



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Adaptyvios diskretinės valdymo sistemos tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Aurimas Žarnauskas

Projekto autorius

Doc. dr. Leonas Balaševičius

Vadovas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Adaptyvios diskretinės valdymo sistemos tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Valdymo technologijos (6211EX014)

Aurimas Žarnauskas

Projekto autorius

Doc. dr. Leonas Balaševičius

Vadovas

Prof. dr. Rimvydas Simutis

Recenzentas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Aurimas Žarnauskas

Adaptyvios diskretinės valdymo sistemos tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Aurimo Žarnausko, baigiamasis projektas tema „Adaptyvios diskretinės valdymo sistemos tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir 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)

Žarnauskas, Aurimas. Adaptyvios diskretinės valdymo sistemos tyrimas. Magistro baigiamasis projektas, vadovas doc. dr. Leonas Balaševičius; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): elektronikos inžinerija (inžinerijos mokslai).

Reikšminiai žodžiai: „fuzzy“, adaptyvusis reguliatorius, skaitmeninis reguliatorius

Kaunas, 2020. 47 p.

Santrauka

Darbe apžvelgiama adaptyvių „fuzzy“ reguliatorių tipai. Nagrinėjami literatūroje aprašyti adaptyvūs „fuzzy“ reguliatoriai: klasikiniai, keičiant reguliatoriaus išėjimo dydį, „fuzzy“-PID, „neuro-fuzzy“ reguliatoriai.

Tiriamojame dalyje nagrinėjamas adaptyvusis „fuzzy“ reguliatorius su etaloniniu modeliu. Tyrimas skirstomas į 3 dalis, pagal 3 objektus / etaloninius modelius. Lyginamas klasikinis „fuzzy“ reguliatorius ir adaptyvusis „fuzzy“, keičiant įėjimą, objekto įėjime bei išėjime paduodant trikdžius, keičiant objekto parametrus.

Žarnauskas, Aurimas. Research of Discrete Adaptive Control System. Master's Final Degree Project supervisor doc. dr, Leonas Balaševičius; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Electronics Engineering (Engineering Science).

Keywords: „fuzzy“, adaptive controller, digital controller

Kaunas, 2020. 47.

Summary

The paper reviews the types of adaptive fuzzy regulators. Adaptive fuzzy controllers described in the literature are analyzed: classical, by changing the output size of the controller, fuzzy-PID, neuro-fuzzy controllers.

The adaptive fuzzy controller with a reference model is considered in the research part. The study is divided into 3 parts, according to 3 objects / reference models. The classic fuzzy controller and adaptive fuzzy are compared by changing the input, interfering at the input and output of the object, and changing the parameters of the object.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Santrumpų ir terminų sąrašas	10
Įvadas.....	11
1. Apžvalginė dalis.....	12
1.1. „Fuzzy“ logika.....	12
1.1.1. „Fuzzy“ reguliatorius.....	14
1.2.1. Klasikinis adaptyvusis „fuzzy“ reguliatorius	15
1.2.2. Išėjimo dydį keičiantis adaptyvusis „fuzzy“ reguliatorius	16
1.2.3. Adaptyvusis „fuzzy“ - PID reguliatorius.....	17
1.2.4. Daugiataisyklis adaptyvusis „fuzzy“ reguliatorius.....	19
1.2.5. Neuroniniais tinklais paremtas „fuzzy“ reguliatorius.....	20
2. Tiriamoji dalis.....	22
2.1. Adaptyviojo diskretinio „fuzzy“ reguliatoriaus su etaloniniu modeliu derinimas 2 eilės objektui	22
2.2. Adaptyviojo „fuzzy“ reguliatoriaus su etaloniniu modeliu derinimas 4 eilės objektui, I dalis	31
2.3. Adaptyviojo „fuzzy“ reguliatoriaus su etaloniniu modeliu derinimas 4 eilės objektui, II dalis	36
Išvados	45
Literatūros sąrašas	46

Lentelių sąrašas

1 lentelė	„Fuzzy“ taisyklių bazės pavyzdys	13
2 lentelė	Taisyklių bazės pagal paklaidos ir paklaidos pokyčio vertes.....	23
3 lentelė	Pasirinktas objektas ir etaloninis modelis.....	24
4 lentelė	Adaptyvios sistemos dalies įjungimo pokyčiai proceso charakteristikose.....	26
5 lentelė	Modeliavimo rezultatai.....	26
6 lentelė	Diskretizacijos periodo įtaka proceso charakteristikoms:	30
7 lentelė	Pasirinktas objektas ir etaloninis modelis.....	31
8 lentelė	Adaptyvios sistemos dalies įjungimo pokyčiai proceso charakteristikose.....	32
9 lentelė	Modeliavimo rezultatai.....	33
10 lentelė	Diskretizacijos periodo įtaka proceso charakteristikoms:	36
11 lentelė	Pasirinktas objektas ir etaloninis modelis	36
12 lentelė	Adaptyviojo „fuzzy“ atlikti pakeitimai pagrindinio „fuzzy“ reguliatoriaus taisyklių bazėje.	38
13 lentelė	Adaptyvios sistemos dalies įjungimo pokyčiai proceso charakteristikose.....	38
14 lentelė	Modeliavimo rezultatai.....	41
15 lentelė	Diskretizacijos periodo įtaka proceso charakteristikoms:	43

Paveikslų sąrašas

1 pav. „Fuzzy“ sistemos struktūrinė schema. [2].....	12
2 pav. Temperatūros įėjimo priskyrimas lingvistinėms reikšmėms ir jų priklausomybės funkcijos[3]	13
3 pav. Sistemos su „fuzzy“ reguliatoriumi struktūra [2].....	14
4 pav. <i>Matlab Simulink</i> sistemos su „fuzzy“ reguliatoriumi struktūra [9].....	14
5 pav. Valdymo sistemos su adaptyviu „fuzzy“ reguliatoriumi struktūra [8].....	15
6 pav. Adaptyvusis „fuzzy“ reguliatorius su kintamu išėjimo dydžiu [4]	16
7 pav. Adaptyvioji „fuzzy“ valdymo sistema keičiant išėjimo dydį [4]	17
8 pav. Sistemos su adaptyviu „fuzzy“ – PID reguliatoriumi struktūra [6].....	18
9 pav. „Fuzzy“ taisyklės parinkti K_p ir K_i [15].....	18
10 pav. Posūkio valdymas drone naudojantis klasikiniu PID (mėlyna linija) ir „fuzzy“-PID (raudona linija)[15].....	19
11 pav. Sistema su daugiataisykliu „fuzzy“ reguliatoriumi [17]	19
12 pav. Adaptyvusis „neuro-fuzzy“ reguliatorius [7]	20
13 pav. 5 sluoksnių „neuro-fuzzy“ struktūra [7].....	20
14 pav. „Neuro-fuzzy“ suprojektuotų priklausomybės funkcijų pavyzdys [7].....	21
15 pav. Diskretinio adaptyviojo „fuzzy“ reguliatoriaus su etaloniniu modeliu schema [10]	22
16 pav. Įėjimų priklausomybės funkcijos	23
17 pav. Suderintas „fuzzy“ reguliatorius kairėje ir įjungtas adaptyvusis mechanizmas dešinėje.....	25
18 pav. Įjungtas adaptyvusis mechanizmas, $g_p=1$ (kairėje), $g_p=5$ (dešinėje).....	25
19 pav. Suderinto „fuzzy“ reguliatoriaus reakcija į trikdį objekto įėjime kairėje o dešinėje atitinkamai su adaptyviu mechanizmu.	28
20 pav. Suderinto „fuzzy“ reguliatoriaus reakcija į trikdį objekto įėjime kairėje o dešinėje atitinkamai su adaptyviu mechanizmu – priartinti vaizdai.....	29
21 pav. Sistemos be adaptyvios grandies(kairėje) ir su (dešinėje) reakcija į kintantį užduoties signalą	29
22 pav. Sistemos be adaptyvios grandies(kairėje) ir su (dešinėje) reakcija į kintantį užduoties signalą	30
23 pav. Diskretizacijos periodo įtaka: $T=0.00001s$ kairėje ir $0.01s$ dešinėje.....	31
24 pav. Suderintas „fuzzy“ reguliatorius kairėje ir įjungtas adaptyvusis mechanizmas dešinėje.....	32
25 pav. Adaptyvusis reguliatorius parinkus atitinkamai: $g_p=0.04$ kairėje ir $g_p=0.4$ dešinėje.....	33
26 pav. Suderinto „fuzzy“ reguliatoriaus reakcija į trikdį objekto įėjime kairėje, o dešinėje atitinkamai su adaptyviu mechanizmu.	34
27 pav. Sistemos be adaptyvios grandies(kairėje) ir su (dešinėje) reakcija į kintantį užduoties signalą	35
28 pav. Trikdys objekto išėjime be adaptyviojo „fuzzy“ kairėje ir su adaptyviu „fuzzy“ dešinėje... 35	35
29 pav. Suderintas „fuzzy“ reguliatorius kairėje ir įjungtas adaptyvusis mechanizmas dešinėje, $g_p=1.35$	37
30 pav. Įjungtas adaptyvusis mechanizmas, $g_p=2$ kairėje, $g_p=10$ dešinėje	37
31 pav. Skirtumo y e integralo palyginimas be ir su adaptyviu mechanizmu.....	39
32 pav. Perreguliavimo palyginimas su ir be adaptyviu mechanizmu.....	39
33 pav. Statinės paklaidos palyginimas su ir be adaptyviojo mechanizmo	40
34 pav. Nusistovėjimo trukmės palyginimas su ir be adaptyviojo mechanizmo	40

35 pav. $b_4=130\%$, įjungtas adaptyvusis mechanizmas dešinėje, kairėje išjungtas adaptyvusis mechanizmas	41
36 pav. Suderinto „fuzzy“ regulatoriaus reakcija į trikdį objekto įėjime kairėje o dešinėje atitinkamai su adaptyviu mechanizmu.	42
37 pav. Sistemos be adaptyvios grandies(kairėje) ir su (dešinėje) reakcija į kintantį užduoties signalą	42
38 pav. Sistemos be adaptyvios grandies(kairėje) ir su (dešinėje) reakcija į trikdį objekto išėjime.	43
39 pav. Diskretizacijos periodas 0.00001 kairėje ir 0.01 dešinėje	44

Santrumpų ir terminų sąrašas

Terminai:

„Fuzzy“ sistema – statinis, netiesinis įėjimų sąryšis su išėjimais.

Fuzifikavimas – Raiškių įėjimų įvertinimas neraiškiomis aibėmis.

Neraiški aibė - Elementų aibėje reikšmės ir jų priklausomybę aibe ribojantis paviršius

Lingvistiniai kintamieji – pastovūs simboliniai terminai, nusakantys, kas yra laike kintantys dydžiai.

Mokymosi mechanizmas - Algoritmas ar algoritmų rinkinys įvertinantis sistemos būsenas ir apskaičiuojantis sistemos derinimo parametrus.

Regulatorius - Tai algoritmas ar algoritmų rinkinys sistemos valdymui.

PID – proporcinis, integralinis, diferencialinis.

Stiprinimo koeficientas - Parametras įtakojančias valdymo signalą ar korekcijos dydį

Žinių bazė - Taisyklių pagal kurias priimamas valdymo sprendimas rinkinys

Įvadas

„Fuzzy“ reguliatorių pritaikymas yra labai platus, juos galima rasti automobiliuose, traukiniuose, gamybos automatikoje, robotikoje, erdvėlaiviuose ir kt. „Fuzzy“ sistema – statinė sistema netiesiškai sujungianti įėjimo signalus su išėjimo signalais. Sistemos veikimas yra pagrįstas „fuzzy“ logika, kuri yra daug artimesnė žmogaus su patirtimi sprendimų priėmimui, nei tradicinės PID valdymo sistemos. „Fuzzy“ sistemą sudaro įėjimų išreiškimo „fuzzy“ aibėmis mechanizmas, sprendimo priėmimo mechanizmas, sprendimo priėmimo taisyklių bazė bei konkretaus sprendimo išskyrimo mechanizmas. Siekiant pagerinti sistemos kokybines charakteristikas yra naudojami adaptyvūs „fuzzy“ reguliatoriai. Šie reguliatoriai turi mokymosi mechanizmą, kuris sugeba tobulinti savo veikimą sąveikaujant su valdomu objektu. Metodikos, kaip yra derinami adaptyvūs „fuzzy“ reguliatoriai yra apžvelgiamos šiame darbe. Tiriamojoje dalyje gilinamasi į adaptyviojo „fuzzy“ reguliatoriaus su etaloniniu modeliu derinimą antros bei ketvirtos eilės objektams.

Darbo tikslas – ištirti adaptyvios diskretinės valdymo sistemos darbą kintant įvairiems objekto parametrams ir objektą veikiant trikdžiams.

Darbo uždaviniai:

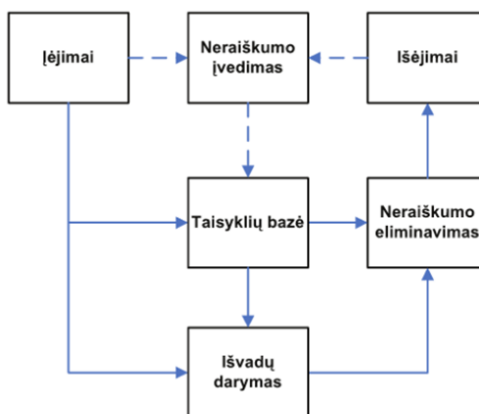
1. suprojektuoti diskretines „fuzzy“ ir adaptyviają „fuzzy“ valdymo sistemas 2 ir 4 eilės objektų valdymui.
2. nustatyti ir palyginti „fuzzy“ ir adaptyvios „fuzzy“ valdymo sistemų reakcijų dinامينius parametrus:
 1. keičiant objektų stiprinimą ir laiko pastoviąją.
 2. į trikdį objekto įėjime.
 3. į trikdį objekto išėjime.
 4. į kintantį įėjimo dydį.
 5. keičiant diskretizacijos periodą.
3. apžvelgti mokymosi koeficiento g_p vertės įtaką sistemai.

1. Apžvalginė dalis

Apžvalginėje dalyje apžvelgiami moksliniai darbai „fuzzy“, adaptyvių „fuzzy“ reguliatorių tematika.

1.1. „Fuzzy“ logika

„Fuzzy“ logikos idėją 1965 m. sugalvojo Kalifornijos universiteto profesorius L.A Zadeh‘as. Šis išradimas nebuvo gerai pripažintas iki Londono universiteto profesorius dr. E. H. Mamdani praktikoje pritaikė „fuzzy“ logiką, kad valdytų automatinę garo gamybą 1974 m. , o tai beveik dešimt metų po to, kai „fuzzy“ teorija buvo sukurta. Tada 1976 m. „Blue Circle Cement“ ir „SIRA“ Danijoje sukūrė pramoninę cemento krosnių kontrolės sistemą. Ši sistema pradėjo veikti 1982 m. Nuo 1980-ųjų pradžios buvo pranešta apie vis daugiau „fuzzy“ sistemos panaudojimų, įskaitant pramoninės gamybos, automatinio valdymo, automatinio valdymo sistemas. Automobilių gamyba, bankininkystė, ligoninės, bibliotekos ir akademinis švietimas – „fuzzy“ logikos metodai buvo plačiai naudojami visose šiandienos visuomenės srityse.[1]



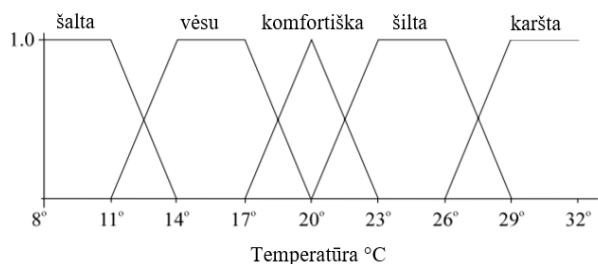
1 pav. „Fuzzy“ sistemos struktūrinė schema. [2]

Kaip matyti iš 1 pav., „fuzzy“ reguliatoriaus struktūrą sudaro 4 pagrindinės dalys:

- Įėjimų išreiškimo „fuzzy“ aibėmis mechanizmas.
- Sprendimo priėmimo mechanizmas.
- Sprendimo priėmimo taisyklių bazė.
- Konkretaus sprendimo išskyrimo mechanizmas.

Yra trys pagrindiniai žingsniai kuriuos reikia atlikti norint panaudoti „fuzzy“ reguliatorių:

- Fuzifikavimas – įėjimai yra išreikšiami „fuzzy“ aibėmis.
- Sprendimo priėmimas – panaudojamos priklausomybės funkcijos ir taisyklių bazė ir taip gaunamas „fuzzy“ išėjimas.
- Defuzifikavimas – pagal išėjimo priklausomybės funkcijas „fuzzy“ reguliatorius sukuria tam tikrą išėjimą.



2 pav. Temperatūros įėjimo priskyrimas lingvistinėms reikšmėms ir jų priklausomybės funkcijos[3]

Temperatūros „fuzifikavimas“ matyti 2 paveiksle. Temperatūros intervalai yra aprašomi lingvistinėmis reikšmėmis – šiuo atveju žodžiais „šalta“, „vėsu“, „komfortiška“, „šilta“ bei „karšta“. Pats įėjimas – temperatūra – tai fizinis kintamasis. Kaip matyti 2 paveiksle, lingvistiniai kintamieji turi savo priklausomybės funkcijas – trapecijas bei trikampi – tokias formas yra lengviausia realizuoti valdiklyje. Dažniausiai sutinkamos priklausomybės funkcijos:

- Trikampio formos.
- Trapecijos formos.
- Varpo formos.

Sistemos išėjimas aprašomas analogiškai – su lingvistiniais kintamaisiais, reikšmėmis bei priklausomybės funkcijomis.

1 lentelė „Fuzzy“ taisyklių bazės pavyzdys

T	Šalta	Komfortiška	Karšta
T_c	Šalta	Komfortiška	Karšta
Mažai	Greitai	Vidutiniškai	Vidutiniškai
Vidutiniškai	Greitai	Lėtai	Lėtai
Daug	Vidutiniškai	Lėtai	Lėtai

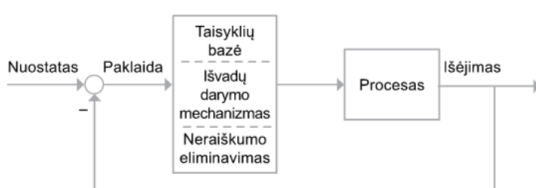
Lentelėje 1 matyti „fuzzy“ taisyklių bazės pavyzdys. Įėjimas T reprezentuoja temperatūrą, o T_c – jos pokytį. Šie įėjimai susiję su taisyklėmis JEIGU – TAI. Valdymas, kaip pavyzdys šildytuvo motoras prie atitinkamų temperatūros ir temperatūros pokyčio turi savo vertes: Greitai, Vidutiniškai ir Lėtai. Sprendimo priėmimo pavyzdys: jeigu yra šalta ir temperatūros pokytis mažas – šildytuvo motoras turi dirbti greitai, kad padidintų esamą temperatūrą kiek įmanoma greičiau.[3]

Defuzifikacija yra procesas kurio metu iš agreguotosios (kai priklausomybės funkcijos sujungiamos į vieną funkciją) išvadų priklausomybės funkcijos $m(y)$ y randama skaitinė vertė y_0 . Dažniausiai naudojamas sunkio centro arba centroido metodas, tai srities esančios po agreguotosios funkcijos grafiku, sunkio centro abscisė [12]:

$$y_0 = \frac{\int_{y_{min}}^{y_{max}} y m(y) dy}{\int_{y_{min}}^{y_{max}} m(y) dy} \quad (1)$$

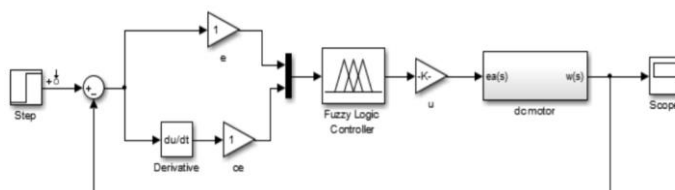
1.1.1. „Fuzzy“ reguliatorius

Per pastarąjį dešimtmetį paskelbta itin daug darbų, kuriuose klasikinių PID reguliatorių valdymo kokybei gerinti siūlomi „Fuzzy“ reguliatoriai. Šiuo atveju paklaida, paklaidos integralas ir paklaidos išvestinė įvardijami lingvistiniais kintamaisiais, jiems priskiriamos atitinkamos priklausomybės funkcijos[2]. „Fuzzy“ valdymo sistemas yra naudinga diegti, kai sudėtinga sukurti proceso matematinį modelį – sukauptos operatoriaus žinios gali būti perkeltamos į „fuzzy“ reguliatorių ir be matematinio modelio. Visgi svarbu nenaudoti „fuzzy“ reguliatoriaus – jei tai nėra būtina. Visada reikia stengtis pradėti nuo paprasčiausių reguliatorių ir tik, kai jų veikimo neužtenka – naudoti „fuzzy“ reguliatorius.



3 pav. Sistemos su „fuzzy“ reguliatoriumi struktūra [2]

Standartinė sistemos su „fuzzy“ reguliatoriumi struktūra pateikta 3pav. (žr. 3 pav.) Regulatorius gauna paklaidą tarp nuostatos ir išėjimo ir pagal tai vadovaudamasis taisyklių baze, išvadų darymo mechanizmu išduoda išėjimą.



4 pav. Matlab Simulink sistemos su „fuzzy“ reguliatoriumi struktūra [9]

„Fuzzy“ reguliatorių nesunkiai galima realizuoti *Matlab Simulink* pakete. Taip pat būtina naudoti ir *Fuzzy Logic Toolbox* įrankį kuriuo yra sudaromos priklausomybės funkcijos, surašomi lingvistiniai kintamieji, taisyklių bazė.

Kaip matyti iš 4 paveikslas, „fuzzy“ valdymo sistemą skirtą reguliuoti nuolatinės srovės variklį. Kadangi pats „fuzzy“ reguliatorius neturi savyje integruoto įėjimo stiprinimo koeficiento ar integruojančios arba diferencijuojančios dalies – tai yra realizuojama prieš reguliatorių.

1.2. Adaptyvusis „fuzzy“ reguliatorius

Adaptyvių reguliatorių tyrimai turi ilgą intensyvios veiklos istoriją, apimančią diskusijas koks yra tikslus adaptyviojo valdymo apibrėžimas, euristika pagrįstas dizainas, stabilumu pagrįstos schemas, nestabilumo pavyzdžiai, stabilumo ir robastiškumo įrodymai ir taikymai.

XX a. šeštajame dešimtmetyje didelio efektyvumo orlaivių autopilotų projektavimas paskatino intensyvų darbą tiriant adaptyvų valdymą. Didelio našumo orlaivių dinamika keičiasi drastiškai, kai

jie skraido iš vieno taško į kitą, ir to negalima valdyti su klasikine nuolatinio grįžtamojo ryšio kontrole. Sudėtingas reguliatorius, toks kaip adaptyvusis reguliatorius, galintis išmokti ir prisitaikyti buvo reikalingas, kad galėtų pakeisti orlaivio dinamiką.[16]

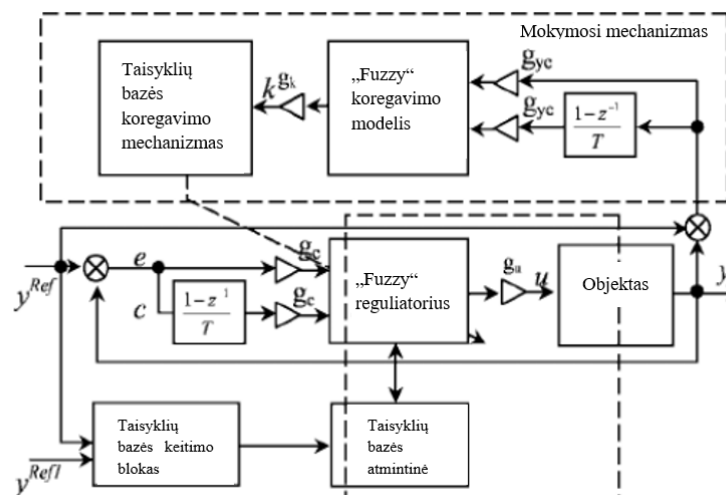
1.2.1. Klasikinis adaptyvusis „fuzzy“ reguliatorius

Tradiciniai „fuzzy“ logikos reguliatoriai reikalauja eksperto patirties nustatant reguliatoriaus parametrus, taip pat svarbu pažymėti, kad paties reguliatoriaus geras darbas priklausys kiek patyręs specialistas dirbs sureguliuojant jį. Norint, kad reguliatoriui nedarytų įtakos jį derinusio specialisto kompetencija galime naudoti adaptyvų „fuzzy“ reguliatorių. Šis reguliatorius naudoja daug daugiau valdiklio resursų nei paprastas „fuzzy“, bet pagerėja kokybinės pereinamojo proceso charakteristikos:

- Nusistovėjimo trukmė.
- Perreguliavimas.
- Kilimo laikas.
- Statinė paklaida.

Klasikinį adaptyvų „fuzzy“ reguliatorių sudaro sistema su paprastu „fuzzy“ reguliatoriumi bei mokymosi mechanizmas. Mokymosi mechanizmo reguliatorius turi tokią pačią struktūrą kaip ir pagrindinis „fuzzy“ reguliatorius, skirtumas yra stiprinimo koeficientuose ir taisyklių bazėje.

„Fuzzy“ reguliatorius naudoja mokymosi mechanizmą, kad stebėtų skaitinius duomenis iš „fuzzy“ valdymo sistemos. Naudodamas šiuos duomenis, jis charakterizuoja „fuzzy“ valdymo sistemos veikimą ir automatiškai reguliuoja „fuzzy“ reguliatorių taip, kad užduotis būtų pasiekta.[7]



5 pav. Valdymo sistemos su adaptyviu „fuzzy“ reguliatoriumi struktūra [8]

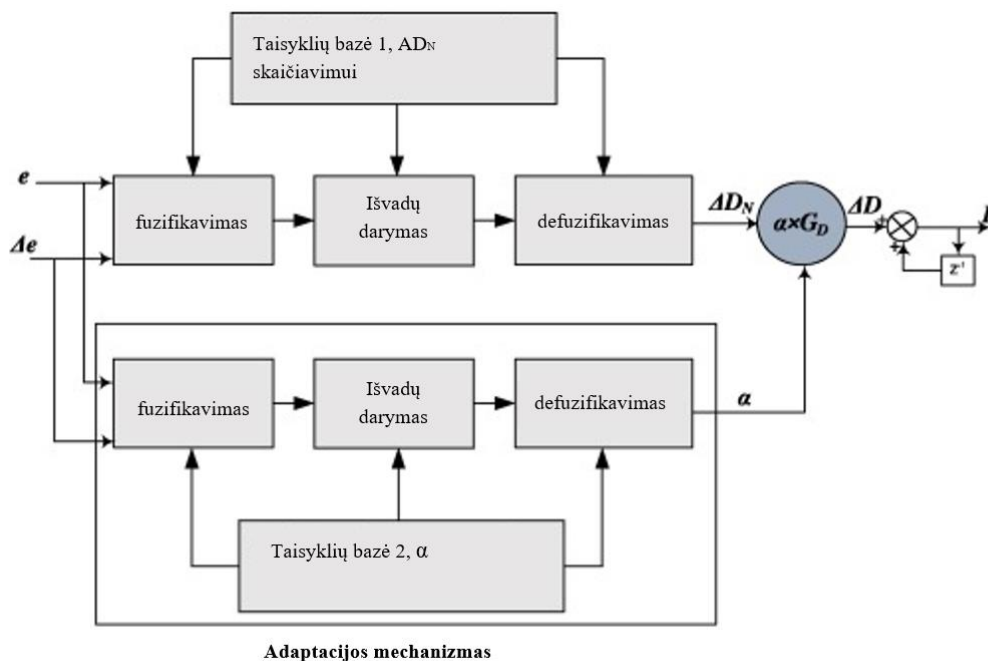
Adaptyviojo „fuzzy“ reguliatoriaus modelis turi daugiau nei vieną taisyklių bazės bloką. Pirmasis blokas laiko informaciją apie suderintos sistemos taisykles. Taisyklių bazės keitimo blokas nustato kaip valdyti procesą esant skirtumui tarp nuostatos ir esamos sistemos vertės. Valdymo pradžioje sudaroma nuostata, kad reguliatorius nežino sistemos pobūdžio – mokymosi mechanizmas pakeičia taisyklių bazę ir suteikia valdikliui informacijos apie procesą. [8]

Itin svarbu išskirti koeficientą g_k – juo galima įjungti arba išjungti mokymosi mechanizmą. Mokymosi mechanizmas turėtų būti įjungiamas tik esant labai nedideliam dydžiui ir turėtų būti stebima, kaip sistema reaguoja padavus nominalų sistemos darbui įėjimo signalą. Mokymas taip pat gali būti atliekamas keičiant neraiškiosios sistemos struktūrą (lingvistinių kintamųjų bei priklausomybės funkcijų formą) arba keičiant „fuzzy“ sistemos parametrus (priklausomybės funkcijų parametrus).

Taisyklių bazės keitimas gali turėti įtakos valdymo sistemai, pvz., perreguliavimui, nusistovėjimo trukmei, stabilumui ir nusistovėjimo greičiui. Pakeitus taisyklę, pokyčiai galios tik šiai taisyklei. Modifikacija atliekama koreguojant taisyklę taip, kad būtų judama stabilaus taško link. Šią sistemą taip pat gali papildyti ir etaloninis modelis. Etaloninis modelis gali būti pasirenkamas, kad atitiktų norimą visos sistemos veikimą. Tai gali būti diskretus, tolydinis, tiesinis ar netiesinis, nekintantis ar kintantis laike modelis.

1.2.2. Išėjimo dydį keičiantis adaptyvusis „fuzzy“ reguliatorius

Skirtingai nei prieš tai nagrinėtame pavyzdyje – šis adaptyvusis reguliatorius nekeičia kito reguliatoriaus parametrų – šiuo atveju antrasis reguliatorius veikia lygiagrečiai pirmojo ir abu reguliatoriai duoda bendrą išėjimą. Abu reguliatoriai įėjime gauna paklaidos e ir paklaidos pokyčio Δe duomenis.

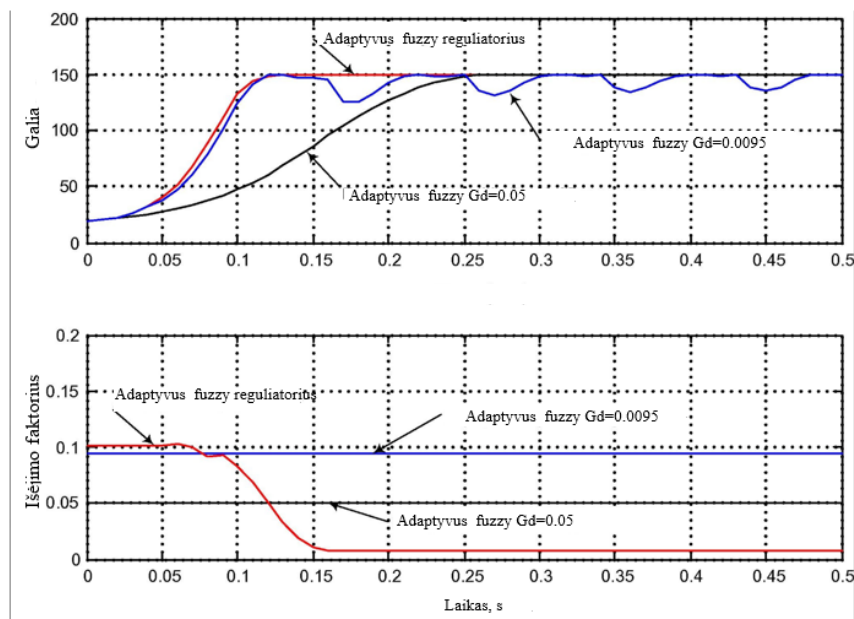


6 pav. Adaptyvusis „fuzzy“ reguliatorius su kintamu išėjimo dydžiu [4]

Išėjimo dydis yra keičiamas kiekvienu ciklu, naudojantis papildomą „fuzzy“ reguliatorių (žr. 6 pav.). Reguliatoriaus išėjimas ΔD yra apskaičiuojamas pagal formulę (2):

$$\Delta D(k) = \{\alpha(k) \times G_D\} \times \Delta D_N(k) \quad (2)$$

Adaptyviojo reguliatoriaus išėjimas $\alpha(k)$ yra padauginamas iš adaptyviojo reguliatoriaus koeficiento G_D . Tokiu būdu, galima valdyti adaptyviojo reguliatoriaus išėjimo dydį ir gerinti pereinamojo proceso charakteristikas.

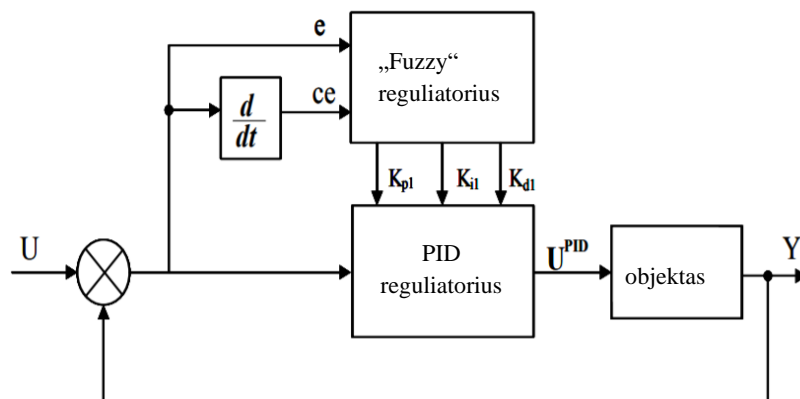


7 pav. Adaptyvioji „fuzzy“ valdymo sistema keičiant išėjimo dydį [4]

Adaptyviojo „fuzzy“ reguliatoriaus pritaikymas saulės baterijų energijos generavime pateiktas 7 paveiksle. Saulės energijos sistemos yra veikiamos atmosferos sąlygų sukeltų galios svyravimų. Todėl tampa svarbu valdyti energijos konversijos sistemas aplink didžiausią galios tašką, kad būtų pagerinta generuojama galia prie tam tikrų atmosferos sąlygų [4]. Keičiant adaptyviojo „fuzzy“ reguliatoriaus išėjimo dydį pasiekiami geriausi rezultatai galios generavime. Matyti, kad adaptyvusis „fuzzy“ reguliatorius pasižymi praktiškai nuliniu perreguliuavimu, greita užduoties pasiekimo trukme.

1.2.3. Adaptyvusis „fuzzy“ - PID reguliatorius

PID reguliatoriaus pranašumai yra paprasta struktūra, aiškus funkcionalumas ir lengvas įgyvendinimas, todėl jis buvo dažnai naudojamas pramoninės kontrolės srityse.[6] Tačiau sunku pasiekti idealų įprastų PID valdiklių efektyvumą dėl netiesinių ir kitų veiksnių įtakos. „Fuzzy“ PID reguliatorius naudojamas, su „fuzzy“ logika nuolat keisti PID reguliatoriaus parametrus ir pasiekti geresnius kokybinius rodiklius [5].



8 pav. Sistemos su adaptyviu „fuzzy“ – PID reguliatoriumi struktūra [6]

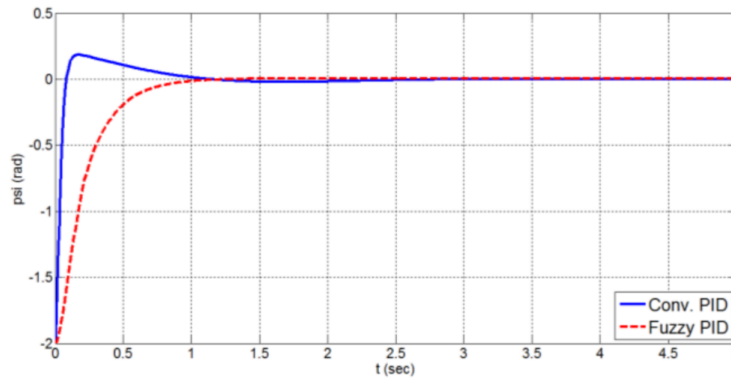
„Fuzzy“ reguliatoriaus įėjimai yra paklaida e ir paklaidos pokytis ce . Pasitelkus „fuzzy“ reguliatoriaus taisykles pagal reguliatoriaus įėjimus ir taisyklių bazę yra formuojami išėjimai – K_p , K_i , K_d koeficientai. PID reguliatoriaus perdavimo funkcija pateikta žemiau:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (3)$$

		paklaida						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
Paklaida pokytis	NB	M	S	VS	VVS	VS	S	M
	NM	B	M	S	VS	S	M	B
	NS	VB	B	M	S	M	B	VB
	Zo	VVB	VB	B	M	B	VB	VVB
	PS	VB	B	M	S	M	B	VB
	PM	B	M	S	VS	S	M	B
	PB	M	S	VS	VVS	VS	S	M

9 pav. „Fuzzy“ taisyklės parinkti K_p ir K_i [15]

„Fuzzy“ reguliatoriaus taisyklių blokas matomas 9 pav. (žr. 9 pav.). Čia paklaidos ir paklaidos pokyčio vertės: NB-neigiama didelė, NM-neigiama vidutinė, NS-neigiama maža, ZO-nulinė, PS-teigiama maža, PM-teigiama vidutinė, PB-teigiama didelė. Išėjimų vertės: VVS-labai labai mažas, VS-labai mažas, S-mažas, M-vidutinis, B-didelis, VB-labai didelis, VVB-labai labai didelis. Tad remiantis „fuzzy“ taisyklėmis logika tokia: jeigu paklaida yra neigiama didelė ir paklaidos pokytis yra teigiamas mažas, tada K_p bei K_i vertės bus labai didelės. K_d vertė parenkama analogiškai, parinkus kitas taisykles.

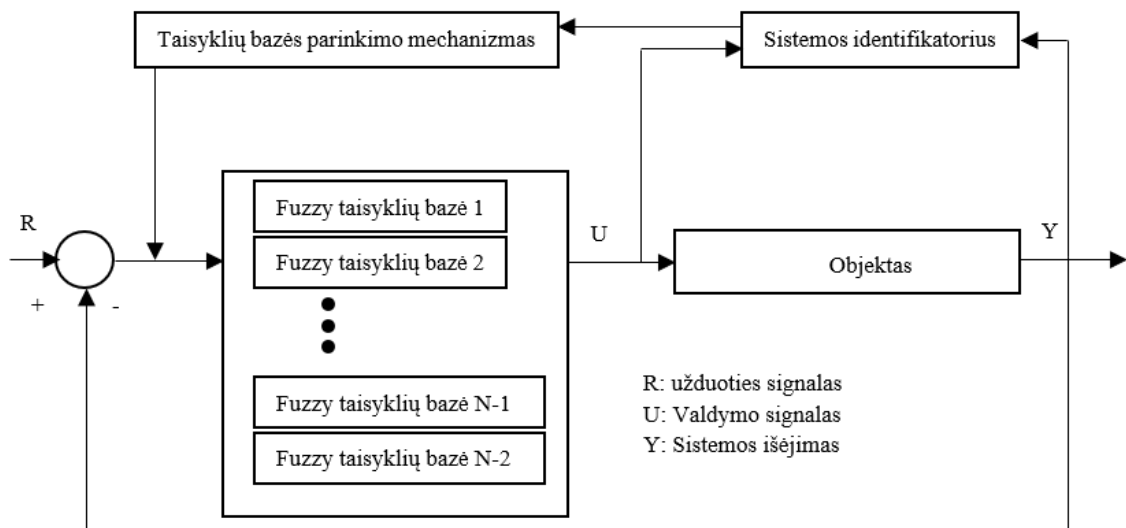


10 pav. Posūkio valdymas drone naudojantis klasikiniu PID (mėlyna linija) ir „fuzzy“-PID (raudona linija)[15]

„Fuzzy“-PID pritaikymo realiame gyvenime pavyzdys yra matomas 10 paveiksle. Reguliatorius valdo drono pasisukimą. Paveiksle palyginta reakcija su klasikiniu PID, kur sistema turi perreguliavimą.

1.2.4. Daugiataisyklis adaptyvusis „fuzzy“ reguliatorius

Šis adaptyvusis reguliatorius išsiskiria tuo, kad naudoja keletą nepriklausomų „fuzzy“ reguliatorių ir tik geriausiai situacijai tinkantis yra pasirenkamas pagal taisyklių parinkimo mechanizmą, kuris stebi kontroliuojamo proceso kintančius parametrus [17].



11 pav. Sistema su daugiataisykliu „fuzzy“ reguliatoriumi [17]

Daugiataisyklis „fuzzy“ reguliatorius yra pavaizduotas 11 paveiksle. Sistemos identifikatorius stebi proceso parametrus ir atitinkamai parenkama taisyklių bazė. Stebėjimas atliekamas kiekvieną reguliatoriaus ciklą. Jeigu esamuoju laiko momentu esanti taisyklė pažymėta S_c , tai kitu ciklu parinkta taisyklė bus S_n .

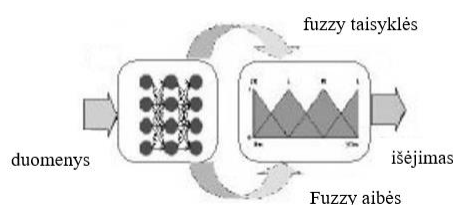
$$S_n = S_c + \Delta S \quad (4)$$

ΔS yra taisyklių bazės parinkimo mechanizmo išėjimas.

1.2.5. Neuroniniais tinklais paremtas „fuzzy“ reguliatorius

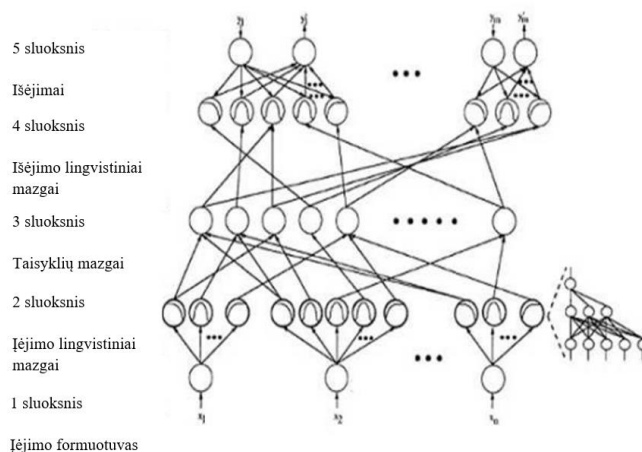
Dirbtiniai neuroniniai tinklai šiuo metu yra sparčiai tobulinama ir madinga skaitinio intelekto kūrimo technika. Šia tematika kasmet išleidžiama daug naujų monografijų bei vadovėlių, nors baziniai šios technikos elementai praktiškai nesikeičia ir pakankamai gerai išdėstyti monografijose [2].

Neuroninių tinklų bei „fuzzy“ logikos apjungimas panaudoja abiejų sistemų teikiamas naudas – specialisto žinios gali būti panaudotos suderinti „fuzzy“ reguliatorių, o mokymosi mechanizmas naudojant neuroninius tinklus padeda iki galo suderinti reguliatorių ir gauti geriausias kiekybines bei kokybines charakteristikas.



12 pav. Adaptyvusis „neuro-fuzzy“ reguliatorius [7]

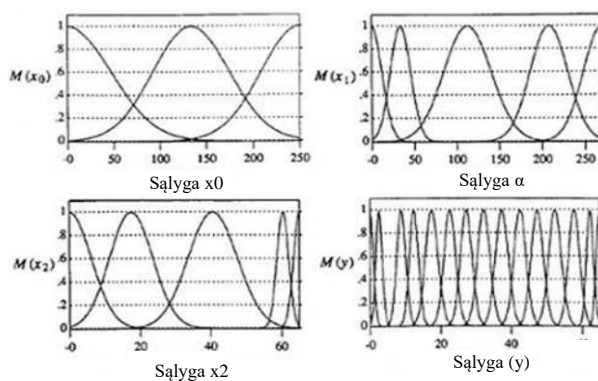
„Neuro-fuzzy“ reguliatoriuje neuroniniai tinklai apmokomi duomenimis, pagal kuriuos yra nustatomos priklausomybės funkcijos, taisyklių bazė. Bazinė taisyklių bazė yra nustatoma „fuzzy“ grupavimo algoritmais. Iš 12 paveiksle pateiktos struktūros matyti kaip iš apmokytų duomenų sukuriama pradinė priklausomybės funkcijos.



13 pav. 5 sluoksnių „neuro-fuzzy“ struktūra [7]

Pirmasis vidinis ar paslėptas sluoksnis yra atsakingas už įvesties kintamųjų „fuzifikaciją“. Kiekvienas šio sluoksnio mazgas gali būti vienetinis, kuris identifikuoja paprastą priklausomybės funkcija arba jis gali būti sudarytas iš daugiasluoksnių mazgų sudėtingoms priklausomybės funkcijoms apskaičiuoti.

Antrasis paslėptas sluoksnis apibrėžia prielaidas ir taisykles atsirado dėl trečio paslėpto sluoksnio. Šiame metode išvestis generuojamas naudojant hibridinio mokymosi algoritmą nekontroliuojamas mokymasis gauti pradinę priklausomybės funkcijų ir taisyklių bazės. [7]



14 pav. „Neuro-fuzzy“ suprojektuotų priklausomybės funkcijų pavyzdys [7]

14 paveiksle galime matyti kaip po kelių etapų apmokymų „neuro-fuzzy“ reguliatorius suprojektavo priklausomybės funkcijas.

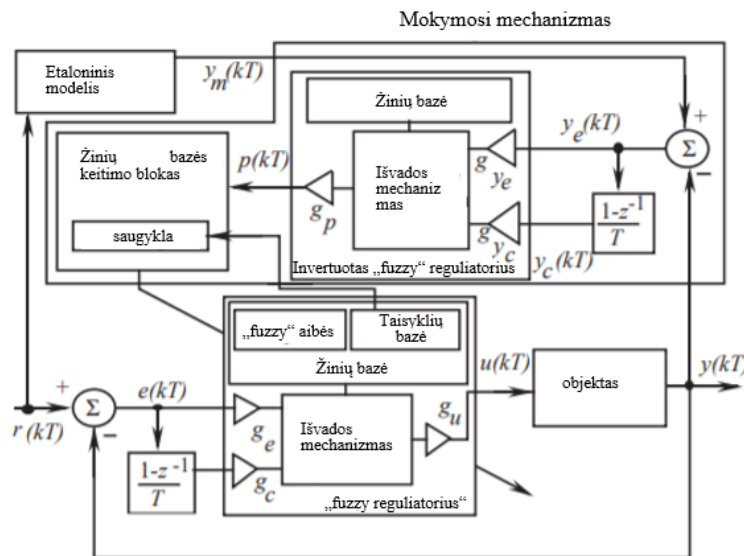
2. Tiriemoji dalis

2.1. Adaptyviojo diskretinio „fuzzy“ regulatoriaus su etaloniniu modeliu derinimas 2 eilės objektui

Nenutrūkstamo liejimo proceso metu lydytas plienas teka iš samčio per tundį (angl. *tundish*) į liejimo formą. Patekęs į formą, išlydytas plienas atšąla per vandeniu aušinamas vario formos sienas ir susidaro kietas liejinys. Mašinoje esantys žemesni varomieji ritinėliai nuolat tempia apvalkalą iš formos nustatytu greičiu, kuris atitinka įtekančio plieno greitį, tad procesas vyksta vienodu tempu [11]. Perdavimo funkcija, kuri aprašo hidraulinės pavaros stabdžio judėjimą tundyje aprašyta taip:

$$W(s) = \frac{39.84}{s^2 + 8.796s + 39.44} \quad (5)$$

Šiame skyriuje bus tiriama šis objektas – tai šio darbo pirmasis pasirinktas objektas. Visa sistema realizuota MATLAB programiniame pakete. Sistema realizuota remiantis 15 paveiksle esančia diskretinio adaptyviojo „fuzzy“ regulatoriaus su etaloniniu modeliu schema.



15 pav. Diskretinio adaptyviojo „fuzzy“ regulatoriaus su etaloniniu modeliu schema [10]

Objektas turi įėjimą $u(kT)$ ir išėjimą $y(kT)$. Įėjimai į „fuzzy“ reguliatorių yra paklaida $e(kT)$ ir paklaidos išvestinė $c(kT)$.

$$e(kT) = r(kT) - y(kT) \quad (6)$$

$$c(kT) = \frac{e(kT) - e(kT-T)}{T} \quad (7)$$

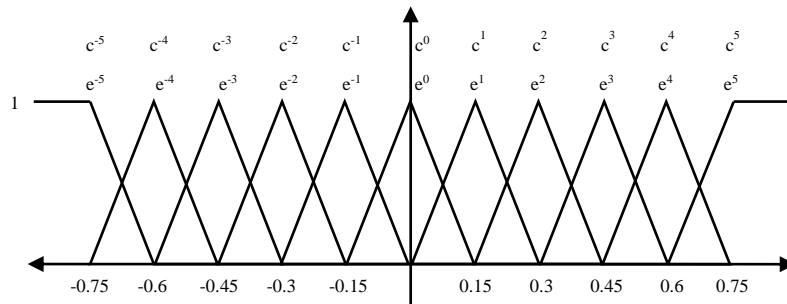
Paklaidos e ir paklaidos išvestinės c formulės atitinkamai pavaizduotos (6) bei (7), $r(kT)$ čia yra užduotis.

Invertuoto „fuzzy“ regulatoriaus tikslas sumažinti skirtumą tarp objekto ir etaloninio modelio iki nulio. Invertuotas „fuzzy“ reguliatorius turi įėjimus y_e bei y_c . Skirtumas tarp y_m bei y yra paskaičiuojamas pagal 8 formulę, o išvestinė paskaičiuojama pagal 9 formulę [18].

$$y_e(kT) = y_m(kT) - y(kT) \quad (8)$$

$$y_c(kT) = \frac{y_e(kT) - y_e(kT-T)}{T} \quad (9)$$

Derinant „fuzzy“ reguliatorių buvo sudarytos 16 pav. pavaizduotos įėjimų priklausomybės funkcijos. Paklaidos e ir paklaidos pokyčio c priklausomybės funkcijų plotis yra 0.3, o lingvistiniai kintamieji čia atitinkamai apibrėžti indeksais nuo -5 iki 5.



16 pav. Įėjimų priklausomybės funkcijos

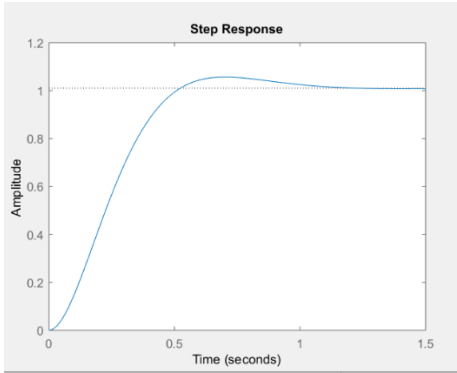
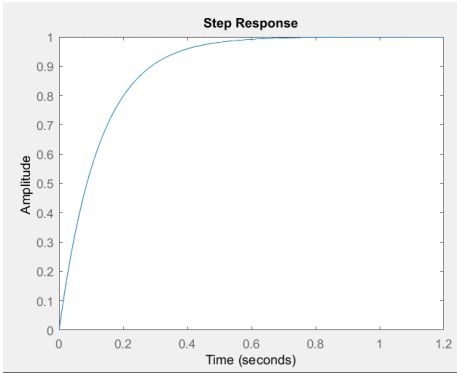
Mokymosi mechanizmas taip sureguliuoja tiesioginio „fuzzy“ reguliatoriaus taisyklių bazę, kad sistema su grįžtamoju ryšiu elgiasi kaip etaloninis modelis. Šios taisyklių bazės modifikacijos atliekamos stebint kontroliuojamo proceso duomenis, etaloninį modelį ir „fuzzy“ reguliatorių. Mokymosi mechanizmą sudaro dvi dalys: „fuzzy atvirkštinis modelis“ ir „žinių bazės modifikatorius“. Žinių bazės modifikatorius atlieka „fuzzy“ reguliatoriaus taisyklių bazės modifikavimo funkciją, kad paveiktų reikiamus proceso įėjimų pakeitimus. Informacija apie reikalingus pakeitimus, kurie nurodomi $p(kT)$, kad paklaida pasiektų nulį žinių bazės modifikatorius pakeičia taisyklių bazę, kad prieš tai atliktas valdymo žingsnis $u(kT-T)$ būtų modifikuotas per $p(kT)$ [13]. Kai $p(kT)$ vertė yra nenulinė koregavimo mechanizmas pagal $e(kT-T)$ ir $c(kT-T)$ vertes pasirenka koreguoti tik atitinkamas taisykles. Taip pat adaptyvusis mechanizmas atsimena koregavimo vertes, tad keičiantis objekto parametrms, jiems grįžtant į ankstesnes vertes mechanizmas žino kaip buvo suderintas.

2 lentelė. Taisyklių bazės pagal paklaidos ir paklaidos pokyčio vertes.

			Paklaida, e										
			5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5
			-0.75	-0.6	-0.45	-0.3	-0.15	0	0.15	0.3	0.45	0.6	0.75
Paklaidos pokytis, c	5	-0.75	-1.6	-1.45	-1.3	-1.15	-0.9	-0.75	-0.6	-0.45	-0.3	-0.15	0
	4	-0.6	-1.45	-1.3	-1.15	-0.9	-0.75	-0.6	-0.45	-0.3	-0.15	0	0.15
	3	-0.45	-1.3	-1.15	-0.9	-0.75	-0.6	-0.45	-0.3	-0.15	0	0.15	0.3
	2	-0.3	-1.15	-0.9	-0.75	-0.6	-0.45	-0.3	-0.15	0	0.15	0.3	0.45
	1	-0.15	-0.9	-0.75	-0.6	-0.45	-0.3	-0.15	0	0.15	0.3	0.45	0.6
	0	0	-0.75	-0.6	-0.45	-0.3	-0.15	0	0.15	0.3	0.45	0.6	0.75
	1	0.15	-0.6	-0.45	-0.3	-0.15	0	0.15	0.3	0.45	0.6	0.75	0.9
	2	0.3	-0.45	-0.3	-0.15	0	0.15	0.3	0.45	0.6	0.75	0.9	1.15
	3	0.45	-0.3	-0.15	0	0.15	0.3	0.45	0.6	0.75	0.9	1.15	1.3
	4	0.6	-0.15	0	0.15	0.3	0.45	0.6	0.75	0.9	1.15	1.3	1.45
	5	0.75	0	0.15	0.3	0.45	0.6	0.75	0.9	1.15	1.3	1.45	1.6

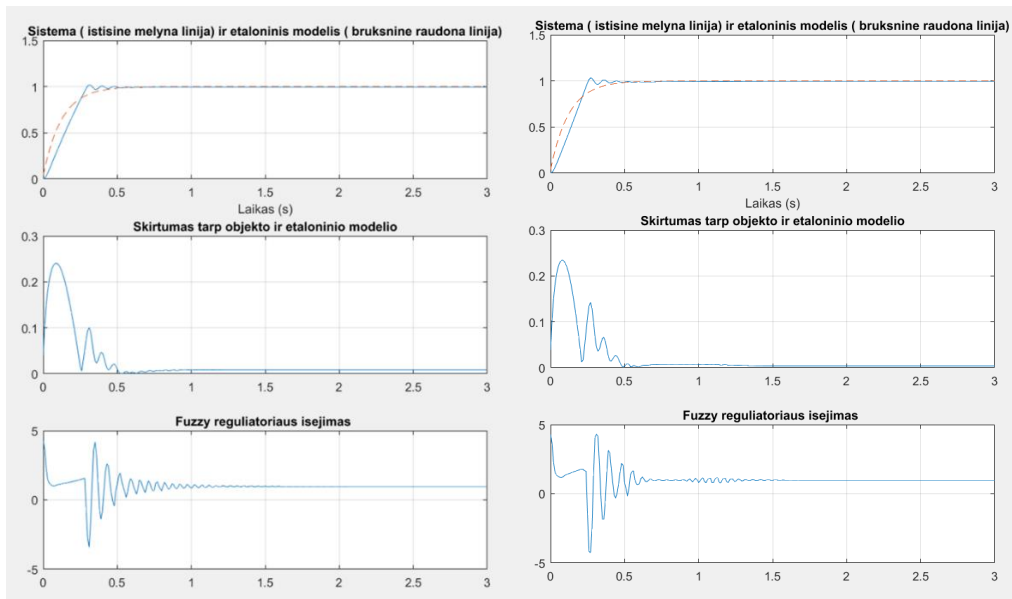
Suderinto „fuzzy“ regulatoriaus taisyklių bazė pavaizduota antroje lentelėje. Regulatoriaus išėjimas yra nustatomas priklausomai nuo paklaidos ir paklaidos pokyčių taisyklių bazės. Išėjimo vertės yra nuo -1.6 iki 1.6 žingsniu 0.15. Kaip galime matyti iš 2 lentelės kai paklaida yra 0.15, o paklaidos pokytis 0, išėjimas yra 0.15. Iš viso buvo panaudota 121 taisyklė. Panaudojus mažiau taisyklių, pailgėja nusistovėjimo laikas, padidėja perreguliavimas. Išėjimo priklausomybės funkcijos trikampės, su lygiu 0.3 pločiu.

3 lentelė. Pasirinktas objektas ir etaloninis modelis

	Objektas	Etaloninis modelis
Reakcija į vienetinį suolį		
Perdavimo funkcija	$W(s) = \frac{39.84}{s^2 + 8.796s + 39.44}$	$G(s) = \frac{8}{s+8}$
Kokybinės charakteristikos	Kilimo laikas: 0.3388s Nusistovėjimo laikas: 0.9520s Perreguliavimas: 4.5868%	Kilimo laikas: 0.2746s Nusistovėjimo laikas: 0.4890s Perreguliavimas: 0%

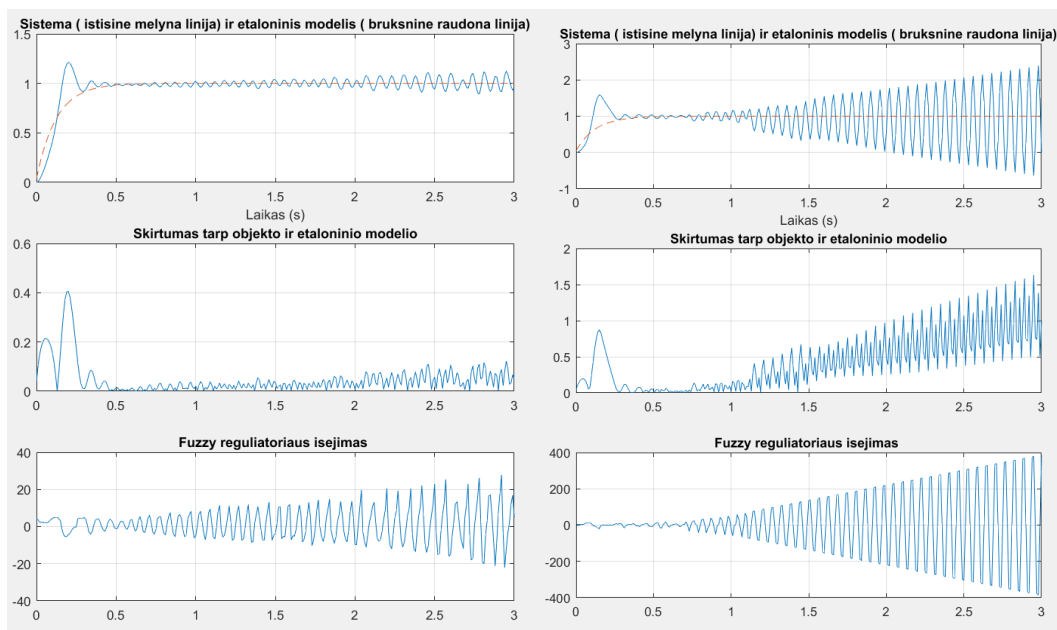
Pirmo objekto, kurį valdysime reakcija yra pateikta trečioje lentelėje. Etaloninis modelis neturi perreguliavimo, o objekto perreguliavimas siekia 4.58%.

Suderinus „fuzzy“ regulatorių duotam objektui gautos tokios reikšmės: $g_e=25$; $g_c=0.2$; $g_u=4.3$. Derinant buvo siekiama, kad perreguliavimas neviršytų 5% bei nusistovėjimo laikas būtų minimalus. Šitaip suderinus regulatorių lieka 0.87% statinė paklaida. Derinant regulatorių buvo siekiama suderinti jį taip, kad „fuzzy“ regulatoriaus išėjimas nusistovėtų ir nekistų.



17 pav. Suderintas „fuzzy“ reguliatorius kairėje ir įjungtas adaptyvusis mechanizmas dešinėje

Suderinus „fuzzy“ reguliatorių derinamas invertuotas „fuzzy“ reguliatorius, koeficientai $g_{ye}=25$; $g_{yc}=0.2$ imami tokie patys kaip ir „fuzzy“ reguliatoriaus, visa struktūra, taisyklių bazė ir kita yra tokia pati, o keičiamas tik koeficientas g_p (invertuoto „fuzzy“ išėjimo koeficientas).



18 pav. Įjungtas adaptyvusis mechanizmas, $g_p = 1$ (kairėje), $g_p = 5$ (dešinėje)

Sistemos reakciją g_p koeficientą parinkus 1 ir 5 pavaizduota 18 paveiksle. Adaptiviojo mechanizmo koeficientas g_p yra itin jautrus ir parinkus jį per didelį matomi augantys švytavimai – sistemos reakcija tampa nestabili.

4 lentelė. Adaptyvios sistemos dalies įjungimo pokyčiai proceso charakteristikose

	„Fuzzy“ reguliatorius be adaptyvios dalies	Su adaptyviu „fuzzy“ reguliatoriumi ($g_p=0.1005$)
Perreguliavimas, %	2.89	3.55
Statinė paklaida	0.0087	0.0039
Objekto ir etalono išėjimo skirtumas $y_e=3s$ laiko periode prie 0.01s diskretizacijos periodo	7.13	6.06
Didžiausias skirtumas	0.24	0.2344

Adaptyvios dalies įjungimas 2.23 karto sumažino statinę paklaidą bei 15% sumažintas objekto ir etalono modelio išėjimo y_e skirtumas 3s laiko tarpe. Perreguliavimas padidėjo, bet neviršijo 5% ribos. Šie duomenys rodo, kad įjungus adaptyvųjų mechanizmą matomas teigiamas poveikis ir geresni kokybiniai proceso rodikliai. Ketvirtoje lentelėje pavaizduotas objektas buvo realizuotas tokia perdavimo funkcija:

$$W(s) = \frac{k_p}{s^2 + 2 * zeta_p * w_p * s + w_p^2} \quad (10)$$

k_p – objekto stiprinimo koeficientas, vertė: 39.84.

$zeta_p$ – slopinimo santykis, vertė: 0.7003.

w_p – natūralusis sistemos dažnis, vertė: 6.28.

t – modeliavimo laikas, vertė: 3s.

T – diskretizacijos periodas, vertė: 0.01s.

Taip pat skaičiavime naudotas rodiklis pereinamojo proceso kokybei nustatyti – etalono ir objekto skirtumo integralas y_e modeliavimo laikotarpyje:

$$Y_e = 1/2(|y_e(kT)| + 2|y_e(kT+T)| + \dots + 2|y_e(kT+nT)| + |y_e(kT+(n+1)T)|) \quad (11)$$

5 lentelė. Modeliavimo rezultatai

G=0 (adaptyvusis reguliatorius išjungtas)							
k_p , %	70	80	90	100	110	120	130
Skirtumo y_e integralas,	9.92	8.63	7.70	7.13	6.76	6.48	6.62
Perreguliavimas, %	3.25	3.24	3.313	2.88	2.87	2.67	3.04
Statinė paklaida	0.0134	0.011	0.0096	0.0087	0.098	0.078	0.0060
Nusistovėjimo trukmė, s	0.53	0.412	0.39	0.29	0.354	0.44	0.345
G=0.1005							

k_p , %	70	80	90	100	110	120	130
Skirtumo y_e integralas,	7.17	6.64	6.319	6.06	5.63	6.6	6.16
Perreguliavimas, %	4.09	4.12	3.67	3.55	3.48	4.54	4.1
Statinė paklaida	0.004	0.004	0.004	0.0039	0.0028	0.0053	0.0043
Nusistovėjimo trukmė, s	0.395	0.374	0.435	0.284	0.3155	0.385	0.299
G=0 (adaptyvusis reguliatorius išjungtas)							
w_p , %	70	80	90	100	110	120	130
Skirtumo y_e integralas,	6.03	6.47	6.77	7.13	7.78	8.80	9.61
Perreguliavimas, %	4.05	4.08	3.43	2.88	2.83	2.81	2.29
Statinė paklaida	0.0047	0.0064	0.0078	0.0087	0.0106	0.0136	0.0165
Nusistovėjimo trukmė, s	0.423	0.425	0.355	0.29	0.384	0.0482	0.0495
G=0.1005							
w_p , %	70	80	90	100	110	120	130
Skirtumo y_e integralas,	5.87	5.91	5.89	6.06	6.107	7.14	7.31
Perreguliavimas, %	5.67	5.47	3.92	3.55	3.67	3.26	3.52
Statinė paklaida	0.0038	0.0038	0.0033	0.0039	0.0037	0.0089	0.0092
Nusistovėjimo trukmė, s	0.405	0.4	0.39	0.284	0.346	0.348	0.0516

Adaptyvusis mechanizmas dirba objekte atsirandant pokyčiams – kokybinės charakteristikos pagerėja – sistema suvaldoma etaloninio modelio atžvilgiu – tai matyti 5 lentelėje. Pirmoje lentelės dalyje lyginama objekto stiprinimo koeficiento pokytis nuo 100% vertės didinant bei mažinant 10%, 20%, 30%. Skirtumo integralas su adaptyviu mechanizmu yra mažesnis visuose bandymuose išskyrus 120% stiprinimo koeficiento vertę. Didžiausias skirtumas stiprinimo koeficiento vertei esant 70% ir siekia 2.75. Statinės paklaidos vertė yra vidutiniškai 8.83 karto mažesnė įjungus adaptyvų mechanizmą. Nusistovėjimo trukmė su adaptyviu mechanizmu išlieka artima sistemai be adaptyviojo mechanizmo – vidutinis skirtumas tarp jų 0.04s. Lyginant laiko pastoviosios pokyčius didinant bei mažinant vertes nuo 100% pastebima, kad adaptyvusis mechanizmas visais atvejais turi geresnį skirtumo y_e integralą bei statinę paklaidą. Nusistovėjimo trukmės skirtumas vidurkis yra vos 0.04s klasikinio „fuzzy“ regulatoriaus naudai.

Reziumuojant 5 lentelės duomenis, žemiau pateikti procentai, kiek vidutiniškai adaptyvusis „fuzzy“ reguliatorius lenkia klasikinį „fuzzy“:

Keičiant objekto stiprinimo vertę:

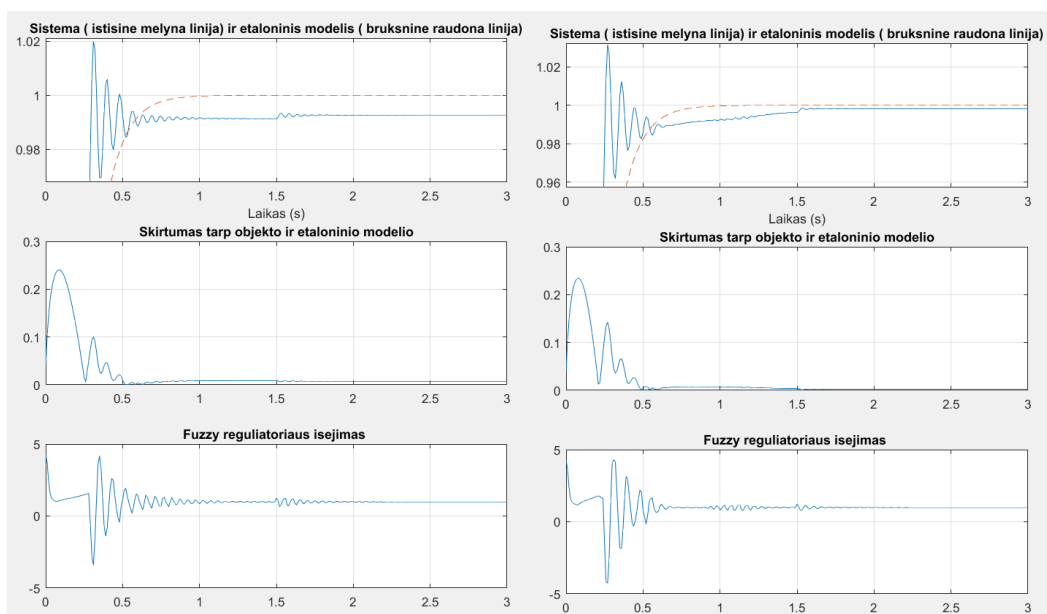
- Skirtumo y_e integralas vidutiniškai 15.08 procentais mažesnis.
- Perreguliavimas vidutiniškai 30.45 procento didesnis (bet pats perreguliavimas neviršija 5 procentų).
- Statinė paklaida vidutiniškai 66.56 procentais mažesnė.
- Nusistovėjimo trukmė vidutiniškai 8.85 procentais mažesnė.

Keičiant laiko pastoviosios vertę:

- Skirtumo y_e integralas vidutiniškai 14.80 procentais mažesnis.
- Perreguliavimas vidutiniškai 30.15 procento didesnis.
- Statinė paklaida vidutiniškai 87.7 procentais didesnė.
- Nusistovėjimo trukmė vidutiniškai 8.85 procentais mažesnė (ties 110 procentų gaunama vertė 7.2 karto didesnė nei be adaptyviojo mechanizmo, išmetus tą vertę vidurkis 1.3 procento mažesnė nusistovėjimo trukmė).

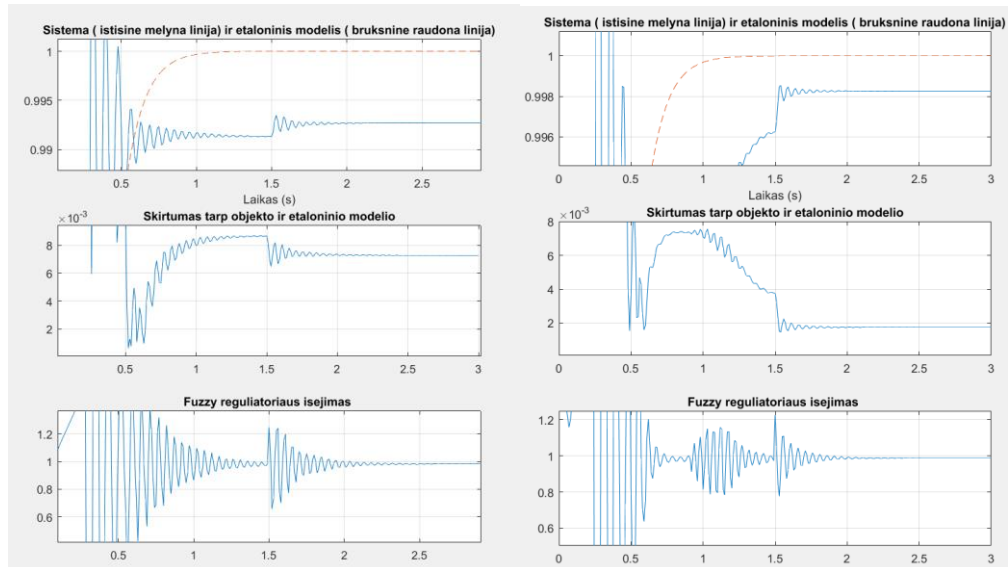
Kaip matyti iš 5 lentelės modeliavimo rezultatų - „fuzzy“ reguliatorius su adaptyviu mechanizmu puikiai susitvarko su kintančiais objekto stiprinimo bei laiko pastoviosios koeficientais ir daugelyje vietų laimi prieš klasikinį „fuzzy“.

Sistemai veikiant suderintame režime, laiko momentu 1.5s paduotas trikdys (šuolinis signalas - 0.004) objekto įėjime. Šiuo bandymu yra realizuojama vykdomojo mechanizmo problemos.



19 pav. Suderinto „fuzzy“ reguliatoriaus reakcija į trikdį objekto įėjime kairėje o dešinėje atitinkamai su adaptyviu mechanizmu.

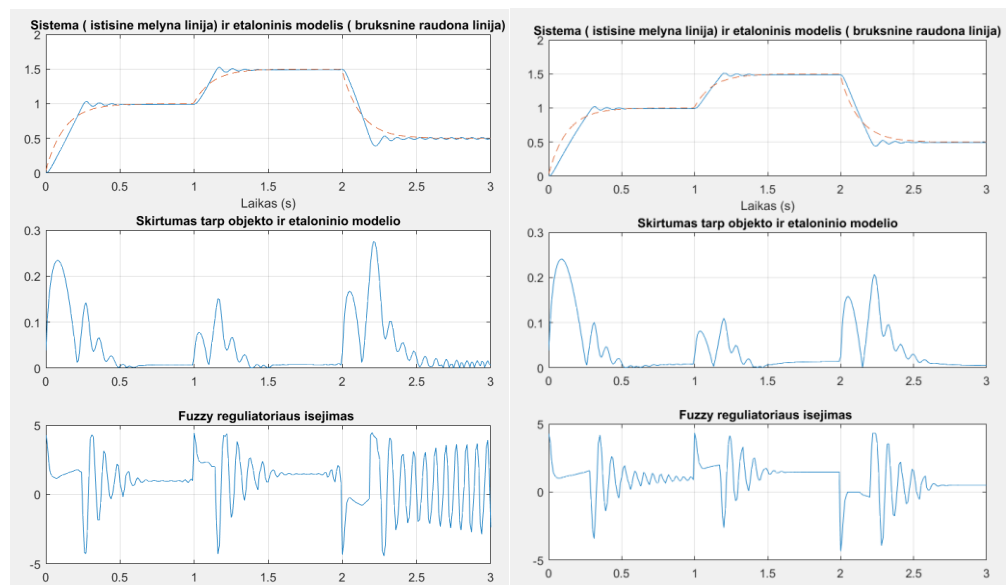
Sistema su adaptyviu mechanizmu po trikdžio ties 1.5s labiau priartėjo prie etaloninio modelio – tai matyti 19 paveiksle. Skirtumas tarp sistemos ir etaloninio modelio be adaptyvios dalies nusistovi ties 7.2×10^{-3} , o su adaptyvia dalimi nusistovi ties 1.8×10^{-3} .



20 pav. Suderinto „fuzzy“ regulatoriaus reakcija į trikdį objekto įėjime kairėje o dešinėje atitinkamai su adaptyviu mechanizmu – priartinti vaizdai.

Iš 19 bei 20 pav. pateiktų grafikų matyti, kad sistema su įjungtu adaptyviu mechanizmu geriau suvaldoma su trikdžiu objekto įėjime – 4 kartus sumažėja statinė paklaida.

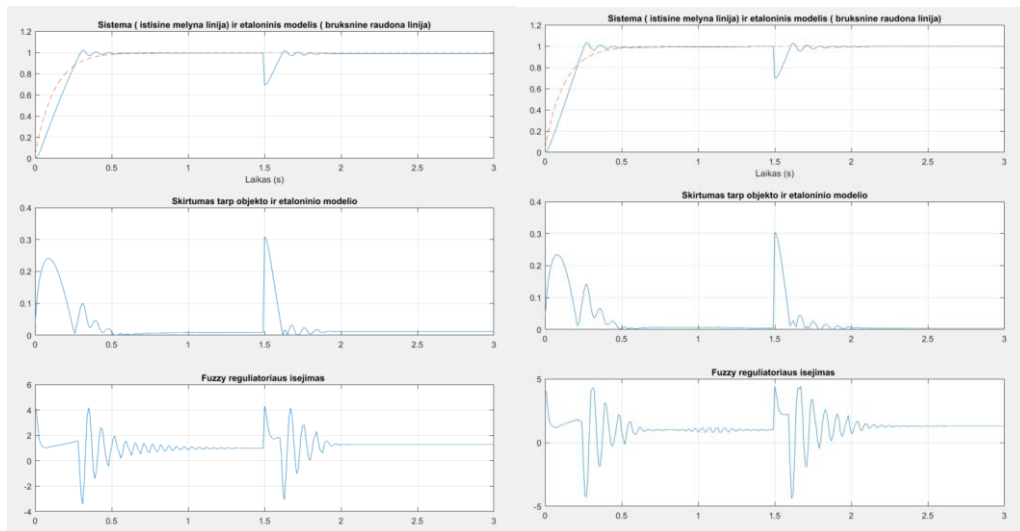
Sistemai veikiant suderintame režime keičiamas užduoties signalas. Užduoties vertė – 1, ties 1s vertė keičiama į 1.5, o ties 2s vertė parenkama 0.5.



21 pav. Sistemos be adaptyvios grandies(kairėje) ir su (dešinėje) reakcija į kintantį užduoties signalą

Kintant užduoties signalui nežymiai geresni rezultatai matyti sistemoje su adaptyviu mechanizmu (žr. 21 pav.)

Sistemai veikiant suderintame režime, laiko momentu 1.5s paduodamas trikdys (šulinis signalas - 0.3) objekto išėjime. Taip realizuojamos jutiklio problemos. Sistemos be adaptyvios grandies statinė paklaida po trikdžio 0.0118, nusistovėjimo laikas 0.27s. Įjungus adaptyviają dalį gauta 0.0033 statinė paklaida ir 0.76s nusistovėjimo laikas.



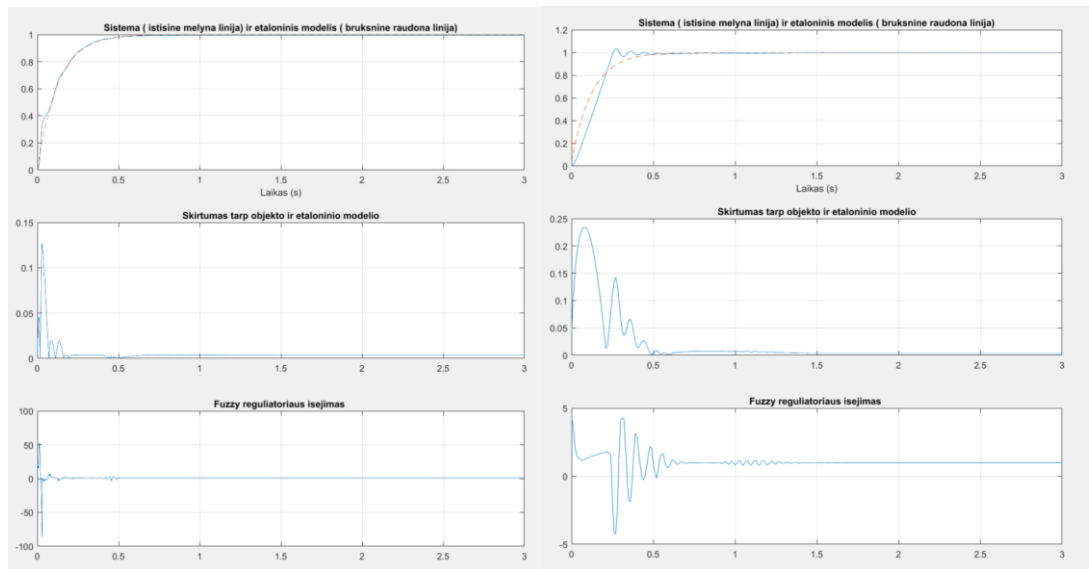
22 pav. Sistemos be adaptyvios grandies(kairėje) ir su (dešinėje) reakcija į kintantį užduoties signalą

Sistemos reakcija į trikdį objekto išėjime 22 paveiksle, pateiktame pavyzdyje nusistovėjimo laikas pagerėja 2.8 karto.

6 lentelė. Diskretizacijos periodo įtaka proceso charakteristikoms:

T, s	0.00001	0.0001	0.001	0.01	0.1
Skirtumo y_e integralas,	1.60	6.05	6.29	6.03	Sistema nestabili
Perreguliavimas, %	1.9×10^{-4}	0.21	13.046	3.55	
Statinė paklaida	0.004	0.0039	0.0023	0.0039	
Nusistovėjimo trukmė, s	0.486	0.567	0.603	0.284	

Kadangi *MATLAB* pakete realizuota sistema buvo diskretinė, didelė svarba yra ir diskretizacijos periodo įtaka. Tai puikiai matyti 6 lentelėje bei 23 paveiksle. Prie $T=0.00001s$ objektas praktiškai idealiai atkartojo etaloninį modelį.



23 pav. Diskretizacijos periodo įtaka: T=0.00001s kairėje ir 0.01s dešinėje

Kai diskretizacijos periodas yra 0.00001 sekundės, objektas itin gerai atkartoja etaloninį modelį, skirtumas tarp jų minimalus – tai matyti 23 paveiksle. Vidurinėje paveikslų dalyje matyti skirtumo tarp objekto ir etaloninio modelio kreives – jos puikiai atspindi, kad sistema su 0.00001s diskretizacijos periodu turi daug didesnę pranašumą lyginant su sistema be adaptyviojo mechanizmo.

2.2. Adaptyviojo „fuzzy“ reguliatoriaus su etaloniniu modeliu derinimas 4 eilės objektui, I dalis

Tolimesniam tyrimui pasirinktas 4 eilės objektas [14]. Objektas aprašytas būsenų erdvėje taip:

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -90 & -60 & -24 & -5 \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} U \quad (8)$$

$$Y = [15 \ 5 \ 1 \ 1/6]$$

Šio objekto perdavimo funkcija pateikta 7 lentelėje.

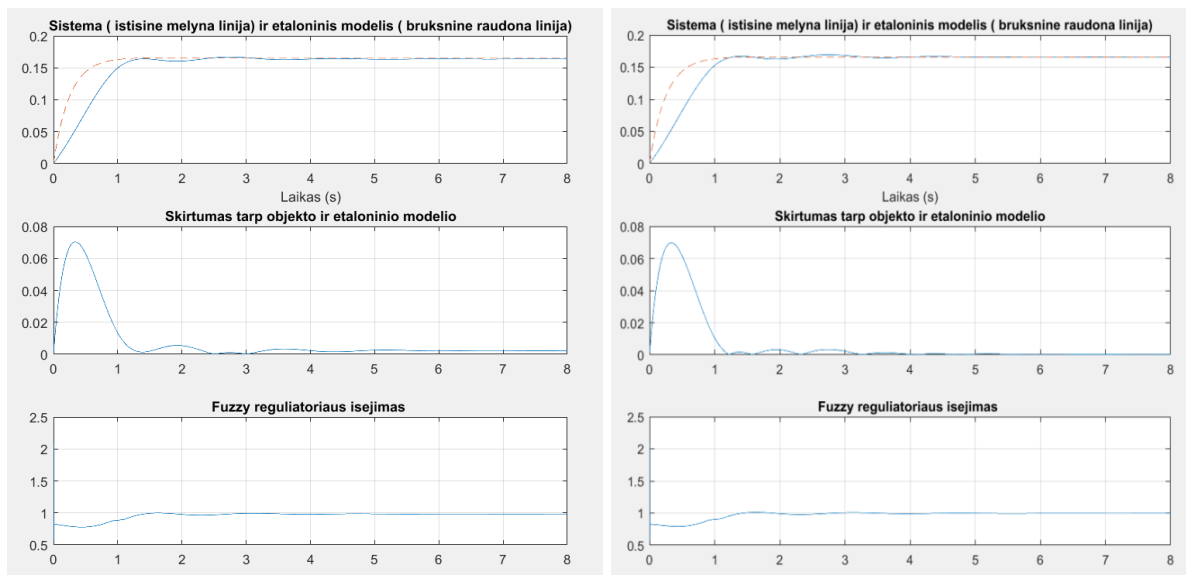
7 lentelė. Pasirinktas objektas ir etaloninis modelis

	Objektas	Etaloninis modelis
Reakcija į vienetinį šuolį		

Perdavimo funkcija	$W(s) = \frac{0.1667*s^3 + s^2 + 5*s + 15}{s^4 + 5*s^3 + 24*s^2 + 60*s + 90}$	$G(s) = \frac{0.664}{s+4}$
Kokybinės charakteristikos	Kilimo laikas: 0.6257s Nusistovėjimo laikas: 4.8337s Perreguliavimas: 17.605%	Kilimo laikas: 0.5493s Nusistovėjimo laikas: 0.97s Perreguliavimas: 0%

4 eilės objektas, kurio perreguliavimas yra 17.6% yra pavaizduotas 7 lentelėje. Tolimesniame tyrime bus siekiama, kad 4 eilės objektas elgtųsi kaip pirmos eilės objektas be perreguliavimo. Pirmos eilės objektas pasirinktas toks, kad nusistovėtų ten pat, kur nusistovi ir 4 eilės objektas. Vėlesniame tyrime bus siekiama, kad objekto nusistovėjimo vertė būtų lygi vienetui.

Suderinus „fuzzy“ reguliatorių gauti tokie koeficientai: $g_e=1$, $g_c=0.9$, $g_u=1.31$. Taisyklių bazė bei priklausomybės funkcijos visame darbe naudojamos tokios pat (16 paveikslas, 2 lentelė). Adaptyviojo reguliatoriaus koeficientai g_e , g_c yra parenkami tokie pat, reguliuojamas tik g_p , kurio vertė parenkama 0.00025.



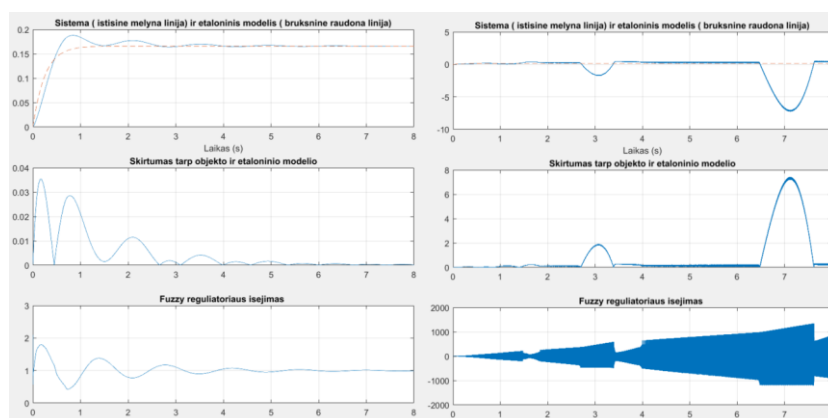
24 pav. Suderintas „fuzzy“ reguliatorius kairėje ir įjungtas adaptyvusis mechanizmas dešinėje

24 Paveiksle matyti skirtumai įjungus adaptyvų mechanizmą pastebimi sunkiau, tad tam pasitelkiama 8 lentelė.

8 lentelė. Adaptyvios sistemos dalies įjungimo pokyčiai proceso charakteristikose

	„Fuzzy“ reguliatorius be adaptyvios dalies	Su adaptyviu „fuzzy“ reguliatoriumi ($g_p=0.00025$)
Perreguliavimas, %	2.05	2.11
Statinė paklaida	0.0023	0.0002
Objekto ir etalono išėjimo skirtumas $y_e=8s$ laiko periode prie 0.001s diskretizacijos periodo	68.24	52.79
Didžiausias skirtumas	0.0703	0.0693

Adaptyvios dalies įjungimas 11.5 kartų sumažino statinę paklaidą bei 22.64% sumažintas objekto ir etaloninio modelio išėjimo y_e skirtumas 8s laiko tarpe – tai matyti 8 lentelėje. Perreguliavimas padidėjo 2.9%, bet neviršijo 5% ribos. Šie duomenys rodo, kad įjungus adaptyvųjį mechanizmą matomas teigiamas poveikis ir geresni kokybiniai proceso rodikliai.



25 pav. Adaptyvusis reguliatorius parinkus atitinkamai: $g_p=0.04$ kairėje ir $g_p=0.4$ dešinėje

Adaptyviojo mechanizmo koeficientas g_p yra jautrus ir parinkus jį per didelį matomi augantys švytavimai – sistemos reakcija tampa nestabili. 25 paveiksle pavaizduoti sistemos reakciją g_p koeficientą parinkus 0.04 ir 0.4. Ketvirtos eilės perdavimo funkciją galima aprašyti tokia forma:

$$T(s) = \frac{b_4s^4 + b_3s^3 + b_2s^2 + b_1s^1 + b_0}{(a_4s^4 + a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s^1 + a_0)} \quad (9)$$

Žemiau pateiktoje lentelėje keičiami 4 eilės objekto (žr. 7 lent.) koeficientai b_4s^4 bei a_3s^3 .

9 lentelė. Modeliavimo rezultatai

G=0 (adaptyvusis reguliatorius išjungtas)							
$b_4, \%$	70	80	90	100	110	120	130
Skirtumo y_e integralas,	68.45	68.39	68.33	68.245	68.14	68.038	67.93
Perreguliavimas, %	2.10	2.09	2.07	2.05	2.02	2.00	1.98
Statinė paklaida	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023
Nusistovėjimo trukmė, s	2.14	2.15	2.16	2.17	2.18	2.2	2.24
G=0.00025							
$b_4, \%$	70	80	90	100	110	120	130
Skirtumo y_e integralas,	52.38	52.32	52.26	51.93	52.27	52.73	53.35
Perreguliavimas, %	2.17	2.16	2.14	2.11	2.077	2.047	2.02
Statinė paklaida	0.0003	0.0003	0.003	0.0002	0.0002	0.0002	0.0003
Nusistovėjimo trukmė, s	1.98	1.96	1.13	1.15	1.16	1.17	1.18
G=0 (adaptyvusis reguliatorius išjungtas)							
$a_3, \%$	70	80	90	100	110	120	130
Skirtumo y_e integralas,	72.73	70.6	69.247	68.245	68.88	71.89	75.76
Perreguliavimas, %	4.2	3.11	2.48	2.05	2.5	4.73	6.84
Statinė paklaida	0.0024	0.0022	0.0022	0.0023	0.0022	0.022	0.0023
Nusistovėjimo trukmė, s	4.48	1.9	2.01	2.17	2.37	2.56	2.74

$G=0.00025$							
$a_3, \%$	70	80	90	100	110	120	130
Skirtumo y_e integralas,	60.45	55.45	52.6	51.93	55.76	60.49	66.05
Perreguliavimas, %	4.4	3.2	2.57	2.11	3.19	5.52	7.74
Statinė paklaida	0.0001	0.0001	0.000	0.0002	0.0004	0.0006	0.0007
Nusistovėjimo trukmė, s	2.55	2.7	2.8	1.15	2.16	2.46	2.66

Režiuojant 9 lentelės duomenis, žemiau pateikti procentai, kiek vidutiniškai adaptyvusis „fuzzy“ reguliatorius lenkia klasikinį „fuzzy“:

Keičiant objekto b_4 koeficientą:

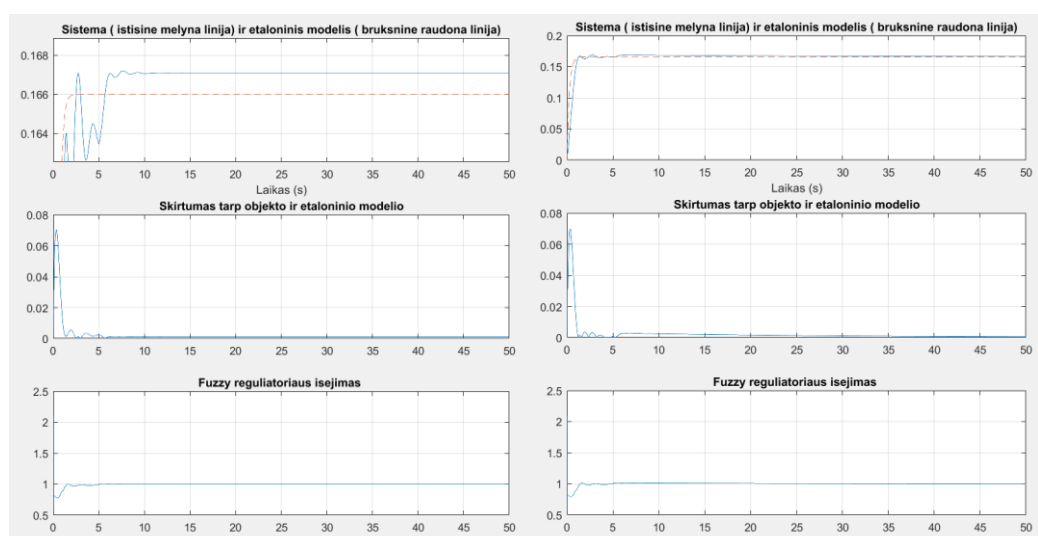
- Skirtumo y_e integralas vidutiniškai 23 procentais mažesnis
- Perreguliavimas vidutiniškai 2.88 procento didesnis
- Statinė paklaida vidutiniškai 72.04 procentais mažesnė
- Nusistovėjimo trukmė vidutiniškai 35.99 procentais mažesnė

Keičiant objekto a_3 koeficientą:

- Skirtumo y_e integralas vidutiniškai 19.14 procentais mažesnis
- Perreguliavimas vidutiniškai 10.24 procento didesnis
- Statinė paklaida vidutiniškai 90.18 procentais mažesnė
- Nusistovėjimo trukmė vidutiniškai 3.48 procentais mažesnė

Matyti, kad adaptyvusis reguliatorius puikiai susitvarko su kintančiais objekto parametrais.

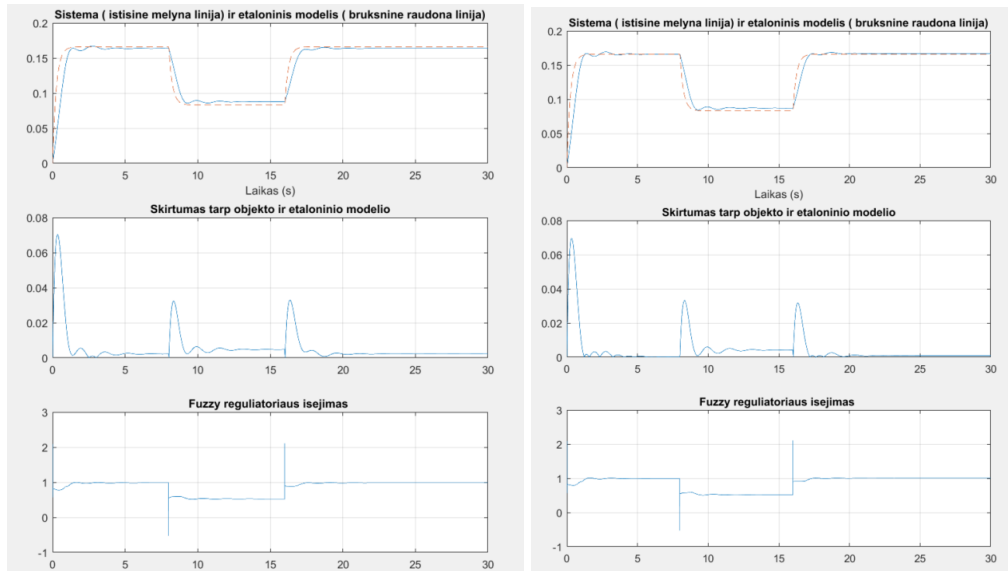
Sistemai veikiant suderintame režime, laiko momentu 5s paduotas trikdys (šuolinis signalas - 0.02) objekto įėjime. Šiuo bandymu yra realizuojama vykdomojo mechanizmo problemos.



26 pav. Suderinto „fuzzy“ reguliatoriaus reakcija į trikdį objekto įėjime kairėje, o dešinėje atitinkamai su adaptyviu mechanizmu.

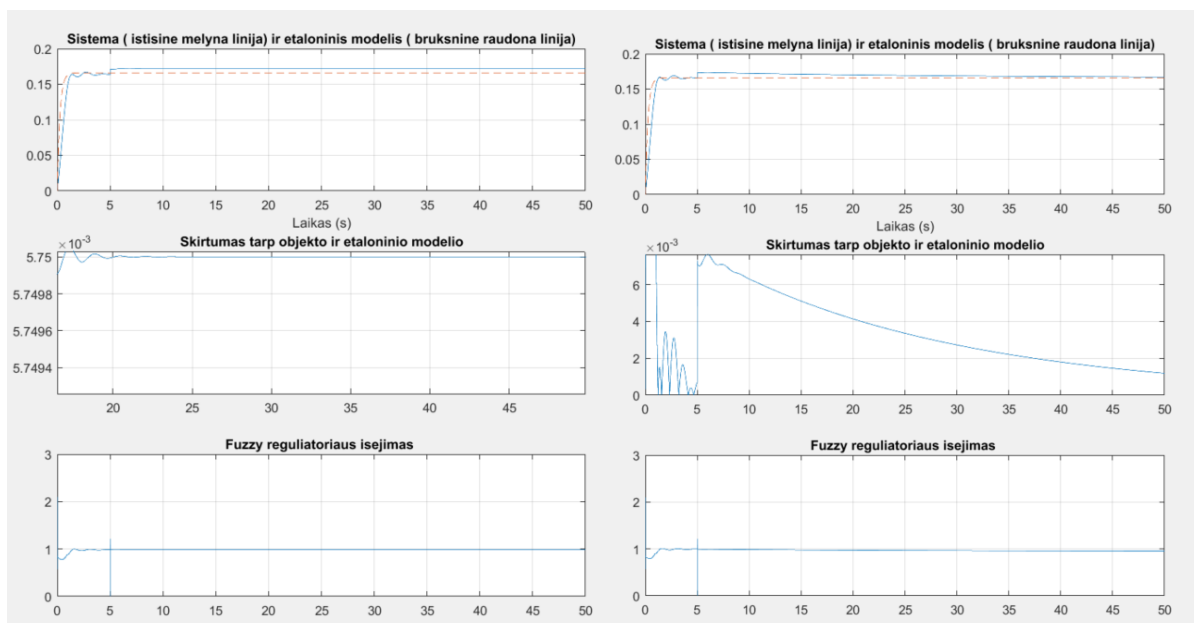
Sistema su adaptyviu mechanizmu po trikdžio ties 5s labiau priartėjo prie etaloninio modelio – tai matyti iš 26 paveikslu grafiku . Skirtumas tarp sistemos ir etaloninio modelio be adaptyvios dalies nusistovi ties 1.08×10^{-3} , o su adaptyvia dalimi po 50s nusistovi ties nusistovi ties 4.6×10^{-4} .

Sistemai veikiant suderintame režime keičiamas užduotis signalas. Užduoties vertė – 0.166 ties 8s vertė keičiama į 0.08, o ties 16s vertė parenkama 0.166.



27 pav. Sistemos be adaptyvios grandies(kairėje) ir su (dešinėje) reakcija į kintantį užduoties signalą

Sistemai veikiant suderintame režime, laiko momentu 5s paduodamas trikdžis (šulinis signalas - 0.008) objekto išėjime. Sistemos be adaptyviojo mechanizmo statinė paklaida 5.75×10^{-3} , su adaptyvia grandimi statine paklaida po 50s 1.2×10^{-3}



28 pav. Trikdžis objekto išėjime be adaptyviojo „fuzzy“ kairėje ir su adaptyviu „fuzzy“ dešinėje.

Sistema be adaptyviojo mechanizmo gavus trikdį objekto išėjime po 50s nepasiekia etaloninio modelio vertę, o sistema su adaptyviu mechanizmu – pasiekia – tai matyti iš 28 paveikslo grafikų. Tą itin gerai parodo dešinio paveikslo viduryje esantis skirtumas tarp objekto ir etaloninio modelio – visą 50s laiką jis mažėja.

10 lentelė. Diskretizacijos periodo įtaka proceso charakteristikoms:

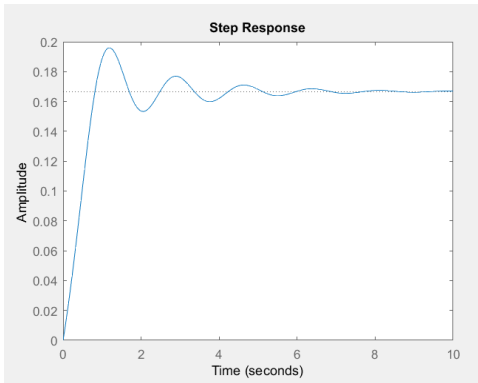
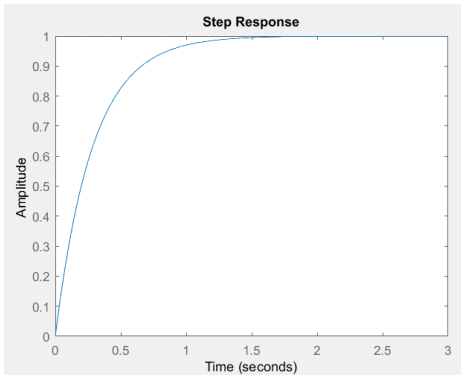
T, s	0.00001	0.0001	0.001	0.01	0.1
Skirtumo y_e integralas,	84.5	51.61	63.8	63.8	63.8
Perreguliavimas, %	7.65	2.09	2.04	2.04	2.04
Statinė paklaida	0.0056	0.0001	0.0022	0.0022	0.0022
Nusistovėjimo trukmė, s	Nepasiekia 2%	1.15	2.176	2.176	2.176

Keičiant diskretizacijos periodą nustatyta, kad geriausi regulatoriaus rezultatai pasiekti, kai vertė buvo 0.0001s – tai matyti 10 lentelėje.

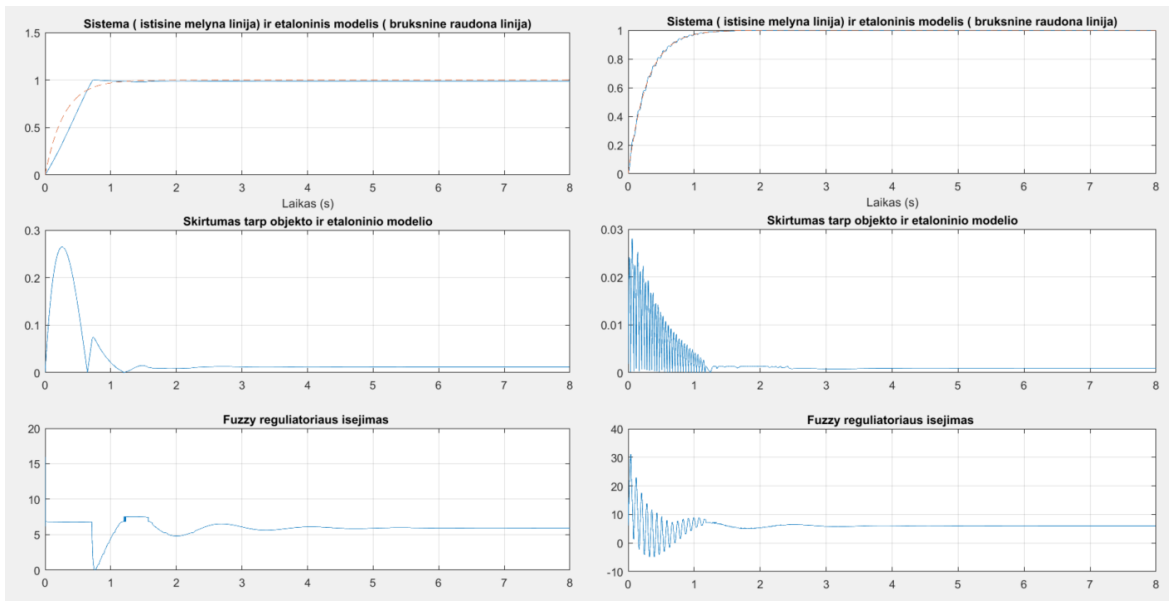
2.3. Adaptyviojo „fuzzy“ regulatoriaus su etaloniniu modeliu derinimas 4 eilės objektui, II dalis

Šioje dalyje naudojamas tas pats objektas kaip ir 2.2 poskyryje, bet bus parinktas toks etaloninis modelis, kuris nusistovi ties vienetu. Priklausomybės funkcijos, taisyklių bazė lieka tokios pačios kaip ir prieš tai buvusiame tyrime.

11 lentelė. Pasirinktas objektas ir etaloninis modelis

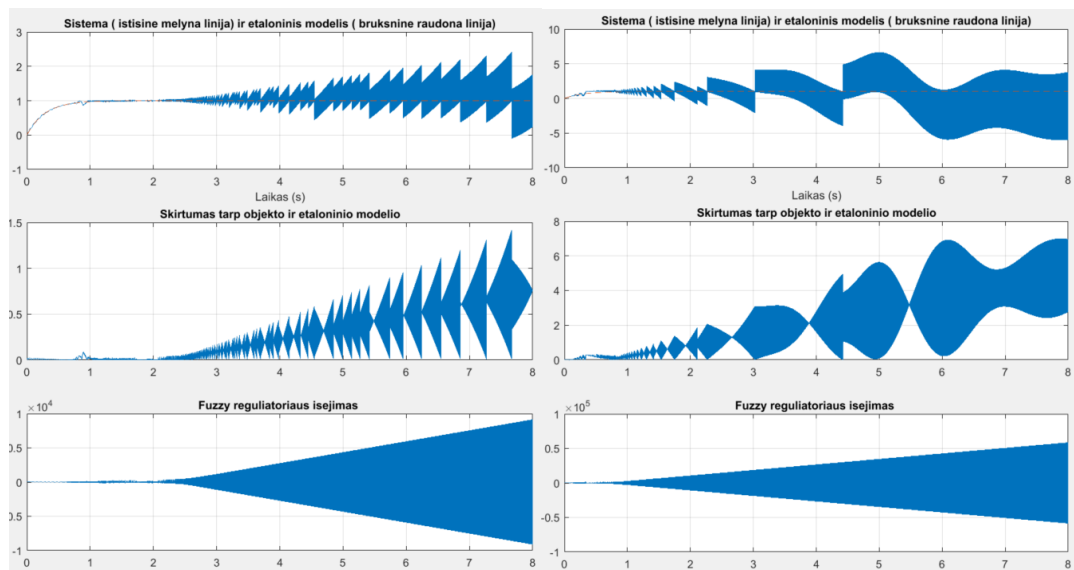
	Objektas	Etaloninis modelis
Reakcija į vienetinį šuolį		
Perdavimo funkcija	$W(s) = \frac{0.1667*s^3 + s^2 + 5*s + 15}{s^4 + 5*s^3 + 24*s^2 + 60*s + 90}$	$G(s) = \frac{3.5}{s + 3.5}$
Kokybinės charakteristikos	Kilimo laikas: 0.6257s Nusistovėjimo laikas: 4.8337s Perreguliavimas: 17.605%	Kilimo laikas: 0.6277s Nusistovėjimo laikas: 1.1177s Perreguliavimas: 0%

Matyti, kad šiuo atveju pasirinktas etaloninis modelis nusistovi ties verte lygia vienetui, kai objektas nusistovi ties 0.166, taigi norima, kad objektas nusistovėtų ties 6.024 karto didesne verte.



29 pav. Suderintas „fuzzy“ reguliatorius kairėje ir įjungtas adaptyvusis mechanizmas dešinėje, $g_p=1.35$

Suderinus „fuzzy“ gauti šie koeficientai: $g_c=50$, $g_c=0.05$, $g_u=10$. Adaptyviam mechanizmui naudojama suderinto „fuzzy“ reguliatoriaus kopija, o adaptyviojo mechanizmo koeficientas g_p šiuo atveju parenkamas 1.35. Iš 29 paveikslu matyti, kad sistema su adaptyviu mechanizmu daug geriau atkartoja etaloninį modelį, taip pat skirtumas tarp jų tampa minimalus.



30 pav. Įjungtas adaptyvusis mechanizmas, $g_p=2$ kairėje, $g_p=10$ dešinėje

30 paveiksle pavaizduota sistemos reakcija g_p koeficientą parinkus 2 ir 10. Parinkus g_p koeficientą dvejetu, sistema praranda stabilumą jau antrąją sekundę, o kai g_p lygus 10, tai atsitinka jau po vienos sekundės. Verta pastebėti, kad reguliatoriaus išėjimas po 8 sekundžių gali pasiekti ir 1×10^5 .

12 lentelė. Adaptyviojo „fuzzy“ atlikti pakeitimai pagrindinio „fuzzy“ regulatoriaus taisyklių bazėje.

			Paklaida, e										
			5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5
			-0.75	-0.6	-0.45	-0.3	-0.15	0	0.15	0.3	0.45	0.6	0.75
Paklaidos pokytis, c	5	-0.75	-1.6	-1.45	-1.3	-1.15	-0.9	-0.75	-0.6	-0.45	-0.3	-0.15	0
	4	-0.6	-1.45	-1.3	-1.15	-0.9	-0.75	-0.6	-0.45	-0.3	-0.15	0	0.15
	3	-0.45	-1.3	-1.15	-0.9	-0.75	-0.6	-0.45	-0.3	-0.15	0	0.15	0.3
	2	-0.3	-1.15	-0.9	-0.75	-0.6	-0.45	-0.3	-0.15	0	0.15	0.3	0.45
	1	-0.15	-0.9	-0.75	-0.6	-0.45	-0.01	0.14	0.29	0.15	0.3	0.45	0.6
	0	0	-0.75	-0.6	-0.45	-0.3	0.47	0.62	0.77	0.3	0.45	0.6	0.75
	1	0.15	-0.6	-0.45	-0.3	-0.15	0.89	1.04	1.19	0.45	0.6	0.75	0.9
	2	0.3	-0.45	-0.3	-0.15	0	0.89	1.04	1.19	0.6	0.75	0.9	1.15
	3	0.45	-0.3	-0.15	0	0.15	0.99	1.14	1.29	0.75	0.9	1.15	1.3
	4	0.6	-0.15	0	0.15	0.3	0.83	0.98	1.13	0.9	1.15	1.3	1.45
	5	0.75	0	0.15	0.22	-1.54	0.27	0.93	3.04	1.15	1.3	1.45	1.62

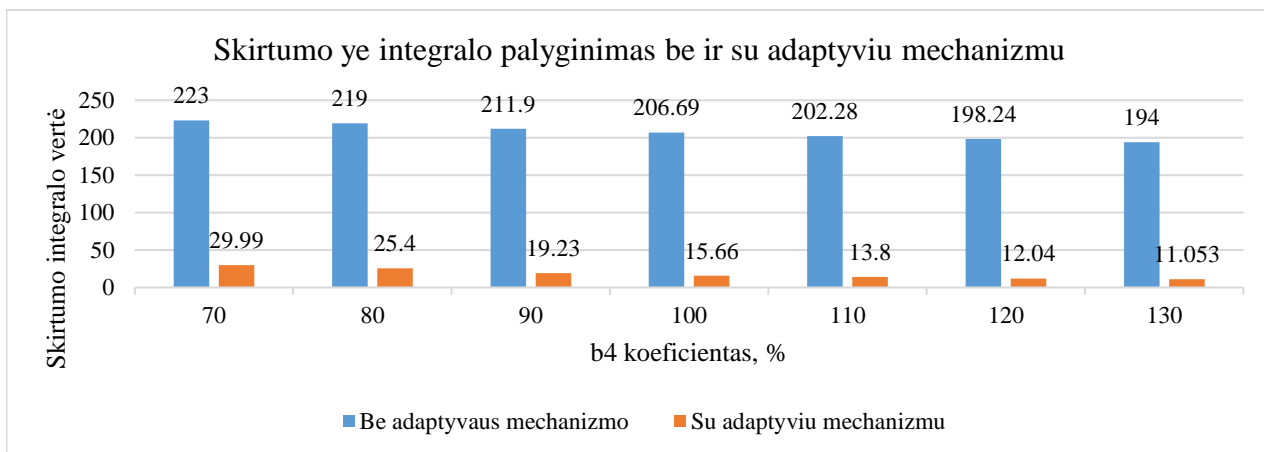
Kaip matyti 12 lentelėje - „fuzzy“ regulatorius pakeitė pagrindinio „fuzzy“ regulatoriaus taisyklių bazę, kuri buvo pateikta antroje lentelėje. Taisyklių bazės vertės pilkame fone – pakeistos vertės. Matyti, kad buvo pakeistos 24 iš 121 vertės. Nulinės įstrižainės vertė kai paklaida 0, o paklaidos pokytis 0, tapo 0.62, kai paklaida buvo 0.15, o paklaidos išvestinė -0,15, nulis pasikeitė į 0.29 ir t.t.

13 lentelė. Adaptyvios sistemos dalies įjungimo pokyčiai proceso charakteristikose

	„Fuzzy“ regulatorius be adaptyvios dalies	Su adaptyviu „fuzzy“ regulatoriumi ($g_p=1.35$)
Perreguliavimas, %	1.21	0.008
Statinė paklaida	0.0119	0.0009
Objekto ir etalono išėjimo skirtumas $y_e=8s$ laiko periode prie 0.001s diskretizacijos periodo	206.69	15.66
Didžiausias skirtumas	0.265	0.028

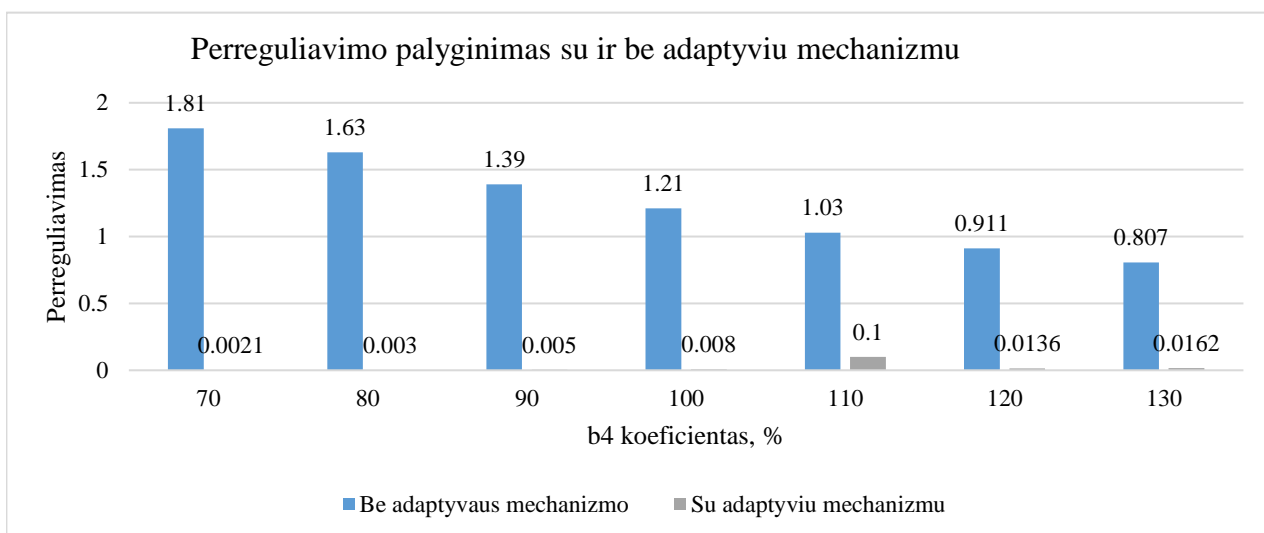
Adaptyvios dalies įjungimas 13 kartų sumažino statinę paklaidą bei 13 kartų sumažintas objekto ir etaloniinio modelio išėjimo y_e skirtumas 8s laiko tarpe. Perreguliavimas sumažėjo 151 kartą. Šie duomenys rodo, kad įjungus adaptyvųjį mechanizmą matomas teigiamas poveikis ir geresni kokybiniai proceso rodikliai.

Toliau pateikti grafikai, modeliavimo rezultatų kintant objekto b_4 koeficientui.



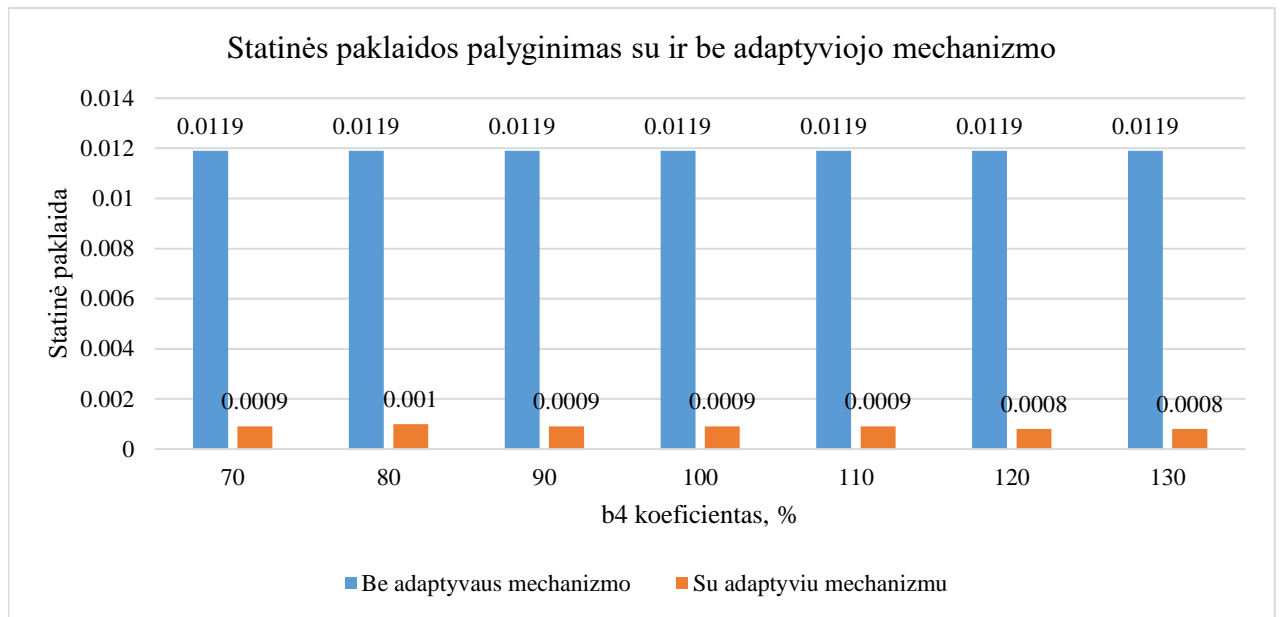
31 pav. Skirtumo y_e integralo palyginimas be ir su adaptyviu mechanizmu

Sistema su adaptyviu mechanizmu kintant b_4 koeficientui išlaikė daug mažesnę skirtumo y_e integralo vertę – vidutiniškai tai buvo 12.7 karto mažesnė vertė nei be adaptyviojo mechanizmo – tai matyti iš 31 paveiksle pateikto grafiko.



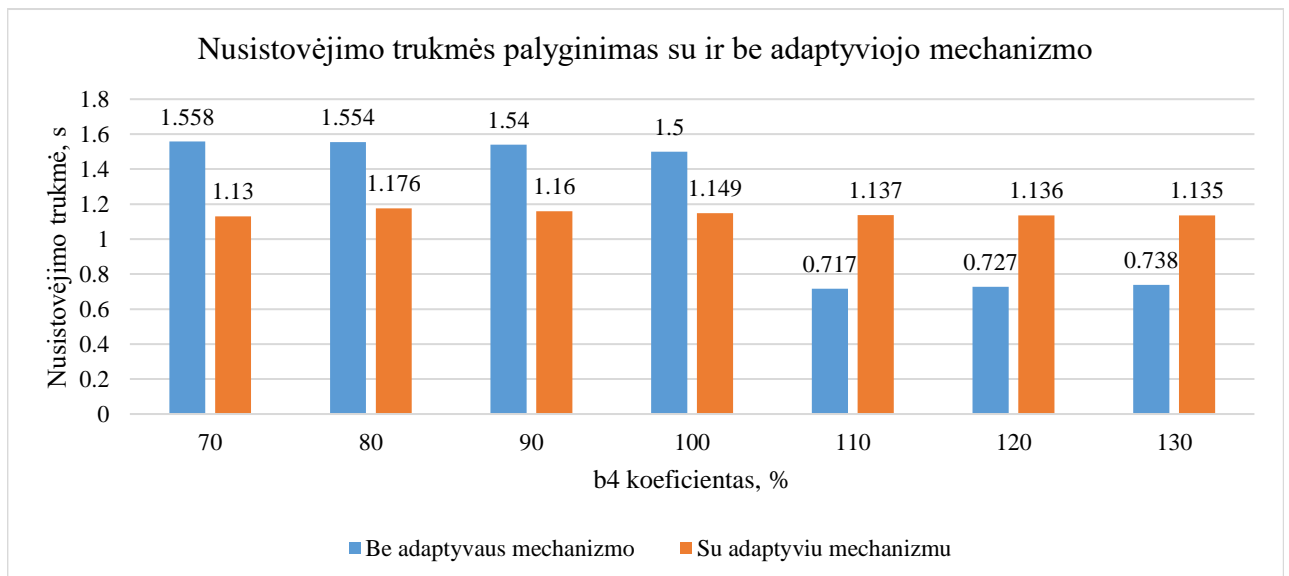
32 pav. Perreguliavimo palyginimas su ir be adaptyviu mechanizmu

Sistema be adaptyvios grandies turėjo vidutiniškai 280 kartų didesnę perreguliavimą – tai iliustruoja 32 paveikslas. Taip pat matyti, kad sistema be adaptyviojo mechanizmo kintant b_4 koeficientui turėjo mažėjantį perreguliavimą. Jis sumažėjo 55 procentais stiprinimo koeficiento vertei kintant nuo 70 iki 130 procentų.



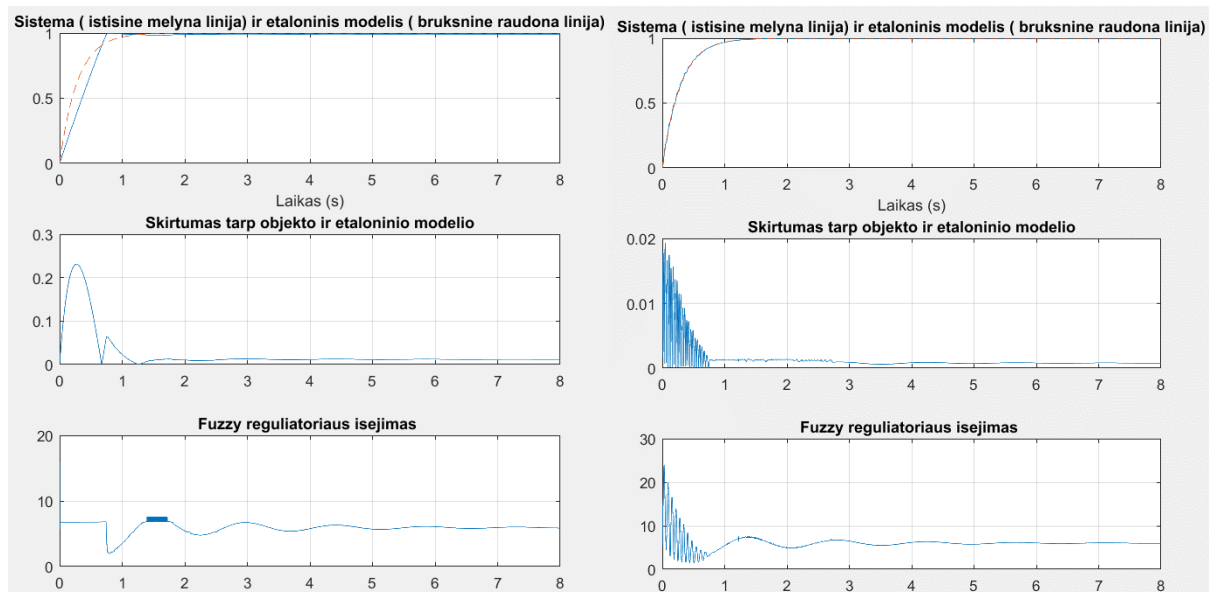
33 pav. Statinės paklaidos palyginimas su ir be adaptyviojo mechanizmo

Statinės paklaidos matavimuose adaptyvūs „fuzzy“ vėl stipriai lenkė klasikinį „fuzzy“ reguliatorių. Tai matyti 33 paveiksle. Čia adaptyvūs reguliatorius vidutiniškai 13.5 karto turėjo mažesnę statinę paklaidą.



34 pav. Nusistovėjimo trukmės palyginimas su ir be adaptyviojo mechanizmo

Nusistovėjimo trukmės sekundėmis palyginimas yra pateiktas 34 paveiksle. *b4* koeficientui esant 70, 80, 90, 100 procentų savo vertės matomas adaptyviojo mechanizmo pranašumas – sistema greičiau nusistovi. Kai stiprinimo koeficiento vertė didėja 10, 20, 30 procentų matyti, kad sistemai su adaptyviu mechanizmu prireikia daugiau laiko nusistovėti. Visgi šiame tyrime svarbu tai, kaip objektas atkartoja etaloninį modelį. Kai stiprinimo koeficientas yra 130% reakcijos nusistovėjimo laikas 1.135s ir tai yra 0.397s daugiau nei sistemos be adaptyviojo mechanizmo.



35 pav. $b_4=130\%$, įjungtas adaptyvusis mechanizmas dešinėje, kairėje išjungtas adaptyvusis mechanizmas

Kaip matyti 35 paveiksle, nors nusistovėjimo laikas didesnis su adaptyviu mechanizmu, bet objektas daug geriau atkartoja etaloninį modelį – o tai ir yra adaptyvios sistemos tikslas.

14 lentelė. Modeliavimo rezultatai

$G=0$ (adaptyvusis reguliatorius išjungtas)							
$a_3, \%$	70	80	90	100	110	120	130
Skirtumo y_e integralas,	181.14	188.94	197.24	206.69	220.72	239.6	261.92
Perreguliavimas, %	0.97	1.04	1.13	1.21	1.27	1.33	1.43
Statinė paklaida	0.0119	0.0119	0.0119	0.0119	0.0119	0.0119	0.0119
Nusistovėjimo trukmė, s	0.65	0.67	0.69	1.5	1.74	1.89	2.01
$G=1.35$							
$a_3, \%$	70	80	90	100	110	120	130
Skirtumo y_e integralas,	20.61	17.607	16.71	15.66	15.138	14.33	13.61
Perreguliavimas, %	0.0822	0.007	0.007	0.008	0.009	0.011	0.0135
Statinė paklaida	0.0008	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0008	0.0008
Nusistovėjimo trukmė, s	1.16	1.175	1.167	1.149	2.08	1.117	1.113

Rezultatai adaptyviojo „fuzzy“ reguliatoriaus naudai išlieka puikūs ir keičiant laiko pastoviąją. Reziumuojant 31, 32, 33, 34 paveikslų duomenis žemiau pateikti procentai, kiek vidutiniškai adaptyvusis „fuzzy“ reguliatorius lenkia klasikinį:

Keičiant objekto b_4 koeficientą:

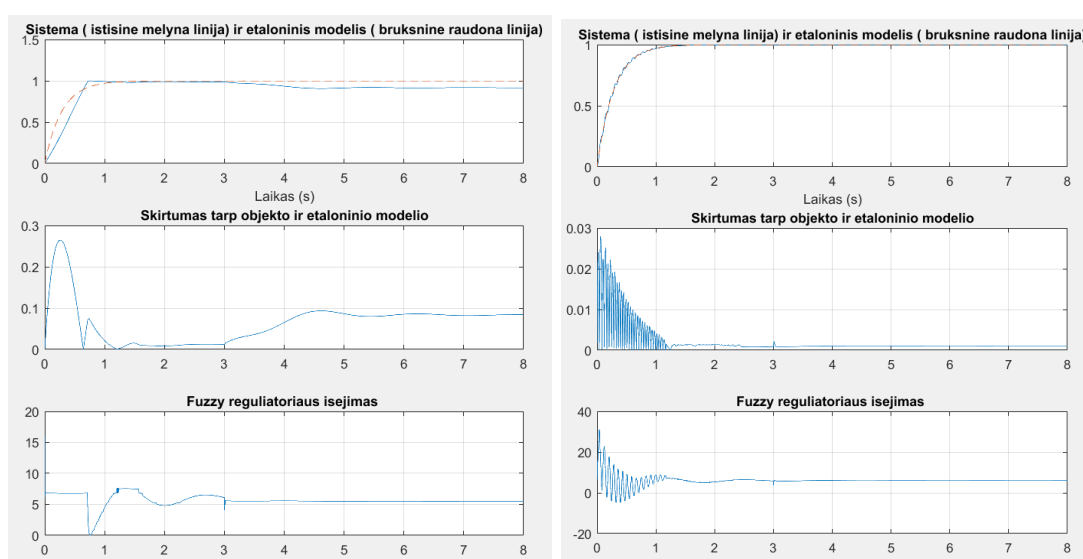
- Skirtumo y_e integralas vidutiniškai 91.38 procentais mažesnis
- Perreguliavimas vidutiniškai 97.92 procentais mažesnis
- Statinė paklaida vidutiniškai 92.56 procentais mažesnė
- Nusistovėjimo trukmė vidutiniškai 9.82 procentais didesnė

Keičiant objekto a_3 koeficientą (14 lentelė):

- Skirtumo y_e integralas vidutiniškai 92.14 procentais mažesnis
- Perreguliavimas vidutiniškai 98.15 procentais mažesnis
- Statinė paklaida vidutiniškai 92.80 procentais mažesnė
- Nusistovėjimo trukmė vidutiniškai 19.28 procentais didesnė

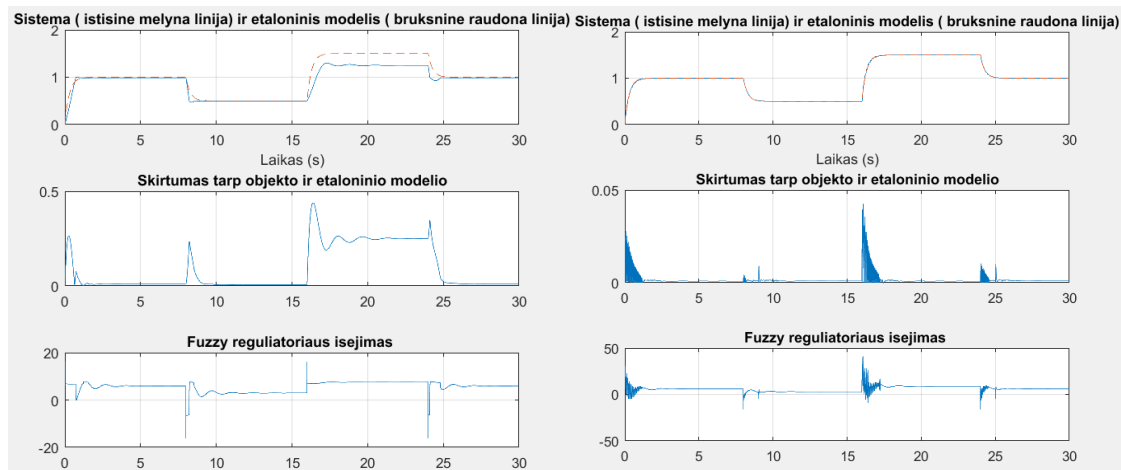
Iš šių rezultatų matyti, kad adaptyvusis „fuzzy“ puikiai susitvarko su kintančiais objekto parametrais ir lenkia klasikinę „fuzzy“ reguliatorių dešimtimis kartų.

Sistemai veikiant suderintame režime, laiko momentu 3s paduotas trikdys (šuolinis signalas - 2) objekto įėjime. Šiuo bandymu yra realizuojama vykdomojo mechanizmo problema. Iš grafikų žemiau matyti, kad sistema su adaptyviu mechanizmu gerai kompensuoja trikdį. Statinė paklaida sistemoje be adaptyviojo mechanizmo – 0.084 o su juo – 0.001



36 pav. Suderinto „fuzzy“ reguliatoriaus reakcija į trikdį objekto įėjime kairėje o dešinėje atitinkamai su adaptyviu mechanizmu.

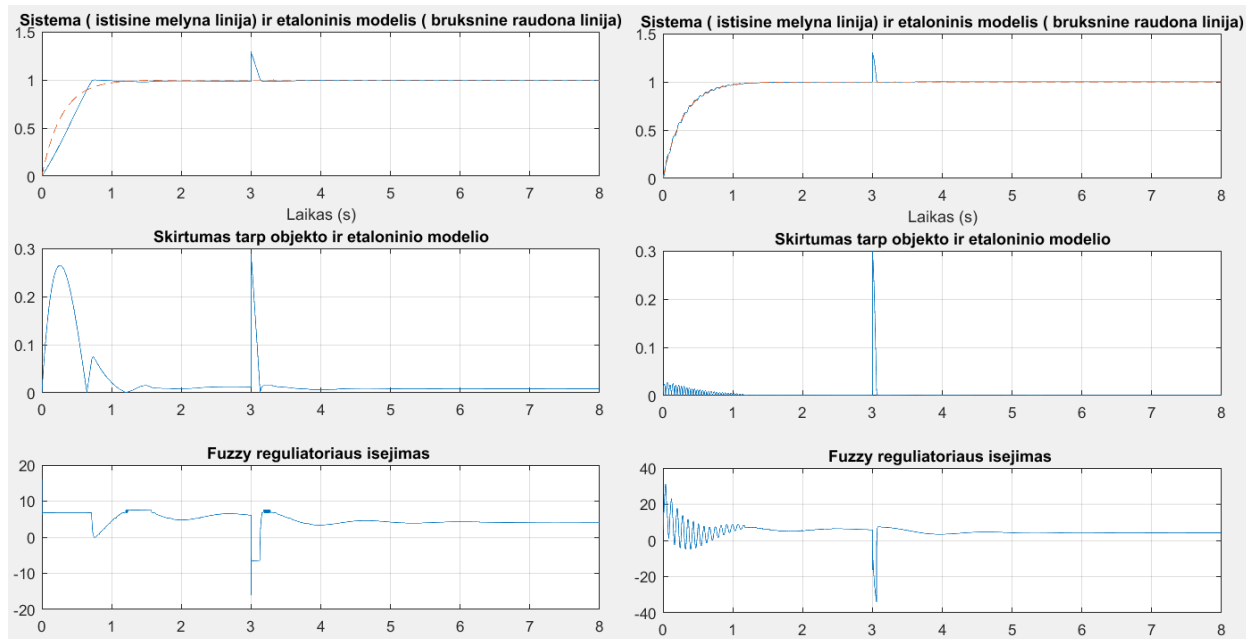
Sistemai veikiant suderintame režime keičiamas užduoties signalas. Užduoties vertė – 1 ties 8s vertė keičiama į 0.5, o ties 16s vertė parenkama 1.5, ties 24s vertė sugrįžta į vienetą.



37 pav. Sistemos be adaptyvios grandies(kairėje) ir su (dešinėje) reakcija į kintantį užduoties signalą

Sistema be adaptyviojo „fuzzy“ pasikeitus užduoties signalui iš 0.5 į 1.5 nepasiekia etaloninio modelio ir nusistovi ties 1.25 verte, tai matyti 37 paveikslo kairėje. 30s laiko tarpe skirtumo integralas be adaptyvios grandies lygus 2.6177×10^3 , o su adaptyvia grandimi jis yra lygus 51.24. Čia matyti 51 karto skirtumas.

Sistemai veikiant suderintame režime, laiko momentu 3s paduodamas trikdžius (šulinis signalas - 0.3) objekto išėjime. Taip realizuojamos jutiklio problemos.



38 pav. Sistemos be adaptyvios grandies(kairėje) ir su (dešinėje) reakcija į trikdį objekto išėjime

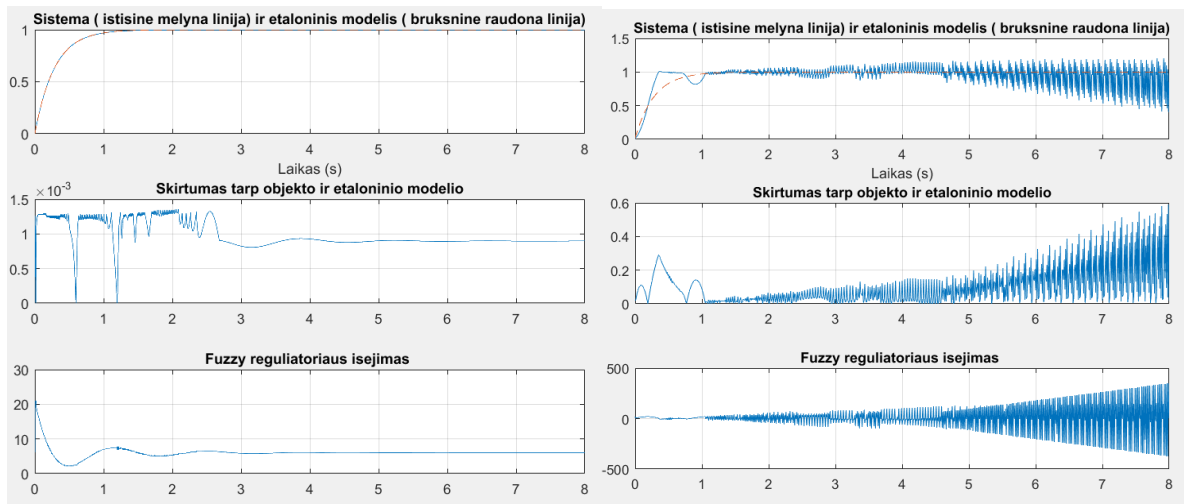
Adaptyvusis mechanizmas puikiai susitvarko su trikdžiu objekto išėjime. 38 Paveiksle pateiktas klasikinio ir adaptyviojo „fuzzy“ reguliatoriaus veikimas, 3s suveikus trikdžiui. Sistemos be adaptyvios grandies statinė paklaida po trikdžio 0.0084, nusistovėjimo laikas 0.122s.

Ijungus adaptyviają dalį gauta 0.0003 statinė paklaida ir 0.058s nusistovėjimo laikas. Tad gaunamas 28 kartų pagerėjimas statinės paklaidos atžvilgiu ir 2.1 karto pagreitėjęs reakcijos nusistovėjimo laikas.

15 lentelė. Diskretizacijos periodo įtaka proceso charakteristikoms:

T, s	0.00001	0.0001	0.001	0.01	0.1
Skirtumo y_e integralas,	7.87	7.97	15.66	nestabili	nestabili
Perreguliavimas, %	0.008	0.008	0.008	nestabili	nestabili
Statinė paklaida	0.0009	0.0009	0.0009	nestabili	nestabili
Nusistovėjimo trukmė, s	1.132	1.135	1.149	nestabili	nestabili

Iš 15 lentelės matyti, kad geriausias yra 0.00001s diskretizacijos periodas. Prie šios vertės skirtumo y_e integralas ir nusistovėjimo trukmė yra mažiausi. Puikų etaloninio modelio atkartojimą prie 0.00001s diskretizacijos periodo galime pastebėti ir 39 paveiksle. Verta pastebėti, kad parinkus diskretizacijos periodą 0.01s, 0.1s sistema laikui bėgant tampa nestabili.



39 pav. Diskretizacijos periodas 0.00001 kairėje ir 0.01 dešinėje

39 paveiksle matyti, kad parinkus diskretizacijos periodą 0.00001s sistema su adaptyviu mechanizmu itin gerai atkartoja etaloninį modelį, o parinkus diskretizacijos periodą 0.01 laikui bėgant sistema tampa nestabili.

Išvados

1. Adaptyvusis diskretinis „fuzzy“ reguliatorius su etaloniniu modeliu pagerina proceso charakteristikas kintant objekto parametrams $\pm 30\%$ ribose nuo nominalių – iki 98.15 % sumažėja perreguliavimas, iki 35.99 % sutrumpėja sistemos nusistovėjimo laikas, iki 92.56% sumažėja statinė paklaida tirtam 4 eilės objektui.
2. Sistema su adaptyviu mechanizmu gerai prisitaiko prie trikdžių objekto įėjime. Esant trikdžiui sistemos įėjime statinė paklaida sumažėja iki 84 kartų nagrinėtam 4 eilės objektui.
3. Sistema su adaptyviu mechanizmu gerai prisitaiko prie trikdžių objekto išėjime. Esant trikdžiui sistemos išėjime statinė paklaida sumažėja iki 28 kartų nagrinėtam 4 eilės objektui.
4. Kintant įėjimo signalui sistema su adaptyviu mechanizmu turi iki 51 karto mažesnę skirtumo integralo vertę nagrinėtam 4 eilės objektui.
5. Taip pat pastebėta, kad diskretizacijos periodas turi didžiulę įtaką rezultatams, 2 ir 4 eilės objektams geriausias proceso charakteristikas turėjo parinkta 0.00001s vertė, o prie 0.1s vertės – sistema buvo nestabili.
6. Nustatyta, kad parinkus per mažą adaptyviojo mechanizmo mokymosi koeficiento g_p vertę adaptyviojo mechanizmo įtaka nepastebima, parinkus per didelę vertę, visa sistema tampa nestabili – tai galioja abejiems nagrinėtiems 2 ir 4 eilės objektams.

Literatūros sąrašas

1. Y. Bai, D. Wang, Fundamentals of Fuzzy Logic Control – Fuzzy Sets, Fuzzy Rules and Defuzzifications [žiūrėta 2019-05-03]. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/225872318_Fundamentals_of_Fuzzy_Logic_Control_-_Fuzzy_Sets_Fuzzy_Rules_and_Defuzzifications
2. V. Galvanauskas, R. Simutis, Hibridinės procesų stebėsenos ir valdymo sistemos. Kaunas, leidykla „Technologija“.
3. M. G. Simoes, Introduction to Fuzzy Control [žiūrėta 2019-05-04]. Prieiga per internetą: http://inside.mines.edu/~msimoes/documents/Intro_Fuzzy_Logic.pdf
4. Adaptive fuzzy controller based MPPT for photovoltaic systems [žiūrėta 2019-05-12]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890413005967>
5. C. Zhang, X. Song, The Self-Adaptive Fuzzy PID Controller in Actuator Simulated Loading System [žiūrėta 2020-03-11]. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/270722812_The_Self-Adaptive_Fuzzy_PID_Controller_in_Actuator_Simulated_Loading_System
6. K. Sharma, D. K. Palwalia, A modified PID control with adaptive fuzzy controller applied to DC motor [žiūrėta 2020-03-11]. Prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8279151&tag=1>
7. F. Zahedi, A review of neuro-fuzzy systems based on intelligent control [žiūrėta 2019-05-12]. Prieiga per internetą: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1805/1805.03138.pdf>
8. V. Kaminskas, R. Liutkevičius, Adaptive Fuzzy Control of Nonlinear Plant with Changing Dynamics [žiūrėta 2019-05-22]. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/220073727_Adaptive_Fuzzy_Control_of_Nonlinear_Plant_with_Changing_Dynamics
9. A. Abdallah, Design of Self Tuning PID Controller Using Fuzzy Logic for DC Motor Speed [žiūrėta 2019-05-22]. Prieiga per internetą: http://www.ijssr.com/data/frontImages/3_August_2017.pdf
10. K. Passino, J. Layne, Fuzzy model reference learning control [žiūrėta 2020-01-14]. Prieiga per internetą: <http://www2.ece.ohio-state.edu/~passino/PapersToPost/FMRLC-IFS.pdf>
11. D. Copot, M. Ghita, Simple Alternatives to PID-Type Control for Processes with Variable Time-Delay [žiūrėta 2020-01-14]. Prieiga per internetą: <https://www.mdpi.com/2227-9717/7/3/146/pdf>
12. O. Purvinis, P. Šukys, Neraiškioji logika ir jos praktiniai taikymai, Kaunas, leidykla „Technologija“ 2012.
13. A. Kwong, K. Passino Dynamically Focused Fuzzy Learning Control [žiūrėta 2020-03-08]. Prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/document/484438>
14. B. Vishwakarma, R. Prasad Time domain model order reduction using Hankel matrix approach [žiūrėta 2020-03-08]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016003214000416>
15. E. Abbasi, Development and implementation of an adaptive fuzzy control system for VTOL vehicle in hovering mode, [žiūrėta 2020-03-19]. Prieiga per internetą:

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01563614v2/document>

16. P. Ioannou, Robust Adaptive Control [žiūrēta 2020-03-23]. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/299747127_Robust_Adaptive_Control/link/5b40ea0c458515f71cafb72c/download
17. S.W. Kim, E.T. Kim, M. Park, A new adaptive fuzzy controller using the parallel structure of fuzzy controller and its application, [žiūrēta 2020-03-23]. Prieiga per internetą: <http://yeh.nutn.edu.tw/ncku/Fuzzy/Control/A%20new%20adaptive%20fuzzy%20controller%20using%20the%20parallel%20structure%20of%20fuzzy%20controller%20and%20its%20application.pdf>
18. P. Mayhan, G. Washington, Fuzzy model reference learning control: a new control paradigm for smart structures, [žiūrēta 2020-03-29]. Prieiga per internetą: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/7/6/015/pdf>