisyklių. Tačiau valdymo taisyklių rinkiniai yra sunkiai perdaromi į tinkančius naudoti *Fuzzy* sistemoje. Siekiant panaikinti šią neigiamą sąlygą, gali būti projektuojami adaptyvūs *Fuzzy* reguliatoriai. Daug tyrimų buvo atlikta sujungiant *Fuzzy* ir PID (įskaitant ir PD, PI) reguliatorius. *Fuzzy* logikos į PID reguliatorių taikymas gali būti skirstomas į dvi dideles grupes, pagal tipą.

- *Fuzzy* sistema realiu laiku derina klasikinio PID reguliatoriaus parametrus pagal *Fuzzy* žinių bazę ir *Fuzzy* išvadas, o tada klasikinis PID reguliatorius generuoja valdymo signalą.
- *Fuzzy* yra suprojektuojamas kaip lingvistinių valdymo taisyklių rinkinys. Valdymo signalas yra tiesiogiai išvedamas iš žinių bazės ir *Fuzzy* išvadų.

Kito tipo reguliatoriai yra vadinami PID tipo *Fuzzy* reguliatoriai, dėl jų įėjimo išėjimo ryši. Struktūra yra analogiška klasikiniam PID reguliatoriui. Daug skirtingų reguliavimo metodologijų yra siūloma literatūroje, pvz.: automatinis reguliavimas, savi-reguliavimas, modelio atpažinimas, dirbtinis intelektas ir optimizavimo metodai.

Remiantis šia informacija buvo modeliuojama speciali ŠVOK sistema su kintančiu debitu, naudojant MATLAB/SIMULINK. k_p, k_i, k_d PID parametrai buvo nustatyti naudojant savi-reguliuojantį PID tipo *Fuzzy* adaptyvųjį reguliatorių. Pasiūlyto valdymo algoritmas yra palyginamas su klasikiniu PID ir *Fuzzy*-PD tipo reguliatoriais. Modeliavimo rezultatai parodė jog siūlomas reguliatorius yra geresnis nei kiti [4].

Savi-reguliuojantis PID tipo *Fuzzy* reguliatorius yra automatinis adaptyvusis reguliatorius kuris yra projektuojamas naudojant pavienį *Fuzzy* loginį reguliatorių tam, jog reguliuoti PID parametrus realiu laiku pagal *Fuzzy* valdymo taisykles. Regulatorius naudoja paklaidą ir paklaidos pokytį kaip įėjimus ir gali keisti savi-reguliacijos parametrus, pagal laike kintančius e ir \dot{e} .

$$u(k) = k_p e(k) + k_i \sum_{i=0}^k e(i) + k_d [e(k) - e(k-1)] \quad (2.1)$$

kur, k_p – reguliatoriaus stiprinimas; $k_i = \frac{k_p T}{T_i}$; $k_d = \frac{k_p T_D}{T}$; T – imties laikas, T_i – integralinis laiko parametras; T_D – diferencialinis laiko parametras [4].

Todėl, kad siūlomas *Fuzzy* savi-reguliuojantis PID reguliatorius siekia pagerinti PID reguliatoriaus valdymo charakteristikas, jis turi paprastą PID reguliatoriaus struktūrą ir dėl to nėra reikalo keisti jokių esamos techninės įrangos dalių. *Fuzzy* savi-reguliuojančio PID parametrus tikslas

yra išsiaiškinti *Fuzzy* priklausomybines funkcijas tarp trijų PID parametų ir e , \dot{e} . Jis be paliovos darbo metu tikrina e ir \dot{e} , tada realiu laiku reguliuoja tris parametrus pagal *Fuzzy* valdymo taisykles tam, kad valdomi objektai pasiektų geresnį dinamišką pastovų veikimą.

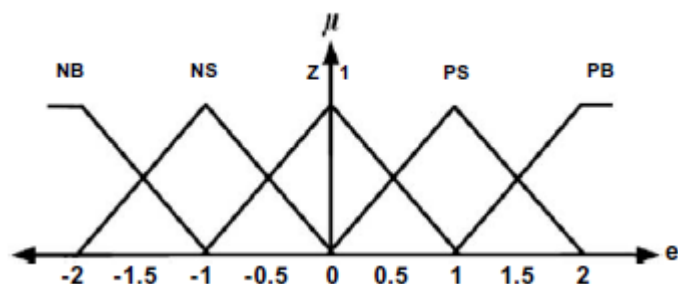
Savi-reguliuojantis adaptyvusis valdymo metodas buvo pritaikytas ŠVOK sistemai. Buvo surastas optimalus valdymo metodas, reikalingas reguliuoti parametų vertes tam, kad šildytuvai palaikytų užduotas temperatūras ir drėgnumą.

Pirmiausiai, yra naudojama matuojamų skirtingų zonų temperatūrų T1 ir T2 paklaida ir paklaidos pokytis kaip įėjimas *Fuzzy*-PD reguliatoriui. Sistemoje yra naudojamas *Mamdani Fuzzy* išvados metodas su dviem įėjimais ir vienu išėjimu. Išėjimas (valdymo kintamasis), kuris yra šaldomo oro debitas kuris yra tiekiamas į zonas, yra nustatomas priklausomai nuo aprašytos e ir \dot{e} taisyklių bazės, su tikslu sumažinti paklaidą.

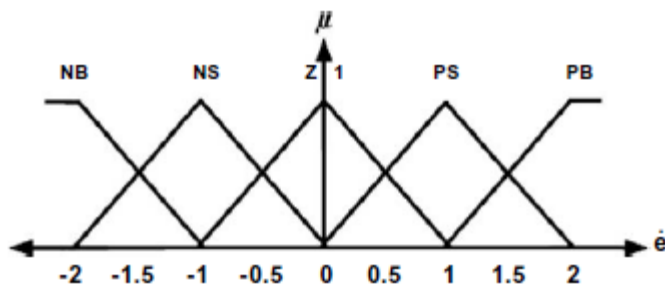
Kai yra nustatoma taisyklių bazė, 2.1 lentelė., tada reikia nustatyti priklausomybines e , \dot{e} ir u funkcijas kurios yra pavaizduotos 2.5 pav., 2.6 pav., 2.7 pav.

2.1 lentelė. *Fuzzy*-PD valdymo taisyklių bazė [4].

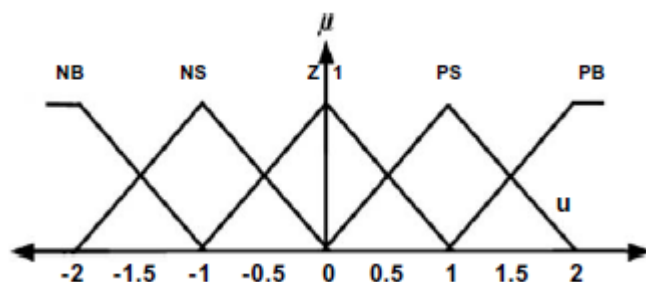
		\dot{e}				
		NB	NS	Z	PS	PB
e	NB	NB	NB	NS	NS	Z
	NS	NB	NS	NS	Z	PS
	Z	NS	NS	Z	PS	PS
	PS	NS	Z	PS	PS	PB
	PB	Z	PS	PS	PB	PB
	Tref<0					



2.5 pav. Įėjimo e priklausomybinė funkcija [4].



2.6 pav. Įėjimo e priklausomybinė funkcija [4].



2.7 pav. Išėjimo u priklausomybinė funkcija [4].

Priklausomybinė funkcija yra kreivė kuri apibrėžia kaip kiekvienas taškas įėjimo erdvėje yra nurodomas priklausomybiniai reikšmei tarp 0 ir 1. Šiuo atveju trikampinės priklausomybinės funkcijos yra naudojamos visiems kintamiesiems ir $\{-2, -1.5, -1, -0.5, 0, 0.5, 1.5, 2\}$ fizinė sritis yra parinkta visiems kintamiesiems, naudojant bandymų ir klaidų metodą.

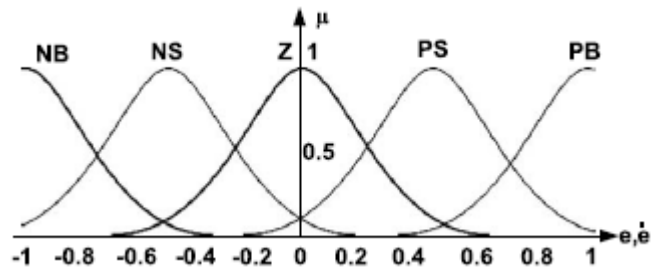
Fuzzy kintamieji taisyklių bazei yra apibrėžiami kaip: $e, \dot{e}, u = \{\text{paklaida, paklaidos pokytis, valdymo kintamasis } \{\text{NB (Neigiamas didelis), NS (Neigiamas mažas), Z (Nulis), PS (Teigiamas mažas), PB (Teigiamas didelis)}\}, [-2, 2]$.

Fuzzy taisyklių bazė yra sudaryta, naudojant kelias IF ir THEN sąlygas, prielaidas ir visų sąlygų rezultatų, kurie yra *Fuzzy* sprendimai. 2.1 lentelė. rodo, jog *Fuzzy*-PD tipo regulatoriaus taisyklių bazę apibrėžia 25 taisyklės.

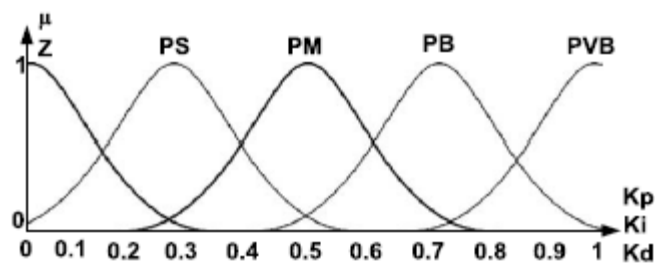
Palyginimo tikslams buvo pritaikytas savi-reguliuojantis PID tipo *Fuzzy* adaptyvusis reguliatorius tai pačiai sistemai. Apjungtos klasikinio PID ir *Fuzzy* reguliatorių teorijos. PID parametrų k_p, k_i, k_d reikšmės buvo adaptyviai nustatomos kiekvieną laiko žingsnį naudojant dinaminį *Fuzzy* logikos reguliatorių. Šiuo atveju *Fuzzy* reguliatorius turi du įėjimus, e ir \dot{e} ir tris išėjimus, k_p, k_i, k_d .

Visiems kintamiesiems buvo naudojamos *Gauss* priklausomybinės funkcijos (10, 11 pav.). Fizinė įėjimų (e, \dot{e}) sritis - $\{-1, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2, 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1\}$, išėjimų (k_p, k_i, k_d) - $\{0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1\}$. Šios įėjimų ir išėjimų sritys parinktos naudojant bandymų ir klaidų metodą. *Fuzzy* kintamieji taisyklių bazėje yra aprašomi taip: $\{\text{paklaida, paklaidos pokytis, } \{\text{NB (Neigiamas didelis), NS (Neigiamas mažas), Z (Nulis), PS (Teigiamas mažas), PB$

(Teigiamas didelis)}}, [-1, 1]. k_p , k_i , $k_d = \{$ valdymo parametrai, $\{Z$ (Nulis), PS (Teigiamas mažas), PM (Teigiamas vidutinis), PB (Teigiamas didelis), PVB (Teigiamas labai didelis)}, [0, 1]. Taisyklių bazės pavaizduotos 2.2 lentelė., 2.3 lentelė. 2.4 lentelė.



2.8 pav. Įėjimų e ir \dot{e} priklausomybinės funkcijos [4].



2.9 pav. Išėjimų k_p , k_i , k_d priklausomybinės funkcijos [4].

2.2 lentelė. k_p taisyklių bazė [4].

		\dot{e}				
		NB	NS	Z	PS	PB
e	Kp	NB	NS	Z	PS	PB
	NB	PVB	PVB	PVB	PB	PM
	NS	PVB	PVB	PB	PB	PM
	Z	PB	PB	PM	PS	PS
	PS	PM	PS	PS	PS	PS
	PB	PS	PS	Z	Z	Z

Tref<0

2.3 lentelė. k_d taisyklių bazė [4].

		\dot{e}				
		NB	NS	Z	PS	PB
e	Kd	NB	NS	Z	PS	PB
	NB	Z	Z	PS	PS	PB
	NS	Z	Z	Z	Z	PS
	Z	Z	Z	Z	PS	PB
	PS	PS	PS	PS	PB	Z
	PB	Z	Z	Z	PS	PB

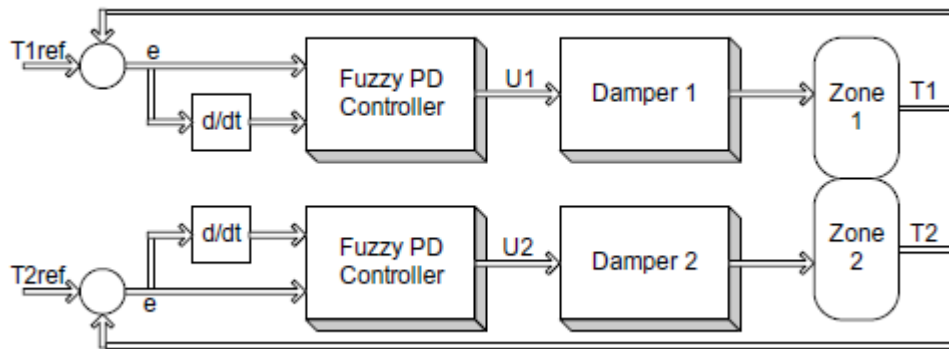
Tref<0

2.4 lentelė. k_i taisyklių bazė [4].

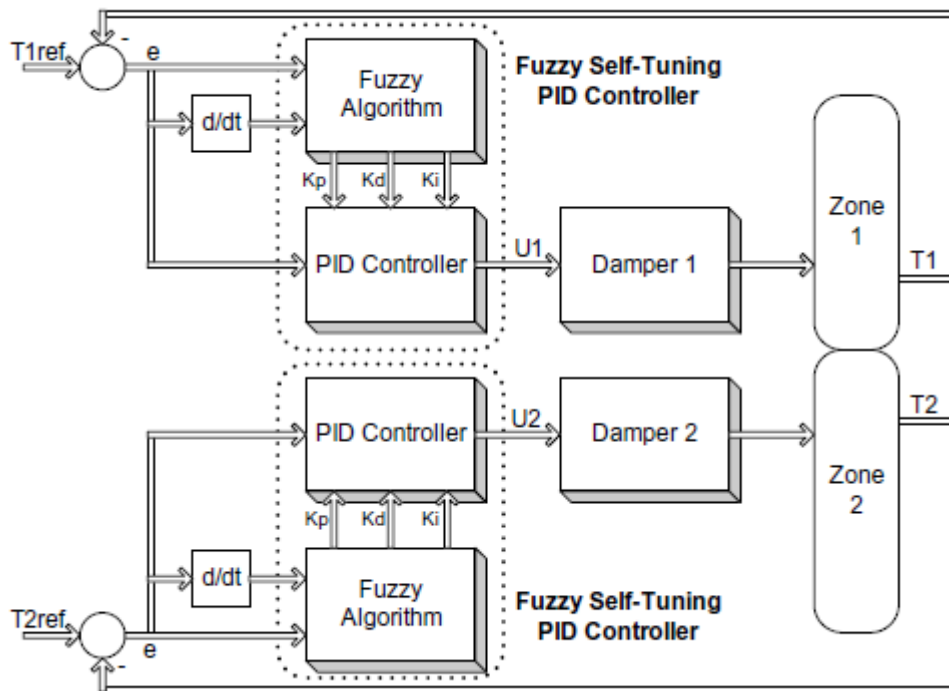
		\dot{e}				
		NB	NS	Z	PS	PB
e	Ki	NB	NS	Z	PS	PB
	NB	PVB	PB	PM	PM	PM
	NS	PVB	PB	PB	PM	PS
	Z	PM	PS	Z	Z	Z
	PS	PM	PM	PS	Z	Z
	PB	PS	Z	Z	Z	Z

Tref<0

2.10 pav. ir 2.11 pav. pavaizduota specialios ŠVOK sistemos valdomos *Fuzzy*-PD ir savi-reguliuojančio PID tipo *Fuzzy* adaptatyviojo regulatoriaus blokinės diagramas. Šiuose diagramose $T1_{ref}$ ir $T2_{ref}$ yra temperatūros nuostatai pirmajai ir antrajai zonoms. 2.10 pav. *Fuzzy* logikos regulatorius išduoda valdymo signalus ($U1$, $U2$) priklausomai nuo e ir \dot{e} . Gautas valdymo signalas keičia sklendės atsidarymo kampą ir oro debitą kuris patenka į zonas, tam, kad būtų pasiektos nustatytos temperatūros. 2.11 pav. Skiriasi tuo, kad išėjimo signalus ($U1$, $U2$) išduoda PID regulatorius, o *Fuzzy* logikos regulatorius reguliuoja PID regulatoriaus k_p , k_i , k_d parametru vertes.

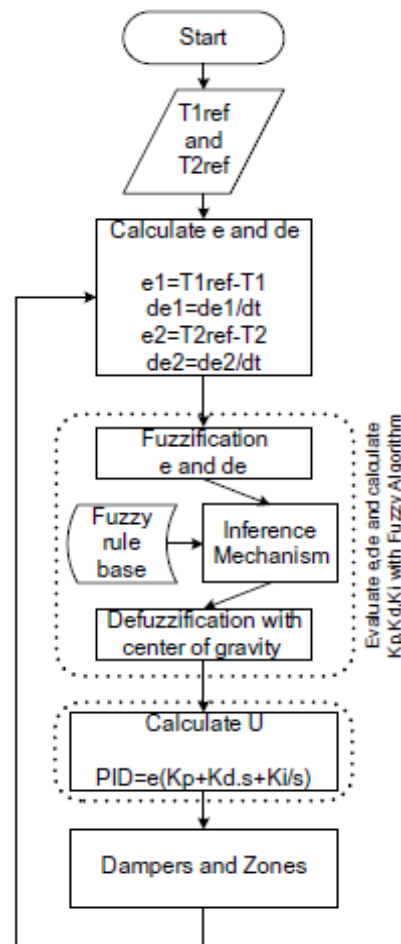


2.10 pav. ŠVOK sistemos valdomos *Fuzzy*-PD reguliatoriaus blokinė schema [4].

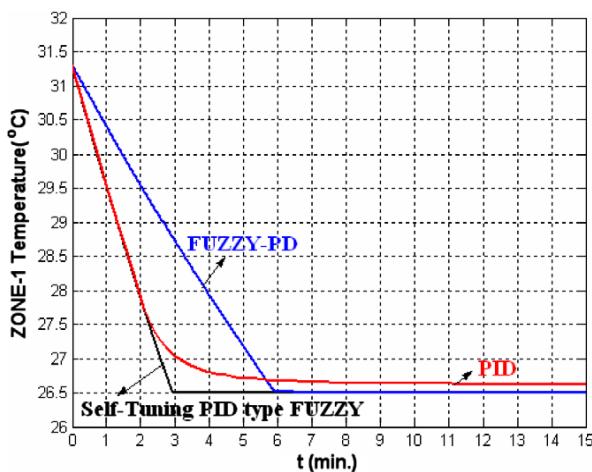


2.11 pav. ŠVOK sistemos valdomos savi-reguliuojančio PID tipo *Fuzzy* adaptyviojo reguliatoriaus blokinė schema [4].

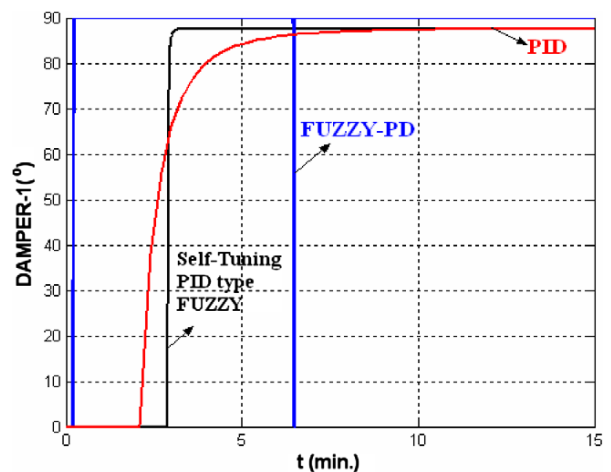
2.12 pav. yra pateiktas specialios ŠVOK sistemos valdomos savi-reguliuojančio PID tipo *Fuzzy* adaptyviojo reguliatoriaus algoritmas.



2.12 pav. Specialios ŠVOK sistemos valdomos savi-reguliuojančio PID tipo *Fuzzy* adaptatyviojo reguliatoriaus algoritmas [4].



2.13 pav. Temperatūrų pokytis reguliuojant ją *Fuzzy*-PD, PID ir adaptatyvioju *Fuzzy* reguliatoriais [4].



2.14 pav. Sklendės atsidarymo laipsnis kai ją valdo *Fuzzy*-PD, PID ir adaptatyvūs *Fuzzy* reguliatoriai [4].

Modeliavimas buvo atliktas, kai aplinkos temperatūra buvo 31.3 °C. Nuostato temperatūra buvo parinkta 26.5 °C. 2.13 pav. pavaizduoti temperatūros pokyčiai kai yra taikomi tiriami reguliatoriai. Adaptyvūs *Fuzzy* reguliatorius geriausiai atliko užduotį, kalbant apie nusistovėjimo laiką ir paklaidą. Paklaidos nėra ir sistema pasiekia nuostatą per minimalų

nusistovėjimo laiką. 2.14 pav. iliustruoja sklendės atsidarymo laipsnį. 90° - visiškai atidaryta pozicija ir sistema turi maksimalų oro srautą. 0° - visiškai uždaryta pozicija.

2.3 Optimalus *Fuzzy* logika pagrįstas adaptyvusis reguliatorius skirtas DFIG vėjo turbinos dažnio valdymui

Šiame straipsnyje pateikiamas optimalaus, *Fuzzy* logika pagrįsto, adaptyviojo reguliatoriaus, skirto vėjo turbinos dažnio valdymui, projektavimas ir modeliavimas. Adaptyvusis reguliatorius yra įrengiamas su DFIG generatoriumi tam, jog būtų valdomas DFIG generatoriaus aktyvios galios išėjimas ir slopinamas dažnio svyravimus. Dažnio svyravimai pasireiškia nuo apkrovos pokyčių. Vėjo galios išėjimas ir dažnio nuokrypis yra naudojami kaip reguliatoriaus įėjimo signalai. *Fuzzy* reguliatoriaus išėjimo signalas yra naudojamas adaptuoti reguliatoriaus parametrus. Iš modeliavimo rezultatų matyti jog pagal užduoties pokytį ir atsitiktines apkrovas, tiriamo reguliatoriaus dažnio valdymas yra žymiai efektyvesnis nei įprastųjų reguliatorių. Adaptyvaus reguliatoriaus robastiškumas yra žymiai didesnis [5].

2.4 BLDC variklio valdymas adaptyviuoju *Fuzzy* logika pagrįstu PID reguliatoriumi

Šio straipsnio autoriai pateikia BLDC (bešepetėlinio nuolatinės srovės) variklio greičio kontrolės valdymo charakteristikas reguliuojant jį *Fuzzy* PID reguliatoriumi ir adaptyviuoju *Fuzzy* PID reguliatoriumi, naudojant Simulink modelį. *Fuzzy* valdymo ir paprastojo PID reguliatoriaus kombinacija sukuria išmanųjį valdymą, kuris reguliuoja valdymo parametrus priklausomai nuo paklaidos. Panaudoti du įėjimai ir trys išėjimai šiam adaptyviam *Fuzzy* PID reguliatoriui. Iš modeliavimo rezultatų matyti, jog BLDC variklio greičio kontrolė reguliuojama adaptyviojo *Fuzzy* PID reguliatoriaus turėjo geresnes charakteristikas, negu *Fuzzy* PID reguliatorius dirbant tokiomis pačiomis sąlygomis. Ypač tuomet, kai BLDC variklis dirba skirtingais greičiais ir kai reikia palaikyti greitį pastovų kai kinta apkrova. Adaptyvusis *Fuzzy* PID reguliatorius turi mažesnę perreguliaciją, greitesnį nusistovėjimo laiką [6].

2.5 Adaptyvusis PI reguliatorius paremtas *Fuzzy* logikos reguliatoriumi skirtas sinchroninio variklio greičio reguliavimui

Fuzzy logika pagrįstas PI reguliatorius taikomas sinchroninio variklio greičio valdymui. Atliktas modeliavimas su skirtingomis greičio užduotimis ir skirtingomis apkrovos sąlygomis. Modeliavimo rezultatai parodė jog siūlomas valdymo metodas gali pasiekti geras sekimo galimybes atsižvelgiant į skirtingus greičio nuostatus bei apkrovas. Taip pat yra palyginamas su klasikiniu PI reguliatoriumi. Rezultatai įrodė jog siūlomas reguliatorius pasirodė geriau, tvarkantis su įvairiomis darbo sąlygomis. Adaptyvusis reguliatorius yra efektyvesnis ir robastiškesnis [7].

2.6 PID regulatoriaus stiprinimo koeficiento planavimas remiantis *Fuzzy* sistemomis

Šiuo tyrimu siekiama panaudoti *fuzzy* taisykles ir priklausomybes norint nustatyti regulatoriaus parametrus. Tyrimo tikslas yra modeliuoti siūlomą schemą įvairiems procesams ir gauti rezultatus kurie suteikia geresnę sistemos reakciją negu geriausias pramoninis auto – reguliavimo metodas: *Ziegler – Nichols*. Siūloma schema yra pagrįsta sistemos pagrindiniu stiprinimo koeficientu ir periodu. Paklaidos ir paklaidos pokyčio stiprinimo koeficientai yra suderinami rankiniu būdu naudojant LabVIEW siekiant gauti norimas reakcijas. Tai gali būti atlikta įvairiais optimizavimo metodais. *Fuzzy* stiprinimo koeficiento numatymo pagrindas yra naudojamos *fuzzy* taisyklės ir priklausomybės nustatant regulatoriaus parametrus remiantis paklaidos ir paklaidos pokyčio signalais [8].

2.7 Žiniomis pagrįstas *Fuzzy* reguliatorius PID parametrų derinimui

Šiame tyrime yra siūloma žiniomis pagrįsto *Fuzzy* valdymo integracija su kieto valdymo metodu. Žiniomis pagrįstas *Fuzzy* yra realizuojamas kaip *Fuzzy* taisyklių rinkinys su išvadų darymo mechanizmu, kuris derina sistemos PID reguliatorių. Aprašoma programinė įranga kurios pagalba vartotojai gali apibrėžti taisyklių bazę. Programa sugeneruoja *Fuzzy* sprendimų lentelę remiantis visa įvesta informacija, tada sprendimų lentelė yra naudojama modifikuoti parametrus kurie yra reikalingi *Fuzzy* reguliatoriui „on-line“ operacijoms. Demonstraciniams tikslams naudojamas modeliavimas MATLAB/SIMULINK aplinkoje. Modeliuojamos dvi vienodos valdymo sistemos su tokiais pačiomis struktūromis. Viena iš sistemų yra su žiniomis pagrįstu *Fuzzy* reguliatoriumi, kita su tradiciniu PID valdymo kontūru. Autoriai šią valdymo struktūrą pritaikė roboto „sąnario“ valdymui [9].

3 Nestacionarių objektų valdymo sistemų kokybės analizė kintant objekto modelio parametrams

Toliau atliksime nestacionaraus objekto valdymo sistemos kokybės analizę pirmos ir antros eilės objektams.

3.1 Pirmos eilės objekto su vėlavimu analizė

Regulatoriaus derinimas siekiant minimizuoti IAE kriterijų, kai sistemoje veikia trikdys. Pasirenkama plačiausiai reguliavimo sistemose naudojama objekto perdavimo funkcija:

$$W(s) = \frac{K_{pr}}{T_{pr}s + 1} e^{-\tau_{pr}s} \quad (3.1)$$

kur K_{pr} - proceso stiprinimo koeficientas, T_{pr} - proceso laiko pastovioji, o τ_{pr} - proceso vėlinimas.

Regulatoriaus PI parametrai apskaičiuojami pagal IAE kriterijaus regulatorių derinimo formules kurių reakcijos tipas yra trikdys. [2]

$$K_r = \frac{0,984}{K_{pr}} \left(\frac{T_{pr}}{\tau_{pr}} \right)^{0,986} \quad (3.2)$$

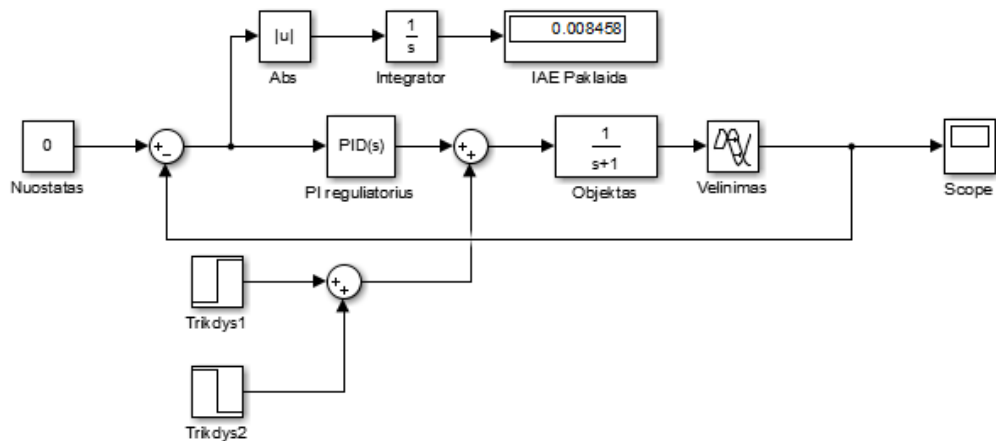
$$T_i = \frac{T_{pr}}{0,608} \left(\frac{\tau_{pr}}{T_{pr}} \right)^{0,707} \quad (3.3)$$

kur K_r - regulatoriaus stiprinimo koeficientas, T_i - regulatoriaus integralinė laiko pastovioji, T_{pr} - proceso laiko pastovioji, o τ_{pr} - proceso vėlinimas.

Apskaičiuojame PI regulatoriaus parametrai pagal tiriamo proceso parametrų vertes kurios nekito. Proceso stiprinimo koeficientas $K_{pr} = 1$, proceso laiko pastovioji $T_{pr} = 1$ ir proceso vėlinimas $\tau_{pr} = 0,1$. Sudaryta tiriamo proceso analizės schema (žr. 3.1 pav.) ir gauta objekto modelio reakcijos kreivė Matlab/Simulink aplinkoje (žr. 3.2 pav.).

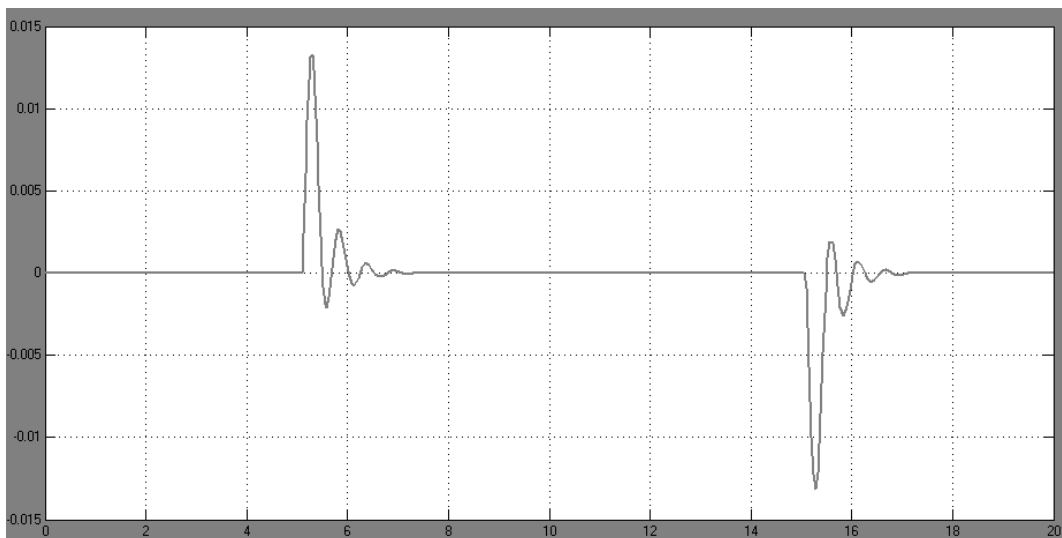
$$K_r = \frac{0,984}{1} \left(\frac{1}{0,1} \right)^{0,986} = 9,5278 \quad (3.4)$$

$$T_i = \frac{1}{0,608} \left(\frac{0,1}{1} \right)^{0,707} = 0,3229 \quad (3.5)$$



3.1 pav. Tiriama proceso analizės schema Matlab/Simulink aplinkoje.

Rezultatai, kai objekto parametrai nesikeičia: $K_{pr} = 1$, $T_{pr} = 1$, $\tau_{pr} = 0,1$. IAE = 0,008409.



3.2 pav. Tiriama objekto modelio, su nekintančiais parametrais, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.

3.2 Adaptyvios reguliavimo sistemos analizė, kai žinomi kintantys objekto parametrai

Toliau nagrinėsime sistemas, kurių kintamus parametrus žinome. Proceso stiprinimo koeficientas K_{pr} kinta nuo 1 iki 6 ir laiko pastovioji T_{pr} nuo 4 iki 20, vėlinimas τ_{pr} viso proceso modeliavimo metu išlieka toks pats, 2. Kadangi kinta ir laiko pastovioji T_{pr} tai automatiškai kinta ir valdomumo santykis VS.

$$VS = \frac{\tau_{pr}}{\tau_{pr} + T_{pr}} \quad (3.6)$$

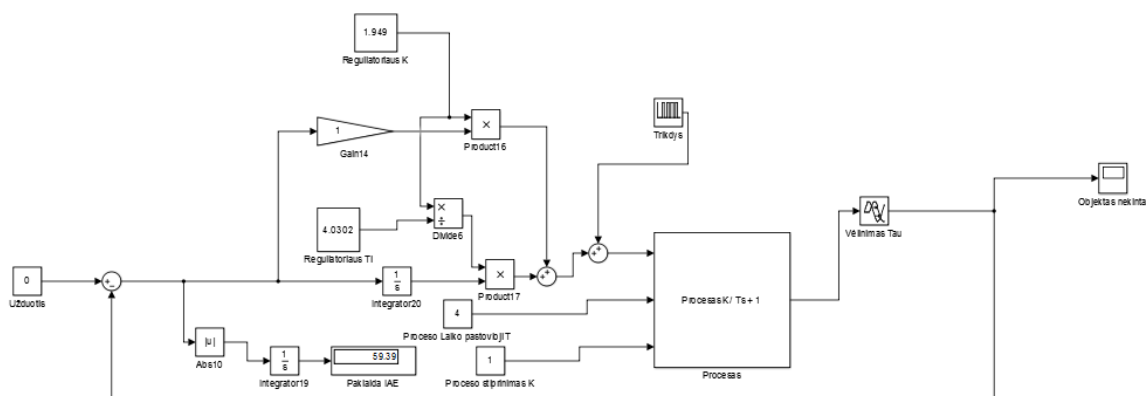
Valdomumo santykis gali apibūdinti sistemos valdomumo sudėtingumą. Sistemos su mažu valdomumo santykiu t.y. kuriose valdomumo santykis yra arčiau nulio yra lengviau suvaldomos, o sistemos kurių valdomumo santykis didėja yra suvaldomos sunkiau. Sistemos su $VS > 0,5$ yra sunkiai valdomos. Tiriamame procese VS kinta nuo 0,0909 iki 0,3333.

Regulatoriaus PI parametrai apskaičiuojami pagal IAE kriterijaus reguliatorių derinimo lygtis (3.2) ir (3.3) kurių reakcijos tipas yra trikdys.

Pirmame etape apskaičiuoti PI regulatoriaus parametrai pagal tiriamo proceso parametrų vertes kurios nekito. Proceso stiprinimo koeficientas $K_{pr} = 1$, proceso laiko pastovioji $T_{pr} = 4$ ir proceso vėlinimas $\tau_{pr} = 2$, sudaryta tiriamo proceso analizės schema (žr. 3.3 pav.) ir gauta objekto modelio reakcijos kreivė Matlab/Simulink aplinkoje (žr. 3.5 pav.).

$$K_r = \frac{0,984}{1} \left(\frac{4}{2}\right)^{0,986} = 1,949 \quad (3.7)$$

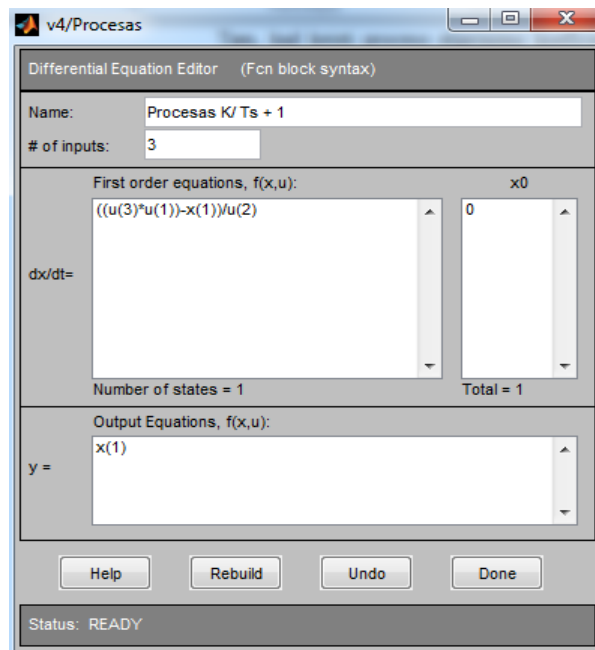
$$T_i = \frac{4}{0,608} \left(\frac{2}{4}\right)^{0,707} = 4,0302 \quad (3.8)$$



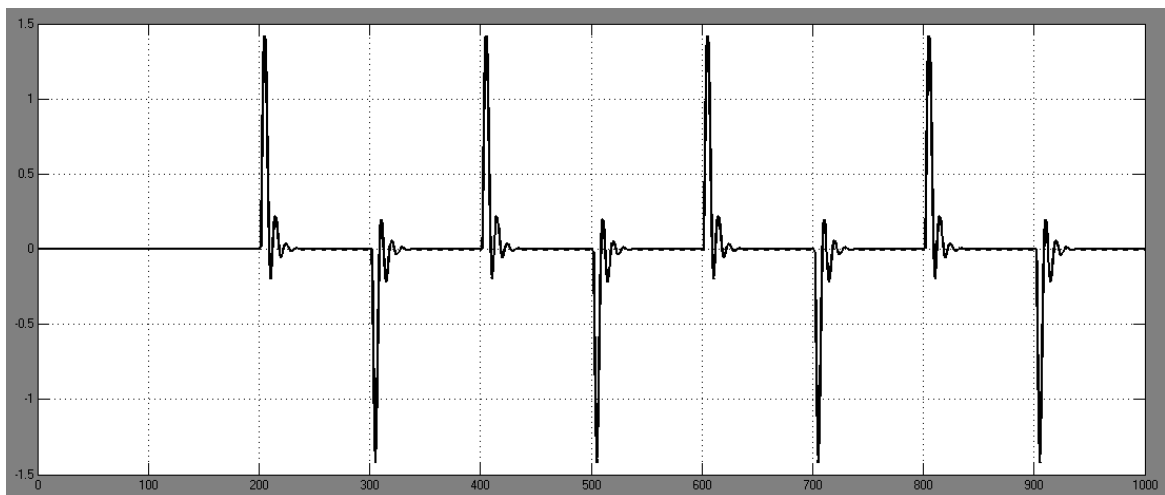
3.3 pav. Tiriamo proceso su nekintančiais proceso parametrais analizės schema.

Siekiant keisti proceso stiprinimo koeficientą K_{pr} ir proceso laiko pastoviąją T_{pr} , objekto perdavimo funkcija (3.1) transformuojama į diferencialinę lygtį (3.9) ir perkeliama į Matlab/Simulink DEE (žr. 3.4 pav.) bloką, kur yra panaudojami trys įėjimai $u(1)$, $u(2)$, $u(3)$. $u(1)$ – proceso įėjimas, $u(2)$ – proceso laiko pastovioji T_{pr} ir $u(3)$ – proceso stiprinimo koeficientas K_{pr} .

$$\frac{dx_1}{dt} = \frac{(K_{pr} * u - x_1)}{T_{pr}} \quad (3.9)$$



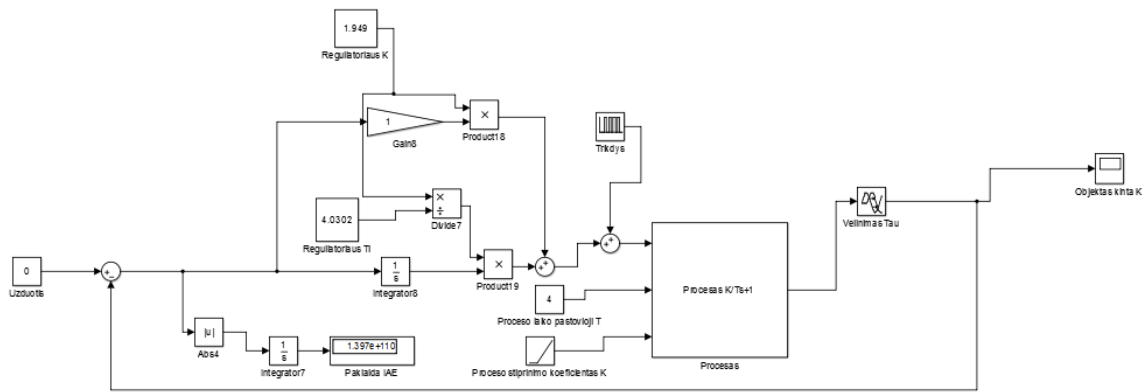
3.4 pav. Tiriama proceso modelio DEE blokas.



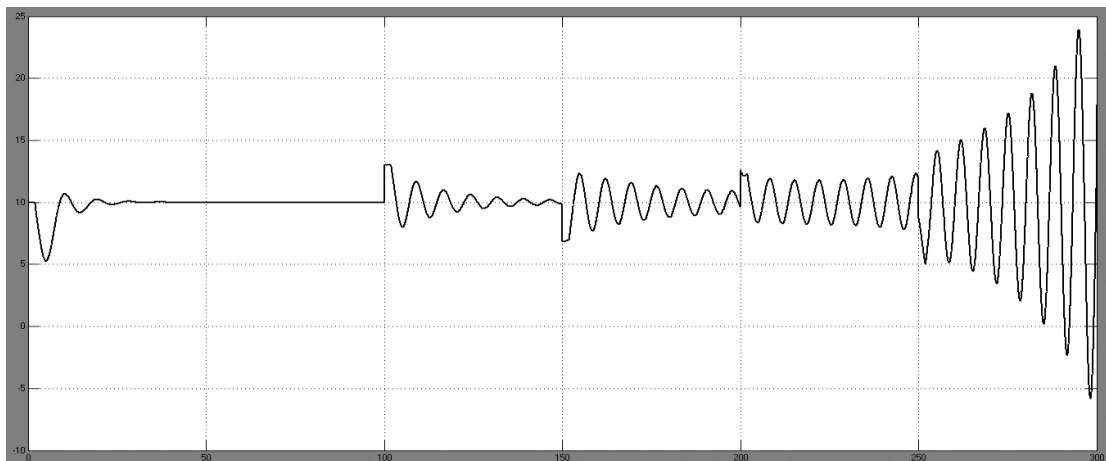
3.5 pav. Tiriama proceso modelio su nekintančiais objekto parametrais reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.

Iš pereinamojo proceso (žr. 3.5 pav.) matyti, kad reguliatorius suvaldo objektą ir į jį paduodamus trikdžius. Trikdžiai yra paduodami nuo laiko momento 200. Šiuo laiko momentu paduodamas teigiamas trikdys lygus 3, po 100 sekundžių paduodamas trikdys lygus -3 ir taip kas 100 sekundžių.

Kitame etape buvo sudaryta tiriamo objekto modelio analizės schema (žr. 3.6 pav.) kurioje proceso stiprinimo koeficientas K_{pr} kito nuo 1 iki 6. Reguliatoriaus parametrai išliko tie patys, taip pat ir proceso laiko pastovioji.



3.6 pav. Tiriamo proceso su kintančiu proceso stiprinimo koeficientu K_{pr} (1-6) analizės schema.



3.7 pav. Tiriamo proceso modelio su kintančiu proceso stiprinimo koeficientu K_{pr} reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.

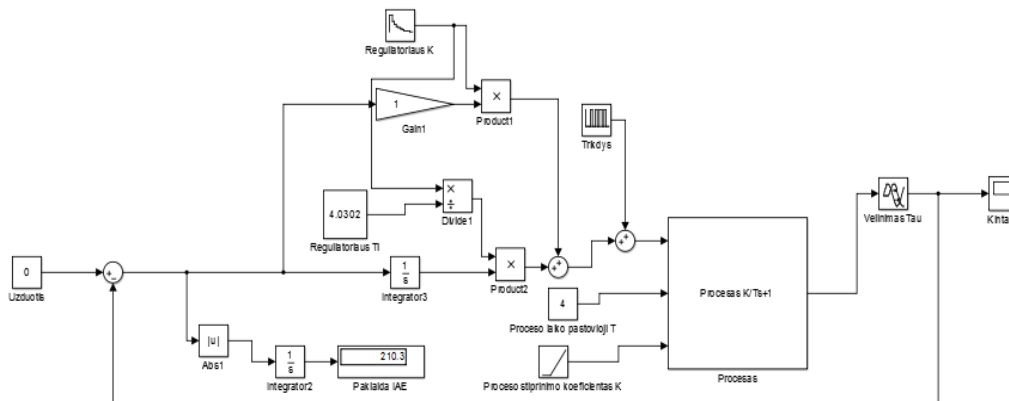
Matoma, kad procesas tampa nestabilus jau nuo 250 sekunde paduoto trikdžio. Modeliavimo laikas sutrumpinamas ir trikdys paduodamas anksčiau, kad būtų galima nustatyti nuo kada procesas tampa nestabilus. Procesu šiame darbe vadiname nestabiliu, jei per 30 laiko pastoviųjų švytavimai nesumažėja iki 5% nuo nusistovėjusios reikšmės.

Sudarytoje tiriamo objekto analizės schemoje (žr. 3.8 pav.) pastovus regulatoriaus stiprinimo koeficientas K_r buvo pakeistas kintančiu regulatoriaus koeficientu. Panaudojant IAE kriterijaus regulatoriaus derinimo lygtį (3.2) buvo apskaičiuoti regulatoriaus stiprinimo koeficientai K_r kurie kito kas 100 sekundžių.

3.1 lentelė. Regulatoriaus koeficientų kitimas kai proceso stiprinimo koeficientas kinta nuo 1 iki 6.

Modeliavimo laikas	Proceso stiprinimo koeficientas K_{pr}	Regulatoriaus stiprinimo koeficientas K_r
0	1	1,949
100	1,5	1,2995
200	2	0,9746
300	2,5	0,7797
400	3	0,6498
500	3,5	0,5569
600	4	0,4873

700	4,5	0,4332
800	5	0,3899
900	5,5	0,3544
1000	6	0,3249



3.8 pav. Tiriamo proceso su kintančiu proceso stiprinimo koeficientu K_{pr} (1-6) ir pritaikytu adaptyvumu analizės schema.



3.9 pav. Tiriamo proceso modelio su kintančiu proceso stiprinimo koeficientu K_{pr} (1-6) ir pritaikytu adaptyvumu reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.

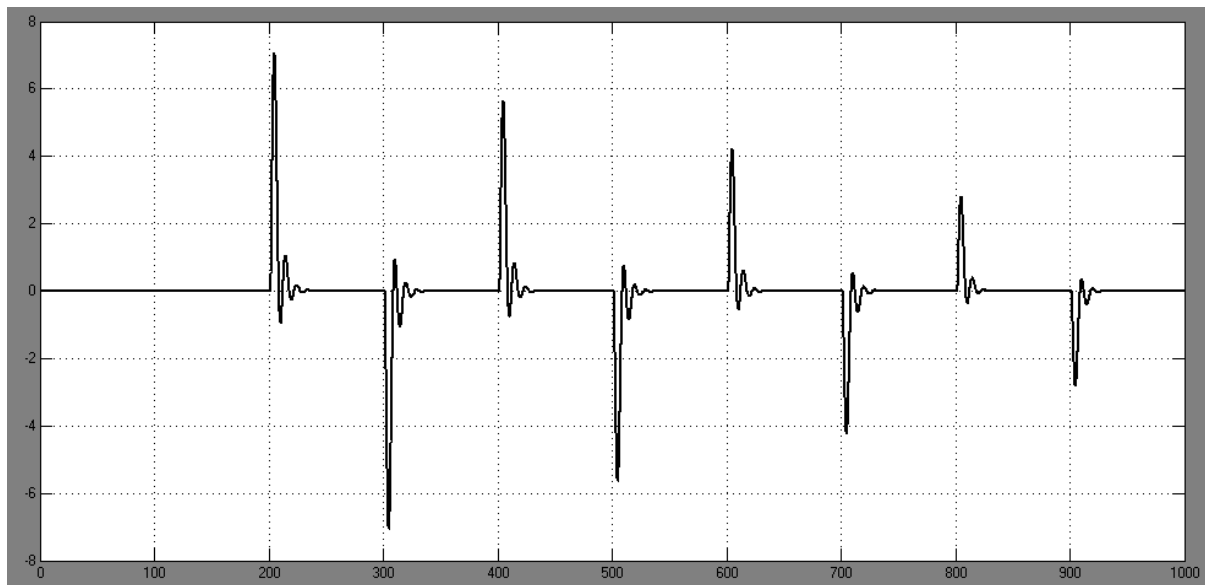
Pritaikius adaptyvumą tiriamas procesas tampa stabilus, kurio minimali integruota absoliučioji paklaida IAE yra 210,3.

Taip pat modeliuojamas procesas kai proceso stiprinimo koeficientas K_{pr} kinta nuo 6 iki 1. Kaip ir prieš tai modeliuotas procesas su stiprinimo koeficiento kitimu be adaptyvumo, taip ir šis procesas tampa nestabiliu. Pritaikius adaptyvumą reguliatoriaus stiprinimo koeficientui K_r kurio kitimo parametrai matomi 3.2 lentelė. gaunama reakcijos kreivė (žr. 3.10 pav.) iš kurios matyti, kad adaptyvumas gerai valdo procesą kurio minimali integruota absoliučioji paklaida IAE yra 205,3.

3.2 lentelė. Regulatoriaus koeficientų kitimas kai proceso stiprinimo koeficientas kinta nuo 6 iki 1.

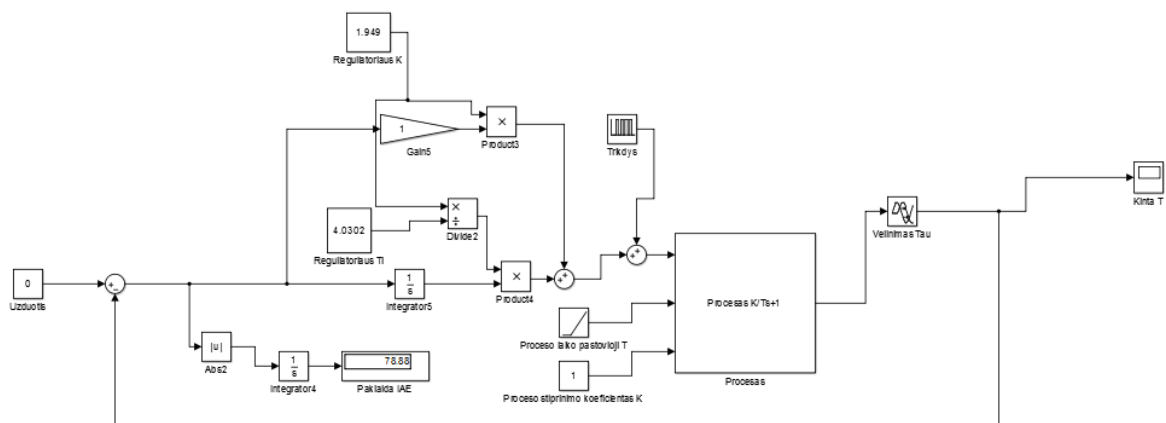
Modeliavimo laikas	Proceso stiprinimo koeficientas K_{pr}	Regulatoriaus stiprinimo koeficientas K_r
0	6	0,3249
100	5,5	0,3544
200	5	0,3899

300	4,5	0,4332
400	4	0,4873
500	3,5	0,5569
600	3	0,6498
700	2,5	0,7797
800	2	0,9749
900	1,5	1,2995
1000	1	1,949



3.10 pav. Tiriama proceso modelio su kintančiu proceso stiprinimo koeficientu K_{pr} (6-1) ir pritaikytu adaptyvumu reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.

Sekančiame etape buvo tiriama kaip procesas reaguoja į proceso laiko pastoviosios T_{pr} kitimą, kuris kinta nuo 4 iki 20, o proceso stiprinimo koeficientas K_{pr} nekinta, išlieka 1. Sudaroma tiriama proceso analizės schema ir įtraukiamas proceso laiko pastoviosios kitimas (žr. 3.11 pav.).



3.11 pav. Tiriama proceso su kintančia proceso laiko pastoviąja T_{pr} (4-20) analizės schema.



3.12 pav. Tiriamo proceso modelio su kintančia proceso laiko pastoviąja T_{pr} (4-20) reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.

Procesas yra stabilus ir skiriasi nuo proceso su pritaikytu adaptyvumu minimalia integruota absoliučiąja paklaida IAE, kuri be adaptyvumo (žr. 3.12 pav.) yra 78,88, o su adaptyvumu (žr. 3.13 pav.) 81,73. Čia būtina pažymėti, kad proceso modelio laiko pastoviosios kitimas praktiškai nedaro įtakos reguliavimo kokybei. Dėl skaičiavimo netikslumų ir pasirinkto derinimo metodo IAE kriterijus adaptyviai sistemai netgi padidėja. PI regulatoriaus integravimo laiko pastoviosios kitimas matomas 3.3 lentelė.

3.3 lentelė. Regulatoriaus integravimo laiko pastoviosios kitimas kai proceso laiko pastovioji kinta nuo 4 iki 20.

Modeliavimo laikas	Proceso laiko pastovioji T_{pr}	Integravimo laiko pastovioji T_i
0	4	4,0302
100	5,6	4,4477
200	7,2	4,7878
300	8,8	5,0774
400	10,4	5,3317
500	12	5,56
600	13,6	5,7688
700	15,2	5,96
800	16,8	6,137
900	18,4	6,3038
1000	20	6,4572



3.13 pav. Tiriama proceso modelio su kintančia proceso laiko pastoviąja T_{pr} (4-20) ir pritaikytu adaptyvumu reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.

Analogiškai modeliuojamas procesas kai kinta proceso laiko pastovioji T_{pr} nuo 20 iki 4. Tiriama objekto modelio pereinamieji procesai pavaizduoti: be adaptyvumo (žr. 3.14 pav.) ir su adaptyvumu (žr. 3.15 pav.).



3.14 pav. Tiriama proceso modelio su kintančia proceso laiko pastoviąja T_{pr} (20-4) reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.



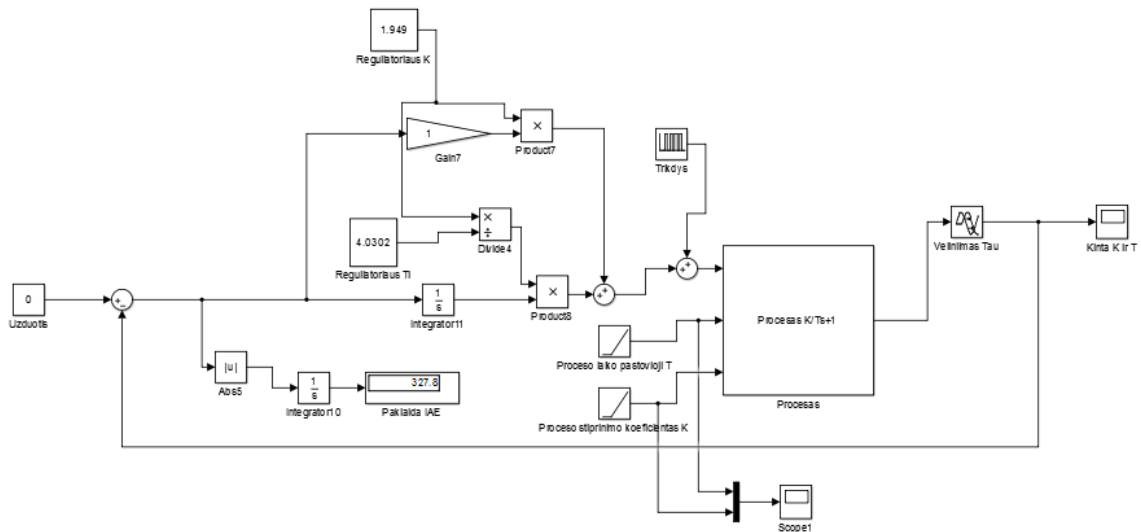
3.15 pav. Tiriama proceso modelio su kintančia proceso laiko pastoviąja T_{pr} (20-4) ir pritaikytu adaptyvumu reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.

Analogiškai prieš tai lyginamiem procesam, šie modeliuoti procesai abu yra stabilūs ir skiriasi minimalia integruota absoliučiąja paklaida IAE, kurios yra be adaptyvumo – 72,23 ir su adaptyvumu – 77,56. Čia būtina pažymėti, kad proceso modelio laiko pastoviosios kitimas praktiškai nedaro įtakos reguliavimo kokybei. Dėl skaičiavimo netikslumų ir pasirinkto derinimo metodo IAE kriterijus adaptyviai sistemai netgi padidėja. PI regulatoriaus integravimo laiko pastoviosios kitimas matomas 3.4 lentelė.

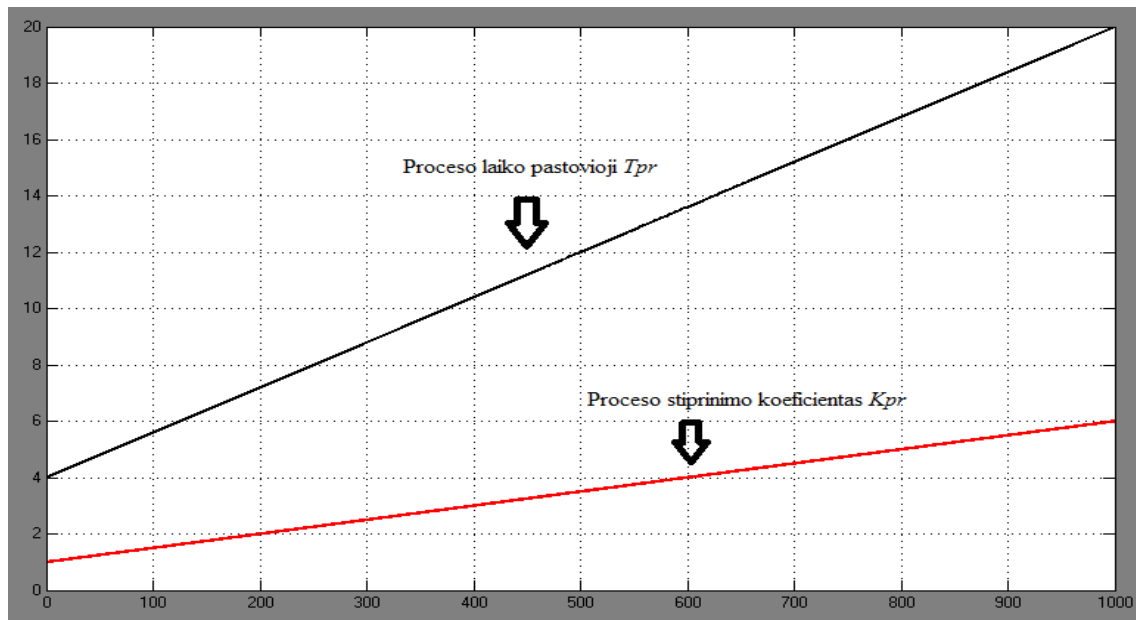
3.4 lentelė. Regulatoriaus integravimo laiko pastoviosios kitimas kai proceso laiko pastovioji kinta nuo 20 iki 4.

Modeliavimo laikas	Proceso laiko pastovioji T_{pr}	Integravimo laiko pastovioji T_i
0	20	6,4572
100	18,4	6,3038
200	16,8	6,137
300	15,2	5,96
400	13,6	5,7688
500	12	5,56
600	10,4	5,3317
700	8,8	5,0774
800	7,2	4,7878
900	5,6	4,4477
1000	4	4,0302

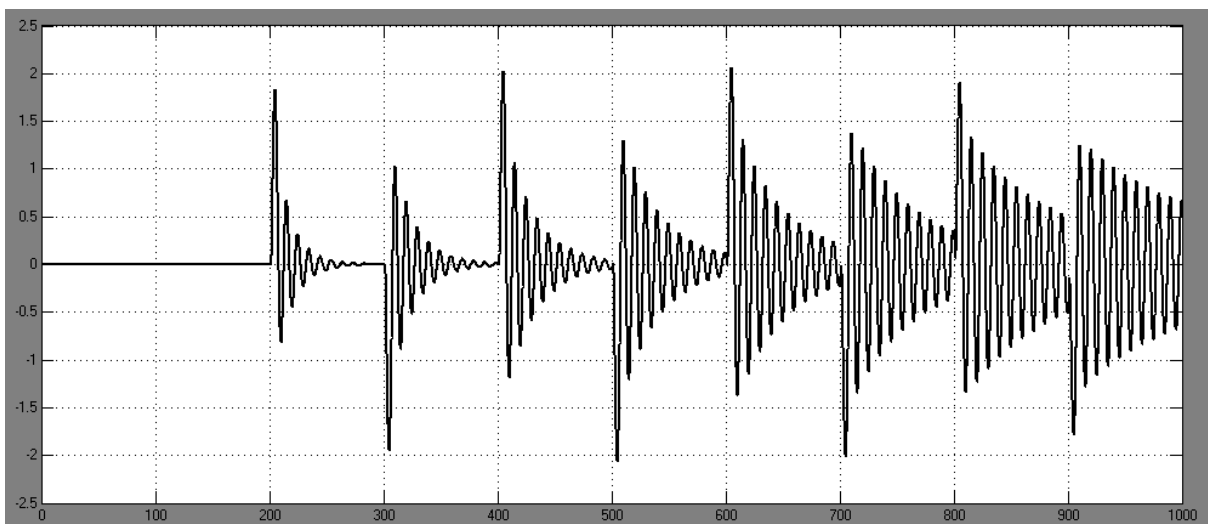
Toliau tiriami procesai kur kartu kinta proceso laiko pastovioji T_{pr} ir proceso stiprinimo koeficientas K_{pr} . Tam sudaroma tiriama proceso analizės schema (žr. 3.16 pav.). Proceso kintamųjų kitimą matyti 3.17 pav.



3.16 pav. Tiriamo proceso su kintančia proceso laiko pastoviaja T_{pr} (4-20) ir proceso stiprinimo koeficientu K_{pr} (1-6) analizės schema.



3.17 pav. Proceso laiko pastoviosios T_{pr} ir stiprinimo koeficiento K_{pr} kitimas.

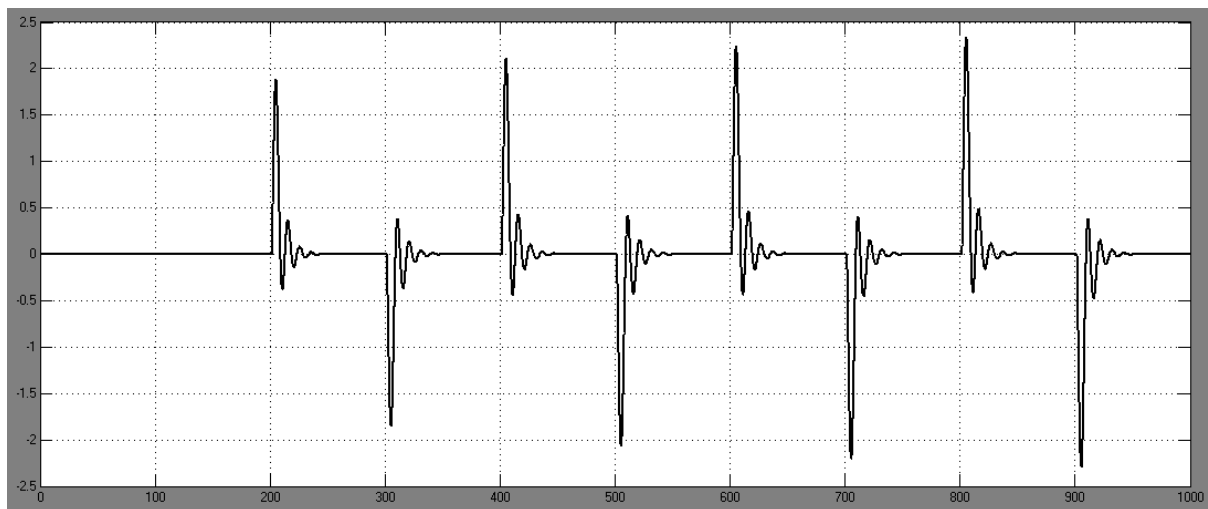


3.18 pav. Tiriamo proceso modelio su kintančia proceso laiko pastoviaja T_{pr} (4-20) ir stiprinimo koeficientu K_{pr} (1-6) reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.

Šiam procesui pritaikomas adaptyvumas. Iš lygties (3.3) (pasirinktas reguliatoriaus derinimo metodas) matyti, kad kintantis proceso stiprinimo koeficientas neturi įtakos reguliatoriaus integravimo laiko pastoviai T_i , todėl šias reikšmes galime naudoti iš 3.3 lentelė. Reguliatoriaus stiprinimo koeficientus K_r reikia paskaičiuoti pagal lygtį (3.2), rezultatai pateikti 3.5 lentelė.

3.5 lentelė. Reguliatoriaus stiprinimo koeficientų kitimas kai proceso stiprinimo koeficientas kinta nuo 1 iki 6 ir proceso laiko pastovioji kinta nuo 4 iki 20.

Modeliavimo laikas	Proceso stiprinimo koeficientas K_{pr}	Proceso laiko pastovioji T_{pr}	Reguliatoriaus stiprinimo koeficientas K_r
0	1	4	1,949
100	1,5	5,6	1,8105
200	2	7,2	1,7397
300	2,5	8,8	1,6963
400	3	10,4	1,6667
500	3,5	12	1,6448
600	4	13,6	1,6285
700	4,5	15,2	1,6156
800	5	16,8	1,6046
900	5,5	18,4	1,5955
1000	6	20	1,588



3.19 pav. Tiriama proceso modelio su kintančia proceso laiko pastoviaja T_{pr} (4-20), stiprinimo koeficientu K_{pr} (1-6) ir pritaikytu adaptyvumu reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.

Lyginant procesą be adaptyvumo (žr. 3.18 pav.) ir su adaptyvumu (žr. 3.19 pav.) matyti, kad procesas valdomas su adaptyvine valdymo sistema pagerina valdymo kokybę. Minimali integruota absoliučioji paklaida IAE sumažėja nuo 327,8 iki 107,3. Atkreipus dėmesį į 3.5 lentelė. pateiktus reguliatoriaus stiprinimo koeficientus K_r matyti, kad jis kito gana nežymiai. Stiprinimo koeficiento ir laiko pastovijų didėjimas vienas kitą kompensavo, todėl sudaroma tyrimo analizės schema kai proceso stiprinimo koeficientas K_{pr} didėja (1 – 6), o proceso laiko pastovioji T_{pr} mažėja (20 – 4).

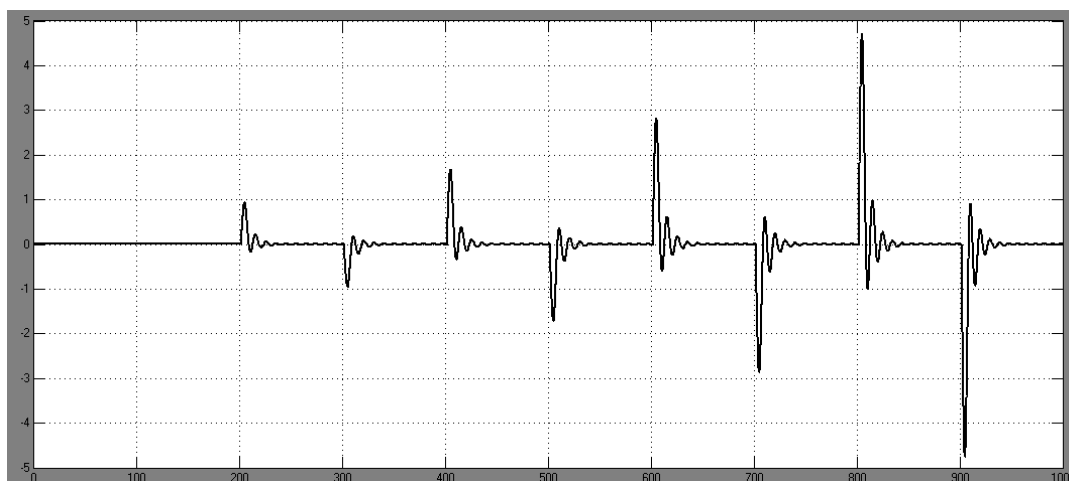


3.20 pav. Tiriama proceso modelio su kintančia proceso laiko pastoviąja T_{pr} (20-4), stiprinimo koeficientu K_{pr} (1-6) reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.

Iš pereinamojo proceso (žr. 3.20 pav.) matyti, kad proceso švytavimai po ketvirtojo trikdžio, kai proceso stiprinimo koeficientas $K_{pr} = 3,5$, o proceso laiko pastovioji $T_{pr} = 12$, pradeda didėti ir procesas tampa nestabilus. Tada pritaikomas adaptyvumas kur reguliatoriaus integralines laiko pastoviąsias T_i galima naudoti iš 3.4 lentelė., o reguliatoriaus stiprinimo koeficientas K_r perskaičiuojamas, rezultatai pateikiami 3.6 lentelė..

3.6 lentelė. Regulatoriaus stiprinimo koeficientų kitimas kai proceso stiprinimo koeficientas kinta nuo 1 iki 6 ir proceso laiko pastovioji kinta nuo 20 iki 4.

Modeliavimo laikas	Proceso stiprinimo koeficientas K_{pr}	Proceso laiko pastovioji T_{pr}	Regulatoriaus stiprinimo koeficientas K_r
0	1	20	9,5279
100	1,5	18,4	5,8506
200	2	16,8	4,0115
300	2,5	15,2	2,9076
400	3	13,6	2,1713
500	3,5	12	1,6448
600	4	10,4	1,25
700	4,5	8,8	0,9425
800	5	7,2	0,696
900	5,5	5,6	0,4937
1000	6	4	0,3248



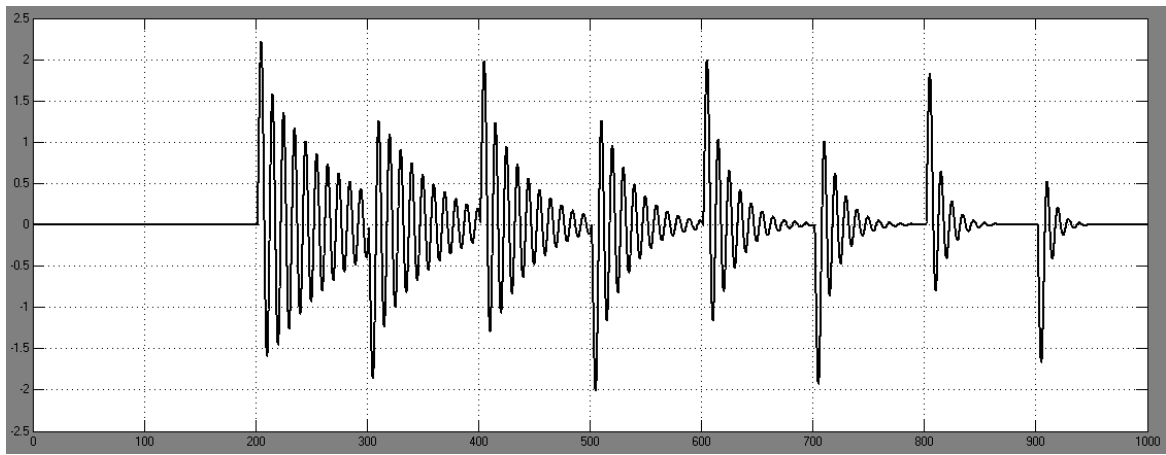
3.21 pav. Tiriama proceso modelio su kintančia proceso laiko pastoviaja T_{pr} (20-4), stiprinimo koeficientu K_{pr} (1-6) ir pritaikytu adaptyvumu reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.

Iš reguliavimo sistemos pereinamojo proceso (žr. 3.21 pav.) matyti, kad adaptyvus reguliatorius atlieka efektyvų proceso valdymą. Minimali integruota absoliučioji paklaida IAE – 129,5.

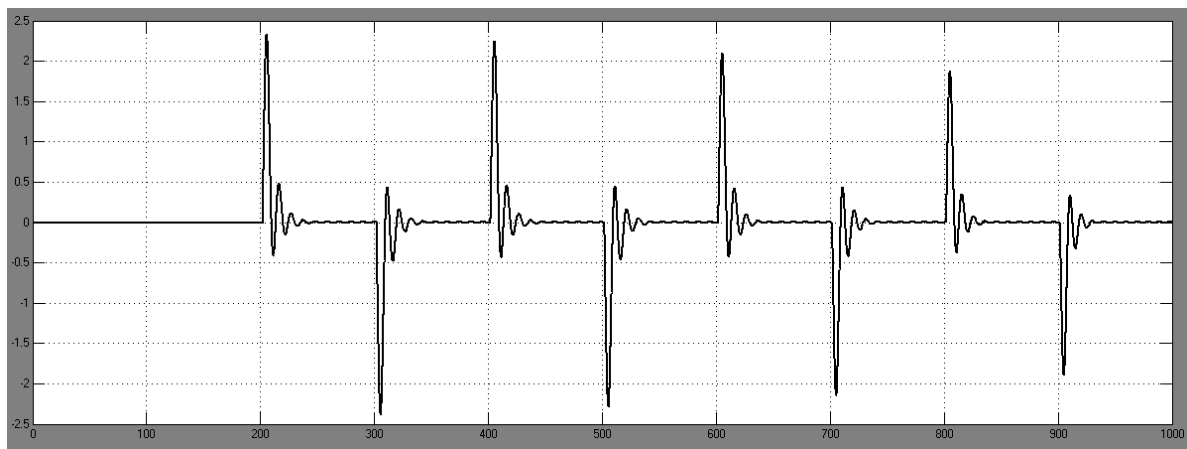
Kita proceso parametrų kitimo kombinacija – kai proceso stiprinimo koeficientas K_{pr} mažėja nuo 6 iki 1 ir proceso laiko pastovioji T_{pr} mažėja nuo 20 iki 4. Toliau modeliuojama – be adaptyvumo (žr. 3.22 pav.) ir su adaptyvumu (žr. 3.23 pav.). Regulatoriaus stiprinimo koeficientai pateikiami 3.7 lentelė., o integralines laiko pastoviąsias galima naudoti iš 3.4 lentelė.

3.7 lentelė. Regulatoriaus stiprinimo koeficientų kitimas kai proceso stiprinimo koeficientas kinta nuo 6 iki 1 ir proceso laiko pastovioji kinta nuo 20 iki 4.

Modeliavimo laikas	Proceso stiprinimo koeficientas K_{pr}	Proceso laiko pastovioji T_{pr}	Regulatoriaus stiprinimo koeficientas K_r
0	6	20	1,588
100	5,5	18,4	1,5955
200	5	16,8	1,6046
300	4,5	15,2	1,6156
400	4	13,6	1,6285
500	3,5	12	1,6448
600	3	10,4	1,6667
700	2,5	8,8	1,6963
800	2	7,2	1,7397
900	1,5	5,6	1,8105
1000	1	4	1,949



3.22 pav. Tiriamo proceso modelio su kintančia proceso laiko pastoviaja T_{pr} (20-4), stiprinimo koeficientu K_{pr} (6-1) reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.



3.23 pav. Tiriamo proceso modelio su kintančia proceso laiko pastoviaja T_{pr} (20-4), stiprinimo koeficientu K_{pr} (6-1) ir pritaikytu adaptyvumu reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.

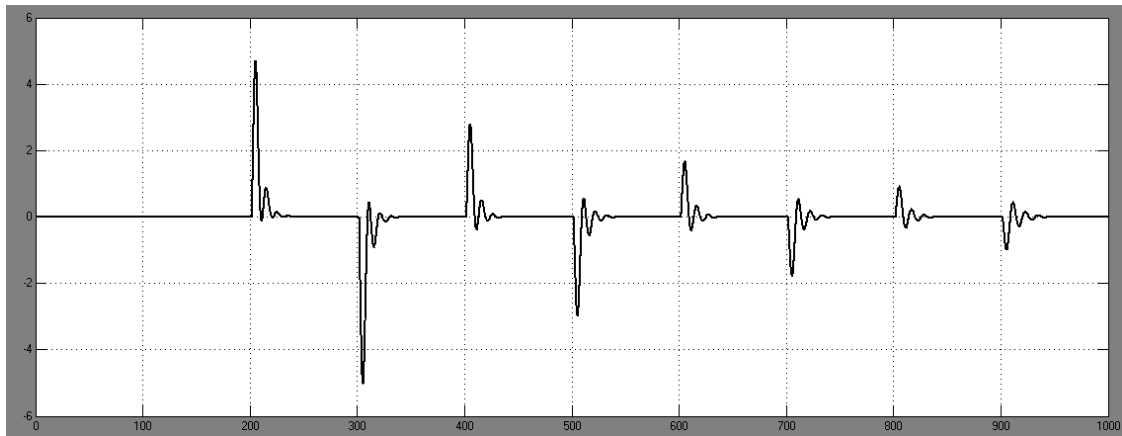
Proceso be adaptyvumo (žr. 3.22 pav.) yra didesni švytavyimai kurie proceso eigos metu slopsta dėl valdomumo santykio mažėjimo. Procesas antroje modeliavimo stadijoje tampa stabilus ir valdomas, tačiau valdymo kokybė bloga. Proceso be adaptyvumo minimali integruota absoliučioji paklaida IAE yra 254,1, o proceso su adaptyvumu – 106,6.

Paskutiniame etape modeliuojami procesai, kai stiprinimo koeficiento K_{pr} kinta ribose 6 – 1, o laiko pastovioji T_{pr} kinta ribose 4 – 20. Procesas yra nestabilus. Pritaikius adaptyvumą, reguliatoriaus integralinės laiko pastoviosios tinka iš 3.3 lentelė., o reguliatoriaus stiprinimo koeficientai pateikiami 3.8 lentelė.je. Procesas yra gerai valdomas, proceso reakcijos kreivė pateikiama 3.24 pav. ir jo minimali integruota absoliučioji paklaida IAE yra 128,5.

3.8 lentelė. Reguliatoriaus stiprinimo koeficientų kitimas kai proceso stiprinimo koeficientas kinta nuo 6 iki 1 ir proceso laiko pastovioji kinta nuo 4 iki 20.

Modeliavimo laikas	Proceso stiprinimo koeficientas K_{pr}	Proceso laiko pastovioji T_{pr}	Reguliatoriaus stiprinimo koeficientas K_r
0	6	4	0,3248
100	5,5	5,6	0,4937
200	5	7,2	0,696
300	4,5	8,8	0,9425

400	4	10,4	1,25
500	3,5	12	1,6448
600	3	13,6	2,1713
700	2,5	15,2	2,9076
800	2	16,8	4,0115
900	1,5	18,4	5,8506
1000	1	20	9,5279



3.24 pav. Tiriama proceso modelio su kintančia proceso laiko pastoviaja T_{pr} (4-20), stiprinimo koeficientu K_{pr} (6-1) ir pritaikytu adaptyvumu reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.

3.9 lentelė. Modeliuotų procesų minimalios integruotos absoliučios paklaidos IAE.

	IAE su adaptyvumu	IAE be adaptyvumo
Proceso dinamika nekinta	59,39	59,39
Kinta K_{pr} (1 - 6)	210,3	Nestabilu
Kinta T_{pr} (4 - 20)	81,73	78,88
Kinta K_{pr} (6 - 1)	205,3	Nestabilu
Kinta T_{pr} (20 - 4)	77,56	72,23
Kinta K_{pr} (1 - 6) Kinta T_{pr} (4 - 20)	107,3	327,8
Kinta K_{pr} (6 - 1) Kinta T_{pr} (4 - 20)	128,5	Nestabilu
Kinta K_{pr} (6 - 1) Kinta T_{pr} (20 - 4)	106,6	254,1
Kinta K_{pr} (1 - 6) Kinta T_{pr} (20 - 4)	129,5	Nestabilu

Iš 3.9 lentelė. pateiktų modeliuotų procesų minimalių integruotų absoliučių paklaidų matyti, kad procesai be adaptyvumo yra nestabilūs, kur objektuose kinta stiprinimo koeficientai ir priešinga kryptimi kinta proceso stiprinimo koeficientai kartu su proceso laiko pastoviosiomis t.y. kai stiprinimo koeficientas didėja, o laiko pastovioji mažėja ir atvirkščiai. Kai keičiasi tik objekto laiko pastovioji adaptyvios ir neadaptyvios valdymo sistemos kokybė yra labai panaši. Dėl skaičiavimų netikslumo ir pasirinkto derinimo būdo, IAE sistemoje be adaptyvumo yra šiek tiek mažesnė.

3.3 Antros eilės objekto su vėlavimu analizė

Toliau darbe nagrinėsime antros eilės objektus su vėlavimu kai žinomi objekto parametrai. Objekto perdavimo funkcija:

$$W(s) = \frac{K_{pr}}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} e^{-\tau_{pr}s} \quad (3.10)$$

kur K_{pr} – tiriamo objekto modelio stiprinimo koeficientas kuris yra lygus 1, T_I – objekto modelio laiko pastovioji lygi 1, T_2 – objekto modelio laiko pastovioji lygi 0,5, o τ_{pr} – vėlinimas lygus 0,1.

Šios sistemos PI regulatoriaus parametrams nustatyti naudojame 3.10 lentelė. duomenis.

3.10 lentelė. Antros eilės sistemos regulatoriaus parametrų derinimo lentelė.

Taisyklė	K_r		T_i		Komentaras									
	Derinimas pagal IAE kriterijų: derinimas trikdžio atžvilgiu													
	$x1/K_r$				$x2/T_{pr}$				Modelis: Metodas 1					
Minimalus IAE – Lopez (1968), psl. 63, 69 -74.														
ξ_{pr}	0.5		0.6		0.8		1.0		1.5		2.0		4.0	
	x1	x2	x1	x2	x1	x2	x1	x2	x1	x2	x1	x2	x1	x2
$\tau_{pr}/T_{pr} = 0,1$	4,8	4,2	5,7	3,4	7,8	2,8	9,7	2,3	15	1,7	21	1,4	35	-
$\tau_{pr}/T_{pr} = 0,2$	2,2	3,3	2,7	3,0	3,9	2,7	5,1	2,4	8,3	1,9	11,5	1,7	27	1,2
$\tau_{pr}/T_{pr} = 0,5$	0,76	2,1	1,0	2,3	1,6	2,4	2,1	2,4	3,7	2,4	5,4	2,4	12,5	2,4
$\tau_{pr}/T_{pr} = 1,0$	0,33	1,2	0,50	1,6	0,82	2,2	1,2	2,5	2,1	2,8	3,0	3,3	6,6	3,7
$\tau_{pr}/T_{pr} = 2,0$	0,23	1,2	0,34	1,6	0,52	2,2	0,70	2,8	1,15	3,8	1,65	4,4	3,4	5,9
$\tau_{pr}/T_{pr} = 5,0$	0,32	2,6	0,34	2,9	0,38	3,3	0,46	3,8	0,62	5,0	0,80	6,3	1,5	9,6
$\tau_{pr}/T_{pr} = 10$	0,34	5,0	0,35	5,3	0,38	5,6	0,39	5,9	0,46	7,1	0,52	8,3	0,90	-

Šią (3.10) perdavimo funkciją galima atvaizduoti tokia forma:

$$\frac{K_{pr}e^{-s\tau_{pr}}}{T_{pr}^2 s^2 + 2\xi_{pr}T_{pr}s + 1} \quad (3.11)$$

Iš šios (3.11) formos išvedami ir apskaičiuojami kintamieji T_{pr} ir ξ_{pr} .

$$T_{pr} = \sqrt{T_1 * T_2} = 0,7071 \quad (3.12)$$

$$\xi_{pr} = \frac{(T_1 + T_2)}{2 * \sqrt{T_1 * T_2}} = 1,0607 \quad (3.13)$$

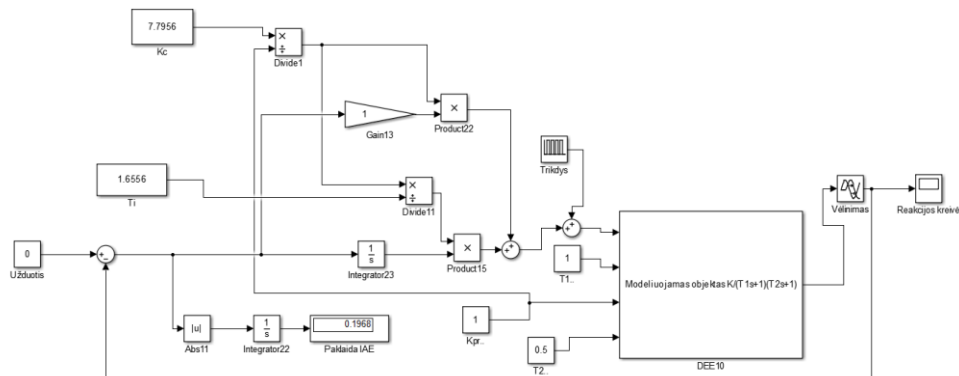
$$\frac{\tau_{pr}}{T_{pr}} = \frac{0,1}{0,7071} = 0,1414 \quad (3.14)$$

Pasinaudojus 3.10 lentelė. ir aukščiau pateiktų lygčių rezultatais gaunami koeficientai $x_1 = 7,7956$ ir $x_2 = 2,3414$. Turint šiuos koeficientus galima apskaičiuoti reguliatorių parametrus pagal žemiau pateiktas lygtis.

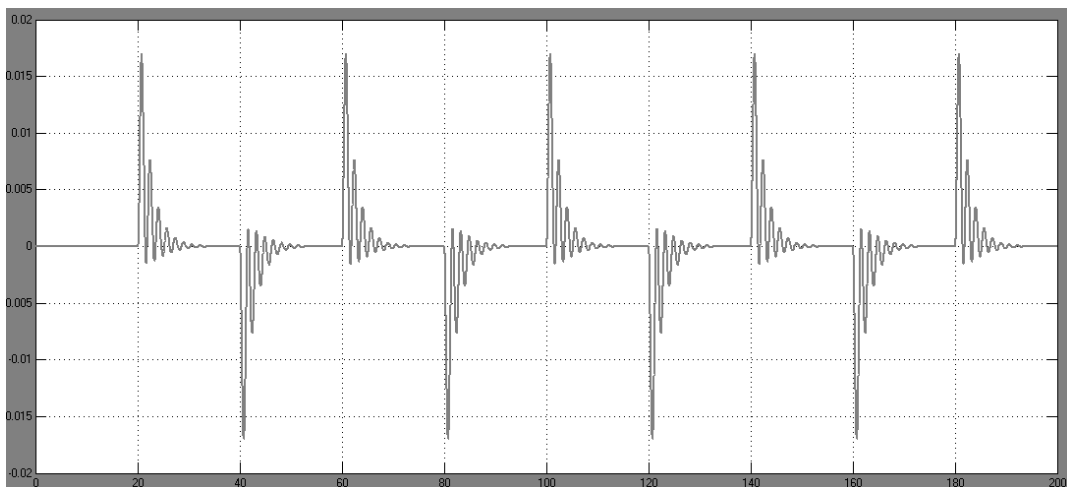
$$K_r = \frac{x_1}{K_{pr}} = 7,7956 \quad (3.15)$$

$$T_i = x_2 * T_{pr} = 1,6556 \quad (3.16)$$

Sudaryta tiriamo antros eilės objekto modelio su vėlavimu analizės schema (žr. 3.25 pav.) ir gauti objekto modelio pereinamieji procesai (žr. 3.26 pav.) Matlab/Simulink aplinkoje.

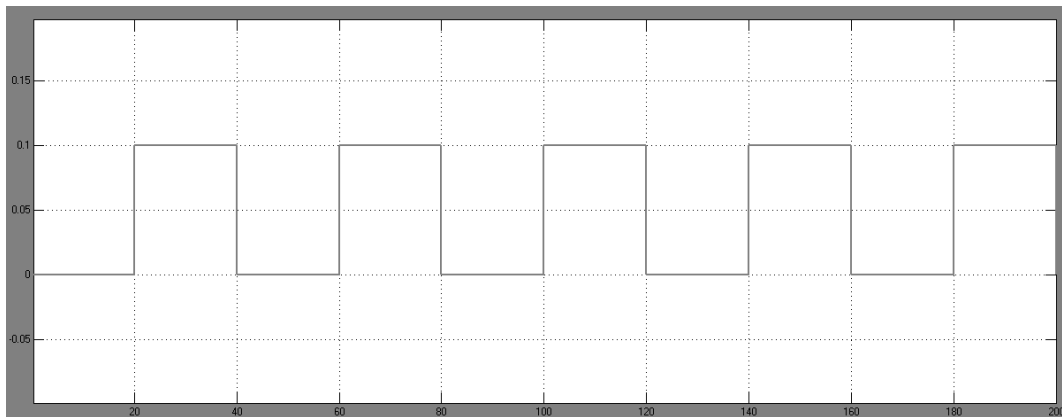


3.25 pav. Antros eilės objekto su vėlavimu ir nekintančiais objekto parametrais analizės schema.



3.26 pav. Antros eilės objekto su nekintančiais parametrais reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.

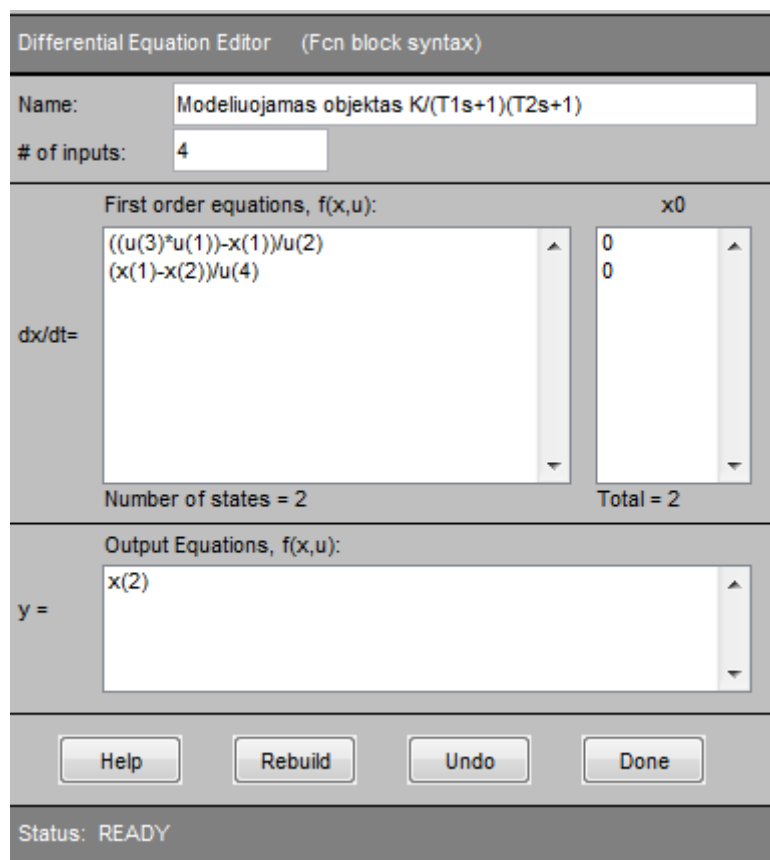
Regulatorius tinkamai valdo objektą veikiant trikdžiams (žr. 3.27 pav.), minimali integruota absoliučioji paklaida IAE = 0,1968.



3.27 pav. Į tiriamo objekto modelį paduodamo trikdžio vertės.

Siekiant keisti tiriamo antros eilės objekto parametrus, objekto perdavimo funkcija (3.10) transformuojama į diferencialinių lygčių sistemą (3.17) ir perkeliama į Matlab/Simulink DEE bloką (žr. 3.28 pav.). Čia turime keturis įėjimus: $u(1)$ – objekto įėjimas, $u(2)$ – objekto laiko pastovioji T_1 , $u(3)$ – objekto stiprinimo koeficientas K_{pr} ir $u(4)$ – objekto laiko pastovioji T_2 .

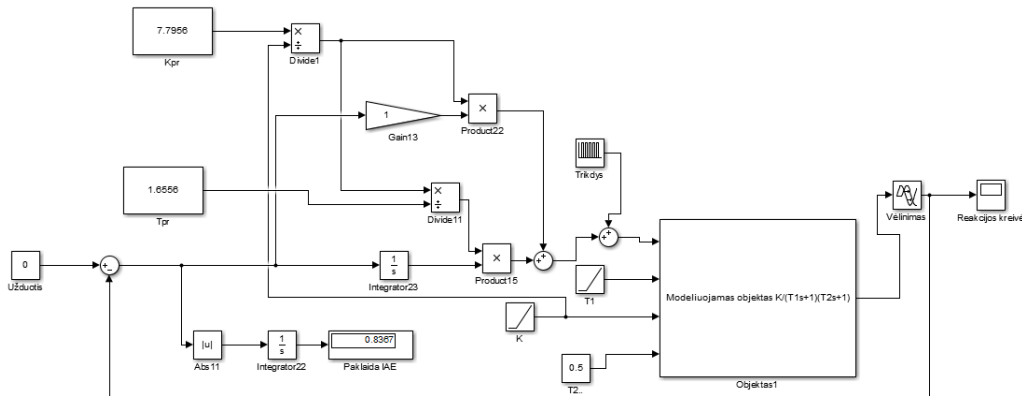
$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = \frac{(K_{pr} * u - x_1)}{T_1} \\ \frac{dx_2}{dt} = \frac{(x_1 - x_2)}{T_2} \end{cases} \quad (3.17)$$



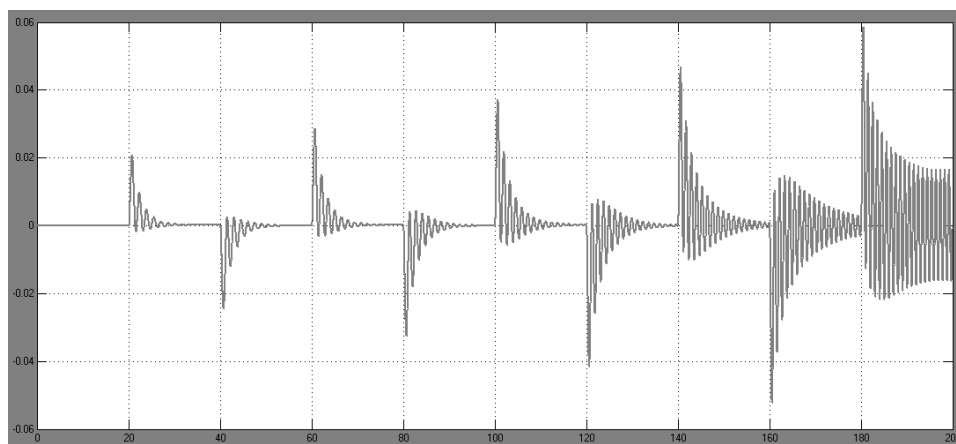
3.28 pav. Tiriamo objekto modelio DEE blokas.

Kitame etape sudaroma tiriamo objekto modelio analizės schema su kintančiais objekto parametrais (žr. 3.29 pav.), objekto stiprinimo koeficientas K_{pr} kinta nuo 1 iki 3, o objekto laiko

pastovioji T_I kinta nuo 1 iki 0,3. Šių parametų kitimas labiausiai veikia valdymo kokybę, todėl toliau analizuojama tik jų įtaka valdymo sistemos kokybei. Regulatoriaus parametrai išlieka tokie patys.



3.29 pav. Antros eilės objekto su vėlavimu ir kintančiais objekto parametrais analizės schema.



3.30 pav. Antros eilės objekto su kintančiu objekto stiprinimo koeficientu K_{pr} (1-3) ir kintančia objekto laiko pastoviąja T_I (1-0,3) reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.

Objektas yra stabilus, bet matyti iš pereinamųjų procesų (žr. 3.30 pav.), kad vis labiau kintant objekto parametrams, blogėja reguliavimo kokybė, IAE didėja. Nekeičiant regulatoriaus parametų minimali integruota absoliučioji paklaida $IAE = 0,8367$.

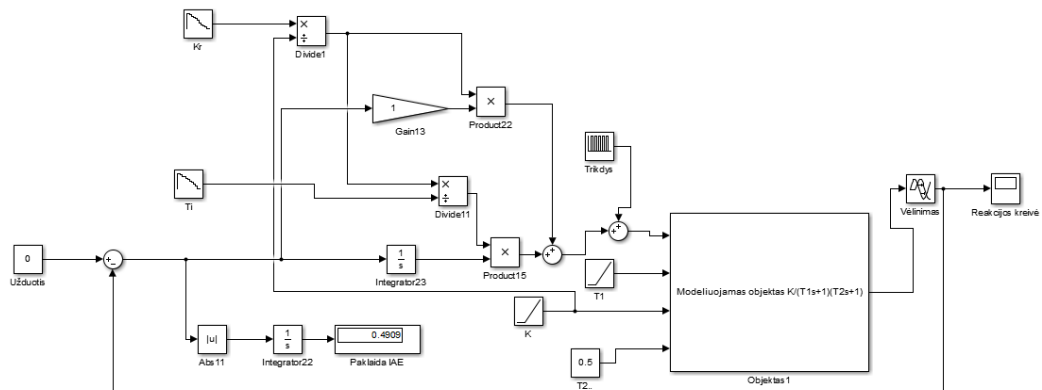
Kadangi kintantys objekto parametrai yra žinomi, objekto stiprinimo koeficientas K_{pr} didėja nuo 1 iki 3, o objekto laiko pastovioji T_I mažėja nuo 1 iki 0,3, todėl naudodamiesi 3.10 lentelė duomenimis ir (3.12), (3.13), (3.14), (3.15), (3.16) lygtimis galime apskaičiuoti reikiamus regulatoriaus parametrus kurie pateikti 3.11 lentelė.

3.11 lentelė. Regulatoriaus koeficientų kitimas kai kinta tiriamo objekto modelio parametrai.

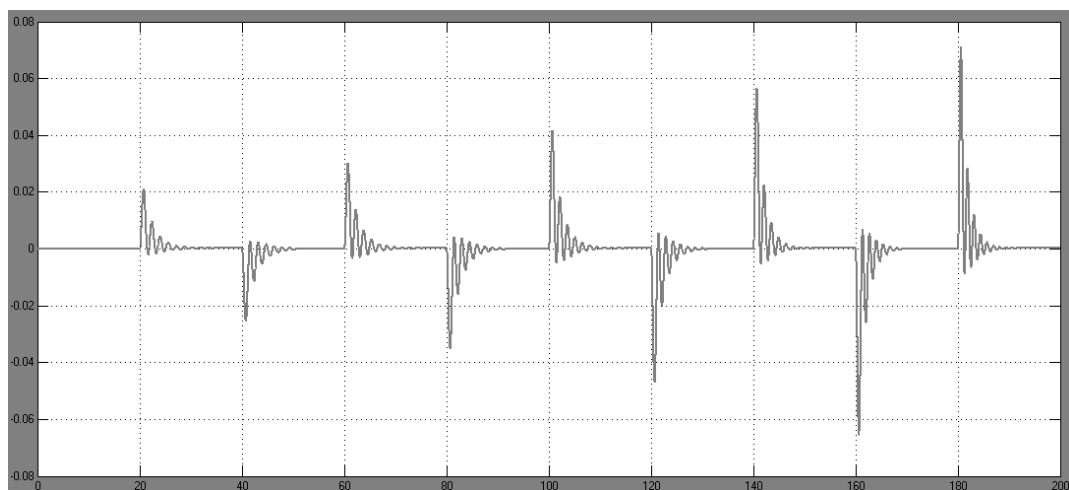
Modeliavimo laikas	Proceso tiprinimo koeficientas K_{pr}	Proceso laiko pastovioji T_I	Regulatoriaus stiprinimo koeficientas K_r	Regulatoriaus Laiko pastovioji T_i
0	1	1	7,7956	1,6556
20	1,2	0,93	7,5564	1,6
40	1,4	0,86	7,2022	1,5258
60	1,6	0,79	6,9814	1,4827
80	1,8	0,72	6,6318	1,42
100	2	0,65	6,2316	1,354

120	2,2	0,58	5,7578	1,2847
140	2,4	0,51	5,1874	1,211
160	2,6	0,44	4,968	1,1256
180	2,8	0,37	4,774	1,032
200	3	0,3	4,516	0,9288

Toliau sudaroma tiriamo objekto analizės schema (žr. 3.31 pav.) su kintančiais tiriamo objekto modelio parametrais ir kintančiais reguliatorių parametrais iš 3.11 lentelė.



3.31 pav. Antros eilės objekto su vėlavimu, kintančiais objekto ir reguliatoriaus parametrais analizės schema.



3.32 pav. Antros eilės objekto su kintančiu objekto stiprinimo koeficientu K_{pr} (1-3), kintančia objekto laiko pastoviaja T_1 (1-0,3) ir pritaikytu adaptyvumu, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.

3.32 pav. pavaizduotas pereinamasis procesas kur reguliatoriaus parametrai kinta kartu su kintančiais objekto modelio parametrais. Šiuo atveju valdymo kokybė geresnė. Minimali integruota absoliučioji paklaida IAE sumažėja nuo 0,8367 iki 0,4909.

3.4 Adaptyvios reguliavimo sistemos modeliavimas parametru adaptavimui naudojant pereinamojo proceso duomenis (pirmos eilės objektai)

Literatūroje pateikiama metodika kaip koreguoti reguliatoriaus parametrus pagal pereinamuosius procesus, tam yra naudojami du parametrai, slopimo laipsnis Ψ ir švytavimų periodas T [10].

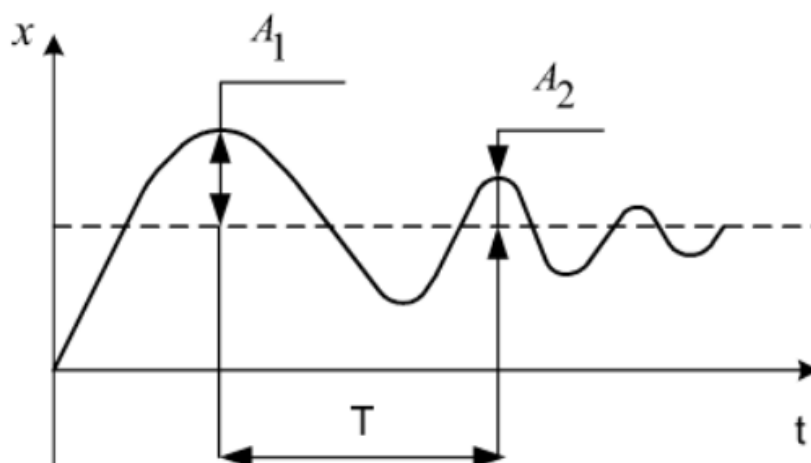
Regulatoriaus derinimas pagal uždarnosios sistemos pereinamąjį procesą, kai nėra žinomi objekto parametrai. Pradžiai nustatome objekto parametrų ribines kitimo reikšmes, kurios pateiktos 3.12 lentelė.

3.12 lentelė. Objekto parametrų ribinės kitimo reikšmės, kai sistema pradeda dirbti nestabiliai (pereinamasis procesas nenusistovi iki sekančio trikdžio).

K_{pr}	T_{pr}	τ_{pr}	IAE
45%	-	-	0,05647 (Pav. 44)
-	-33%	-	0,05285 (Pav. 46)
-	-	33%	0,05077 (Pav. 48)
-	-20%	15%	0,06422 (Pav. 50)
20%	-20%	-	0,08039 (Pav. 52)
15%	-	20%	0,05532 (Pav. 54)

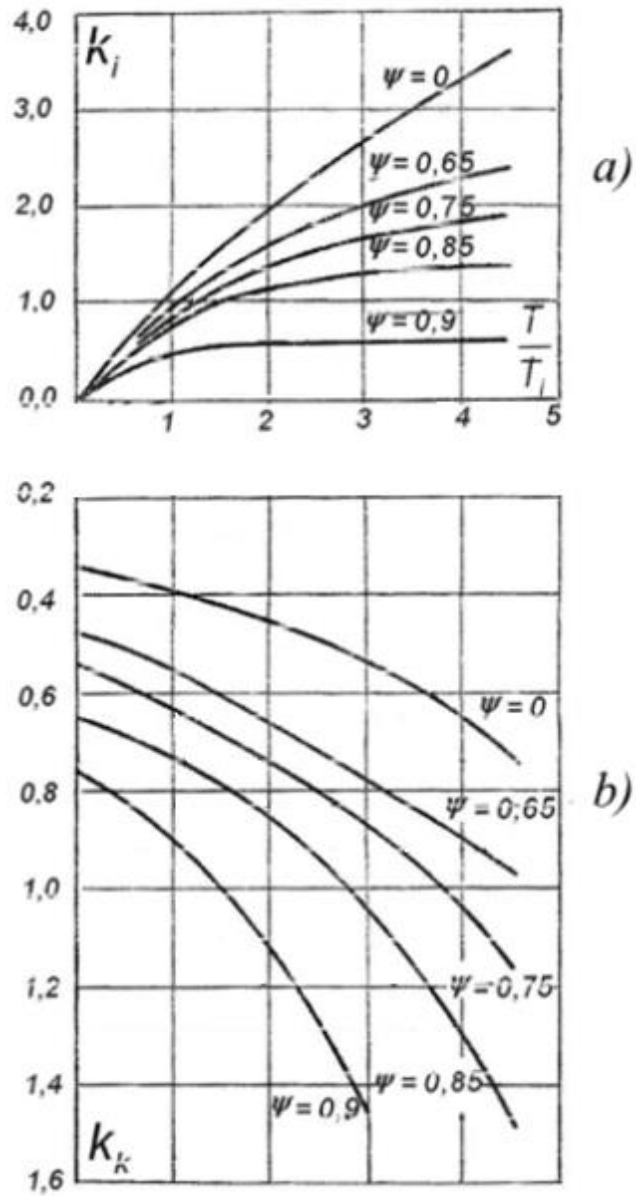
Toliau naudojantis uždarnosios sistemos pereinamojo proceso kreive ir lygtimi (3.18) nustatomas slopimo laipsnis Ψ . Koeficientai A_1 , A_2 ir T randami pagal pavyzdį (žr. 3.33 pav.).

$$\Psi = 1 - \frac{A_2}{A_1} \quad (3.18)$$

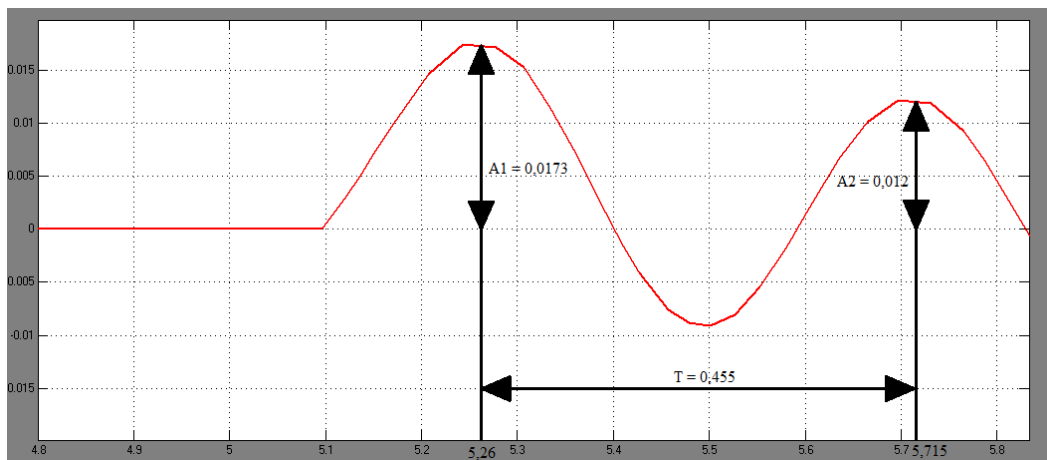


3.33 pav. A_1 , A_2 ir T koeficientų grafinio nustatymo pavyzdys [10].

Regulatoriui derinti taikomi grafikai (žr. 3.34 pav.), kurie vaizduoja pataisos koeficientų k_k ir k_i priklausomybę nuo svyravimų periodo T ir reguliatoriuje nustatytos integravimo laiko pastoviosios santykio, esant įvairioms pereinamojo proceso slopimo laipsnio vėrtėms. k_k ir k_i yra atitinkamai regulatoriaus perdavimo koeficiento K_r ir integravimo laiko pastoviosios T_i pataisos koeficientai [10].



3.34 pav. PI regulatoriaus optimalaus derinimo grafikai: a) - integravimo laiko pastoviosios pataisos koeficientų nustatymo grafikai; b) - stiprinimo koeficiento pataisos koeficientų nustatymo grafikai [10].



3.35 pav. Tiriama objekto modelio reakcijos kreivė iš kurios nustatome slopimo laipsnį ir svyravimų periodą.

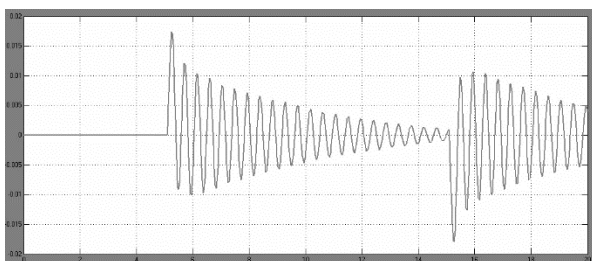
Iš 3.35 pav. pavaizduoto pereinamojo proceso buvo nustatytas slopimo laipsnis $\Psi = 0,3064$ ir svyravimų periodas $T_p = 0,455$. Pasinaudojus derinimo grafikais (žr. 3.34 pav.), gauti pataisos koeficientai $k_k = 0,529$ ir $k_i = 1,2941$. Šiuos koeficientai dauginami iš turimų reguliatoriaus parametrų, kurie gauti (3.4), (3.5) lygtyse.

$$K_{pat} = K_r * k_k = 9,5278 * 0,529 = 5,0402 \quad (3.19)$$

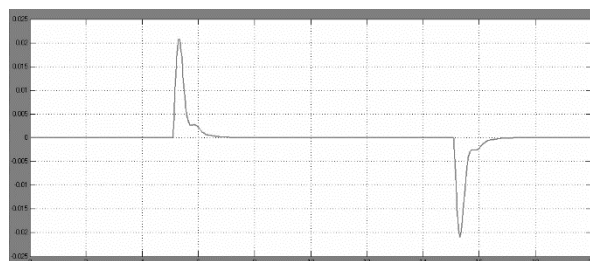
$$T_{ipat} = T_i * k_i = 0,3229 * 1,2941 = 0,4179 \quad (3.20)$$

Šie veiksmus atliekami su kitais modeliuojamais pereinamaisiais procesais.

Rezultatai, kai objekto stiprinimo koeficientas padidėja 45%, $K_{pr} = 1,45$ ir reguliatoriaus parametrai nesikeičia, $IAE = 0,05647$ (žr. 3.36 pav.), o 3.37 pav. pavaizduotas pereinamasis procesas su pritaikytais pataisos koeficientais. Apskaičiuoti reguliatoriaus parametrai: $K_{pat} = 5,0402$, $T_{ipat} = 0,4179$, $IAE = 0,01658$.

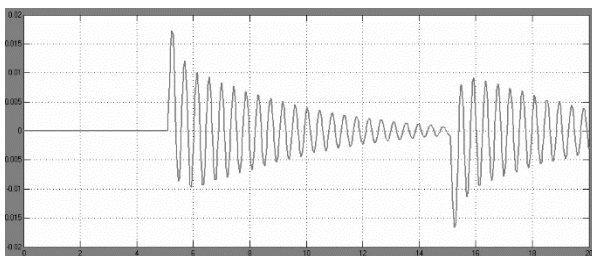


3.36 pav. Tiriama objekto modelio, kai objekto stiprinimo koeficientas padidėja 45%, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.

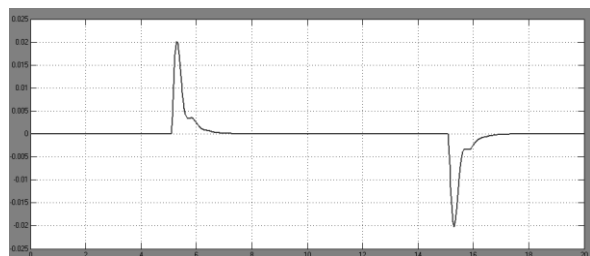


3.37 pav. Tiriama objekto modelio, kai objekto stiprinimo koeficientas padidėja 45% ir reguliatoriaus parametrams pritaikyti pataisos koeficientai, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.

Rezultatai, kai objekto laiko pastovioji sumažėja 33%, $T_{pr} = 0,67$ ir reguliatoriaus parametrai nesikeičia, $IAE = 0,05285$ (žr. 3.38 pav.), o 3.39 pav. pavaizduotas pereinamasis procesas su pritaikytais pataisos koeficientais. Apskaičiuoti reguliatoriaus parametrai: $K_{pat} = 5,0973$, $T_{ipat} = 0,423$, $IAE = 0,0166$.



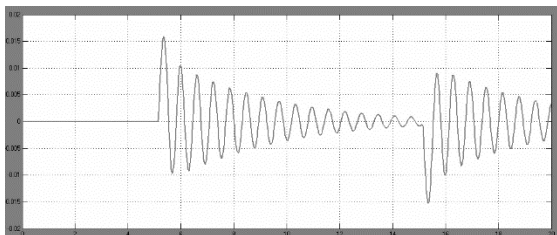
3.38 pav. Tiriama objekto modelio, kai objekto laiko pastovioji sumažėja 33%, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.



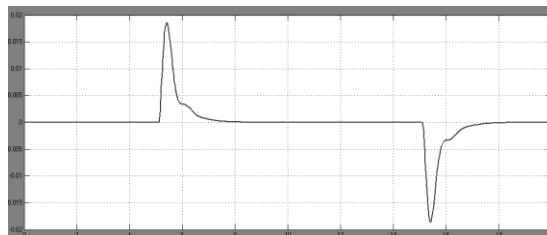
3.39 pav. Tiriama objekto modelio, kai objekto laiko pastovioji sumažėja 33% ir reguliatoriaus parametrams pritaikyti pataisos koeficientai, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.

Rezultatai, kai objekto vėlinimas padidėja 33%, $\tau_{pr} = 0,133$ ir reguliatoriaus parametrai nesikeičia, $IAE = 0,05077$ (žr. 3.40 pav.), o 3.41 pav. pavaizduotas pereinamasis procesas

su pritaikytais pataisos koeficientais. Apskaičiuoti reguliatoriaus parametrai: $K_{pat} = 5,4928$, $T_{ipat} = 0,5888$, $IAE = 0,02144$.

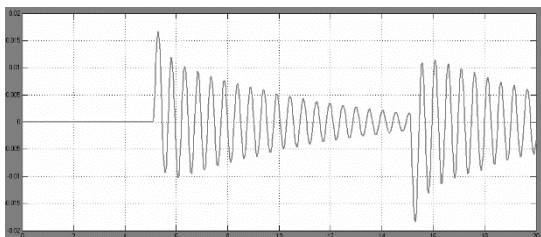


3.40 pav. Tiriamo objekto modelio, kai objekto vėlinimas padidėja 33%, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.

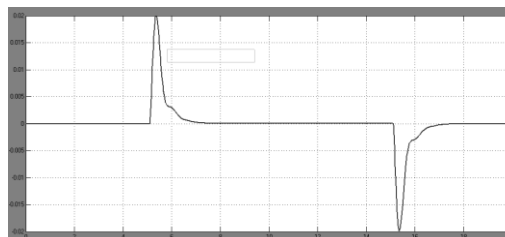


3.41 pav. Tiriamo objekto modelio, kai objekto vėlinimas padidėja 33% ir reguliatoriaus parametrams pritaikyti pataisos koeficientai, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.

Rezultatai, kai objekto vėlinimas padidėja 15%, $\tau_{pr} = 0,115$, objekto laiko pastovioji sumažėja 20%, $T_{pr} = 0,8$ ir reguliatoriaus parametrai nesikeičia, $IAE = 0,06422$ (žr. 3.42 pav.), 3.43 pav. pavaizduotas pereinamasis procesas su pritaikytais pataisos koeficientais. Apskaičiuoti reguliatoriaus parametrai: $K_{pat} = 4,9316$, $T_{ipat} = 0,4749$, $IAE = 0,01926$.

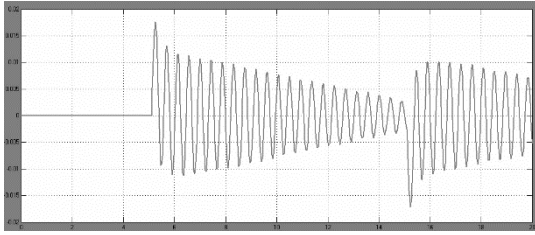


3.42 pav. Tiriamo objekto modelio, kai objekto vėlinimas padidėja 15% ir objekto laiko pastovioji sumažėja 20%, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.

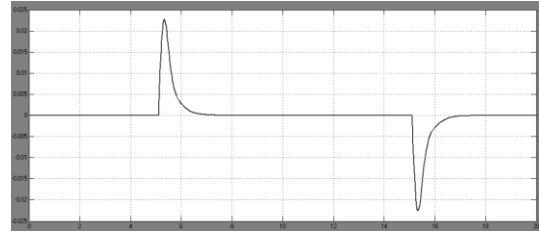


3.43 pav. Tiriamo objekto modelio, kai objekto vėlinimas padidėja 15%, objekto laiko pastovioji sumažėja 20% ir reguliatoriaus parametrams pritaikyti pataisos koeficientai, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.

Rezultatai, kai objekto stiprinimo koeficientas padidėja 20%, $K_{pr} = 1,2$, objekto laiko pastovioji sumažėja 20%, $T_{pr} = 0,8$ ir reguliatoriaus parametrai nesikeičia, $IAE = 0,08039$ (žr. 3.44 pav.), o 3.45 pav. pavaizduotas pereinamasis procesas su pritaikytais pataisos koeficientais. Apskaičiuoti reguliatoriaus parametrai: $K_{pat} = 3,8784$, $T_{ipat} = 0,4368$, $IAE = 0,02253$.

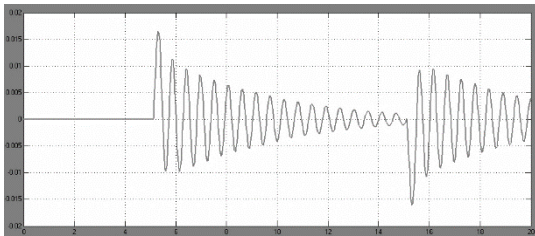


3.44 pav. Tiriamo objekto modelio, kai objekto stiprinimo koeficientas padidėja 20% ir objekto laiko pastovioji sumažėja 20%, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai

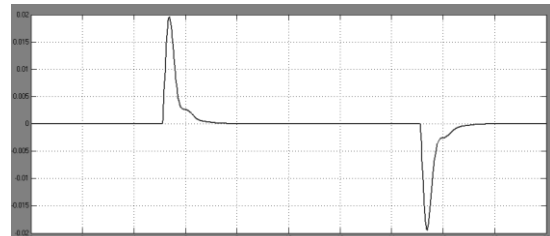


3.45 pav. Tiriamo objekto modelio, kai objekto stiprinimo koeficientas padidėja 20%, objekto laiko pastovioji sumažėja 20% ir regulatoriaus parametrams pritaikyti pataisos koeficientai, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.

Rezultatai, kai objekto stiprinimo koeficientas padidėja 15%, $K_{pr} = 1,15$, objekto vėlinimas padidėja 20%, $\tau_{pr} = 0,12$ ir regulatoriaus parametrai nesikeičia, $IAE = 0,05532$ (žr. 3.46 pav.), o 3.47 pav. pavaizduotas pereinamasis procesas su pritaikytais pataisos koeficientais. Apskaičiuoti regulatoriaus parametrai: $K_{pat} = 5,1564$, $T_{ipat} = 0,4937$, $IAE = 0,01915$.



3.46 pav. Tiriamo objekto modelio, kai objekto stiprinimo koeficientas padidėja 15% ir objekto vėlinimas padidėja 20%, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai

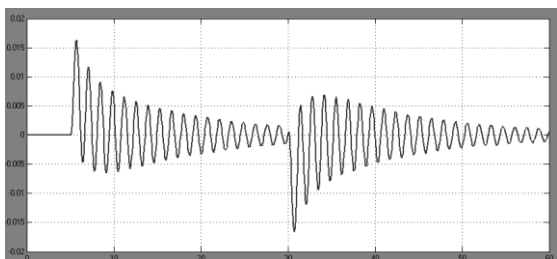


3.47 pav. Tiriamo objekto modelio, kai objekto stiprinimo koeficientas padidėja 15%, objekto vėlinimas padidėja 20% ir regulatoriaus parametrams pritaikyti pataisos koeficientai, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.

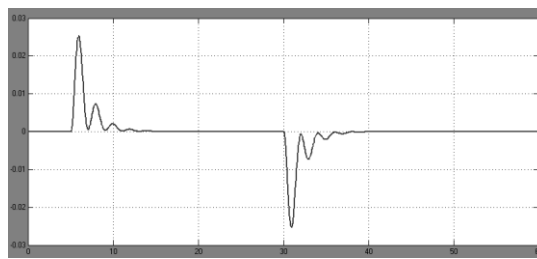
3.5 Adaptyvios reguliavimo sistemos modeliavimas parametru adaptavimui, naudojant antros eilės objekto pereinamojo proceso duomenis (antros eilės objektai)

Regulatoriaus derinimas pagal uždarnosios antros eilės sistemos pereinamąjį procesą, kai nėra žinomi objekto parametrai. Atliekami tokie patys veiksmai kaip ir pirmos eilės sistemai. Naudodamiesi uždarnosios sistemos pereinamojo proceso kreive ir lygtimi (3.18) nustatomas slopimo laipsnis Ψ . Koeficientai A_1 , A_2 ir T_p randami pagal pavyzdį (žr. 3.33 pav.). Gauti pataisos koeficientai k_k ir k_i dauginami iš (3.15) ir (3.16) lygtyse apskaičiuotų regulatoriaus parametru.

Rezultatai, kai objekto stiprinimo koeficientas padidėja 20%, $K_{pr} = 1,2$ ir regulatoriaus parametrai nesikeičia, $IAE = 0,1528$ (žr. 3.36 pav.), o 3.49 pav. pavaizduotas pereinamasis procesas su pritaikytais pataisos koeficientais. Apskaičiuoti regulatoriaus parametrai: $K_{pat} = 3,508$, $T_{ipat} = 1,6059$, $IAE = 0,07228$.

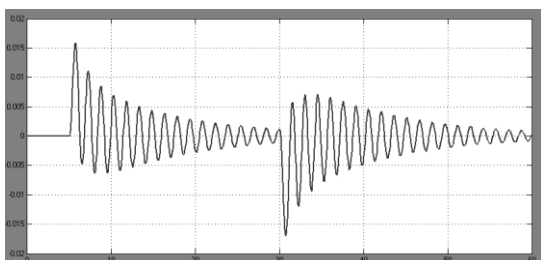


3.48 pav. Tiriamo objekto modelio, kai objekto stiprinimo koeficientas padidėja 20%, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.



3.49 pav. Tiriamo objekto modelio, kai objekto stiprinimo koeficientas padidėja 20% ir reguliatoriaus parametrams pritaikyti pataisos koeficientai, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.

Rezultatai, kai objekto vėlinimas padidėja 20%, $\tau_{pr} = 0,12$ ir reguliatoriaus parametrai nesikeičia, $IAE = 0,1489$ (žr. 3.50 pav.), o 3.51 pav. pavaizduotas pereinamasis procesas su pritaikytais pataisos koeficientais. Apskaičiuoti reguliatoriaus parametrai: $K_{pat} = 3,6686$, $T_{ipat} = 1,6556$, $IAE = 0,07125$.

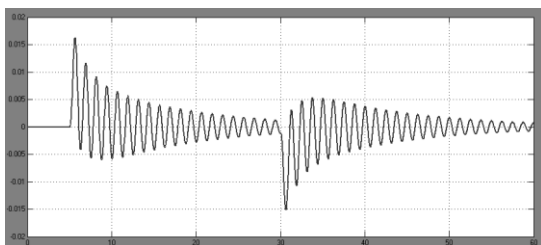


3.50 pav. Tiriamo objekto modelio, kai objekto vėlinimas padidėja 20%, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.

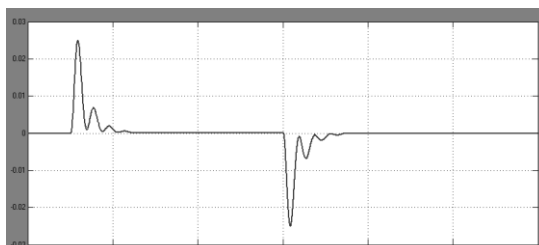


3.51 pav. Tiriamo objekto modelio, kai objekto vėlinimas padidėja 20% ir reguliatoriaus parametrams pritaikyti pataisos koeficientai, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.

Rezultatai, kai objekto laiko pastovioji sumažėja 30%, $T_1 = 0,7$ ir reguliatoriaus parametrai nesikeičia, $IAE = 0,1337$ (žr. 3.52 pav.), o 3.53 pav. pavaizduotas pereinamasis procesas su pritaikytais pataisos koeficientais. Apskaičiuoti reguliatoriaus parametrai: $K_{pat} = 3,3934$, $T_{ipat} = 1,4121$, $IAE = 0,0657$.



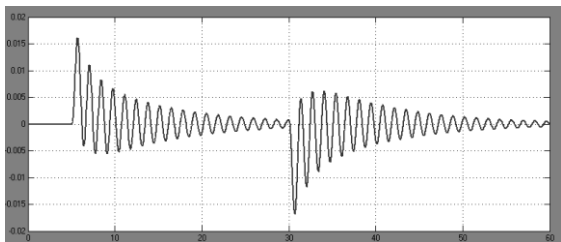
3.52 pav. Tiriamo objekto modelio, kai objekto laiko pastovioji T_1 sumažėja 30%, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.



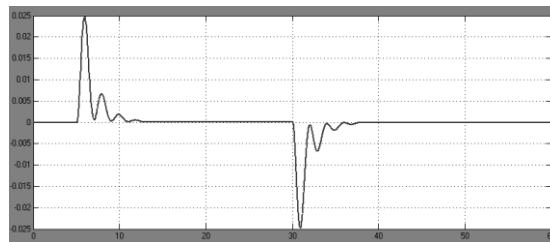
3.53 pav. Tiriamo objekto modelio, kai objekto laiko pastovioji T_1 sumažėja 30%, ir reguliatoriaus parametrams pritaikyti pataisos koeficientai, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.

Rezultatai, kai objekto stiprinimo koeficientas padidėja 10%, $K_{pr} = 1,1$, objekto laiko pastovioji sumažėja 10%, $T_1 = 0,9$ ir reguliatoriaus parametrai nesikeičia, $IAE = 0,1245$ (žr. 3.54

pav.), o 3.55 pav. pavaizduotas pereinamasis procesas su pritaikytais pataisos koeficientais. Apskaičiuoti regulatoriaus parametrai: $K_{pat} = 3,4854$, $T_{ipat} = 1,5096$, $IAE = 0,06838$.

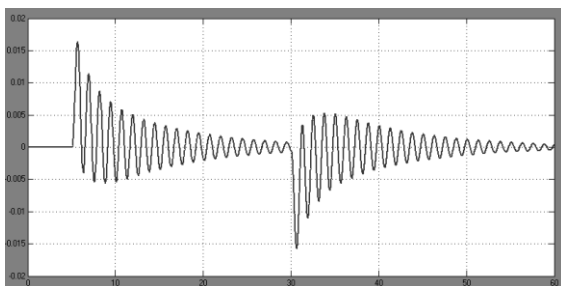


3.54 pav. Tiriama objekto modelio, kai objekto stiprinimo koeficientas padidėja 10% ir objekto laiko pastovioji T_1 sumažėja 10%, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.

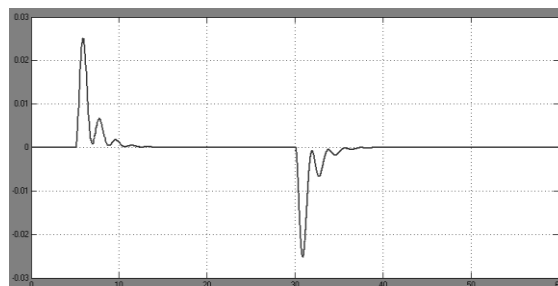


3.55 pav. Tiriama objekto modelio, kai objekto stiprinimo koeficientas padidėja 10%, objekto laiko pastovioji T_1 sumažėja 10% ir regulatoriaus parametrams pritaikyti pataisos koeficientai, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.

Rezultatai, kai objekto stiprinimo koeficientas padidėja 15%, $K_{pr} = 1,15$, objekto laiko pastovioji sumažėja 20%, $T_2 = 0,4$ ir regulatoriaus parametrai nesikeičia, $IAE = 0,119$ (žr. 3.56 pav.), o 3.57 pav. pavaizduotas pereinamasis procesas su pritaikytais pataisos koeficientais. Apskaičiuoti regulatoriaus parametrai: $K_{pat} = 3,4301$, $T_{ipat} = 1,4205$, $IAE = 0,06538$.

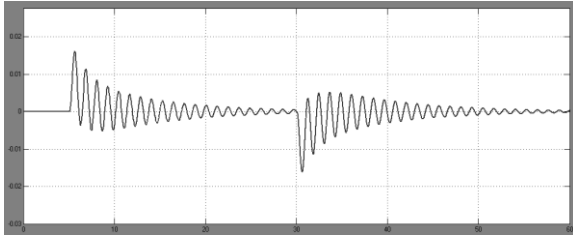


3.56 pav. Tiriama objekto modelio, kai objekto stiprinimo koeficientas padidėja 15% ir objekto laiko pastovioji T_2 sumažėja 20%, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.

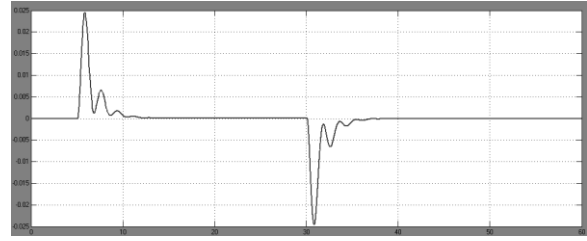


3.57 pav. Tiriama objekto modelio, kai objekto stiprinimo koeficientas padidėja 15%, objekto laiko pastovioji T_2 sumažėja 20% ir regulatoriaus parametrams pritaikyti pataisos koeficientai, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.

Rezultatai, kai objekto laiko pastovioji T_1 sumažėja 20%, $T_1 = 0,8$, objekto laiko pastovioji T_2 sumažėja 20%, $T_2 = 0,4$ ir regulatoriaus parametrai nesikeičia, $IAE = 0,1077$ (žr. 3.58 pav.), o 3.59 pav. pavaizduotas pereinamasis procesas su pritaikytais pataisos koeficientais. Apskaičiuoti regulatoriaus parametrai: $K_{pat} = 3,4301$, $T_{ipat} = 1,3634$, $IAE = 0,06276$.

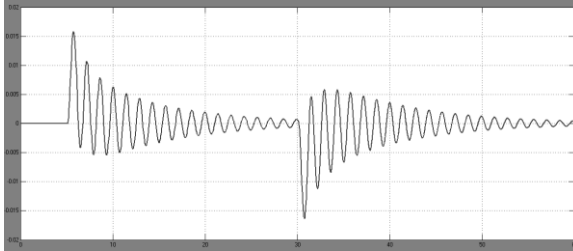


3.58 pav. Tiriamo objekto modelio, kai objekto laiko pastovioji T_1 sumažėja 20% ir objekto laiko pastovioji T_2 sumažėja 20%, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.



3.59 pav. Tiriamo objekto modelio, kai objekto laiko pastovioji T_1 sumažėja 20%, objekto laiko pastovioji T_2 sumažėja 20% ir regulatoriaus parametrams pritaikyti pataisos koeficientai, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.

Rezultatai, kai objekto vėlinimas padidėja 10%, $\tau_{pr} = 0,11$, objekto laiko pastovioji sumažėja 10%, $T_{pr} = 0,9$ ir regulatoriaus parametrai nesikeičia, $IAE = 0,1194$ (žr. 3.60 pav.), 3.61 pav. pavaizduotas pereinamasis procesas su pritaikytais pataisos koeficientais. Apskaičiuoti regulatoriaus parametrai: $K_{pat} = 3,5766$, $T_{ipat} = 1,5582$, $IAE = 0,06879$.

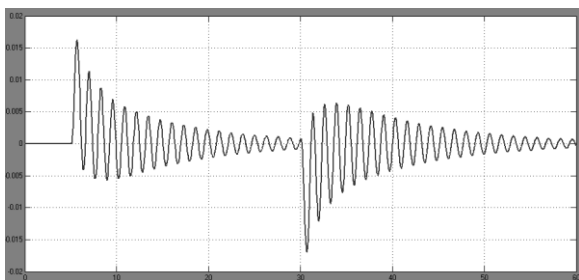


3.60 pav. Tiriamo objekto modelio, kai objekto laiko pastovioji T_1 sumažėja 10% ir objekto vėlinimas padidėja 10%, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.

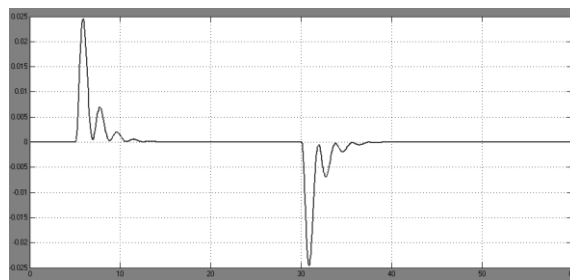


3.61 pav. Tiriamo objekto modelio, kai objekto laiko pastovioji T_1 sumažėja 10%, objekto vėlinimas padidėja 10% ir regulatoriaus parametrams pritaikyti pataisos koeficientai, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.

Rezultatai, kai objekto stiprinimo koeficientas padidėja 10%, $K_{pr} = 1,1$, objekto laiko pastovioji T_1 sumažėja 10%, $T_1 = 0,9$, objekto laiko pastovioji T_2 sumažėja 10%, $T_2 = 0,45$ ir regulatoriaus parametrai nesikeičia, $IAE = 0,1319$ (žr. 3.62 pav.), o 3.63 pav. pavaizduotas pereinamasis procesas su pritaikytais pataisos koeficientais. Apskaičiuoti regulatoriaus parametrai: $K_{pat} = 3,5766$, $T_{ipat} = 1,4607$, $IAE = 0,06449$.



3.62 pav. Tiriama objekto modelio, kai objekto stiprinimo koeficientas padidėja 10%, objekto laiko pastovioji T1 sumažėja 10% ir objekto laiko pastovioji T2 sumažėja 10%, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.



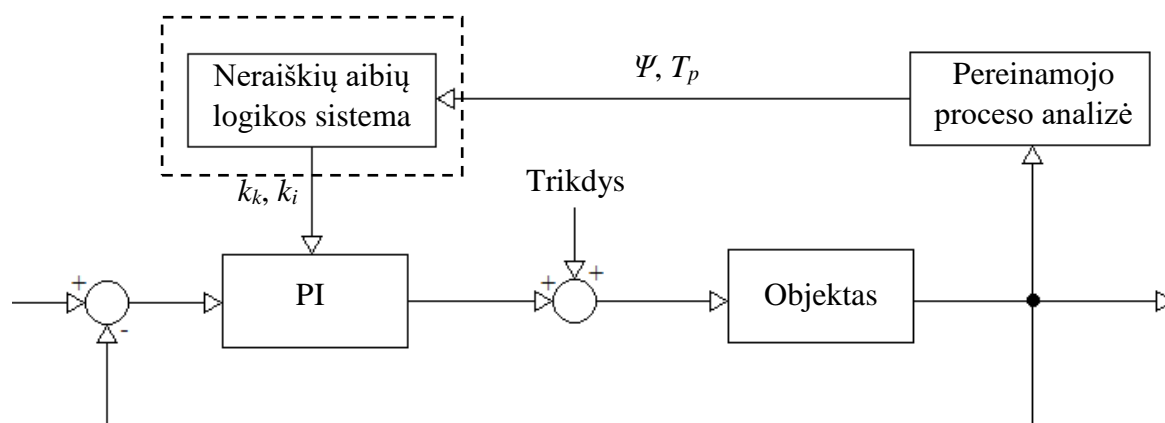
3.63 pav. Tiriama objekto modelio, kai objekto stiprinimo koeficientas padidėja 10%, objekto laiko pastovioji T1 sumažėja 10%, objekto laiko pastovioji T2 sumažėja 10% ir regulatoriaus parametrus pritaikyti pataisos koeficientai, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.

Pravesti tyrimai parodė, kad siūloma metodika veikia, ji nėra pakankamai lanksti, kadangi nėra galimybės papildomai įtakoti regulatoriaus parametrų derinimą atsižvelgiant į objekto specifiką. Tokia sistema leistų lanksčiau priderinti metodiką specifiniams valdymo objektams ir įvairiems pereinamojo proceso kokybės kriterijams. Todėl sekančiame skyriuje bus pasiūlyta sistema kuri bus realizuota *Fuzzy* logika.

4 Neraiškių aibių logikos ekspertinė sistema PI regulatoriaus parametų derinimui

Šiame skyriuje pagal pereinamojo proceso duomenis yra formuojama neraiškių aibių sistema kuri objekto parametrms pasikeitus atitinkamai pagal pereinamojo proceso charakteristikas keičia stiprinimo koeficientą ir integralinę PI dedamąją.

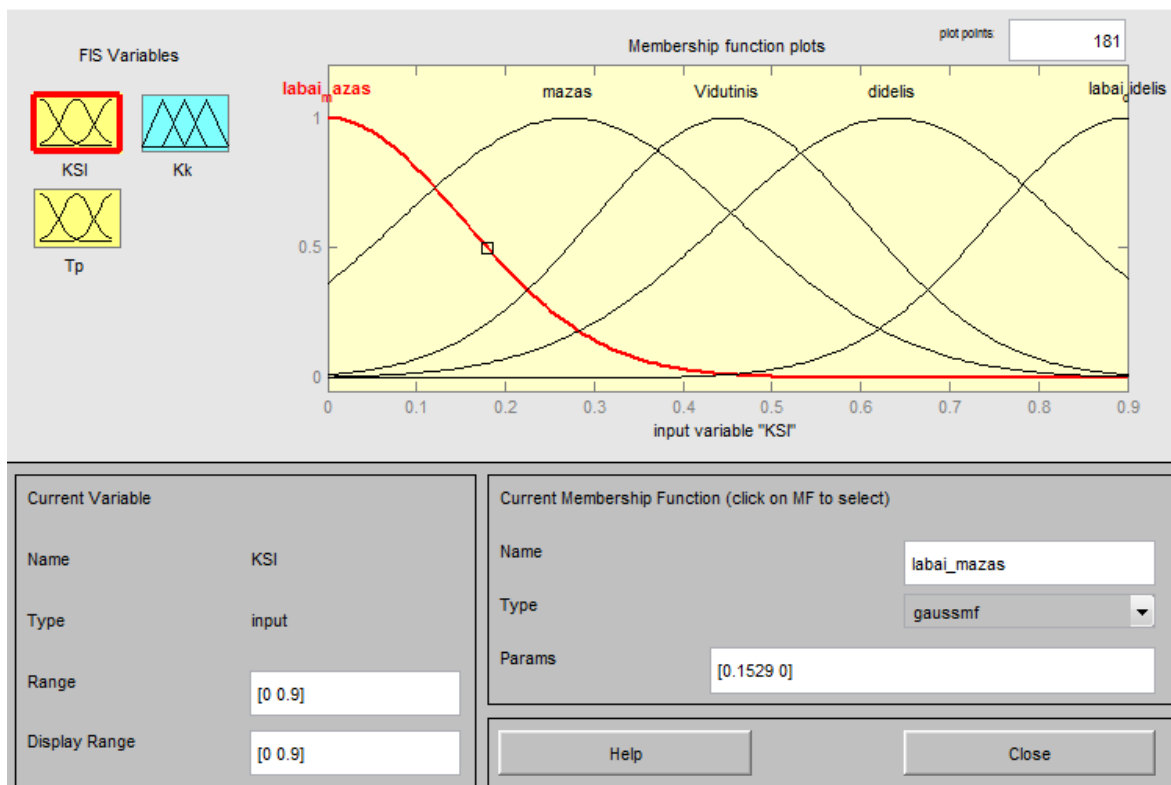
Pirmame etape sudaryta neraiškių aibių logikos PI regulatoriaus parametų derinimo ekspertinės sistemos struktūrinė schema (žr. 4.1 pav.). Neraiškių aibių logikos sistema turi du įėjimus: švytavimo laipsnį – ψ ir švytavimų periodą – T_p ir vieną išėjimą, pataisos koeficientą. Jei tai sistema skirta keisti regulatoriaus stiprinimo koeficientą tai išėjimas – k_k , jei sistema skirta keistu regulatoriaus integralinę dedamąją išėjimas – k_i .



4.1 pav. Neraiškių aibių logikos PI regulatoriaus parametų derinimo ekspertinės sistemos struktūrinė schema.

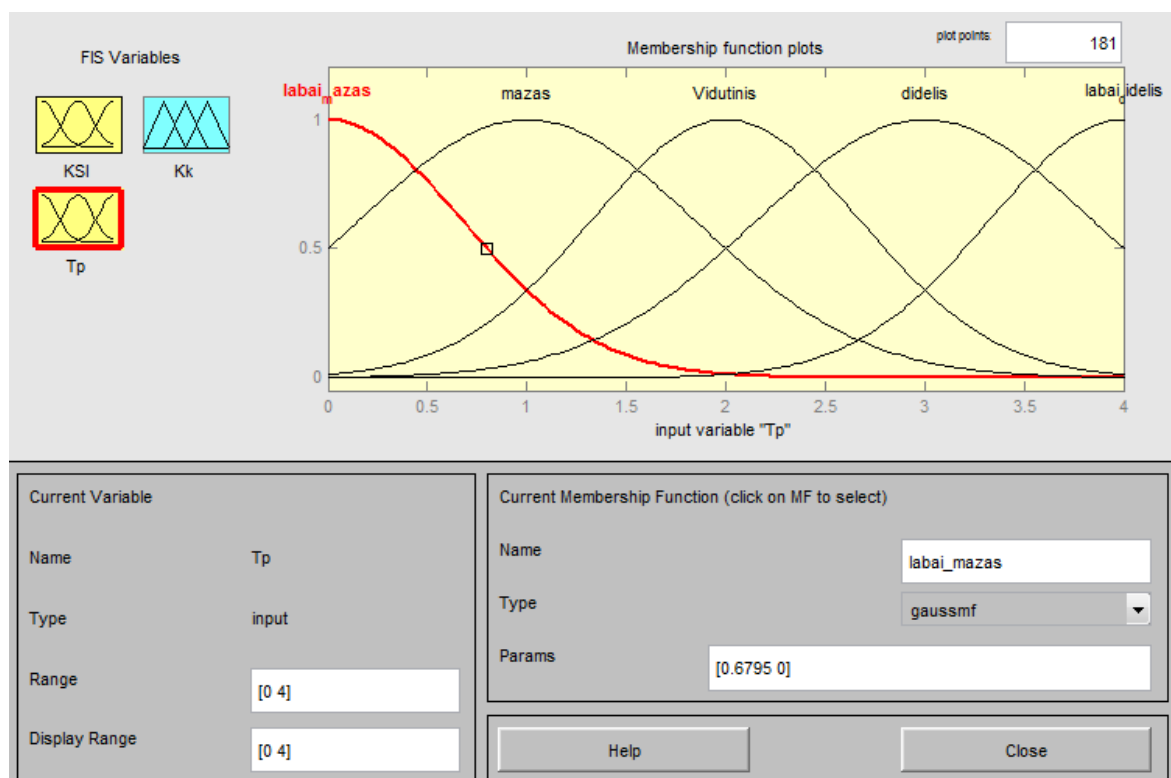
Pirmiausiai parodoma kaip formuojama stiprinimo koeficiento ekspertinė sistema. Pasitelkiant įėjimo signalus, švytavimo laipsnį ψ ir periodą T_p . Priklausomybės funkcijos suformuojamos pagal PI regulatoriaus optimalaus derinimo grafikus (žr. 3.34 pav.).

Įėjimo ψ priklausomybės funkcijų ribos – nuo 0 iki 0,9. Priklausomybės funkcijos: labai mažas ($\psi = 0$), mažas ($\psi = 0,65$), vidutinis ($\psi = 0,75$), didelis ($\psi = 0,85$) ir labai didelis ($\psi = 0,9$) parinktos pagal PI regulatoriaus optimalaus derinimo grafiką b (žr. 3.34 pav.) ir pakoreguotos bandymų būdu.



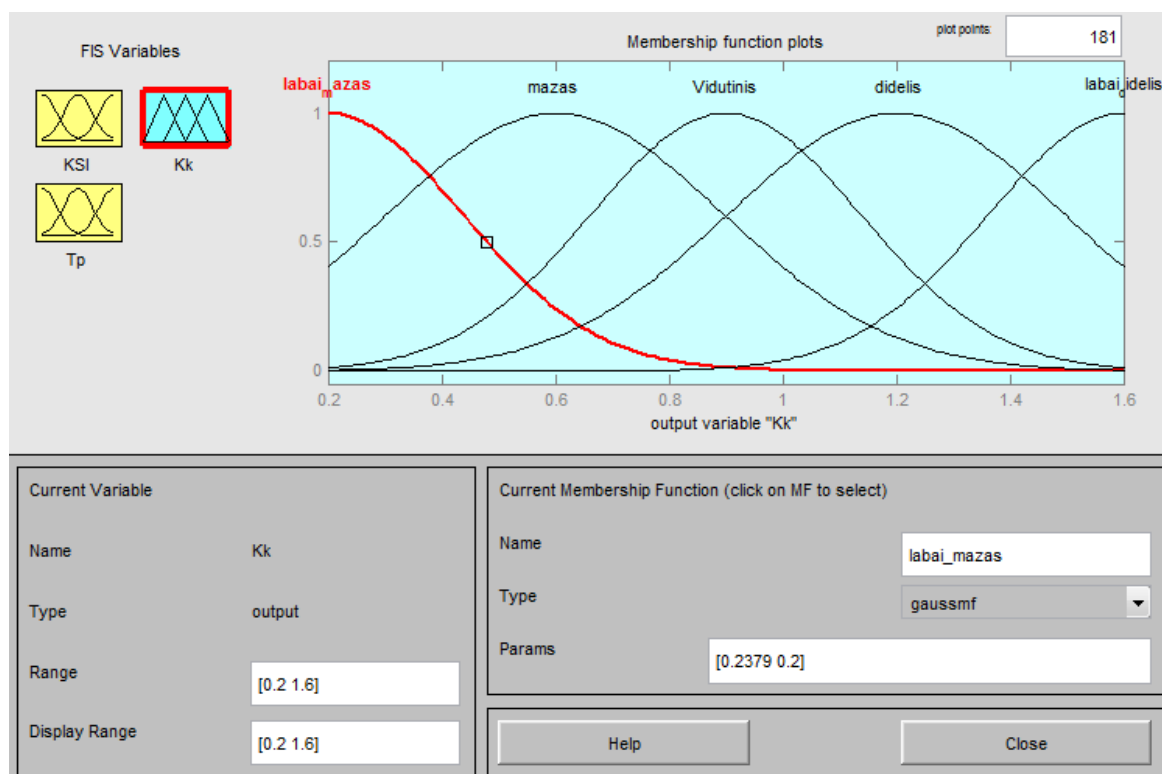
4.2 pav. Įėjimo ψ priklausomybės funkcijos k_k koeficientui.

Įėjimo T_p priklausomybės funkcijų ribos – nuo 0 iki 4. Priklausomybės funkcijos: labai mažas ($T_p = 0$), mažas ($T_p = 1$), vidutinis ($T_p = 2$), didelis ($T_p = 3$) ir labai didelis ($T_p = 4$) parinktos pagal PI regulatoriaus optimalaus derinimo grafiką b (žr. 3.34 pav.) ir pakoreguotos bandymų būdu.



4.3 pav. Įėjimo T_p priklausomybės funkcijos k_k koeficientui.

Išėjimo k_k priklausomybės funkcijų ribos – nuo 0,2 iki 1,6. Priklausomybės funkcijos: labai mažas ($k_k = 0,2$), mažas ($k_k = 0,6$), vidutinis ($k_k = 0,9$), didelis ($k_k = 1,2$) ir labai didelis ($k_k = 1,6$) parinktos pagal PI reguliatoriaus optimalaus derinimo grafiką b (žr. 3.34 pav.) ir pakoreguotos bandymų būdu.



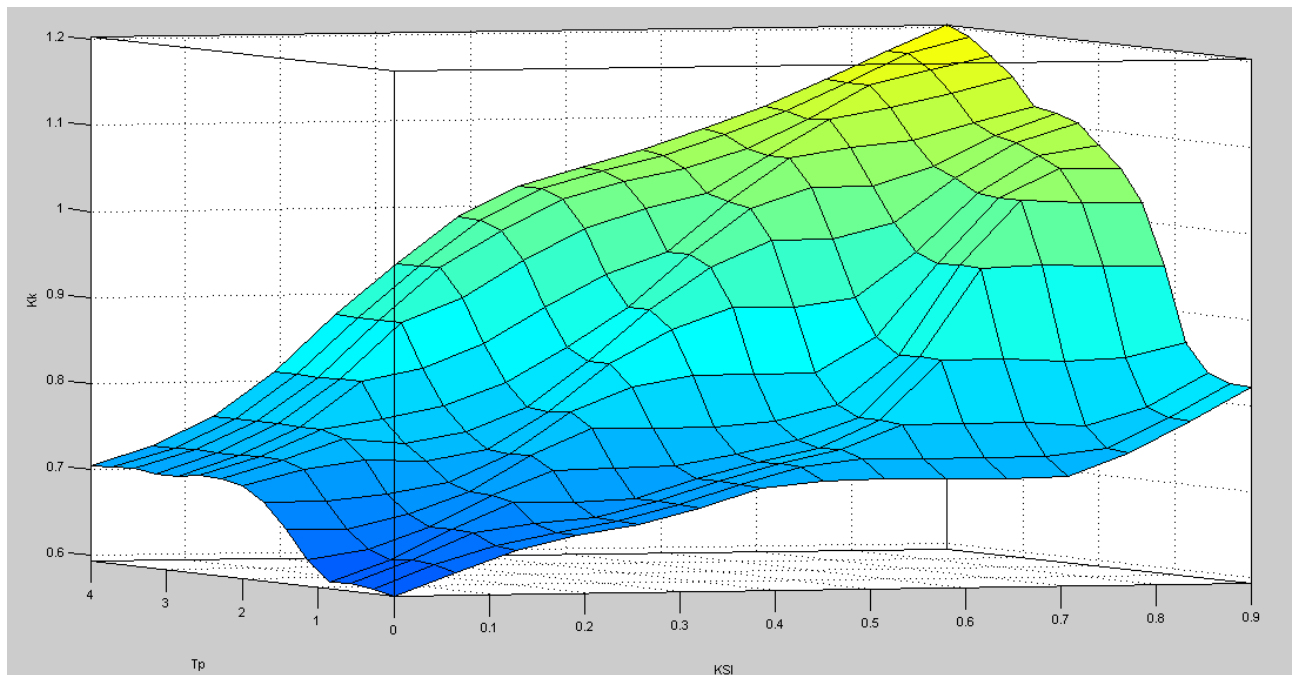
4.4 pav. Išėjimo k_k priklausomybės funkcijos.

Pagal priklausomybės funkcijas ir PI reguliatoriaus optimalaus derinimo grafiką b (žr. 3.34 pav.) surašome taisykles kaip turi keistis reguliatoriaus stiprinimo koeficientas.

4.1 lentelė. Neraiškių aibių logikos, skirtos koreguoti reguliatoriaus stiprinimo koeficientą, taisyklių bazė.

Eil. nr.	Loginis operatorius	ψ	Loginis operatorius	T_p	Loginis operatorius	k_k
1.	IF	Labai mažas	AND	Labai mažas	THEN	Labai mažas
2.	IF	Labai mažas	AND	Mažas	THEN	Labai mažas
3.	IF	Labai mažas	AND	Vidutinis	THEN	Mažas
4.	IF	Labai mažas	AND	Didelis	THEN	Mažas
5.	IF	Labai mažas	AND	Labai didelis	THEN	Mažas
6.	IF	Mažas	AND	Labai mažas	THEN	Mažas
7.	IF	Mažas	AND	Mažas	THEN	Mažas
8.	IF	Mažas	AND	Vidutinis	THEN	Mažas
9.	IF	Mažas	AND	Didelis	THEN	Vidutinis
10.	IF	Mažas	AND	Labai didelis	THEN	Vidutinis
11.	IF	Vidutinis	AND	Labai mažas	THEN	Mažas
12.	IF	Vidutinis	AND	Mažas	THEN	Mažas
13.	IF	Vidutinis	AND	Vidutinis	THEN	Vidutinis
14.	IF	Vidutinis	AND	Didelis	THEN	Vidutinis
15.	IF	Vidutinis	AND	Labai didelis	THEN	Vidutinis
16.	IF	Didelis	AND	Labai mažas	THEN	Mažas

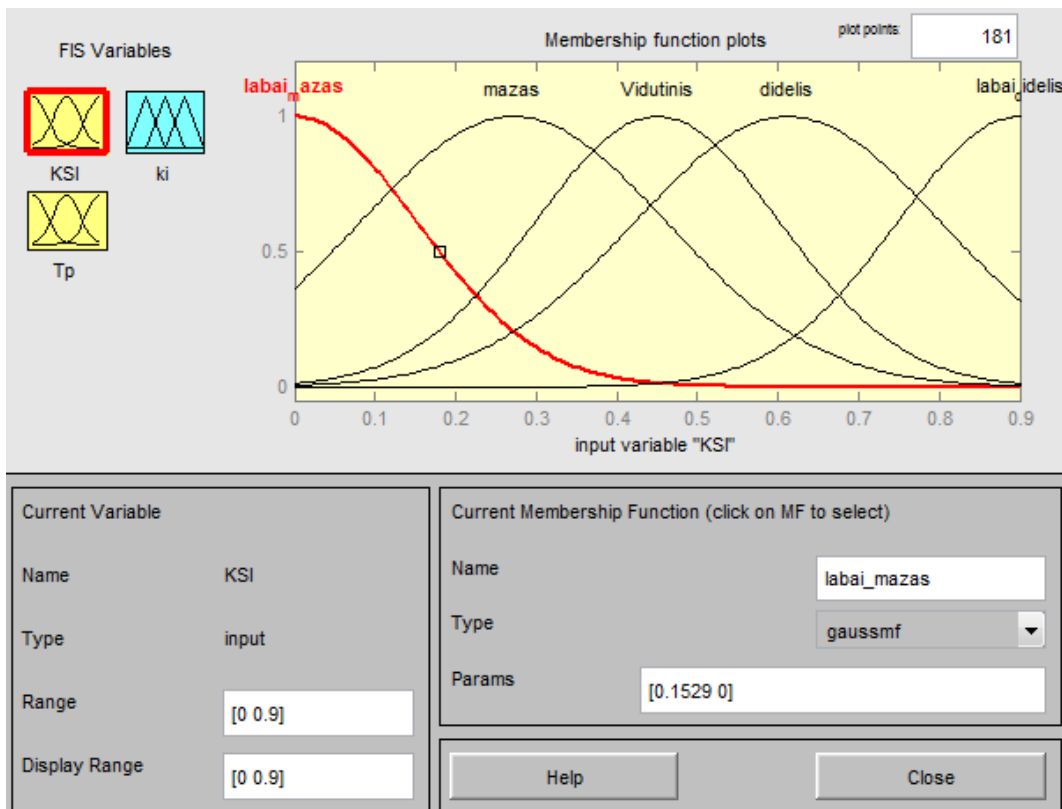
17.	IF	Didelis	AND	Mažas	THEN	Vidutinis
18.	IF	Didelis	AND	Vidutinis	THEN	Vidutinis
19.	IF	Didelis	AND	Didelis	THEN	Didelis
20.	IF	Didelis	AND	Labai didelis	THEN	Didelis
21.	IF	Labai didelis	AND	Labai mažas	THEN	Vidutinis
22.	IF	Labai didelis	AND	Mažas	THEN	Vidutinis
23.	IF	Labai didelis	AND	Vidutinis	THEN	Didelis
24.	IF	Labai didelis	AND	Didelis	THEN	Labai didelis
25.	IF	Labai didelis	AND	Labai didelis	THEN	Labai didelis



4.5 pav. Neraiškių aibių logikos, skirtos koreguoti reguliatoriaus stiprinimo koeficientą, erdvinė diagrama.

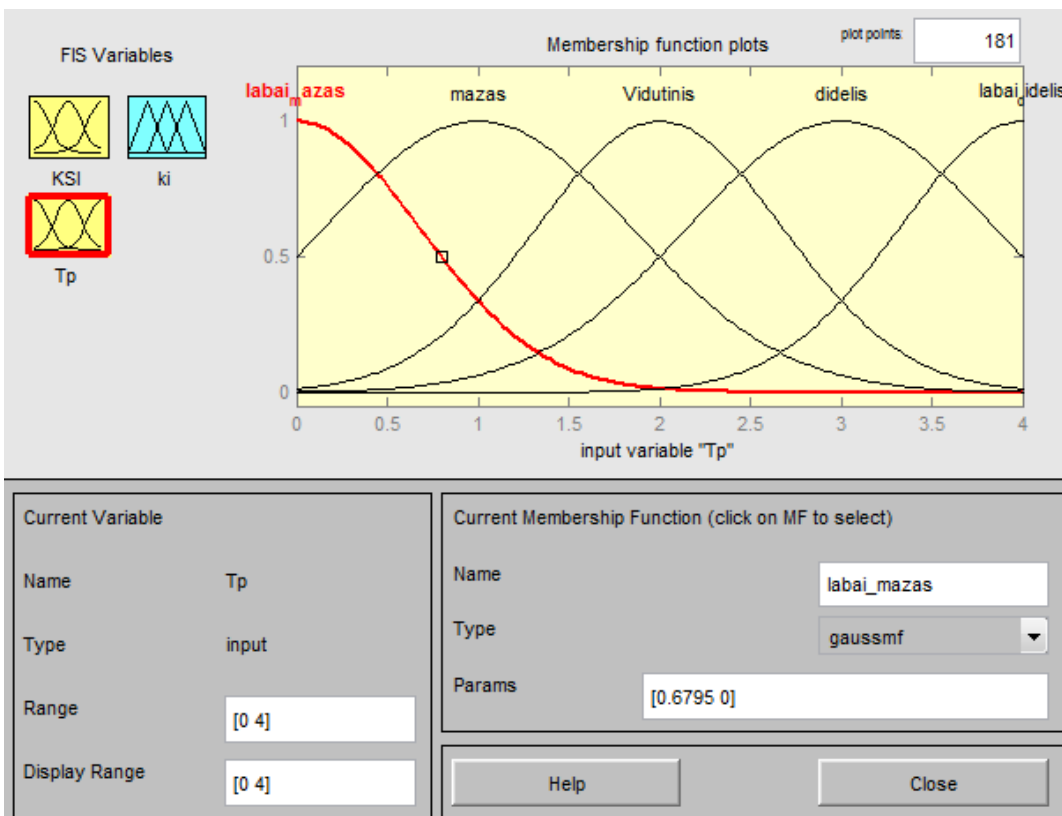
Sekančiame etape formuojama integralinės PI reguliatoriaus dedamosios ekspertinė sistema. Pasitelkiant įėjimo signalus, švytavimo laipsnį ψ ir periodą T_p . Priklausomybės funkcijos suformuojamos pagal PI reguliatoriaus optimalaus derinimo grafikus (žr. 3.34 pav.).

Įėjimo ψ priklausomybės funkcijų ribos – nuo 0 iki 0,9. Priklausomybės funkcijos: labai mažas ($\psi = 0$), mažas ($\psi = 0,65$), vidutinis ($\psi = 0,75$), didelis ($\psi = 0,85$) ir labai didelis ($\psi = 0,9$) parinktos pagal PI reguliatoriaus optimalaus derinimo grafiką b (žr. 3.34 pav.) ir pakoreguotos bandymų būdu.



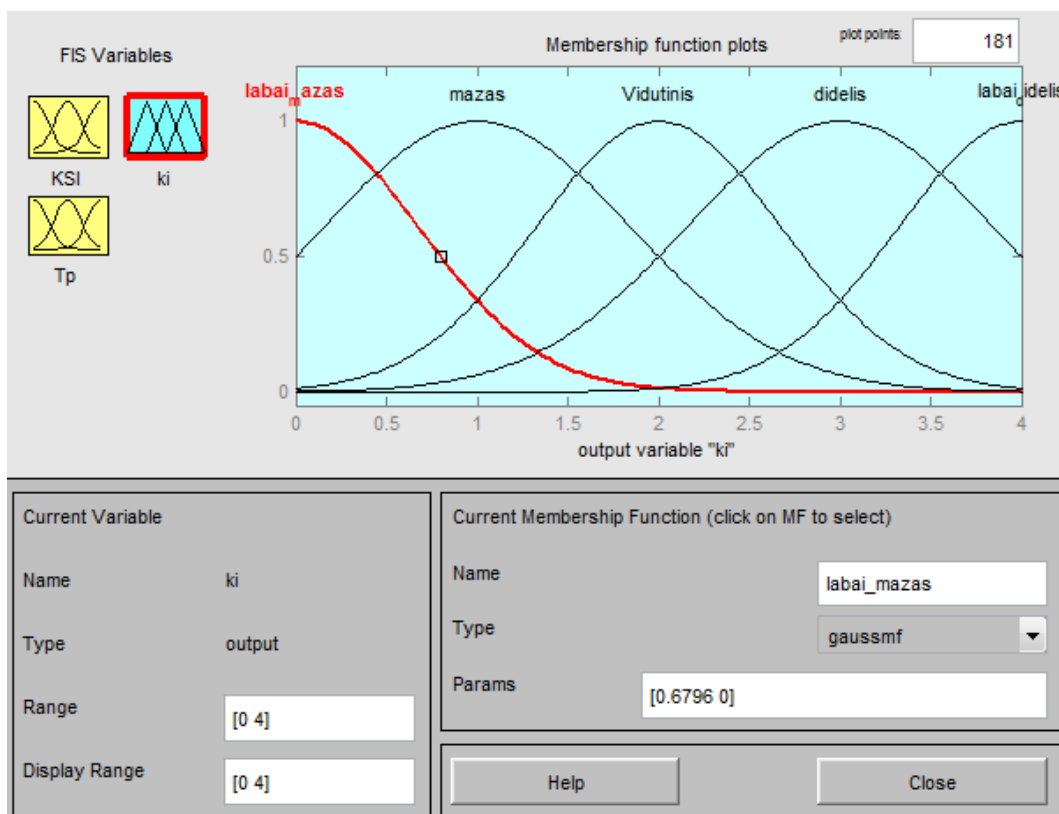
4.6 pav. Įėjimo ψ priklausomybės funkcijos k_i koeficientui.

Įėjimo T_p priklausomybės funkcijų ribos – nuo 0 iki 4. Priklausomybės funkcijos: labai mažas ($T_p = 0$), mažas ($T_p = 1$), vidutinis ($T_p = 2$), didelis ($T_p = 3$) ir labai didelis ($T_p = 4$) parinktos pagal PI regulatoriaus optimalaus derinimo grafiką b (žr. 3.34 pav.) ir pakoreguotos bandymų būdu.



4.7 pav. Įėjimo T_p priklausomybės funkcijos k_i koeficientui.

Išėjimo k_i priklausomybės funkcijų ribos – nuo 0 iki 4. Priklausomybės funkcijos: labai mažas ($k_k = 0$), mažas ($k_k = 1$), vidutinis ($k_k = 2$), didelis ($k_k = 3$) ir labai didelis ($k_k = 4$) parinktos pagal PI reguliatoriaus optimalaus derinimo grafiką b (žr. 3.34 pav.) ir pakoreguotos bandymų būdu.



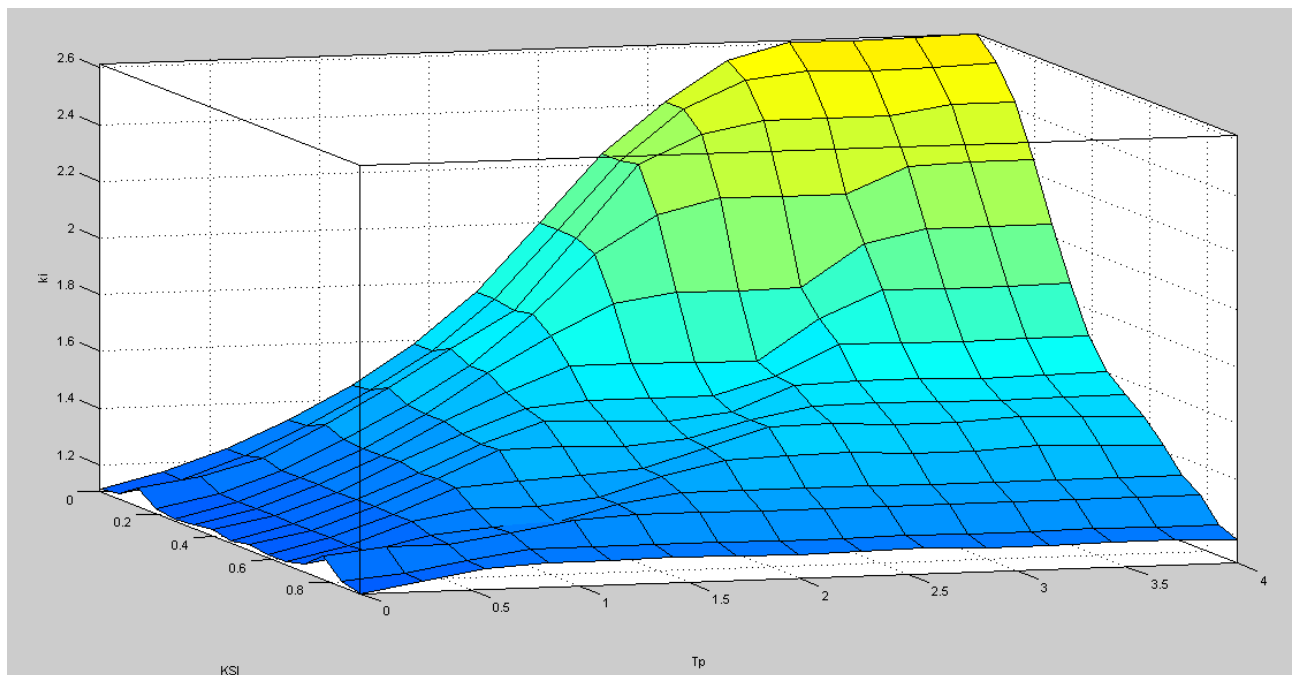
4.8 pav. Išėjimo k_i priklausomybės funkcijos.

Pagal priklausomybės funkcijas ir PI reguliatoriaus optimalaus derinimo grafiką b (žr. 3.34 pav.) surašome taisykles kaip turi keistis reguliatoriaus integralinė dedamoji.

4.2 lentelė. Neraiškių aibių logikos, skirtos koreguoti reguliatoriaus integralinę dedamąją, taisyklių bazė.

Eil. nr.	Loginis operatorius	ψ	Loginis operatorius	T_p	Loginis operatorius	k_i
1.	IF	Labai mažas	AND	Labai mažas	THEN	Labai mažas
2.	IF	Labai mažas	AND	Mažas	THEN	Mažas
3.	IF	Labai mažas	AND	Vidutinis	THEN	Vidutinis
4.	IF	Labai mažas	AND	Didelis	THEN	Didelis
5.	IF	Labai mažas	AND	Labai didelis	THEN	Didelis
6.	IF	Mažas	AND	Labai mažas	THEN	Labai mažas
7.	IF	Mažas	AND	Mažas	THEN	Mažas
8.	IF	Mažas	AND	Vidutinis	THEN	Vidutinis
9.	IF	Mažas	AND	Didelis	THEN	Vidutinis
10.	IF	Mažas	AND	Labai didelis	THEN	Vidutinis
11.	IF	Vidutinis	AND	Labai mažas	THEN	Labai mažas
12.	IF	Vidutinis	AND	Mažas	THEN	Mažas
13.	IF	Vidutinis	AND	Vidutinis	THEN	Mažas
14.	IF	Vidutinis	AND	Didelis	THEN	Vidutinis
15.	IF	Vidutinis	AND	Labai didelis	THEN	Vidutinis
16.	IF	Didelis	AND	Labai mažas	THEN	Labai mažas

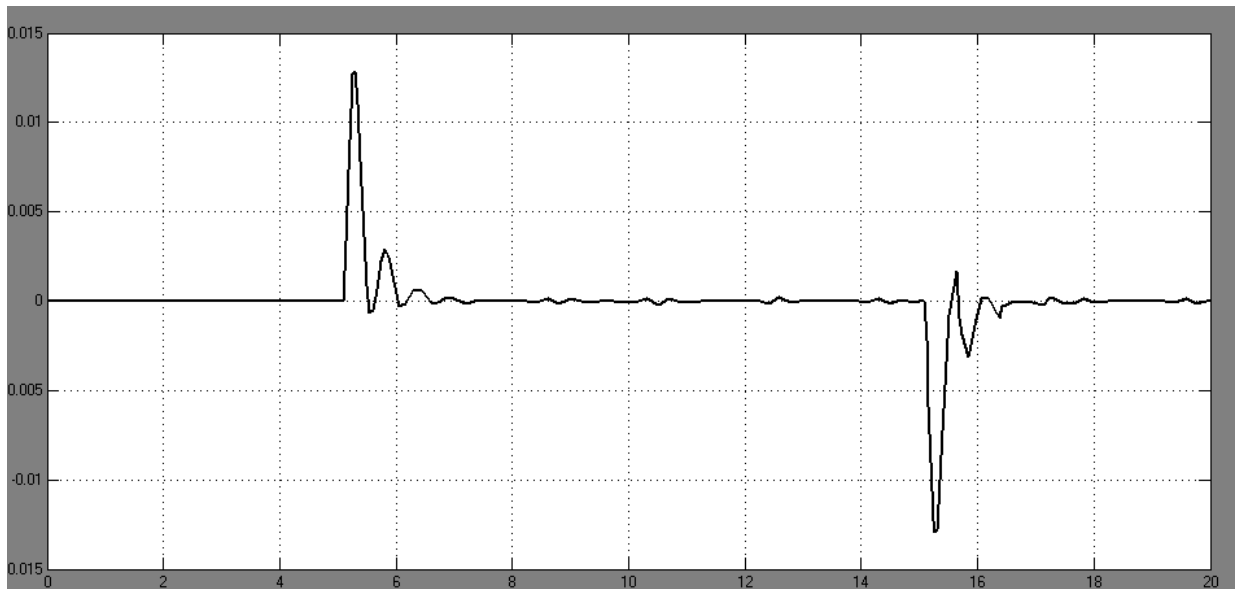
17.	IF	Didelis	AND	Mažas	THEN	Mažas
18.	IF	Didelis	AND	Vidutinis	THEN	Mažas
19.	IF	Didelis	AND	Didelis	THEN	Mažas
20.	IF	Didelis	AND	Labai didelis	THEN	Mažas
21.	IF	Labai didelis	AND	Labai mažas	THEN	Labai mažas
22.	IF	Labai didelis	AND	Mažas	THEN	Mažas
23.	IF	Labai didelis	AND	Vidutinis	THEN	Mažas
24.	IF	Labai didelis	AND	Didelis	THEN	Mažas
25.	IF	Labai didelis	AND	Labai didelis	THEN	Mažas



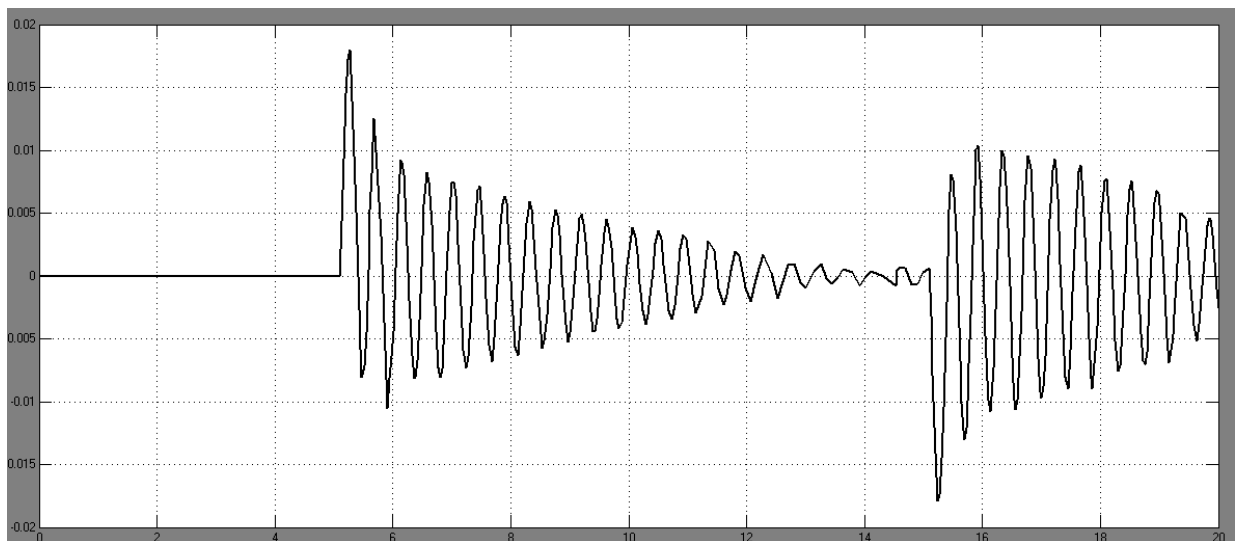
4.9 pav. Neraiškių aibių logikos, skirtos koreguoti regulatoriaus integralinę dedamąją, erdvinė diagrama.

4.1 Sistemos testavimas. Pirmos eilės objektas su vėlavimu

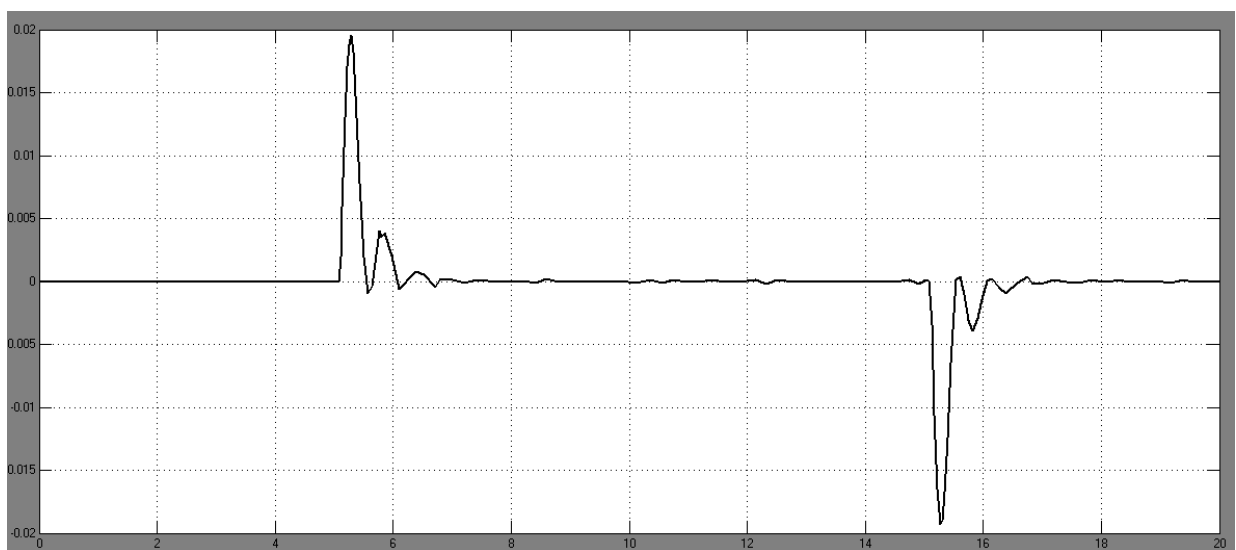
Ši sistema yra pritaikoma pirmos eilės objektui su vėlavimu. Objekto modelis naudojamas toks pats kaip ir 3.1 skyriuje, $K_{pr} = 1$, $T_{pr} = 1$, $\tau_{pr} = 0,1$. Regulatoriaus parametrai buvo apskaičiuoti (3.4) ir (3.5) lygčių pagalba, $K_r = 9,5278$, $T_i = 0,3229$. Rezultatai matomi 4.10 pav. $IAE = 0,00879$. Kitas bandymas atliktas pakitus objekto stiprinimo koeficientu. Objekto stiprinimo koeficientas padidinamas 48%, $K_{pr} = 1,48$, $T_{pr} = 1$, $\tau_{pr} = 0,1$. Pereinamasis procesas matyti 4.11 pav. $IAE = 0,05726$. Tada pritaikoma neraiškių aibių logikos sistema ir gaunamas pereinamasis procesas (žr. 4.12 pav.). Modeliuojamas objektas yra suvaldomas ir sumažėjo Minimali integruota absoliučioji paklaida, $IAE = 0,01268$.



4.10 pav. Tiriama pirmos eilės objekto modelio, kai objekto parametrai nekinta, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.



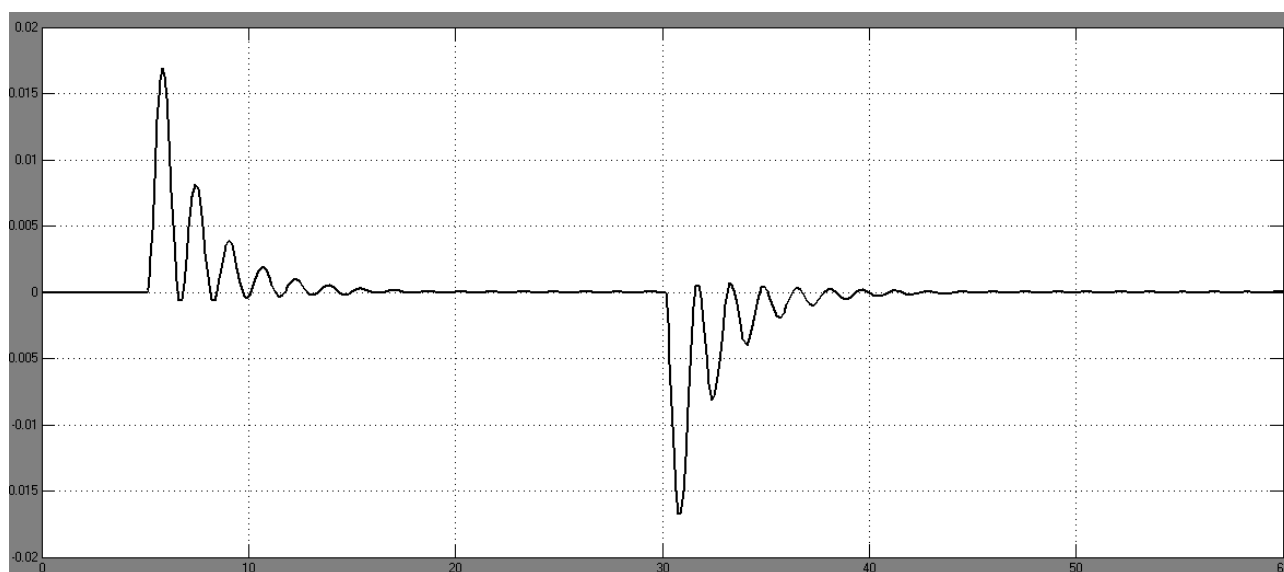
4.11 pav. Tiriama pirmos eilės objekto modelio, kai objekto stiprinimo koeficientas padidėja 48%, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.



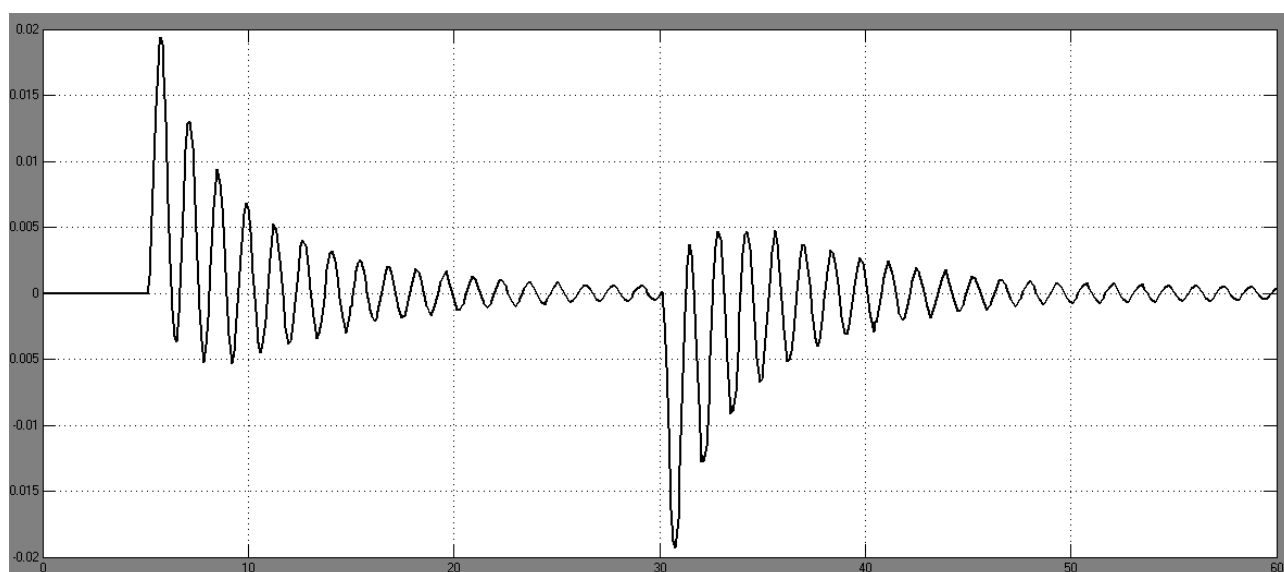
4.12 pav. Tiriama pirmos eilės objekto modelio, kai objekto stiprinimo koeficientas padidėja 48% ir pritaikyta neraiškių aibių logikos sistema, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.

4.2 Sistemos testavimas. Antros eilės objektas su vėlavimu

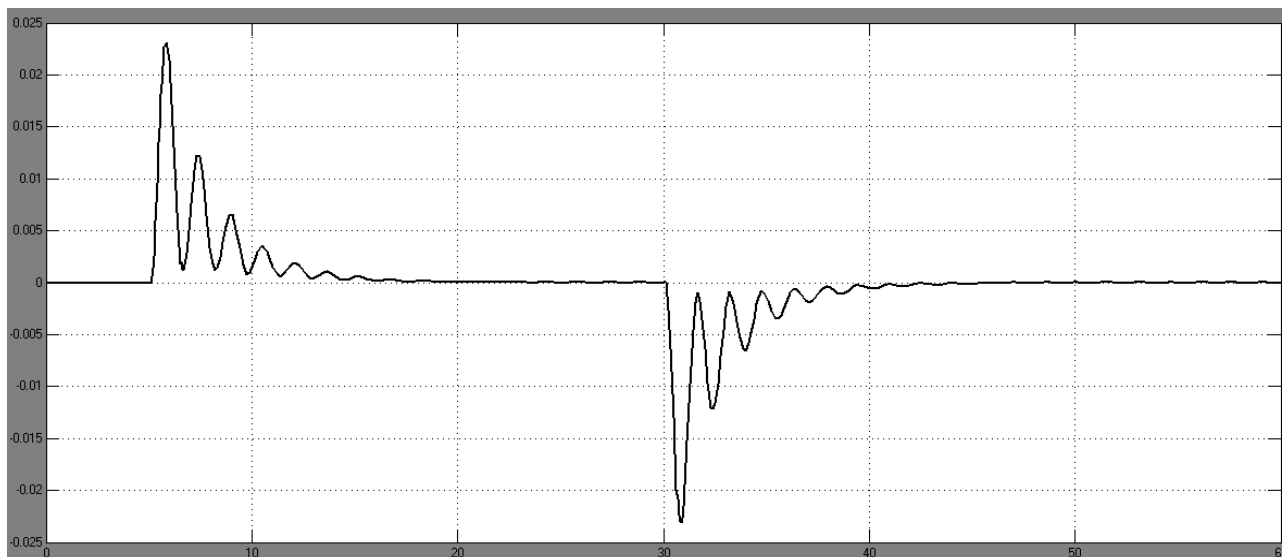
Kitame etape neraiškių aibių logikos PI reguliatoriaus parametrų derinimo ekspertinė sistema yra pritaikoma antros eilės objektui su vėlavimu. Objekto modelis naudojamas iš 3.3 skyriaus, $K_{pr} = 1$, $T_1 = 1$, $T_2 = 0,5$, $\tau_{pr} = 0,1$. Reguliatoriaus parametrai jau apskaičiuoti (3.13) ir (3.14) lygčių pagalba, $K_r = 7,7956$, $T_i = 1,6556$. Pereinamasis procesas matyti 4.13 pav. $IAE = 0,0505$. Objekto stiprinimo koeficientas padidinamas 40%, o kiti objekto parametrai išlieka tie patys, $K_{pr} = 1,4$, $T_1 = 1$, $T_2 = 0,5$, $\tau_{pr} = 0,1$. Pereinamasis procesas matyti 4.14 pav. $IAE = 0,1075$. Tada pritaikoma neraiškių aibių logikos sistema ir gaunamas pereinamasis procesas (žr. 4.15 pav.). Modeliuojamas objektas yra suvaldomas ir sumažėjo Minimali integruota absoliučioji paklaida, $IAE = 0,08528$.



4.13 pav. Tiriama antros eilės objekto modelio, kai objekto parametrai nekinta, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.



4.14 pav. Tiriama antros eilės objekto modelio, kai objekto stiprinimo koeficientas padidėja 40%, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.



4.15 pav. Tiriama antros eilės objekto modelio, kai objekto stiprinimo koeficientas padidėja 40% ir pritaikyta neraiškių aibių logikos sistema, reguliavimo sistemos pereinamieji procesai.

Atlikti pasiūlytos neraiškių aibių logikos sistemos, skirtos adaptyviai keisti PI reguliatoriaus parametrus tyrimai, parodė, kad sistema pagal pereinamojo proceso parametrus sugeba tinkamai adaptuoti valdiklio parametrus ir pagerina valdymo kokybę.

4.3 Sistemos taikymas realiam objektui

Buvo tirtas realus objektas – pozicionavimo sistema sudaryta iš sinchroninio variklio FESTO EMMS-AS-55-S-TM (žr. 4.16 pav.), variklio valdiklio FESTO CMMP-AS-C5-3A-M0 (žr. 4.17 pav.) ir diržinės ašies FESTO EGC-50-500-TB-KF-0H-GK (žr. 4.18 pav.). Iš pereinamųjų procesų (žr. 4.20 pav.) matyti, kad šios sistemos reguliatoriaus parametrai buvo netinkamai suderinti, parametrai matyti 4.19 pav.



4.16 pav.
Pozicionavimo sistemos sinchroninis variklis FESTO EMMS-AS-55-S-TM.



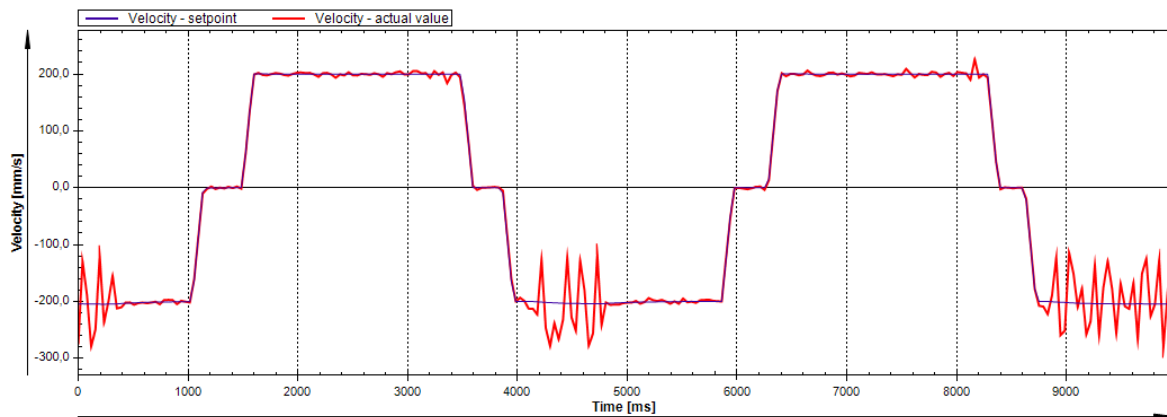
4.17 pav.
Pozicionavimo sistemos variklio valdiklis FESTO CMMP-AS-C5-3A-M0.



4.18 pav.
Pozicionavimo sistemos diržinė ašis FESTO EGC-50-500-TB-KF-0H-GK.

Current Control	
Gain:	12,49
Time Constant:	0,90 ms
Velocity Control	
Gain:	6,37
Time Constant:	13,00 ms
Actual Velocity Filter:	0,25 ms
Position Control	
Gain:	0,05
Max. Correction Velocity:	483,33 mm/s
Dead Range:	0,00 mm

4.19 pav. Tiriamo objekto regulatoriaus parametrai.

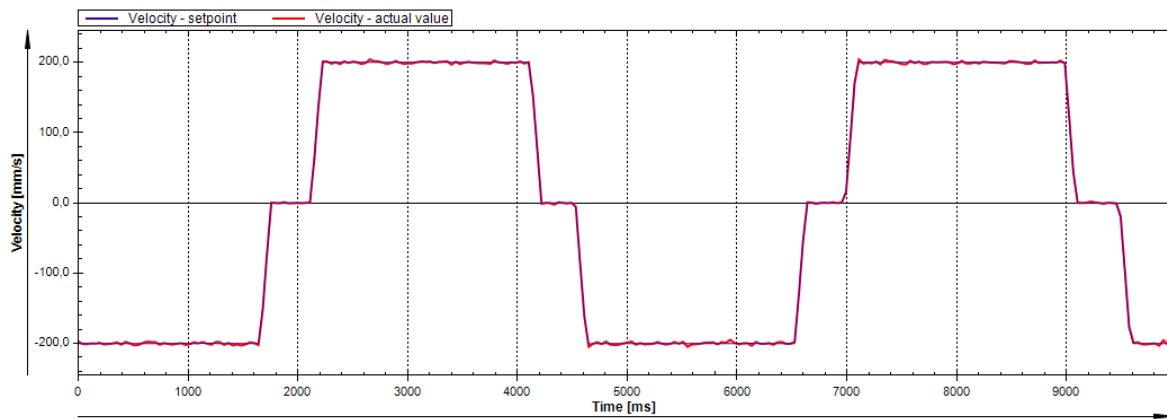


4.20 pav. Tiriamo objekto pereinamieji procesai.

Iš tiriamo objekto pereinamųjų procesų (žr. 4.20 Pav.) gautas švytavimo laipsnis $\psi = 0,152$ ir periodas $T_p = 0,078$. Taikant fuzzy logikos sistemą buvo gauti korekcijos koeficientai, $k_k = 0,6515$, $k_i = 1,1613$. Šie korekcijos koeficientai pritaikomi objekto greičio regulatoriaus parametrms (žr. 4.21 pav.) ir gaunami pereinamieji procesai (žr. 4.22 pav.).

Current Control	
Gain:	12,49
Time Constant:	0,90 ms
Velocity Control	
Gain:	4,15
Time Constant:	15,11 ms
Actual Velocity Filter:	0,25 ms
Position Control	
Gain:	0,05
Max. Correction Velocity:	483,33 mm/s
Dead Range:	0,00 mm

4.21 pav. Tiriamo objekto regulatoriaus parametrai su pritaikytais korekcijos koeficientais.



4.22 pav. Tiriamo objekto pereinamieji procesai, kai regulatoriaus parametrams pritaikyti pataisos koeficientai.

Realaus objekto tyrimo rezultatai parodė pasiūlytos adaptyvios valdymo sistemos efektyvumą ir darbingumą.

REZULTATAI IR IŠVADOS

1. Šiame darbe buvo apžvelgti adaptyvių valdymo sistemų kūrimo principai, išsamiau išanalizuotos tiesioginio valdymo adaptyviosios sistemos.
2. Pirmos ir antros eilės objektams su vėlavimu nustatyta, kad sistemos stabilumui ir valdymo kokybei (IAE kriterijus) didžiausią įtaką daro objekto stripinimo koeficiento kitimas. Laiko pastoviosios kitimo ženklesnė įtaka stebima tik objektams kuriuose laiko pastovioji mažėja.
3. Pasiūlyta metodika kaip pagal pereinamojo proceso rezultatus galima derinti regulatoriaus parametrus. Šios metodikos realizavimui sukurta neraiškių aibių logikos sistema.
4. Metodika išbandyta modeliavimo eksperimentuose. Gauti rezultatai parodė metodikos efektyvumą. Tiriamiems procesams IAE kriterijus sumažėjo nuo 30% iki 300%.
5. Darbe sukurta neraiškių aibių logikos sistema pritaikyta realaus pozicionavimo įrenginio greičio regulatoriaus parametrų adaptavimui ir valdymo kokybės gerinimui.

LITERATŪRA

- [1] K. J. Astrom ir T. Hagglund, *Advanced PID Control*, Lund, Švedija: Lund Institute of Technology, 2006.
- [2] D. Levišauskas, *Automatinio reguliavimo sistemų derinimas*, Vilnius: Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla, 2008.
- [3] M. Rabbani, M. Maruf, T. Ahmed, A. Kabir ir U. Mahbub, „Fuzzy logic driven adaptive PID controller for PWM based buck converter,“ įtraukta *Informatics, Electronics & Vision*, Dhaka, Bangladešas, 2012.
- [4] S. Soyguder, M. Karakose ir H. Alli, „Design and simulation of self-tuning PID-type fuzzy adaptive control for an expert HVAC system,“ *Expert Systems with Applications*, t. 36, nr. 3, pp. 4566-4573, 2009.
- [5] N. Sangawong ir I. Ngamroo, „Optimal fuzzy logic-based adaptive controller equipped with DFIG wind turbine for frequency control in stand alone power system,“ įtraukta *Innovation Smart Grid Technologies - Asia*, Bangalore, Indija, 2013.
- [6] P. H. Krishnan ir M. Arjun, „Control of BLDC motor based on adaptive fuzzy logic PID controller,“ įtraukta *Green Computing Communication and Electrical Engineering*, Coimbatore, Indija, 2014.
- [7] E. Celik, A. Dalcali, N. Ozturk ir R. Canbaz, „An adaptive PI controller schema based on fuzzy logic controller for speed control of permanent magnet synchronous motors,“ įtraukta *Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, Stambulas, Turkija, 2013.
- [8] S. Singh ir M. Kaur, „Gain Scheduling of PID Controller Based on Fuzzy Systems,“ įtraukta *4th International Conference on Advancements in Enginnering & Technology*, Londonas, 2016.
- [9] A. Eydgahi ir M. Fotouhi, „A Fuzzy Knowledge-Based Controller to Tune PID Parameters,“ įtraukta *Engineering and Aviation Sciences*, Maryland, 1999.
- [10] V. Aleksa ir V. Galvanauskas, *Technologinių Procesų Automatizavimas ir Valdymas*, Kaunas: KTU leidykla "Technologija", 2008.
- [11] G. Feng ir R. Lozano, *Adaptive Control Systems*, Guildford: Reed Educational and Professional Publishing Ltd, 1999.
- [12] G. A. Dumont ir M. Huzmezan, „Concepts, Methods and Techniques in Adaptive Control,“ įtraukta *American Control Conference*, Anchorage, JAV, 2002.
- [13] I. D. Landau, R. Lozano, M. M'Saad ir A. Karimi, *Adaptive Control*, Londonas: Springer-Verlag, 2011.