

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Valerijus ZLOSNIKAS

# DAŽNIO KEITIKLIŲ ASIMETRINIŲ REGULIATORIŲ KŪRIMAS IR TYRIMAS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,  
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS INŽINERIJA (01T)



Vilnius LEIDYKLA  
TECHNIKA 2013

Disertacija rengta 2009–2013 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

### **Mokslinis vadovas**

Prof. dr. Algirdas BAŠKYS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas,  
technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

VG TU leidyklos TECHNIKA 2145-M mokslo literatūros knyga  
*<http://leidykla.vgtu.lt>*

ISBN 978-609-457-484-9

© VG TU leidykla TECHNIKA, 2013

© Valerijus, Zlosnikas, 2013

*[valerijus.zlosnikas@vgtu.lt](mailto:valerijus.zlosnikas@vgtu.lt)*

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Valerijus ZLOSNIKAS

# DEVELOPMENT OF ASYMMETRIC CONTROLLERS FOR FREQUENCY CONVERTERS

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,  
ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING (01T)



Vilnius LEIDYKLA TECHNICA 2013

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2009–2013.

**Scientific Supervisor**

Prof. dr. Algirdas BAŠKYS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T).

# Reziumė

Darbe pateikti asimetrinių reguliatorių, skirtų objektų su asimetrine dinamika valdymui, tyrimų rezultatai. Pagrindinis atliktų darbų tikslas – sukurti algoritmus asimetriniams reguliatoriams ir ištirti juos valdant objektus su asimetrine dinamika ir tiesinius objektus. Disertacijoje apibūdinta objekto su asimetrine dinamika sąvoka, suformuluotos objektų su asimetrine dinamika ir tiesinių objektų valdymo problemos, naudojant populiarius pramonėje PI ir PID reguliatorius. Pasiūlyti asimetriniai PI (aPI) ir PID (aPID) reguliatoriai, realizuojantys valdymo algoritmus su keičiamais reguliatoriaus parametrais. Juose reguliatoriaus koeficientai pakeičiami, keičiantis valdomojo parametro laiko išvestinės arba valdymo paklaidos ženklui. Sukurti reguliatoriai ištirti valdant asimetrinės dinamikos objektus, kuriuose dinamikos asimetriją nulemia objekto laiko pastoviosios, vėlinimo ir vykdiklio tempo asimetrija. Jie taip pat ištirti valdant tiesinius objektus. Gauti rezultatai rodo, kad sukurti reguliatoriai, lyginant su PI ir PID reguliatoriais, leidžia sumažinti objektų su asimetrine dinamika valdymo sistemos atsako į nuostatos pokyčius pereinamojo proceso trukmę ir perreguliaciją. Jie taip pat leidžia sumažinti ir atsako į trikdžius pereinamojo proceso trukmę, tiek valdant objektus su asimetrine dinamika, tiek – tiesinius objektus. Tyrimų rezultatai gauti modeliuojant *Spice* ir *Simulink* programomis ir eksperimentiškai. Asimetrinės dinamikos objektų su laiko pastoviosios asimetrija modeliavimui *Simulink* programa, pasiūlytas naujas modelis, leidžiantis modeliuoti tokius objektus naudojant standartinius *Simulink* programos blokus. Darbe ištirtas valdymo sistemų su asimetriniais reguliatoriais stabilumas. Nustatyta, kad valdymo sistemų su asimetriniais reguliatoriais stabilumo tyrimui gali būti taikomas Popovo kriterijus ir šio metodo modifikacijos, jeigu valdymo sistemą galima pateikti kaip struktūrą, kurioje jos tiesinė dalis yra atskirta nuo netiesinės. Gauti tokių valdymo sistemų stabilumo tyrimo rezultatai patikrinti modeliuojant jas programa *Simulink*. Pateikti valdymo sistemų su asimetriniais reguliatoriais eksperimentinių tyrimų rezultatai. Tyrimai atlikti naudojant HIL (liet. *įterptinė sistema grandinėje*) metodiką ir industrinės vėdinimo valdymo sistemos standą. Sukurti asimetriniai reguliatoriai pritaikyti kuriant specializuotus dažnio keitiklius asinchroniniams trifaziams varikliams, naudojamiems vėdinimo ir vandens tiekimo sistemose, automatiniam variklio sukimosi greičio valdymui. Tyrimų rezultatai gauti atliekant 2 užsakomuosius mokslo tiriamuosius darbus, finansuotus ūkio subjektų bei vykdant du Aukštųjų technologijų plėtros programos projektus, finansuotus Lietuvos valstybinio mokslo ir studijų fondo ir Mokslo, inovacijų ir technologijų agentūros. Atliktų darbų tema publikuota 11 mokslinių straipsnių ir perskaityta 10 pranešimų mokslinėse konferencijose.

# Abstract

The research results of the asymmetric controllers developed for the control of plants with the asymmetric dynamics are presented. The main aim of the work is to create the control algorithms of asymmetric controllers and to investigate them in control systems of plants with the asymmetric dynamics and linear plants. The term of the plant with the asymmetric dynamics is characterized, the problems of control of plants with the asymmetric dynamics and linear plants using popular in the industry PI and PID controllers are formulated. The asymmetric PI (aPI) and PID (aPID) controllers, which implement the control algorithms with the variable parameters are suggested in the work. The values of parameters of aPI and aPID controllers are switched when sign of plant parameter time derivative or control error changes. The proposed controllers are investigated in the control systems of plants with the time constant, response delay and actuator limitation rate asymmetry. The obtained results show that the developed controllers as compared to the PI and PID controllers allow us to reduce the setpoint change response settling time and overshoot of control systems of plants with the asymmetric dynamics. Additionally, they allow us to decrease the settling time of transient caused by the load disturbance of control systems of plants with the asymmetric dynamics and linear plants as well. The investigation results are obtained using softwares *Spice* and *Simulink*, and experimentally. The new model of plants with the time constant asymmetry based on the standard blocks of *Simulink* software is proposed. The stability of control systems with the asymmetric controllers is analyzed. The suitable non-linear control systems stability analysis methods are chosen. It has been defined that the Popov criterion and its modifications can be used for stability analysis of control systems based on the asymmetric controllers in the situation when the linear and non-linear parts can be separated. This method can be implemented only in the case when linear plants are controlled using asymmetric controllers. The stability analysis results of such a control systems were verified using software *Simulink*. The experimental investigation results of control systems based on the asymmetric controllers are presented. The investigation is performed using HIL (Hardware in the loop) technique and industrial ventilation system stand. The proposed asymmetric controllers are implemented in the specialized frequency converters for the automatic control of speed of AC induction motors used in the modern ventilation and water supply systems. The research works were related with the 2 projects financed by the industry and two projects supported by the Lithuanian State Science and Study Foundation and Agency for Science, Innovation and Technology. The results of the dissertation were presented in the 10 scientific conferences and published in the 11 scientific papers.

---

# Žymėjimai

## Simboliai

$Y_a(t)$  – valdomasis parametras;

$Y_d(t)$  – nuostata (norima valdomojo parametro vertė);

$U(t)$  – reguliatoriaus išėjimo signalas;

$D(t)$  – valdomojo objekto trikdys;

$e(t)$  – valdymo paklaida;

$G(s)$  – valdomojo objekto perdavimo funkcija;

$T$  – valdomojo objekto vėlinimas;

$\tau$  – valdomojo objekto laiko pastovioji;

$M$  – perreguliavimas;

$t_s$  – pereinamojo proceso trukmė;

$K_p$  – proporcinės PID reguliatoriaus dalies koeficientas;

$K_i$  – integralinės PID reguliatoriaus dalies koeficientas;

$K_d$  – diferencialinės PID reguliatoriaus dalies koeficientas;

$n$  – perdavimo funkcijos eilė;

## **Santrumpos**

AVS – automatinio valdymo sistema;

PI – proporcinis-diferencialinis;

PID – proporcinis-integralinis-diferencialinis;

aP – asimetrinis proporcinis;

aPI – asimetrinis proporcinis-integralinis;

PaI – proporcinis asimetrinis integralinis;

aPID – asimetrinis proporcinis-integralinis-diferencialinis;

HIL – įterptinė sistema grandinėje (angl. *hardware in the loop*);

FTMC – Valstybinis mokslinių tyrimų institutas Fizinių ir technologijos mokslų centras;



---

# Turinys

IVADAS .....	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimų objektas.....	2
Darbo tikslas.....	3
Darbo uždaviniai .....	3
Tyrimų metodika .....	3
Darbo mokslinis naujumas .....	3
Darbo rezultatų praktinė reikšmė .....	4
Ginamieji teiginiai.....	4
Darbo rezultatų aprobavimas.....	4
Disertacijos struktūra.....	5
Padėka .....	6
1. OBJEKTŲ SU ASIMETRINE DINAMIKA IR TIESINIŲ OBJEKTŲ VALDYMO PROPORCINIŲ-INTEGRALINIŲ IR PROPORCINIŲ- INTEGRALINIŲ-DIFERENCIALINIŲ REGULIATORIAIS PROBLEMAS .....	7
1.1. Valdomojo objekto su asimetrine dinamika sąvoka .....	8
1.2. Valdymo sistemos kokybės vertinimas .....	11
1.3. Objektų su asimetrine dinamika valdymo proporcinio-integralinio ir proporcinio-integralinio-diferencialinio reguliatoriais problemos .....	12
1.4. Objektų su asimetrine dinamika modeliavimo problema .....	14

1.5. Tiesinių objektų valdymo proporcinio-integraliniu ir proporcinio-integraliniu-diferencialiniu reguliatoriais problema .....	15
1.6. Valdymo sistemų su asimetriniais reguliatoriais stabilumo tyrimo problema ...	16
1.7. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas.....	19
<b>2. ASIMETRINIAI REGULIATORIAI OBJEKTŲ SU ASIMETRINE DINAMIKA</b>	
<b>VALDYMUI</b> .....	21
2.1. Asimetrisinis proporcinis-intergalinis reguliatorius .....	21
2.2. Objektų su laiko pastoviosios asimetrija valdymas asimetriniu proporcinio-intergaliniu reguliatoriumi .....	24
2.3. Objektų su vykdyklio tempo ribojimo asimetrija valdymas asimetriniu Proporciniu-Intergaliniu reguliatoriumi .....	32
2.4. Objektų su velinimo asimetrija valdymas asimetriniu proporcinio-intergaliniu reguliatoriumi.....	36
2.5. Asimetrisinis proporcinis-intergalinis-diferencialinis reguliatorius ir jo taikymas objektų su asimetrine dinamika valdymui.....	42
2.6. Antrojo skyriaus išvados .....	46
<b>3. ASIMETRINIŲ REGULIATORIŲ TAIKYMAS TIESINIŲ OBJEKTŲ</b>	
<b>VALDYMUI</b> .....	49
3.1. Asimetrinio proporcinio-intergalinio reguliatoriaus taikymas tiesinių objektų valdymui .....	49
3.2. Asimetrinio proporcinio-intergalinio-diferencialinio reguliatoriaus taikymas tiesinių objektų valdymui.....	53
3.3. Proporcinis-intergalinis-diferencialinis reguliatorius su nuostatos stebėjimu ...	55
3.4. Trečiojo skyriaus išvados .....	58
<b>4. VALDYMO SISTEMŲ SU ASIMETRINIAIS REGULIATORIAIS</b>	
<b>STABILUMO ANALIZĖ IR EKSPERIMENTINIS TYRIMAS</b> .....	59
4.1 Valdymo sistemų su asimetriniais reguliatoriais tyrimas dažniniais metodais... 59	
4.2. Valdymo sistemų su asimetriniais reguliatoriais stabilumo tyrimas naudojant <i>Off-Axis</i> kriterijų .....	62
4.3. Eksperimentinis asimetrinio proporcinio-intergalinio reguliatoriaus tyrimas <i>hardware in the loop</i> metodika .....	65
4.4. Eksperimentinis vėdinimo valdymo sistemos su proporcinio asimetriniu integrai reguliatoriumi tyrimas.....	70
4.5. Ketvirtojo skyriaus išvados .....	72
<b>BENDROSIOS IŠVADOS</b> .....	75
<b>LITERATŪRA IR ŠALTINIAI</b> .....	77
<b>AUTORIAUS PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS</b> .....	83

---

# Contents

INTRUDUCTION .....	1
The problem .....	1
Topicality of work .....	2
The object of the research .....	2
The aim of the work .....	3
The tasks of the work .....	3
Research methodology .....	3
The novelty of the work .....	3
Practical value of the work .....	3
Defended propositions.....	4
Approval of the results .....	4
The dissertation structure .....	5
1. CONTROL PROBLEMS OF PLANTS WITH THE ASYMMETRIC DYNAMICS AND LINEAR PLANTS USING PROPORTIONAL-INTEGRAL AND PROPORTIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVE CONTROLLERS .....	7
1.1. The term of the plant with asymmetric dynamics .....	8
1.2. Evaluation of control systems quality .....	11
1.3. The control problems of systems with plants characterized by asymmetric dynamics using proportional-integral and proportional-integral-derivative controllers .....	12
1.4. Simulation problem of plants with the asymmetric dynamics.....	14

1.5. The control problems of systems of linear plants using proportional-integral and proportional-integral-derivative controllers .....	15
1.6. Stability analysis problem of systems with the asymmetric controllers .....	16
1.7. Conclusions of the chapter 1 and formulation of the dissertation tasks.....	19
2. ASYMMETRIC CONTROLLERS FOR THE CONTROL OF PLANTS WITH ASYMMETRIC DYNAMICS .....	21
2.1. Asymmetric proportional-integralcontroller.....	21
2.2. Asymmetric proportional-integral controller for control of plants with the time constant asymmetry.....	24
2.3. Asymmetric proportional-integral controller for control of plants with actuator rate limitation asymmetry.....	32
2.4. Asymmetric proportional-integral controller for control of plants with the response delay asymmetry .....	36
2.5. Asymmetric proportional-integral-derivative controller for control of plants with asymmetric dynamics.....	42
2.6. Conclusions of the chapter 2 .....	46
3. APPLICATION OF ASYMMETRIC CONTROLLERS FOR THE CONTROL OF LINEAR PLANTS .....	49
3.1. Asymmetric proportional-integral controller for control of linear plants .....	49
3.2. Asymmetric proportional-integral-derivative controller for control of linear plants .....	53
3.3. Proportional-integral-derivative controller with the set point observation .....	55
3.4. Conclusions of the chapter 3 .....	58
4. STABILITY ANALYSIS AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF CONTROL SYSTEMS WITH THE ASYMMETRIC CONTROLLERS .....	59
4.1 Stability analysis of the systems with the asymmetric controllers using frequency domain methods .....	59
4.2. Stability analysis of the systems with the asymmetric controllers using <i>Off-Axis</i> criterion.....	62
4.3 Experimental investigation of asymmetric proportional-integral controller using <i>hardware in the loop</i> technique .....	65
4.4. Experimental investigation of ventilation control system based on the Proportional asymmetric integral controller .....	70
4.5. Conclusions of the chapter 4 .....	72
GENERAL CONCLUSIONS .....	72
REFERENCES .....	77
LIST OF THE AUTHOR'S SCIENTIFIC PUBLICATIONS RELATED TO THE TOPIC OF DISSERTATION .....	83

---

# Ivadas

## Problemos formulavimas

Sparčiai vystantis elektronikai ir automatinio valdymo teorijai, automatinio valdymo sistemos vis plačiau taikomos technologijų ir įrenginių valdymui. Jų taikymas leidžia didinti darbo našumą, gaminių kokybę ir taupyti energiją.

Tyrimai rodo, kad dalis realių valdomųjų objektų turi asimetrinę dinamiką, t. y. skirtingą valdomojo objekto dinamiką, valdomajam parametrai didėjant ir mažėjant. Kalbant matematinėmis sąvokomis, asimetrinės dinamikos objekto perdavimo funkcijos, jei ji egzistuoja, parametrai arba pati funkcija keičiasi, keičiantis valdomojo parametro laiko išvestinės ženklui, t.y. šie objektai yra netiesiniai. Tokiomis savybėmis, pavyzdžiui, pasižymi energiją tausojančios vėdinimo sistemos, suskystintų dujų ir vandens tiekimo sistemos bei insulino, žmogui sergančiam diabetu, dozavimo sistema. Pramonėje ir kitose srityse plačiai naudojami, PI ir PID valdymo algoritmus realizuojantys, reguliatoriai gerai tinka valdyti simetrinės dinamikos procesus, nes jų poveikis valdomajam objektui yra simetrinis, t.y. valdymo paklaidai padidėjus arba sumažėjus ta pačia verte, reguliatoriaus formuojamas valdymo signalas savo absoliutine verte pakinta tiek pat. Šiais reguliatoriais taip pat įmanoma pasiekti priimtinių valdymo kokybės rodiklių (valdymo sistemos atsako pereinamojo proceso trukmę ir perreguliuojimą),

esant santykinai mažai valdomojo objekto dinamikos asimetrijai. Tačiau didėjant objekto dinamikos asimetrijai, sistemos su minėtais reguliatoriais valdymo kokybės rodikliai blogėja ir tampa nepriimtini, o atskirais atvejais apskritai neįmanoma pasiekti stabilaus valdymo sistemos darbo.

PI ir PID reguliatoriai taip pat neleidžia tuo pat metu pasiekti geriausių atsako į valdymo sistemos nuostato pokytį ir į valdomojo objekto trikdį pereinamųjų procesų kokybės rodiklių, valdant tiesinius objektus.

Šiame darbe siūlomi ir tiriama asimetriniai reguliatoriai, kurių poveikis valdomajam objektui yra asimetrinis. Jie, lyginant su PI ir PID reguliatoriais, leidžia gauti geresnius objektų su asimetrine dinamika valdymo kokybės rodiklius. Taip pat, lyginant su PI ir PID reguliatoriais, jie leidžia pagerinti ir tiesinių objektų valdymo sistemų atsako į trikdį kokybės rodiklius. Darbo rezultatai panaudoti kuriant reguliatorius dažnio keitikliams technologijų su asinchroninių variklių pavaromis valdymui, reguliuojant variklio sukimosi greitį.

## Darbo aktualumas

Daugelis technologinių procesų ir įrenginių, tame tarpe ir technologijų su asinchroninių variklių pavaromis, kurių sukimosi greitis yra valdomas dažnio keitikliais, turi asimetrinę dinamiką. Asimetrinių reguliatorių taikymas, lyginant su šiuo metu naudojamais PI ir PID reguliatoriais, tokių technologinių procesų ir įrenginių automatinio valdymo sistemose leidžia pagerinti valdymo kokybės rodiklius, o to pačiu ir valdomos technologijos ar įrenginio darbo kokybę ir patikimumą. Šie reguliatoriai taip pat leidžia pagerinti ir tiesinių objektų (objektų turinčių simetrinę dinamiką) valdymo kokybės rodiklius, todėl darbai pasirinktoje tyrimų srityje yra aktualūs ir turi praktinę vertę.

Disertacijoje pateiktų darbų aktualumą įrodo Lietuvos įmonių užsakomieji darbai ir Lietuvos valstybinio mokslo ir studijų fondo bei Mokslo inovacijų ir technologijų agentūros finansuoti Aukštųjų technologijų plėtros programos projektai, kuriuos vykdant buvo gauti disertacijoje pateikti tyrimų rezultatai.

## Tyrimų objektas

Darbo tyrimų objektas yra asimetriniai reguliatoriai technologinių procesų ir įrenginių valdymui. Tiriamų reguliatorių specifinis bruožas yra tas, kad reguliatorių parametrų vertės yra diskretiškai keičiamos, pasikeitus valdomo parametro laiko išvestinės arba valdymo paklaidos ženklui. Darbe tiriama asimetrinis PI (aPI) ir asimetrinis PID (aPID) reguliatoriai.

## Darbo tikslas

Šio darbo tikslas – sukurti ir ištirti asimetrinius reguliatorius, kurie lyginant su šiuo metu naudojamais PI ir PID reguliatoriais, leidžia pagerinti technologinių procesų ir įrenginių (toliau valdymo objektų) valdymo kokybės rodiklius.

## Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti išspręsti šie uždaviniai:

1. Sudaryti valdymo algoritmai asimetriniams reguliatoriams objektų su asimetrine dinamika ir tiesinių objektų valdymui.
2. Ištirtas asimetrinių reguliatorių darbas valdant objektus su asimetrine dinamika.
3. Ištirtas asimetrinių reguliatorių darbas valdant tiesinius objektus.
4. Ištirtas valdymo sistemų su asimetriniais reguliatoriais stabilumas.

## Tyrimų metodika

Darbe taikomi kompiuterinio modeliavimo ir eksperimentinio tyrimo metodai. Modeliavimas atliktas *Simulink* ir *Spice* programomis. Eksperimentiniai tyrimai atlikti naudojant reguliatorių, skirtų dažnio keitikliams, bandomuosius pavyzdžius ir HIL (*Hardware in the Loop*) tyrimo metodiką bei vėdinimo sistemos stendą su ventiliatoriaus dažnine asinchronine pavara. Programos mikrovaldikliui, realizuojančiam sukurtus asimetrinius reguliatorius, sukurtos assemblerio programavimo kalba.

## Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie elektros ir elektronikos inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Sudaryti šie nauji valdymo algoritmai asimetriniams reguliatoriams, leidžiantys, lyginant su PI ir PID reguliatorių algoritmais, pagerinti objektų su asimetrine dinamika ir tiesinių objektų valdymo kokybės rodiklius:
  - asimetrinis proporcinis-integralinis;
  - asimetrinis proporcinis-integralinis-diferencialinis.
2. Sukurtas naujas objekto su laiko pastoviosios asimetrijos modelis, kurį galima realizuoti standartiniais *Simulink* programos funkciniais blokais.

## Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Disertacijos rezultatai pritaikyti kuriant reguliatorius energiją tausojančių vėdinimo sistemų ventiliatorių ir vandens tiekimo sistemų siurblių pavarų asinchroninių variklių, maitinamų dažnio keitikliu, greičio valdymui. Disertacijos darbai susieti su šiais mokslo tiriamaisiais projektais:

### *Ūkio subjektų užsakomieji projektai*

1. Specializuoto dažnio keitiklio, skirto pažangių ventiliavimo sistemų ventiliatorių elektros variklių valdymui, sukūrimas, užsakovas UAB „Ventmatika“, 2007–2010 m., vadovas A. Baškys, sutarties reg. Nr. U–2007/8 2.

2. Dažnio keitiklio, skirto pažangioms vandens tiekimo sistemoms, kūrimas, užsakovas UAB „Tamoną“, 2011–2012 m., vadovas A. Baškys, sutarčių reg. Nr. 308-S095 ir 3400-S155.

### *Aukštųjų technologijų plėtros programos projektai*

3. Dažnio keitiklių tyrimas, kūrimas ir įdiegimas į serijinę gamybą, 2007–2009 m., sutarties reg. Nr. B–13/2007–2009, vadovas A. Baškys, finansavo Lietuvos valstybinis mokslo ir studijų fondas.

4. Specializuoto dažnio keitiklio sukūrimas serijinei gamybai, 2012–2013 m., Nr. 31V–37 (2012m.), 31V–35 (2013m.) vadovas A. Baškys, finansuoja Mokslo inovacijų ir technologijų agentūra.

## Ginamieji teiginiai

1. Sukurti asimetriniai aPI ir aPID reguliatoriai, lyginant juos su PI ir PID reguliatoriais, leidžia 1,6–6 kartus sutrumpinti tirtų asimetrinės dinamiškos objektų valdymo sistemų atsako į nuostatos šuolį pereinamojo proceso trukmę, 5–20 kartų perreguliuojamą ir 1,2–3,1 karto atsako į teigiamus trikdžius pereinamojo proceso trukmę.
2. Sukurti asimetriniai aPI ir aPID reguliatoriai, lyginant juos su PI ir PID reguliatoriais, leidžia 1,5–5 kartus sutrumpinti tirtų tiesinių objektų valdymo sistemų atsako į teigiamą trikdį pereinamojo proceso trukmę, nebloginant atsako į nuostatos šuolį pereinamojo proceso kokybės rodiklių.
3. Tiesinių objektų valdymo sistemų su aP ir PaI reguliatoriais struktūroje įmanoma atskirti netiesinę ir tiesinę dalis, todėl šių sistemų stabilumo tyrimui gali būti taikomas Popovo kriterijus ir jo modifikacijos.

## Darbo rezultatų apibavimas

Disertacijos tema yra paskelbta 11 mokslinių straipsnių: 5 straipsniai – recenzuojamuose mokslo žurnaluose; 6 straipsniai – kituose leidiniuose.



Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai pristatyti dešimtyje tarptautinių mokslinių konferencijų:

- Tarptautinė konferencija „*Mechatronic Systems and Materials (MSM 2005)*“, 2005 m. spalio 20–23 d., Vilnius, Lietuva. Pranešimo tema: „Asymmetric PI controller for mechatronic systems“;
- Tarptautinė konferencija „*The International IEEE Industrial Electronics Conference*“, *IECON 06*, 2006 m. lapkričio 7–10 d., Paryžius, Prancūzija. Pranešimo tema: „Asymmetric PID Controller“;
- 26-ji tarptautinė konferencija „*Problemy elektroniki*“, 2006 m. balandžio 11–13 d. Kijevas, Ukraina. Pranešimo tema: „Control of plants with asymmetric dynamics“;
- 10-toji tarptautinė konferencija „*10th Biennial Baltic Electronics Conference, BEC 2006*“, 2006 m., spalio 2–4 d. Talinas, Estija. Pranešimo tema: „Controller for plants with the asymmetric dynamics“;
- 13-oji tarptautinė konferencija „*Power Electronics and Motion Control Conference, EPE/PEMC 2008*“, 2008 m. rugsėjo 1–3 d., Poznanė, Lenkija. Pranešimo tema: „Control system with the set point observation“;
- Tarptautinė konferencija „*The International IEEE Electric Machines and Drives Conference, IEMDC '09*“, 2009 m. gegužės 3–6 d., Majamis, JAV. Pranešimo tema: „Control of plant with dynamics asymmetry caused by the actuator rate saturation change“;
- 13-oji tarptautinė konferencija „*Power Electronics and Applications, EPE '09*“, 2009 m. rugsėjo 8–10 d., Barselona, Ispanija. Pranešimo tema: „Control of system with the switched actuator rate limitation“;
- 13-oji tarptautinė konferencija „*Elektronika 2009*“, 2009 m. gegužės 12–14 d. Kaunas, Lietuva. Pranešimo tema: „Investigation of asymmetric PI controller using hardware-in-the-loop simulation system“;
- 14-oji tarptautinė konferencija „*Power Electronics and Motion Control Conference, EPE/PEMC 2010*“, 2010 m. rugsėjo 6–8 d., Ohrid, Makedonija. Pranešimo tema: „Control of the plant with the response delay asymmetry“;
- 15-oji tarptautinė konferencija „*Elektronika 2011*“, 2011 m. gegužės 17–19 d., Kaunas, Lietuva. Pranešimo tema: „The Stability Analysis of the Control System with The Asymmetric PI Controller“.

## Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai ir bendrosios išvados. Darbo gale pateiktas literatūros šaltinių bei autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašas.

Darbo apimtis yra 95 puslapiai, tekste pateikiamos 29 numeruotos formulės, 69 paveikslai ir 2 lentelės. Rašant disertaciją buvo panaudoti 93 literatūros šaltiniai.

## **Padėka**

Dėkoju mokslinio darbo vadovui prof. dr. Algirdui Baškiui už išsamias konsultacijas, komentarus ir vertingas pastabas, nenuilstamą skatinimą ir pagalbą ruošiant disertaciją.

Taip pat dėkoju Valstybinio mokslinių tyrimų instituto Fizinių ir technologijos mokslų centro (FTMC) Puslaidininkų fizikos instituto (PFI) Elektroninių sistemų laboratorijos (buvusios Mikroelektronikos laboratorijos – MEL) darbuotojams Vitoldui Gobiui, Vytautui Bleizgiui, Aldui Derviniui, Andriui Platakiui ir Daliui Augustinui, padėjusiems kryptingai dirbti ruošiant disertaciją.

Ypatingai esu dėkingas savo šeimai už palaikymą ir kantrybę.

## **Objektų su asimetrine dinamika ir tiesinių objektų valdymo proporciniu-integraliniu ir proporciniu-integraliniu-diferencialiniu reguliatoriais problemos**

Skyriuje apibrėžiama objekto su asimetrine dinamika sąvoka. Aptariami valdymo sistemos kokybės vertinimo rodikliai. Nagrinėjamos objektų su asimetrine dinamika ir tiesinių objektų valdymo PI ir PID reguliatoriais problemos ir netiesinių valdymo sistemų stabilumo tyrimo problema. Aptariama objektų su asimetrine dinamika modeliavimo problema. Pateikiamos pirmojo skyriaus išvados ir formuluojami disertacijos uždaviniai.

## 1.1. Valdomojo objekto su asimetrine dinamika sąvoka

Daugelio valdomųjų objektų dinamika yra asimetrinė, t.y. objekto parametro dinamika, jam didėjant, yra skirtinga nuo tos, kurią jis turi parametrai mažėjant (J. A. Gantt *et al* 2007). Tai atsitinka todėl, kad parametro vertės didėjimą ir mažėjimą nulemia skirtingi fizikiniai procesai. Pavyzdžiui, vandens tiekimo sistemoje vandens slėgis didinamas pumpuojant vandenį, o mažinamas naudojant vandenį.

Kalbant matematinėmis sąvokomis, valdomasis objektas su asimetrine dinamika yra objektas, kurio perdavimo funkcijos parametrai arba pati funkcija keičiasi, keičiantis valdomojo parametro laiko išvestinės ženklui, t.y. bendru atveju objekto su asimetrine dinamika perdavimo funkcijai galioja nelygybė:

$$G_a(s) \Big|_{dY_a(t)/dt \geq 0} \neq G_a(s) \Big|_{dY_a(t)/dt < 0}, \quad (1.1)$$

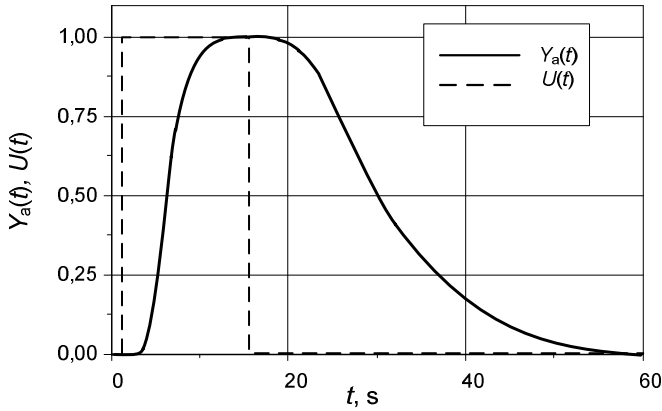
čia  $G_a(s)$  yra valdomojo objekto su asimetrine dinamika perdavimo funkcija,  $s$  yra Laplaso operatorius,  $Y_a(t)$  yra valdomasis objekto parametras,  $t$  yra laikas.

Bendru atveju valdomojo objekto perdavimo funkcija yra ši:

$$G(s) = \frac{e^{-T s}}{(\tau s + 1)^n}, \quad (1.2)$$

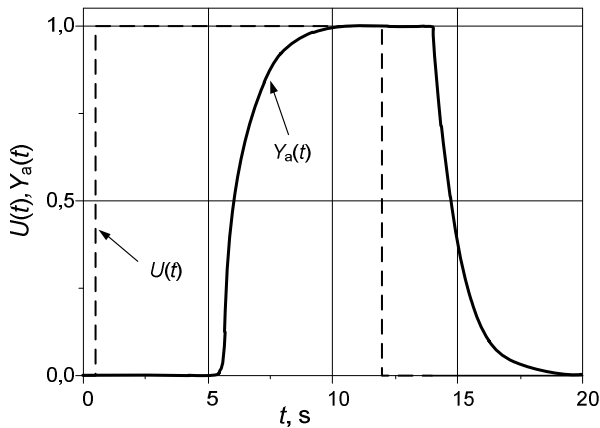
čia  $T$  – objekto vėlinimas,  $\tau$  – laiko pastovioji,  $n$  – perdavimo funkcijos eilė. Objekto dinamikos asimetrija gali būti nulemta visų trijų perdavimo funkcijos parametru asimetrija. Darbe analizuojami atvejai kai objekto dinamiką nulemia  $T$  arba  $\tau$  asimetrija. Valdomųjų objektų su asimetrine dinamika atsako į impulsinį poveikį iliustracijos pateiktos 1.1 ir 1.2 paveiksluose. Juose  $U(t)$  – valdomojo objekto įėjimo signalas,  $Y_a(t)$  – valdomasis objekto parametras. 1.1 paveiksle pateiktas valdomojo objekto su  $\tau$  asimetrija atsakas, o 1.2 paveiksle – objekto su  $T$  asimetrija atsakas.

AVS paprastai savyje turi vykdiklį (*angl. actuator*). Vykdiklis dėl baigtinių energetinių galimybių negali momentaliai pakeisti valdomojo objekto būsenos, t.y. riboja jo atsako spartą (A. Baskys, V. Zlosnikas 2009a). Dažniausiai vykdiklio sukuriama spartos ribojimas (*angl. actuator rate limitation*) yra nežymus ir neįtakoja valdomojo objekto dinamikos. Tačiau, jei vykdiklio sparta yra lėta, vykdiklio įtaka turi būti įvertinta tiriant valdymo sistemą. Kartais vykdiklio spartos ribojimo vertė yra skirtinga valdomojo parametro didinimui ir mažinimui.



**1.1 pav.** Valdomojo objekto su laiko pastoviosios asimetrija, atsakas į impulsinį poveikį

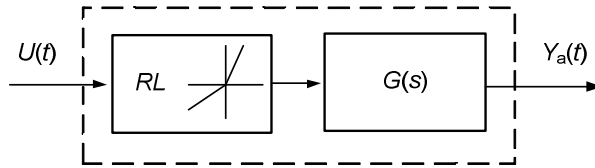
**Fig. 1.1.** Pulse response of the plant with asymmetrical dynamics caused by the plant time constant asymmetry



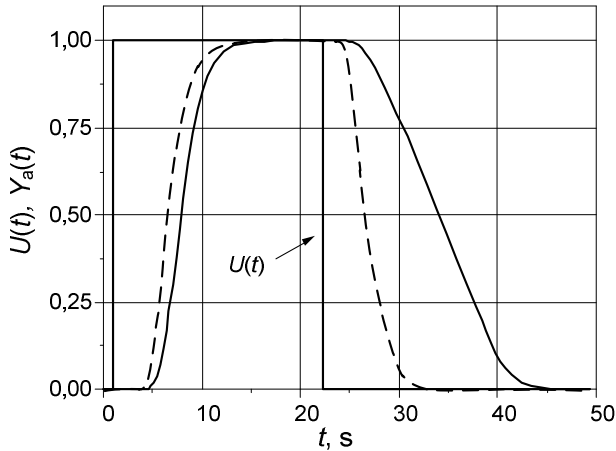
**1.2 pav.** Valdomojo objekto su vėlinimo asimetrija, atsakas į impulsinį poveikį

**Fig. 1.2.** Pulse response of the plant with asymmetrical dynamics caused by the plant dead time asymmetry

Tokia situacija yra sutinkama asinchroninių variklių pavarose, kai variklis, jo greičio valdymui, yra maitinamas dažnio keitikliu. Šiuo atveju dažnio keitiklis veikia kaip vykdyklis, kuris riboja variklio greičio kitimo spartą. Praktikoje dažnai naudojama skirtinga variklio greičio kitimo sparta didinant ir mažinant variklio greitį, t.y. dinamikos asimetriją šiuo atveju įveda vykdyklis. Valdomojo objekto su išskirtu vykdykliu struktūrinė schema ir atsakas į impulsinį poveikį pateikti 1.3 ir 1.4 paveiksluose.



**1.3 pav.** Valdomojo objekto su išskirtu vykdikliu struktūrinė schema  
**Fig. 1.3.** The block diagram of the plant with the separated actuator



**1.4 pav.** Valdomojo objekto su dinamikos asimetrija, įnešama vykdiklio, atsakas į impulsinį poveikį. Brūkšnine linija pateiktas atsakas kai vykdiklis neįtakoja valdomojo objekto dinamikos

**Fig. 1.4.** Pulse response of the plant with asymmetric dynamics caused by the plant actuator rate limitation asymmetry. The dashed line presents the response of the plant without the actuator rate limitation

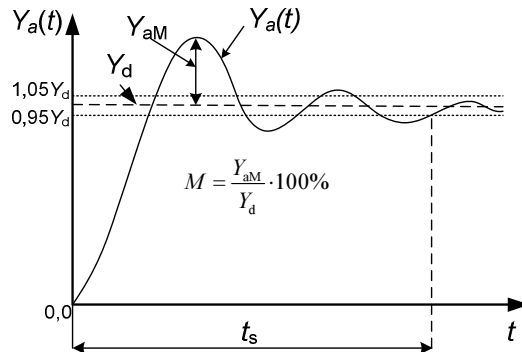
Šiame disertacijos skyriuje nagrinėti objektai su asimetrine dinamika yra priskirtini prie objektų su kintančia struktūra (5,6,7,10). Natūralu, kad tokių objektų kokybiškam valdymui turi būti naudojami ir reguliatoriai su keičiama struktūra. Šiuos reguliatorius galima skirstyti į dvi grupes: reguliatoriai su keičiamu valdymo algoritmu (2,8,9); reguliatoriai su keičiamomis koeficientų vertėmis. Pastarajai grupei priskirtini reguliatoriai, kuriose naudojama neraiškioji logika (1,4,11,15,17) ir reguliatoriai sukurti naudojant slenkančio režimo (angl. *sliding mode*) teoriją (3).

Regulatoriai su keičiama struktūra yra taikomi konkrečių objektų valdymui: servo mechanizmų (9); robotizuotų sistemų (C. Bowen, Y. Maode 2008); nuolatinės srovės variklių (13); asinhroninių trifazių variklių (12,14).

## 1.2. Valdymo sistemos kokybės vertinimas

Disertacijoje nagrinėjamos valdymo sistemos vertinamos naudojant šiuos kokybės rodiklius (R. Rinkeviciene 1999; A. Ivanauskas 2005) (1.5–1.6 pav.):

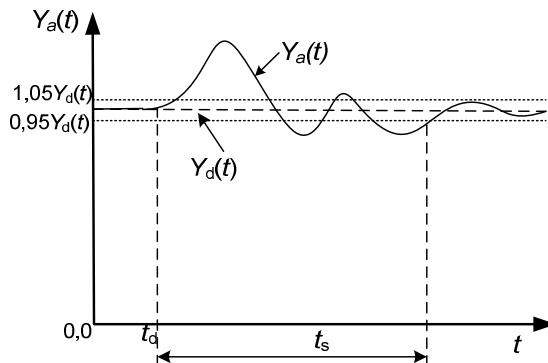
- atsako į nuostatos šuolinį pokytį maksimalus perreguliavimas  $M$  (1.5 pav.);
- atsako į nuostatos šuolinį pokytį ir trikdį pereinamojo proceso trukmė  $t_s$  (1.5–1.6 pav.).



1.5 pav. Valdymo sistemos atsako į nuostatos šuolinį poveikį pereinamasis procesas

Fig. 1.5. The set point step response of the control system

Valdant sistemą yra svarbu, kad valdomasis parametras neviršytų nustatytos vertės. Šito faktoriaus įvertinimui naudojamas maksimalaus perreguliavimo parametras, kuris yra matuojamas didžiausiu valdomojo parametro perviršiu (1.5 pav.).



1.6 pav. Valdymo sistemos atsako į trikdį pereinamasis procesas. Čia  $t_d$  – trikdžio atsiradimo laiko momentas

Fig. 1.6. Load disturbance response of the control system, where  $t_d$  – load disturbance action time

Vienas iš pagrindinių regulatoriaus uždavinių – valdyti sistemą taip, kad pasiekti minimalią atsako pereinamojo proceso trukmę.

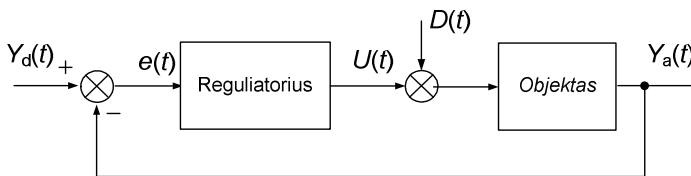
Pereinamojo proceso trukmė tai laikas tarp nuostatos pokyčio arba trikdžio atsiradimo momento ir momento po kurio valdymo paklaida nebeviršija nustatytos vertės (1.5, 1.6 pav.). Disertacijoje, pereinamojo proceso trukmės nustatymui, buvo naudojama 5% vertė.

### 1.3. Objektų su asimetrine dinamika valdymo proporciniais-integraliniais ir proporciniais-integraliniais-diferencialiniais regulatoriais problemos

Pramonėje, daugumoje atvejų, yra naudojami PI ir PID regulatoriai. Šių regulatorių principai aprašyti (R. Kelly, J. Moreno 2001; C. Knospe 2006; Y. Li *et al* 2006). Darbuose (H. Panagopoulos *et al* 1997; K. J. Åström, T. Hägglund 2000, 2001; J. L. Guzman *et al* 2008) nagrinėjami PI ir PID regulatorių analizės būdai ir perspektyvos. Šių regulatorių koeficientų nustatymo metodai pateikti (Y. Li *et al* 1998; G. J. Silva *et al* 2002; J. C. Basilio, S. R. Matos 2002; G. H. M. de Arruda, P. R. Barros 2003; J. Luis 2006) darbuose, o konkrečių objektų valdymo pavyzdžiai – (B. Z. Khan, B. Lehman 1996; P. Rocco 1996; M. Berenguel *et al* 1999; D. Lee 2003) darbuose.

Darbe nagrinėjamos uždarnosios valdymo sistemos, kurių bendra struktūrinė schema pateikta 1.7 paveiksle. Joje  $t$  yra laikas,  $e(t) = Y_d(t) - Y_a(t)$  yra valdymo paklaida (skirtumas tarp nuostatos, t.y. norimos valdomojo objekto parametro vertės  $Y_d(t)$  ir realios vertės  $Y_a(t)$ ),  $U(t)$  – valdomojo objekto valdymo signalas (regulatoriaus išėjimo signalas),  $D(t)$  yra valdomojo objekto trikdys.

Ištirkime objektų su laiko pastoviosios asimetrija valdymo sistemą, kurioje naudojamas PID regulatorius.



1.7 pav. Valdymo sistemos struktūrinė schema

Fig. 1.7. Block diagram of the control system

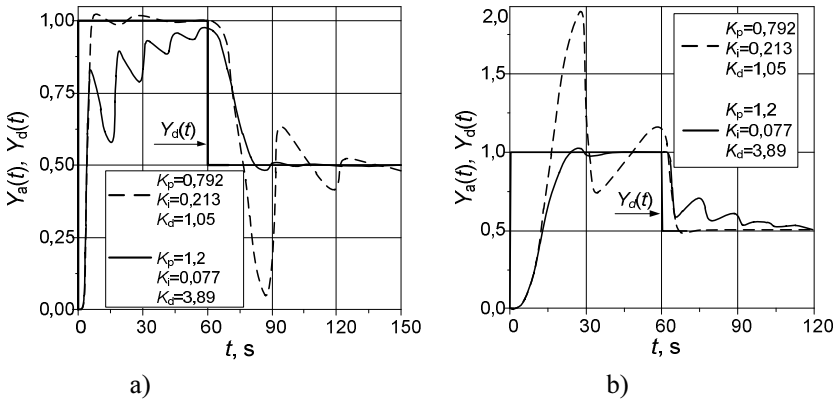
Tiriamų valdomųjų objektų su laiko pastoviosios asimetrija perdavimo funkcijos yra šios:

$$G_1(s) = \frac{e^{-2s}}{(\tau s + 1)^3}, \quad \tau = \begin{cases} 1, & dY_a(t)/dt \geq 0 \\ 5, & dY_a(t)/dt < 0 \end{cases} \quad (1.3)$$



$$G_2(s) = \frac{e^{-2s}}{(\tau s + 1)^3}, \quad \tau = \begin{cases} 5, & dY_a(t)/dt \geq 0 \\ 1, & dY_a(t)/dt < 0 \end{cases} \quad (1.4)$$

Tiriamų valdymo sistemų atsakai į nuostatos šuolius pateikti 1.8 ir 1.9 paveiksluose. (A. Baskys, V. Zlosnikas 2006a).

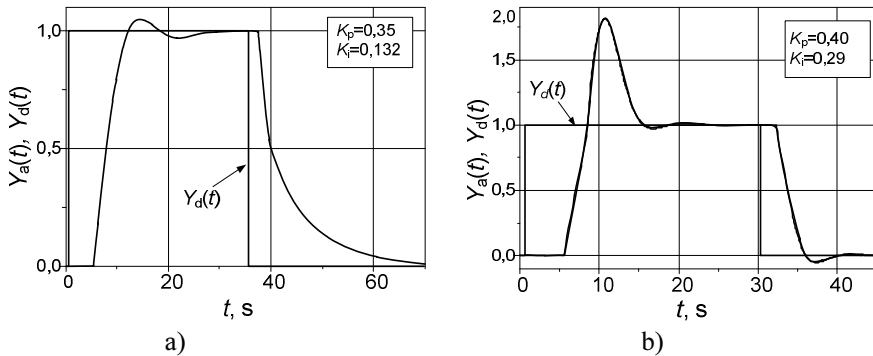


**1.8 pav.** Objektų  $G_1(s)$  (a) ir  $G_2(s)$  (b) su laiko pastoviosios asimetrijos valdymo sistemos atsakas į nuostatos  $Y_d(t)$  šuolius, naudojant PID reguliatorių

**Fig. 1.8.** The set point unit step response followed by the  $Y_d(t)$  drop of the control system of plants with time constant asymmetry  $G_1(s)$  (a) and  $G_2(s)$  (b) based on PID controller

Matome, kad PID reguliatorius neleidžia tuo pat metu pasiekti valdomojo parametro kokybiško pereinamojo proceso parametrai didėjant ir mažėjant. Jei reguliatoriaus parametrai priderinti objekto dinamikai, kurią jis turi parametrai didėjant, tuomet parametrai mažėjant jo pereinamasis procesas pasižymi dideliu perreguliuoimu arba ilgą pereinamojo proceso trukmę (1.8a pav., brūkšninė linija, 1.8b pav., ištisinė linija).

1.9 paveiksle pateiktas objekto su vėlinimo asimetrijos atsakas į impulsinį nuostatos pokytį, kai objekto dinamikos asimetrija yra nulemta skirtingu vėlinimu valdomąjį parametrai didinant ir mažinant (A. Baskys, V. Zlosnikas 2010). Matome, kad PI reguliatorius neleidžia gauti gerų valdymo sistemos kokybės rodiklių. Jei reguliatoriaus parametrai priderinti objekto dinamikai, kurią jis turi valdomajam parametrai didėjant, tuomet pereinamojo proceso trukmė tampa nepriimtina ilgą parametrai mažėjant (1.9a pav.). Panaši situacija susidaro ir tada, kai reguliatoriaus parametrai priderinti prie objekto dinamikos, kurią jis turi valdomajam parametrai mažėjant (1.9b pav.). 1.9 paveiksle  $U_p(t)$  yra objekto įėjimo signalas.



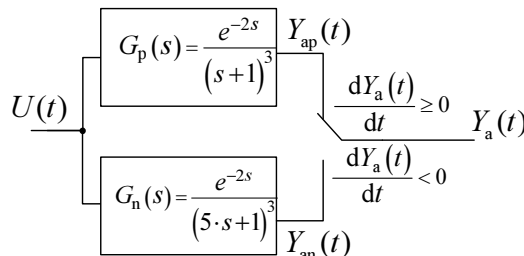
**1.9 pav.** Objekto su vėlinimo asimetrija valdymo sistemos atsakas į nuostato impulsinį pokytį, kai valdymui naudojamas PI reguliatorius su skirtingais parametrais. Valdomojo objekto perdavimo funkcija  $G(s) = e^{-Ts}/(s+1)$ , kurioje  $T = 5$  s, kai  $U_p(t)/dt \geq 0$  ir  $T = 2$  s, kai  $U_p(t)/dt < 0$

**Fig. 1.9.** The set point unit pulse response of the unit feedback control system of the plant with the response delay asymmetry based on the PI controller. Plant parameters: transfer function  $G(s) = e^{-Ts}/(s+1)$ , where  $T = 5$  s if  $U_p(t)/dt \geq 0$  and  $T = 2$  s if  $U_p(t)/dt < 0$

Analogiška problema, naudojant PI ir PID reguliatorius, iškyla ir valdymo sistemose, kuriose valdomojo parametro dinamikos asimetriją sukelia vykdyklio spartos ribojimas (A. Baskys, V. Zlosnikas 2009a)(A. Baskys, V. Zlosnikas 2009b).

### 1.4. Objektų su asimetrine dinamika modeliavimo problema

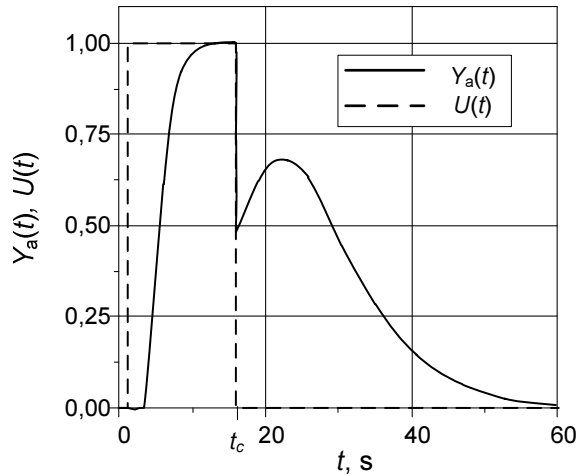
Programa *Simulink* modeliuoti objektus su  $\tau$  asimetrija, naudojant standartinius perdavimo funkcijos blokus, yra problematiška (A. Baskys, V. Zlosnikas 2006a). Atrodo, kad, pavyzdžiui, objektui, kurio perdavimo funkcija (1.3),



**1.10 pav.** Valdomojo objekto su laiko pastoviosios asimetrija struktūrinė schema, realizuota naudojant du perdavimo funkcijos blokus ir jungiklį

**Fig. 1.10.** Plant with the time constant asymmetry created using two transfer function blocks and switch

realizuoti *Simulink* programa galima būtų naudoti struktūrą, susidedančią iš dviejų perdavimo funkcijos blokų su skirtinga  $\tau$  verte ir perjungėju (1.10 pav.).



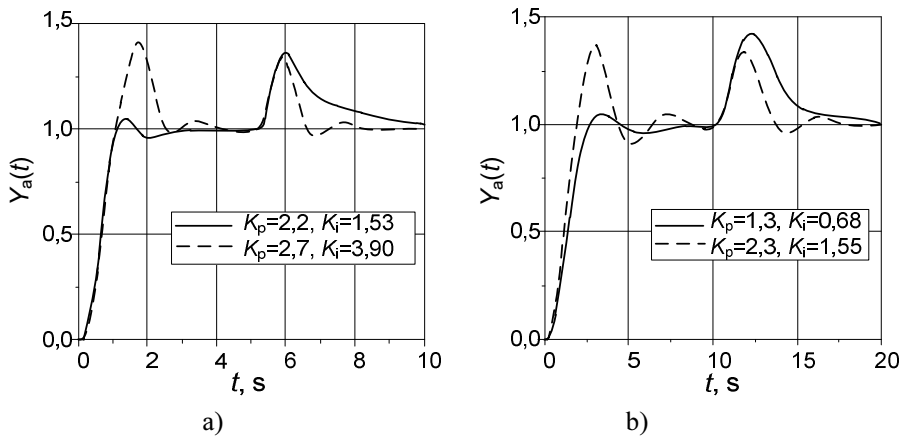
**1.11. pav.** Objekto su laiko pastoviosios asimetrija, modeliuojamo dviem perdavimo funkcijos blokais ir perjungėju, atsakas į impulsinį poveikį

**Fig. 1.11.** Pulse response of plant with the time constant asymmetry created using two transfer function blocks and switch

Tačiau toks objekto su asimetrine dinamika modelis yra nekorektiškas. Priežastis tame, kad bendru atveju dinaminėje sistemoje  $Y_{ap}(t_c) \neq Y_{an}(t_c)$  ( $t_c$  laiko momentas, kai perjungiamas jungiklis) ir tai nulemia  $Y_a(t)$  šuolį, laiko momentu  $t = t_c$  (1.11 pav.), kurio realiam objektui nebūna.

## 1.5. Tiesinių objektų valdymo proporciniumi-integraliniu ir proporciniumi-integraliniu-diferencialiniu reguliatoriais problema

Problema, su kuria susiduriama tiesinių objektų valdymo sistemose, kuriose naudojami PI ir PID reguliatoriai, yra ta, kad šie reguliatoriai neleidžia tuo pat metu pasiekti gerų atsako į nuostatos pokytį ir į valdomojo objekto trikdį pereinamųjų procesų kokybės rodiklių (I. Boiko *et al* 2008, 2009). Tai matyti iš valdymo sistemos atsakų į nuostatos šuolį, po kurio seka trikdys, pateiktą 1.12 paveiksle. (A. Baskys, V. Zlosnikas 2006b), gautų modeliuojant programa *Simulink*.



**1.12 pav.** Valdymo sistemos su PI reguliatoriumi atsakai į vienetinį nuostato šuolį, po kurio seka teigiamas trikdžio vienetinis šuolis, valdant objektus, kurių perdavimo funkcijos  $G_3(s) = e^{-0.3s}/(s+1)$  (a) ir  $G_4(s) = e^{-0.2s}/(s+1)^2$  (b), įvairioms reguliatoriaus koeficientų  $K_p$  ir  $K_i$  vėrtėms

**Fig. 1.12.** The set point unit step response followed by positive unit load disturbance of the control system with plants  $G_3(s) = e^{-0.3s}/(s+1)$  (a) and  $G_4(s) = e^{-0.2s}/(s+1)^2$  (b) based on the PI controller with various  $K_p$  and  $K_i$  parameters

Pereinamieji procesai, pateikti ištisine linija, gauti kai reguliatoriaus parametrai priderinti, siekiant gauti mažiausią atsako į nuostatos šuolį pereinamojo proceso trukmę, brūkšine linija pateikti pereinamieji procesai reguliatoriaus parametrams parinktiems siekiant gauti trumpiausią pereinamojo proceso, sukeltą trikdžio, trukmę. Matome, kad PI reguliatorius neleidžia pasiekti tuo pat metu kokybiško atsako į nuostatos šuolį ir į trikdį.

## 1.6. Valdymo sistemų su asimetriniais reguliatoriais stabilumo tyrimo problema

Iki šiol nėra sukurta vieningos teorijos, leidžiančios pilnai ištirti bet kokios netiesinės sistemos stabilumą. Dėl šios priežasties egzistuoja daugelis netiesinių sistemų analizės metodų, leidžiančių tirti atskirų netiesinių sistemų stabilumą. Pavyzdžiui, Liapunovo metodas, kuris gali būti taikomas šių keičiamos struktūros sistemų stabilumo analizei:

- netiesinių hibridinių (M. A. Wicks *et al* 1994; M. Johansson, A. Rantzer 1998; M. S. Branicky 1998);
- sistemų su neraiškiosios logikos reguliatoriais (Y. Dote, T. Saitoh 1991; M. Xu, S. Li 2004);

- sistemų su perjungiamosiomis tiesinėmis dalimis (P. Peleties, R. A. Decarlo 1991; B. Hu *et al* 1999; W. P. Dayawansa, C. F. Martin 1999; L. B. Freidovich, H. K. Khalil 2003).

Konkretūs Liapunovo funkcijų taikymo pavyzdžiai aprašyti darbuose (S. Boyd, Q. Yang 1989; H. Shim *et al* 1998; E. M. Jafarov *et al* 2005).

Nors Liapunovo metodas yra naudotinas daugeliui netiesinių sistemų, tačiau dažnai praktiškai negali būti taikomos, nes jo realizavimui reikia turėti netiesinės sistemos analitinį modelį, kas netiesinėms sistemoms dažnai yra neįmanoma.

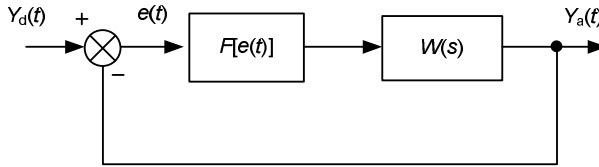
Dėl šių priežasčių dažniausiai netiesinių sistemų stabilumo analizė gali būti atliekama tik įvedus apribojimus ir sąlygas, kurios atskirais atvejais leidžia ištirti sistemos stabilumą, panaudojant tam žinomus metodus. Tokie atvejai gali būti šie:

1. Netiesinė sistema aproksimuojama tiesine ir jos tyrimui pritaikomi žinomi tiesinių sistemų metodai, pvz. *Naikvisto, šaknų, ADCH ir FDCH*;
2. Netiesinei sistemai keliami reikalavimai, leidžiantys nagrinėti tik pirmosios harmonikos įtaką sistemos darbui. Tokiu atveju stabilumo analizei galima naudoti *charakterizuojančių funkcijų metodą* (angl. *describing function method* (R. Sridhar 1960; S. R. Sanders 1993; I. Boiko *et al* 2009; D. Wu, K. Chen 2012), kuris leidžia taikyti spektrinius sistemų tyrimo būdus. Aprašančių funkcijų metodo apribojimus nagrinėja autoriai (S. Kou, K. W. Han 1975; V. K. Pillai, H. D. Nelson 1988), galimas panaudojimo sritis – autoriai (M. Rao, P. Rao 1970; J. Lota *et al* 2006).
3. Sistemai sudaroma netiesinė diferencialinė lygtis, kuriai atskirais atvejais galima gauti jos sprendinius arba nagrinėti ją *fazinio portreto arba fazinės erdvės* metodu (M. A. Shayman 1984; R. Wilson-Jones, P. E. Wellstead 1994; A. M. Jelic, D. M. Vasiljevic 1996). Sistemoms su neriškiosios logikos regulatoriais sudaryti diferencialinę lygtį neįmanoma, tačiau šiuo atveju galima taikyti fazinio portreto metodą (H. Kang, G. J. Vachtsevanos 1990; S. A. Shumsky 1992).
4. Netiesinė sistema suskaidoma į netiesinę ir tiesinę dalis ir, taikant netiesinei daliai specialius reikalavimus, ieškoma visos sistemos stabilumo ribų absoliutaus stabilumo kriterijais. Šiuo atveju stabilumo tyrimui galima naudoti *Popovo kriterijų* (A. Suyitno *et al* 1993; M. Johansson, A. Rantzer 1998).
5. Regulatorius sintezuojamas taip, kad sistema būtų stabili. Tokios sistemos stabilumo analizei galima naudoti *slankųjį metodą* (angl. *sliding mode*) (Z. Lu *et al* 1995). Šio metodo taikymas kintamosios srovės trifazių variklių greičio ir roboto manipulatoriaus valdymui aprašytas, atitinkamai, (Y. Wang *et al* 2005; J. Liu *et al* 2009) ir (V. Parra-Vega *et al* 2003; E. M. Jafarov *et al* 2005) darbuose. Slankojo metodo realizavi-

mas, naudojant 8 bitų mikrovaldikius, pateiktas (E. Ho, P. Sen 1990; E. Vidal-Idiarte *et al* 2004; M. Dal, K. Jezernik 2006) darbuose.

6. Kuriamos naujos teorijos, bei matematinė bazė, leidžiančios analizuoti konkrečias sistemas, priklausančias tam tikrai netiesinių sistemų klasei, pvz. *perjungiamų tiesinių sistemų* (angl. *Switched Linear Systems* (C. Gokcek 2004; D. Cheng *et al* 2005)).

Valdymo sistemų su asimetriniais reguliatoriais tyrimui gali būti pritaikytas 4-ajame punkte paminėtas Popovo kriterijus. Rumunų mokslininkas Popovas laikomas absoliutaus stabilumo metodo pradininku. Norint taikyti jo pasiūlytą metodą būtina pertvarkyti netiesinės sistemos struktūrą taip, kad būtų atskirtos jos tiesinė ir netiesinė dalys. Analizuojant valdymo sistemų su asimetriniais reguliatoriais stabilumą šis metodas gali būti pritaikytas sistemoms kuriuose asimetrinis reguliatorius naudojamas tiesinių objektų valdymui. Tokios sistemos



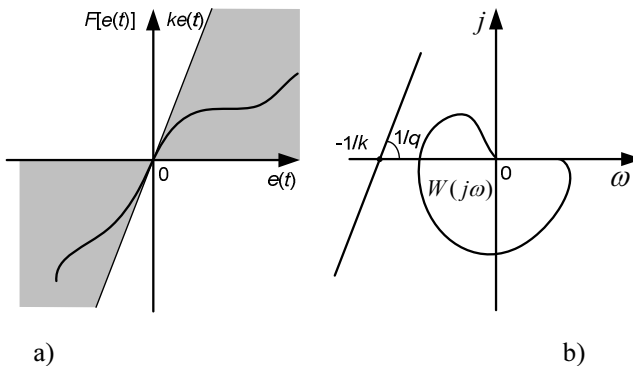
**1.13 pav.** Valdymo sistema su atskirta tiesine ir netiesine dalimis

**Fig. 1.13.** Control system with separated linear and nonlinear parts

netiesinę dalį sudaro reguliatoriaus netiesinė dalis, o tiesinę – reguliatoriaus tiesinė dalis ir valdomasis objektas (1.13 pav.).

Valdymo sistemos struktūrinėje schemoje (1.13 pav.) netiesinės dalies funkcija pažymėta  $F[e(t)]$ , o tiesinės dalies perdavimo funkcija –  $W(s)$ .

Nagrinėjamas metodas taikytinas, jei funkcija  $F[e(t)]$  randasi tarp abscisių ašies ir funkcijos  $ke(t)$ , kaip parodyta 1.14 a paveiksle, kur  $k$  yra Hurvitco koeficientas.



**1.14 pav.** Popovo kriterijaus taikymas netiesinei funkcijai

**Fig. 1.14.** Popov criterion for nonlinear function

Jei netiesinės dalies funkcija tenkina minėtą aukščiau reikalavimą, kompleksinėje plokštumoje braižoma sistemos tiesinės dalies *Naikvisto* diagrama bei tiesė (Popovo tiesė) kertanti tašką –  $1/k$ , kurios kampas su abscisių ašimi  $1/q$ . Sistema yra skaitoma stabilia jei Popovo tiesė nekerta *Naikvisto* diagramos.

Popovo kriterijus yra vaizdus ir lengvai įgyvendinamas, lyginant su kitais išvardintais metodais. Juo remiantis sukurti šiuolaikiniai stabilumo tyrimo metodai pvz. apskritiminis kriterijus (J. Moore 1968; Z. Bonenn 1968; A. Shiriaev *et al* 2003; P. Grabowski, F. M. Callier 2006; S. Ibrir 2007). Apskritiminio kriterijaus modifikacijos, leidžiančios praplėsti šio metodo taikymo ribas, pateiktos (Y.-S. Cho, K. S. Narendra 1968; C. J. Harris, R. K. Husband 1981; Y. Okuyama, F. Takemori 1999; W. Rahiman *et al* 2007) darbuose. Sistemų su neraiškiosios logikos reguliatoriais stabilumo tyrimai, panaudojant apskritiminį kriterijų pateikti (R. E. H. Guerra *et al* 2003; J.-C. Lo *et al* 2011) darbuose. Įvairius apskritiminio metodo patobulinimus pasiūlė autoriai (G. Schndtt-Braess 2002; D. Materassi *et al* 2006, 2007).

## 1.7. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Daugelio valdomųjų objektų dinamika yra asimetrinė, t. y. objekto parametro dinamika, jam didėjant, yra skirtinga nuo tos, kurią jis turi parametrai mažėjant

2. Objekto su dinamikos asimetrija perdavimo funkcijos parametrai arba ir pati funkcija pasikeičia, keičiantis valdomojo parametro laiko išvestinės ženklui. Valdomojo objekto dinamikos asimetriją gali nulėmti ir vykdiklis, jei jo sparta yra lėta, ir yra skirtinga didinant ir mažinant valdomąjį parametą.

3. Plačiai pramonėje naudojami PI ir PID reguliatoriai, valdant objektus su asimetrine dinamika, neleidžia tuo pat metu pasiekti valdomojo parametro kokybiško pereinamojo proceso parametrai didėjant ir mažėjant.

4. Sudaryti adekvatų objekto su laiko pastoviosios asimetrija modelį programa *Simulink*, naudojant standartinius perdavimo funkcijos blokus, neįmanoma.

5. Problema, su kuria susiduriama tiesinių objektų valdymo sistemose, kuriuose yra naudojami PI ir PID reguliatoriai, yra ta, kad šie reguliatoriai neleidžia tuo pat metu pasiekti gerų atsako į nuostatos pokytį ir į valdomojo objekto trikdį pereinamųjų procesų kokybės rodiklių.

Atlikus literatūros ir mokslinių tiriamųjų projektų, kurių tematika susijusi su disertacijos tema ir kuriuose dalyvavo disertantas, analizę, suformuluoti šie disertacijos uždaviniai:

1. Sudaryti valdymo algoritmus asimetriniams reguliatoriams objektų su asimetrine dinamika ir tiesinių objektų valdymui.

2. Ištirti asimetrinius reguliatorius, valdant objektus su asimetrine dinamika.
3. Ištirti asimetrinius reguliatorius, valdant tiesinius objektus.
4. Atlikti valdymo sistemų su asimetriniais reguliatoriais stabilumo analizę.



---

## Asimetriniai reguliatoriai objektų su asimetrine dinamika valdymui

Skyriuje aprašomi sukurti algoritmai asimetriniams PI (aPI) ir PID (aPID) reguliatoriams ir pateikiami asimetrinės dinamikos objektų valdymo sistemų su šiais reguliatoriais tyrimų rezultatai.

Skyriaus tematika paskelbti 6 autoriaus (A. Baskys, V. Zlosnikas 2006a, 2006c, 2006d, 2009a, 2009b, 2010) straipsniai.

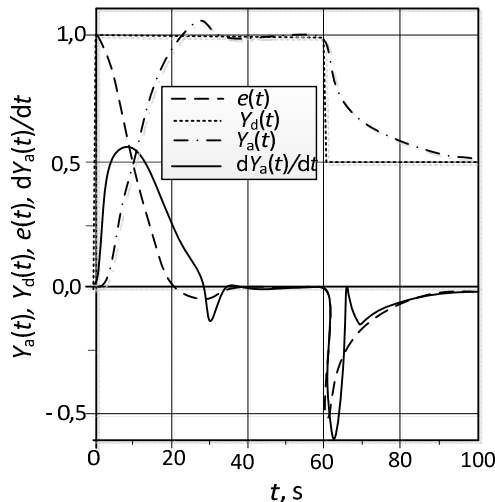
### 2.1. Asimetrinis proporcinis-integralinis reguliatorius

Nagrinėjamų objektų valdomojo parametro dinamika jam didėjant yra skirtinga nuo tos, kurią jis turi parametru mažėjant. Kadangi reguliatoriaus parametrai turi būti priderinti valdomojo objekto dinamikai, natūralu, kad kokybiškam tokių objektų valdymui turi būti naudojami reguliatoriai su keičiamais koeficientais. Valdomajam parametru didėjant turi būti naudojamos vienos koeficientų vertės, jam mažėjant – kitos. Kuriant tokius reguliatorius, kuriuos toliau vadiname asimetriniais reguliatoriais, pagrindinė problema yra nustatyti laiko momentus kuriais turi būti perjungiami reguliatoriaus koeficientai. Vienas iš galimų būdų yra perjungti koeficientus laiko momentu, kai pasikeičia valdomojo parametro laiko išvestinės ženklas. Panagrinėkime objektus su asimetrine dinamika, kurių perdavimo funkcijos

$$G_5(s) = \frac{e^{-1s}}{(\tau s + 1)^2}, \quad \tau = \begin{cases} 1, & dY_a(t)/dt \geq 0 \\ 5, & dY_a(t)/dt < 0 \end{cases} \quad (2.1)$$

$$G_6(s) = \frac{e^{-1s}}{(\tau s + 1)^2}, \quad \tau = \begin{cases} 5, & dY_a(t)/dt \geq 0 \\ 1, & dY_a(t)/dt < 0 \end{cases} \quad (2.2)$$

Objekto  $G_5(s)$  valdymo sistemos su PI reguliatoriumi atsakas į nuostatos šuolius pateiktas 2.1. paveiksle. Matome, kad išėjimo parametro išvestinės  $dY_a(t)/dt$  ženklas praktiškai sutampa su sistemos valdymo paklaidos  $e(t)$  ženklu. Todėl, asimetrinio reguliatoriaus parametru vertės gali būti perjungiamos ir laiko momentais kai keičiasi  $e(t)$  ženklas. Metodo, kuriame reguliatoriaus parametrai perjungiami keičiantis  $e(t)$  ženklui privalumas yra tas, kad reguliatoriui nereikia papildomai stebėti valdomojo parametro laiko išvestinės.



**2.1 pav.** Objekto  $G_5(s)$  valdymo sistemos su PI reguliatoriumi atsakas į nuostatos šuolius.  $Y_d(t)$  – nuostata;  $e(t)$  – paklaida;  $Y_a(t)$  – valdomasis parametras

**Fig. 2.1.** The set point unit step response followed by the  $Y_d$  drop of the PI controller-based  $G_5(s)$  plant control system.  $Y_d(t)$  is set point;  $e(t)$  is error;  $Y_a(t)$  is plant parameter

Darbe nagrinėjami abu siūlomo aPI reguliatoriaus atvejai: atvejis kai parametrai perjungiami keičiantis  $e(t)$  ženklui (A. Baškys *et al* 2006; A. Baskys *et al* 2009) ir atvejis kai jie perjungiami keičiantis  $dY_a/dt$  ženklui (A. Baskys, V. Zlosnikas 2010).

Siūlomo aPI reguliatoriaus algoritmai yra šie:

$$U(t) = K_p(t) \cdot e(t) + \int_{t_0}^t K_i(\tau) \cdot e(\tau) d\tau,$$

$$K_p(t) = K_{pp}, K_i(\tau) = K_{ip} \mid dY_a(t) / dt \geq 0, \quad (2.3)$$

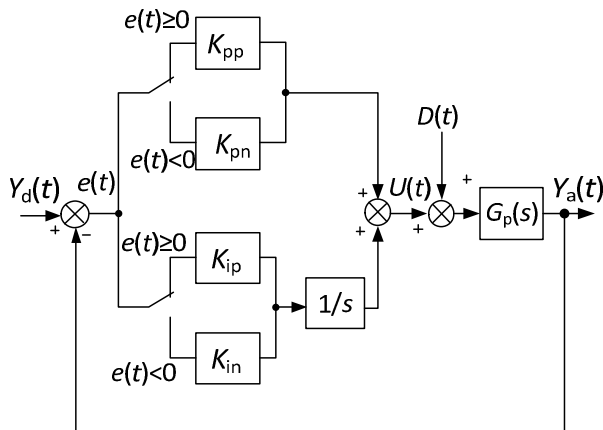
$$K_p(t) = K_{pn}, K_i(\tau) = K_{in} \mid dY_a(t) / dt < 0,$$

$$U(t) = K_p(t) \cdot e(t) + \int_{t_0}^t K_i(\tau) \cdot e(\tau) d\tau,$$

$$K_p(t) = K_{pp}, K_i(\tau) = K_{ip} \mid e(t) \geq 0, \quad (2.4)$$

$$K_p(t) = K_{pn}, K_i(\tau) = K_{in} \mid e(t) < 0.$$

Išraiškos (2.3) aprašo aPI reguliatoriaus algoritmą kai reguliatoriaus koeficientai perjungiami keičiantis  $dY_a/dt$  ženklu, o išraiškos (2.4) – kai koeficientai perjungiami keičiantis  $e(t)$  ženkliui. Čia  $K_{pp}$ ,  $K_{ip}$  ir  $K_{pn}$ ,  $K_{in}$  yra aPI reguliatoriaus proporcinio ir integralinio koeficientų reikšmės, esant teigiamoms ir neigiamoms  $dY_a/dt$  arba  $e(t)$  reikšmėms,  $t_0$  yra algoritmo darbo pradžios laikas. Atskiru atveju, kai  $K_{pp} = K_{pn}$  ir  $K_{ip} = K_{in}$ , aPI algoritmas sutampa su PI reguliatoriaus algoritmu. Reguliatoriaus, realizuojančio (2.4) algoritmą struktūrinė schema pateikta 2.2 paveiksle.



**2.2 pav.** Valdymo sistemos su aPI reguliatoriumi, realizuojančiu (2.4) valdymo algoritmą, struktūrinė schema

**Fig. 2.2.** aPI controller block diagram, which implements (2.4) control algorithm

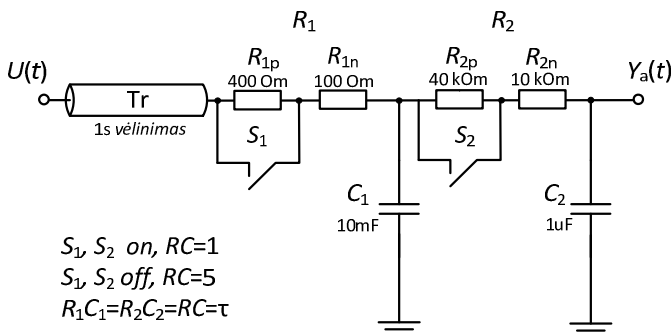
Kadangi reguliatoriaus parametrai – proporcinis ( $K_p$ ) ir integralinis ( $K_i$ ) koeficientai turi skirtingas vertes esant teigiamoms ir neigiamoms  $e(t)$  arba  $dY_a/dt$  reikšmėms, aPI reguliatoriaus poveikis valdomajam objektui yra skirtingas, t.y.

asimetrinis, o  $K_p$  ir  $K_i$  nėra pastovūs kaip PI, nes keičia savo vertę laiko momentais, kai keičia ženklą  $dY_a/dt$  arba  $e(t)$ .

aPI reguliatorius, lyginant jį su PI turi daugiau laisvės laipsnių derinant jo koeficientus prie objekto dinamikos. Reguliatoriaus derinimo procesas yra ypatingas tuo, kad jo parametru asimetrinės dinamikos objekto valdymo sistemai parinkimo metu į reguliatorių galima žiūrėti kaip į du atskirus PI reguliatorius, derinamus prie dviejų atskirų tiesinių objektų. Dėl šios priežasties aPI reguliatoriaus derinimui prie valdomojo objekto dinamikos tinka PI reguliatoriaus derinimo metodai. Tai daro aPI metodą patrauklų naudoti pramonėje, nes inžinieriai žino PI reguliatorių derinimo principus.

## 2.2. Objektų su laiko pastoviosios asimetrija valdymas asimetriniu proporcinium-integraliniu reguliatoriumi

Kaip buvo minėta I skyriuje, modeliuoti objektus su  $\tau$  asimetrija visuotinai dinaminių sistemų modeliavimui naudojama programa *Simulink* yra komplikuota. Dėl šios priežasties, tokių asimetrinės dinamikos objektų valdymo sistemų tyrimui buvo naudojama elektroninių schemų modeliavimo programa *Spice*. Joje pirmosios eilės perdavimo funkciją realizuoja RC grandinė, vėlinimą – vėlinimo linija. Pavyzdžiui, objektus aprašomus perdavimo funkcijomis (2.1) ir (2.2) atitinka schema pateikta 2.3 paveiksle, realizuota standartiniais *Spice* programos elementais. Nuosekliai sujungtų RC grandinių elementų parametrai parinkti taip, kad RC grandinė sudarytų nykstamai mažą apkrovą prieš ją einančią RC grandinę.



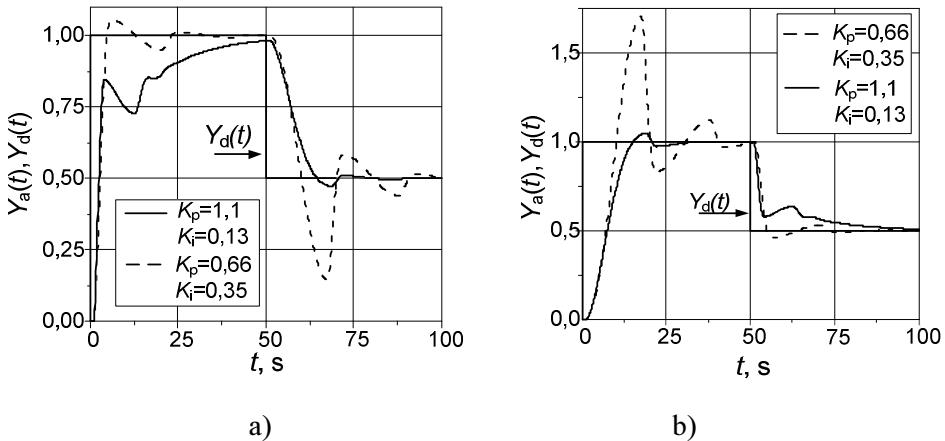
2.3 pav. Objekto su laiko pastoviosios asimetrija  $G_5(s)$  *Spice* modelis

Fig. 2.3. *Spice* model of plant  $G_5(s)$  with time constant asymmetry

Objekto dinamikos asimetrija realizuojama keičiant rezistorių  $R_1$  ir  $R_2$  varžas jungikliais  $S_1$  ir  $S_2$ . Objekto su asimetrine dinamika modelis realizuotas *Spice* programa, priešingai modeliui realizuotam *Simulink* programa, naudojant stan-

dartinius blokus (1.10 pav.), leidžia gauti tolydų objekto atsaką, kuris atitinka realaus objekto atsaką.

Objektų, kurių perdavimo funkcijos (2.1), (2.2) uždarnosios valdymo sistemos, kurios struktūrinė schema pateikta 1.7 paveiksle, atsakas į nuostatos teigiamą ir neigiamą šuolius kai naudojamas PI reguliatorius, pateikti 2.4 paveiksle (A. Baskys, V. Zlosnikas 2006c).



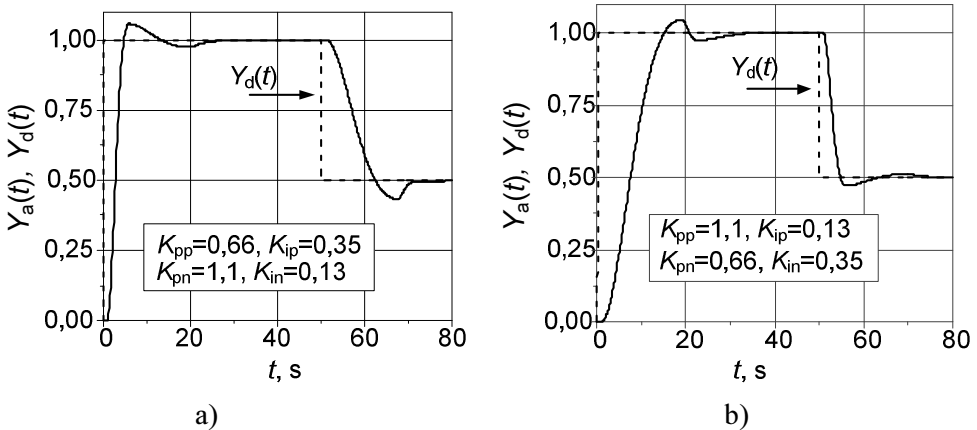
**2.4 pav.** Objektų  $G_5(s)$  (a) ir  $G_6(s)$  (b) valdymo sistemos su PI reguliatoriumi atsakas į teigiamą ir neigiamą nuostatos  $Y_d(t)$  šuolius, kai PI reguliatoriaus koeficientai priderinti objekto dinamikai atitinkančiai  $\tau = 1$  (brūkšninė linija) ir  $\tau = 5$  (ištisinė linija)

**Fig. 2.4.** The unit step response followed by the  $Y_d(t)$  drop of the control system with plants  $G_5(s)$  (a) and  $G_6(s)$  (b) based on the PI controller adjusted for dynamics of plant associated with  $\tau = 1$  (dashed line) and  $\tau = 5$  (solid line)

Reguliatoriaus koeficientai buvo parenkami taip, kad gauti minimalią atsako pereinamojo proceso trukmę, o perreguliavimas neviršytų vertės  $M = 10\%$ . Tyrimai parodė, kad valdant objektą  $G_5(s)$ , kai PI reguliatoriaus koeficientai priderinti objekto dinamikai atitinkančiai laiko pastoviosios vertę  $\tau = 1$ , teigiamo nuostatos šuolio metu gaunama pereinamojo proceso trukmė 25 s (2.4 a, pav. brūkšninė linija). Tuo tarpu sistemos atsakas į nuostatos neigiamą šuolį pasižymi dideliu perreguliavimu  $M = 70\%$  ir santykinai ilgu 39 s pereinamuoju procesu. Tuo atveju kai PI reguliatoriaus koeficientai priderinti objekto dinamikai atitinkančiai laiko pastoviosios vertę  $\tau = 5$ , neigiamo šuolio metu gaunama pereinamojo proceso trukmė 20 s (2.4 a, pav. ištisinė linija), tačiau sistemos atsakas į nuostatos teigiamą šuolį šiuo atveju pasižymi santykinai ilgu 50 s pereinamuoju procesu. Panašūs rezultatai gaunami ir PI reguliatoriumi valdant objektą  $G_6(s)$  (2.4b pav.).

Analogiški objektų  $G_5(s)$  ir  $G_6(s)$  valdymo sistemų atsakų tyrimai, kai naudojamas aPI reguliatorius, realizuojantis valdymo algoritmą (2.3), kuriame regu-

liatoriaus parametrai perjungiami keičiantis  $dY_a/dt$  ženklui, pateikti 2.5 paveiksle. Rezultatai gauti modeliuojant programa *Spice*.

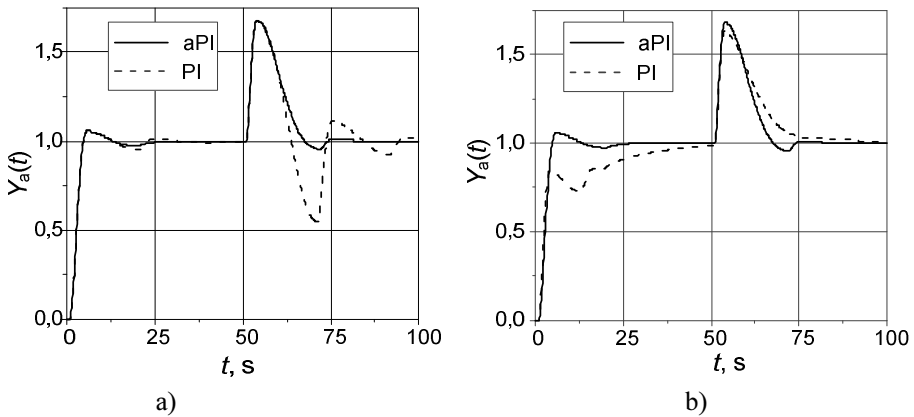


**2.5 pav.** Objektų  $G_5(s)$  (a) ir  $G_6(s)$  (b) valdymo sistemos su aPI reguliatoriumi, realizuojančiu algoritmą (2.3), atsakas į teigiamą ir neigiamą nuostatos  $Y_d(t)$  šuolius

**Fig. 2.5.** The set point unit step response followed by the  $Y_d(t)$  drop of the control system with plants  $G_5(s)$  (a) and  $G_6(s)$  (b) based on the aPI controller, which implements control algorithm (2.3)

Gauti sistemos atsako pereinamieji procesai rodo kad aPI reguliatoriaus taikymas, priešingai PI reguliatoriui, leidžia gauti geriausius pereinamojo proceso parametrus, tiek teigiamam tiek neigiamam nuostatos šuoliui (palyginkite pereinamuosius procesus pateiktus 2.5 pav. su pateiktais 2.4 pav.). Tai yra dėl to, kad esant teigiamam nuostatos šuoliui išvestinė  $dY_a(t)/dt \geq 0$ , todėl reguliatoriuje yra nustatomos koeficientų vertės  $K_{pp}$ ,  $K_{ip}$ , suderintos objekto dinamikai kai  $\tau = 1$ . Esant nuostatos neigiamam šuoliui valdomo objekto išėjimo parametro išvestinė  $dY_a(t)/dt < 0$ , todėl reguliatoriuje yra nustatomos koeficientų vertės  $K_{pn}$ ,  $K_{in}$ , suderintos objekto dinamikai kai  $\tau = 5$ . Vertinant kiekybiškai, aPI reguliatorius taikymas tiriamiems objektams leido 1,6–2,5 karto sumažinti valdymo sistemos atsako pereinamojo proceso trukmę ir 7 kartus perreguliuvimą.

Nuostatos reikšmė realiose automatinio valdymo sistemose retai keičiasi, dažniausiai valdymo sistemą nuolat trikdo pasikeitimai, vadinami trikdžiais. Todėl svarbu nagrinėti sistemos veikimą, kai joje nuostatos vertė nesikeičia, bet gali atsirasti neigiamas ( $D(t) < 0$ ) arba teigiamas ( $D(t) > 0$ ) trikdys (1.7 pav.). Buvo ištirti objektų  $G_5(s)$  ir  $G_6(s)$  valdymo sistemų atsakai į vienetinius teigiamus ir neigiamus objekto trikdžius. Gauti tyrimų rezultatai, kai naudojamas PI ir aPI realizuojantis (2.3) algoritmas, reguliatoriai, pateikti 2.6–2.9 paveiksluose.



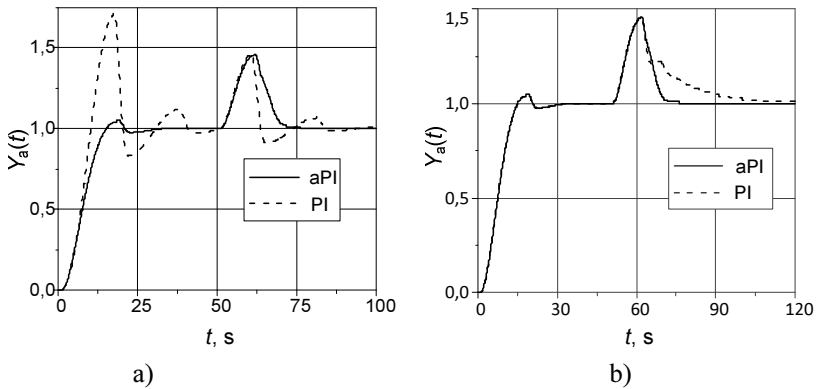
**2.6 pav.** Valdymo sistemos su PI ir aPI, realizuojančiu algoritmą (2.3), reguliatoriais, atsakas į vienetinį nuostatos šuolį, po kurio seka vienetinis teigiamas trikdys, kai yra valdomas objektas  $G_5(s)$ . PI reguliatoriaus parametrai priderinti atvejams kai  $\tau = 1$  (a) ir  $\tau = 5$  (b)

**Fig. 2.6.** Set point unit step response followed by the positive unit load disturbance of control system with plant  $G_5(s)$ , based on aPI controller, which implements algorithm (2.3), and PI controller adjusted for dynamics of plant associated with  $\tau = 1$  (a) and  $\tau = 5$  (b)

Pirmu atveju (2.6a, 2.7b pav.) aPI reguliatoriaus darbas lyginamas su PI reguliatoriumi, kurio koeficientai yra parinkti pagal valdomojo objekto persdavimo funkciją, kurią jis turi valdomajam parametru didėjant. Šiuo atveju abu reguliatoriai duoda panašius rezultatus. Tačiau atsakai į teigiamą trikdį skiriasi. aPI reguliatorius leidžia pasiekti iki 1,2 karto trumpesnę atsako pereinamojo proceso trukmę nei PI reguliatorius. Tai įvyksta dėl to, kad veikiant teigiamam trikdžiui valdomojo objekto parametro išvestinė keičia ženklą, todėl aPI koeficientų vertės persijungia į kitas (2.3), priderintas siekiant gauti mažą atsako į trikdį pereinamojo proceso trukmę (priderintas valdomojo objekto dinamikai, kurią jis turi valdomajam parametru mažėjant).

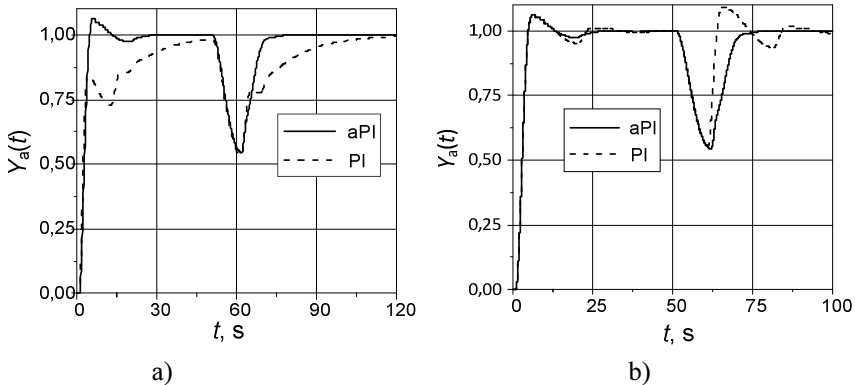
Kai PI reguliatoriaus parametrai priderinti minimaliai atsako į teigiamą trikdžio šuolį pereinamojo proceso trukmei gauti (2.6b, 2.7a pav.), tuomet, priklausomai nuo objekto dinamikos asimetrijos pobūdžio, išauga atsako į nuostatos šuolį pereinamojo proceso trukmė (2.6b pav.) arba perreguliavimas (2.7a pav.).

Valdymo sistemos atsako į teigiamą nuostatos šuolį, po kurio seka neigiamas trikdys, pereinamieji procesai pateikti 2.8 ir 2.9 paveiksluose.



**2.7 pav.** Valdymo sistemos su PI ir aPI, realizuojančiu algoritmą (2.3), reguliatoriais, atsakas į vienetinį nuostatos šuolį, po kurio seka vienetinis teigiamas trikdys, kai yra valdomas objektas  $G_6(s)$ . PI reguliatoriaus parametrai priderinti atvejams kai  $\tau = 1$  (a) ir  $\tau = 5$  (b)

**Fig. 2.7.** Set point unit step response followed by the positive unit load disturbance of control system with plant  $G_6(s)$ , based on aPI controller, which implements algorithm (2.3), and PI controller adjusted for dynamics of plant associated with  $\tau = 1$  (a) and  $\tau = 5$  (b)



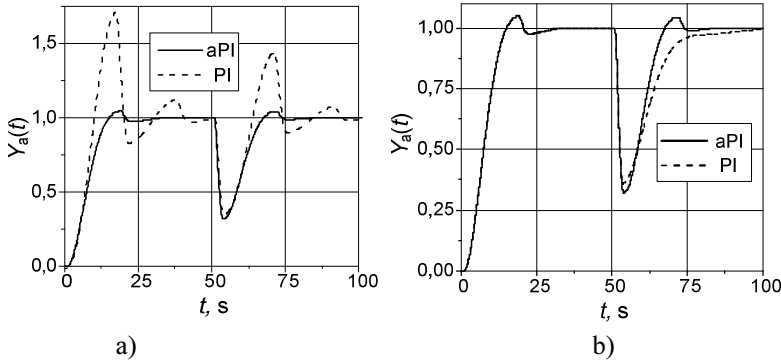
**2.8 pav.** Valdymo sistemos su PI ir aPI, realizuojančiu algoritmą (2.3), reguliatoriais, atsakas į vienetinį nuostatos šuolį, po kurio seka vienetinis neigiamas trikdys, kai yra valdomas objektas  $G_5(s)$ . PI reguliatoriaus parametrai priderinti atvejams kai  $\tau = 1$  (a) ir  $\tau = 5$  (b)

**Fig. 2.8.** Set point unit step response followed by the negative unit load disturbance of control system with plant  $G_5(s)$ , based on aPI controller, which implements algorithm (2.3), and PI controller adjusted for dynamics of plant associated with  $\tau = 1$  (a) and  $\tau = 5$  (b)

Matome, kad trimis atvejais (2.8a,b ir 2.9a pav.) aPI reguliatorius leidžia, priklausomai nuo valdomojo objekto asimetrijos pobūdžio, pasiekti 1,75–4 karto trumpesnę pereinamojo proceso trukmę (2.8b) ir 14 kartų mažesnę perreguliuoti-



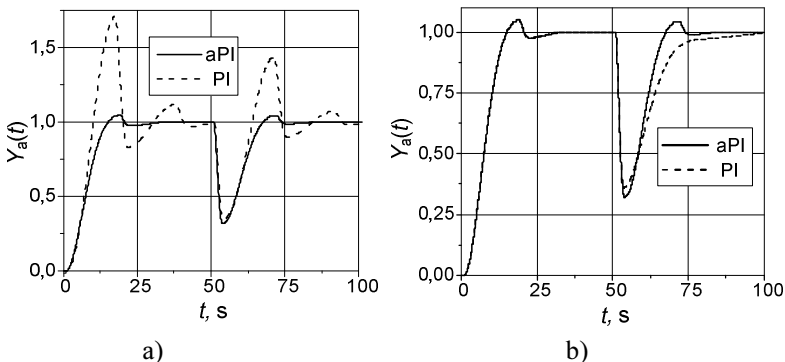
mą (2.9a pav.). Atvejui, pateiktam 2.9b paveiksle, valdymo sistemos atsako perėjimo proceso trukmė PI ir aPI reguliatoriams sutampa, todėl šiuo atveju aPI reguliatorius, lyginant su PI, neleidžia pagerinti valdymo kokybės rodiklių.



**2.9 pav.** Valdymo sistemos su PI ir aPI, realizuojančiu algoritmą (2.3), reguliatoriais, atsakas į vienetinį nuostatos šuolį, po kurio seka vienetinis neigiamas trikdys, kai yra valdomas objektas  $G_6(s)$ . PI reguliatoriaus parametrai priderinti atvejams kai  $\tau = 1$  (a) ir  $\tau = 5$  (b)

**Fig. 2.9.** Set point unit step response followed by the negative unit load disturbance of control system with plant  $G_6(s)$ , based on aPI controller, which implements algorithm (2.3), and PI controller adjusted for dynamics of plant associated with  $\tau = 1$  (a) and  $\tau = 5$  (b)

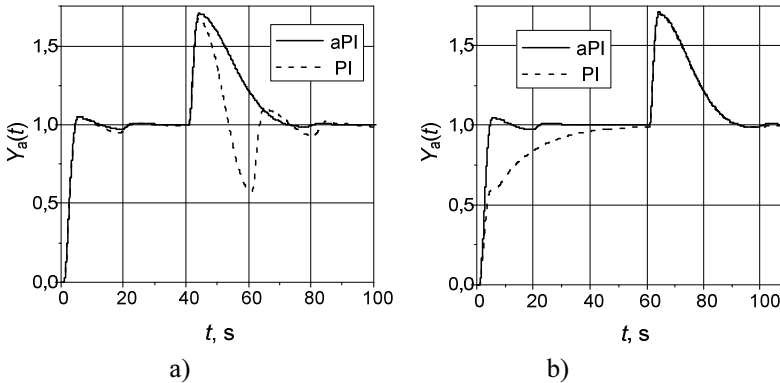
Vertinant kiekybiškai, aPI reguliatorius, realizuojantis algoritmą (2.3) tiriameiems objektams su asimetrine dinamika, lyginant su PI reguliatoriumi, leido 1,2–2 kartus sumažinti atsako į trikdžius perėjimo proceso trukmę.



**2.10 pav.** Asimetrinės dinamikos objektų  $G_5(s)$  (a) ir  $G_6(s)$  (b) valdymo sistemos su aPI reguliatoriumi, realizuojančiu algoritmą (2.4), atsakas į teigiamą ir neigiamą nuostatos  $Y_d(t)$  šuolius

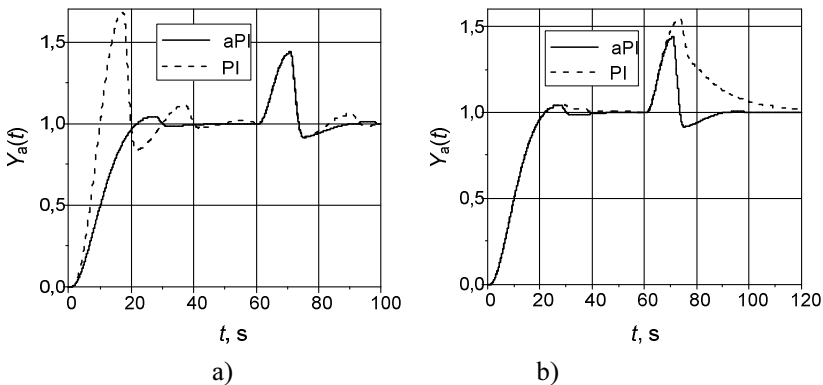
**Fig. 2.10.** Set point unit step response followed by the  $Y_d(t)$  drop of the control system with plants  $G_5(s)$  (a) and  $G_6(s)$  (b) based on the aPI controller, which implements algorithm (2.4)

Objektų su asimetrine dinamika  $G_5(s)$  ir  $G_6(s)$  valdymo sistemų, kai valdymui naudojamas aPI reguliatorius, realizuojantis (2.4) valdymo algoritmą, tyrimų rezultatai pateikti 2.10–2.14 paveiksluose (A. Baskys, V. Zlosnikas 2006d).



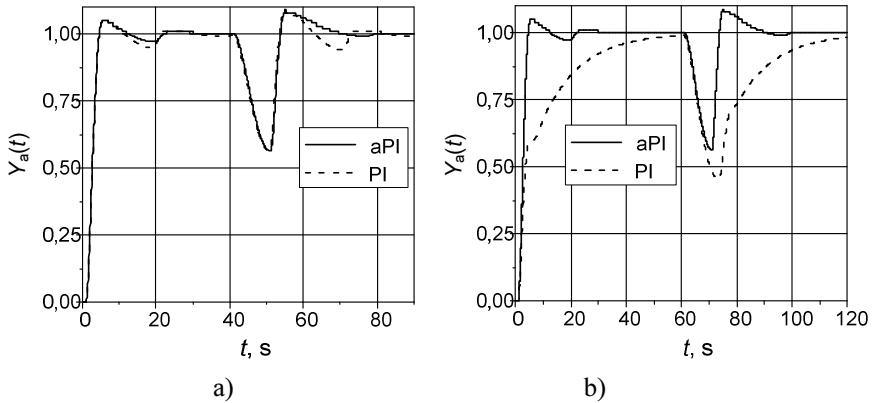
**2.11 pav.** Valdymo sistemos su PI ir aPI, realizuojančiu algoritmą (2.4), reguliatoriais, atsakas į vienetinį nuostatos šuolį, po kurio seka vienetinis teigiamas trikdys, kai yra valdomas objektas  $G_5(s)$ . PI reguliatoriaus parametrai priderinti atvejams kai  $\tau = 1$  (a) ir  $\tau = 5$  (b)

**Fig. 2.11.** Set point unit step response followed by the positive unit load disturbance of control system with plant  $G_5(s)$ , based on aPI controller, which implements algorithm (2.4), and PI controller adjusted for dynamics of plant associated with  $\tau = 1$  (a) and  $\tau = 5$  (b)



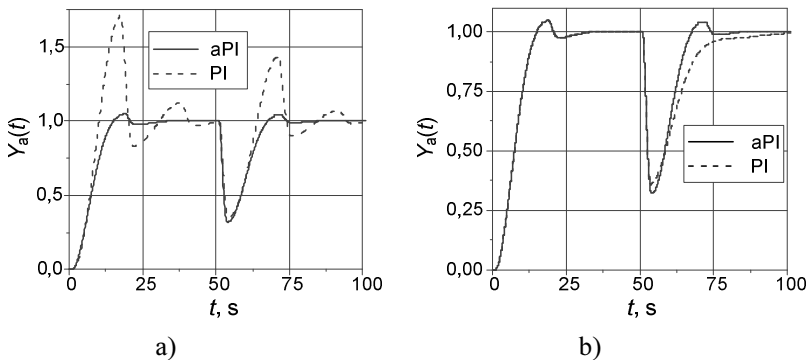
**2.12 pav.** Valdymo sistemos su PI ir aPI, realizuojančiu algoritmą (2.4), reguliatoriais, atsakas į vienetinį nuostatos šuolį, po kurio seka vienetinis teigiamas trikdys, kai yra valdomas objektas  $G_6(s)$ . PI reguliatoriaus parametrai priderinti atvejams kai  $\tau = 1$  (a) ir  $\tau = 5$  (b)

**Fig. 2.12** Set point unit step response followed by the positive unit load disturbance of control system with plant  $G_6(s)$ , based on aPI controller, which implements algorithm (2.4), and PI controller adjusted for dynamics of plant associated with  $\tau = 1$  (a) and  $\tau = 5$  (b)



**2.13 pav.** Valdymo sistemos su PI ir aPI , realizuojančiu algoritmą (2.4), reguliatoriais, atsakas į vienetinį nuostatos šuolį, po kurio seka vienetinis neigiamas trikdys, kai yra valdomas objektas  $G_5(s)$ . PI reguliatoriaus parametrai priderinti atvejams kai  $\tau = 1$  (a) ir  $\tau = 5$  (b)

**Fig. 2.13.** Set point unit step response followed by the negative unit load disturbance of control system with plant  $G_5(s)$ , based on aPI controller, which implements algorithm (2.4), and PI controller adjusted for dynamics of plant associated with  $\tau = 1$  (a) and  $\tau = 5$  (b)



**2.14 pav.** Valdymo sistemos su PI ir aPI , realizuojančiu algoritmą (2.4), reguliatoriais, atsakas į vienetinį nuostatos šuolį, po kurio seka vienetinis neigiamas trikdys, kai yra valdomas objektas  $G_6(s)$ . PI reguliatoriaus parametrai priderinti atvejams kai  $\tau = 1$  (a) ir  $\tau = 5$  (b)

**Fig. 2.14.** Set point unit step response followed by the negative unit load disturbance of control system with plant  $G_6(s)$ , based on aPI controller, which implements algorithm (2.4), and PI controller adjusted for dynamics of plant associated with  $\tau = 1$  (a) and  $\tau = 5$  (b)

Iš gautų valdymo sistemų atsakų pereinamųjų procesų matome, kad aPI reguliatorius, realizuojantis (2.4) algoritmą (perjungiantis reguliatoriaus koeficientų vertes kai keičiasi valdymo paklaidos  $e(t)$  ženklas), lyginant su PI reguliato-

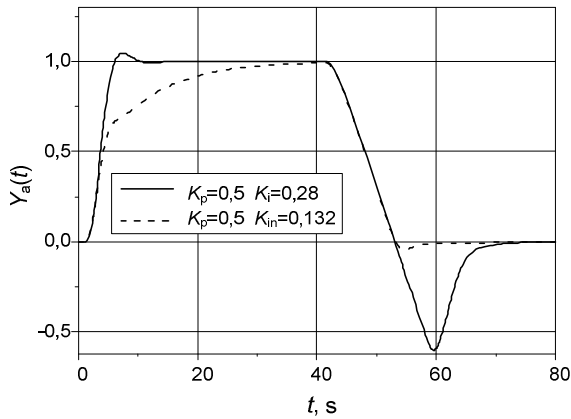
riumi, leidžia sumažinti pereinamojo proceso trukmes ir perreguliuojimą. Gautų pereinamųjų procesų trukmės ir perreguliuojimai sutampa su analogiškų parametrų vertėmis, gautomis naudojant aPI reguliatorių, realizuojantį (2.3) algoritmą (palyginkite kreives pateiktas 2.5–2.9 paveiksluose su atitinkamomis kreivėmis pateiktomis 2.10–2.14 paveiksluose).

### 2.3. Objektų su vykdiklio tempo ribojimo asimetrija valdymas asimetriniu proporciniu-integraliniu reguliatoriumi

Vykdiklis (angl. *actuator*) yra sudedamoji automatinio valdymo sistemos dalis, skirta ryšiu tarp valdiklio ir valdomojo objekto suderinti. Paprastai jis keičia valdymo signalą, formuojamą valdiklio, į kitą fizikinį dydį, kuriuo yra veikiamas valdomasis objektas. Vykdiklio pavyzdžiu gali būti dažnio keitiklis, generuojantis trifazę kintamąją įtampą su keičiamu dažniu, kuria yra maitinamas asinchroninis variklis. Šiuo atveju, valdiklis savo išėjimo signalu valdydamas dažnio keitiklio generuojamos trifazės įtampos dažnį, valdo variklio, kuris yra valdomojo objekto dalis, sukimosi greitį ir tuo pačiu – to objekto parametą, pavyzdžiui oro slėgį vėdinimo sistemoje arba vandens slėgį vandens tiekimo sistemoje. Kadangi vykdiklio energetinės galimybės yra baigtinės, jis negali momentaliai pakeisti valdomojo objekto parametro. Dėl šios priežasties vykdiklis iššaukia tempo ribojimą (angl. *rate limitation*). Jei vykdiklis yra santykinai lėtas, tempo ribojimas turi būti įvertintas kuriant valdymo sistemą. Valdomojo objekto su išskirtu vykdikliu struktūrinė schema pateikta 1.3 paveiksle., o jo atsako į impulsinį poveikį pavyzdys – 1.4 paveiksle.

Vykdiklis yra charakterizuojamas išėjimo parametro  $U_a(t)$  didėjimo ir mažėjimo tempo ribojimo vertėmis RSR ir FSR. Nagrinėjamu atveju RSR ir FSR vertės yra skirtingos, todėl valdymo sistemos dinamika yra skirtinga  $Y_a(t)$  didėjant ir mažėjant. Tokiomis savybėmis dažnai pasižymi minėti aukščiau dažnio keitikliai naudojami pavarų su asinchroniniais varikliais valdymui. Juose tempo (generuojamos kintamosios įtampos dažnio laiko išvestinės) leistina ribinė vertė gali būti skirtinga dažniui, o tuo pačiu ir variklio sukimosi greičiui, didėjant ir mažėjant. Ją apsprendžia dažnio keitiklio išėjime naudojamų puslaidininkinių prietaisų baigtinės energetinės galimybės. Kintantis vykdiklio tempo ribojimas keičia sistemos dinaminis parametrus. Tokia sistema turi asimetrinę dinamiką, todėl PI reguliatoriai neleidžia pasiekti gerų tokių sistemų valdymo kokybės rodiklių.

Objekto su vykdiklio dinamikos asimetrija valdymo sistemos su PI reguliatoriumi atsakas į nuorodos vienetinį impulsą pateiktas 2.15 paveiksle.



**2.15 pav.** Objekto  $G_7(s) = e^{-1s}/(s+1)^2$ , su vykdykliu, kurio tempo ribojimo vertės  $RSR = 0,5$ ,  $FSR = -0,1$ , valdymo sistemos su PI reguliatoriumi atsakas į nuorodos vienetinį impulsinį pokytį. Regulatoriaus koeficientai proporcinis ( $K_p$ ) ir integralinis ( $K_i$ ) nustatyti valdomojo objekto su vykdykliu dinamikai, kurią jis turi valdomajam parametrai  $Y_a(t)$  didėjant (ištininė linija) ir mažėjant (brūkšninė linija)

**Fig.2.15.** Set point unit pulse response of the control system based on the PI controller with the plant that has the following parameters: transfer function  $G_7(s) = e^{-1s}/(s+1)^2$ , actuator parameters  $RSR = 0.5$ ,  $FSR = -0.1$ . The controller constants proportional ( $K_p$ ) and integral ( $K_i$ ) are adjusted to dynamics of the plant, which corresponds to the rise (solid line) and fall (dashed line) of the plant output parameter  $Y_a(t)$

Matome, kad PI reguliatorius neleidžia pasiekti tuo pat metu kokybiško valdymo sistemos atsako pereinamojo proceso valdomajam parametrai didėjant ir mažėjant.

Objektų, kurių asimetrinę dinamiką nulemia vykdyklio tempo ribojimas, valdymui turi būti naudojami reguliatoriai su keičiamais parametrais arba specialios struktūros reguliatoriai, pavyzdžiui reguliatorius su įsisiūbavimo reiškinio ( angl. *windup*) slopinimu.

Darbe objektų su vykdyklio tempo ribojimo asimetrija valdymui siūloma naudoti Proporcini-asiimetrinį-Integralinį (PaI) reguliatorių. Jis yra atskiras aPI reguliatoriaus atvejis, kai perjungiama tik integralinio nario koeficiento vertė, o proporcinio nario koeficientas yra pastovus. Šis reguliatorius leidžia pasiekti gerų valdymo sistemų su vykdyklio tempo ribojimo asimetrija valdymo kokybės rodiklių. Regulatorius buvo tiriamas modeliuojant ir eksperimentiškai. Tyrimo rezultatai palyginti su rezultatais, gautais naudojant PI reguliatorių su klasikine lygiagrečiąja struktūra ir PI reguliatorių su įsisiūbavimo reiškinio slopinimu.

PaI reguliatoriaus algoritmas yra šis (A. Baskys, V. Zlosnikas 2009a, 2009b):

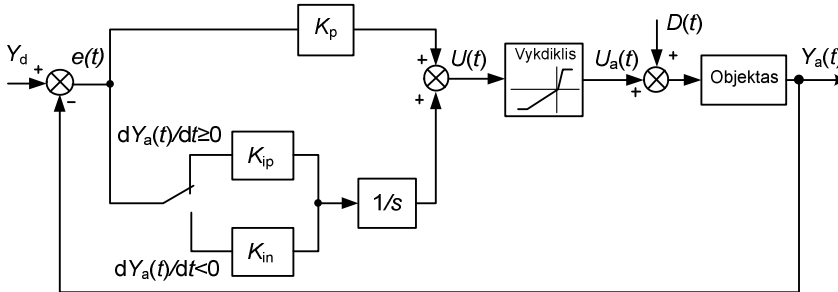
$$U(t) = K_p e(t) + \int_0^t K_i(\tau) e(\tau) d\tau,$$

$$K_i(\tau) = K_{ip} \quad | \quad dY_a(t)/dt \geq 0, \quad (2.5)$$

$$K_i(\tau) = K_{in} \quad | \quad dY_a(t)/dt < 0,$$

čia  $K_p$  yra reguliatoriaus proporcinio nario koeficientas,  $K_{ip}$  ir  $K_{in}$  yra integralinio nario koeficientų reikšmės, naudojamos, atitinkamai,  $Y_a(t)$  didėjant ir mažėjant.

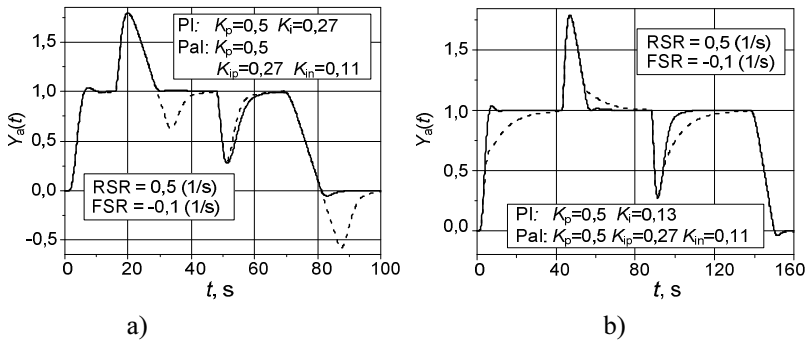
Objekto su vykdikliu, turinčiu tempo ribojimo asimetriją, valdymo sistemos, kurioje naudojamas PaI reguliatorius, struktūrinė schema pateikta 2.16 paveiksle. Joje  $U_a(t)$  yra vykdiklio išėjimo parametras,  $D(t)$  yra valdomojo objekto trikdys.



**2.16 pav.** Valdymo sistemos su PaI reguliatoriumi struktūrinė schema  
**Fig. 2.16.** The block diagram of the control system based on the PaI controller

Dinaminių procesų modeliavimo programa Simulink buvo tiriamas valdymo sistemos su PaI reguliatoriumi (2.16 pav.) atsakas į vienetinį nuostatos  $Y_d(t)$  impulsą ir teigiamą bei neigiamą vienetinius valdomojo objekto trikdžius  $D(t)$ . Buvo analizuojama sistema su tiesiniu objektu  $G_7(s) = e^{-1s}/(s+1)^2$ . Tyrimo rezultatai buvo palyginti su rezultatais, kai valdymo sistemoje naudojamas PI reguliatorius su klasikine lygiagrečiąja struktūra (A. Baskys, V. Zlosnikas 2009a). Reguliatorių parametrai buvo derinami siekiant minimalią pereinamųjų procesų trukmę. Gauti rezultatai, taip pat vykdiklio, valdomojo objekto ir reguliatorių parametrai, pateikti 2.17 paveiksle.

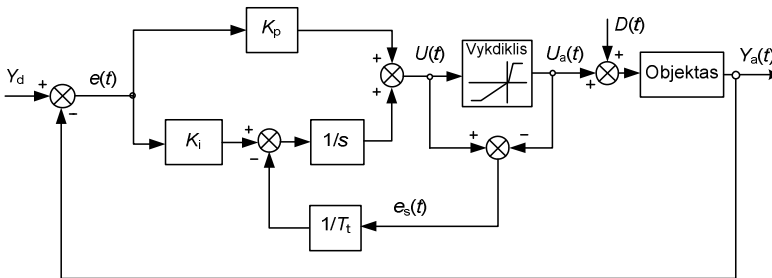
Iš jų matosi, kad PaI reguliatorius, lyginant su PI, užtikrina aukštesnius sistemos valdymo kokybės rodiklius, t.y. leidžia gauti 1,7–6 kartų trumpesnius atsako į nuostatos šuolį pereinamuosius procesus ir iki 10 kartų mažesni perreguliuojimą, taip pat 1,7 karto trumpesnes atsakų į trikdžius pereinamųjų procesų trukmes.



**2.17 pav.** Objekto  $G_7(s) = e^{-1s}/(s+1)^2$  su vykdyklio tempo ribojimu valdymo sistemos su PaI (išstinė linija) ir PI (brūkšninė linija), regulatoriais atsakas į nuorodos vienetinį impulsinį pokytį ir valdomojo objekto vienetinius teigiamą ir neigiamą trikdžius. PI regulatoriaus parametrai nustatyti valdomojo objekto su vykdykliu dinamikai, kurią jis turi valdomajam parametru didėjant (a) ir mažėjant (b)

**Fig. 2.17.** Set point unit pulse and load disturbance response of control system of the plant  $G_7(s) = e^{-1s}/(s+1)^2$  with the actuator rate limitation based on the PaI (solid lines) and PI (dashed lines) controllers. The PI controller parameters are adjusted to dynamics of the plant, which corresponds to the rise (a) and fall (b) of the plant output parameter

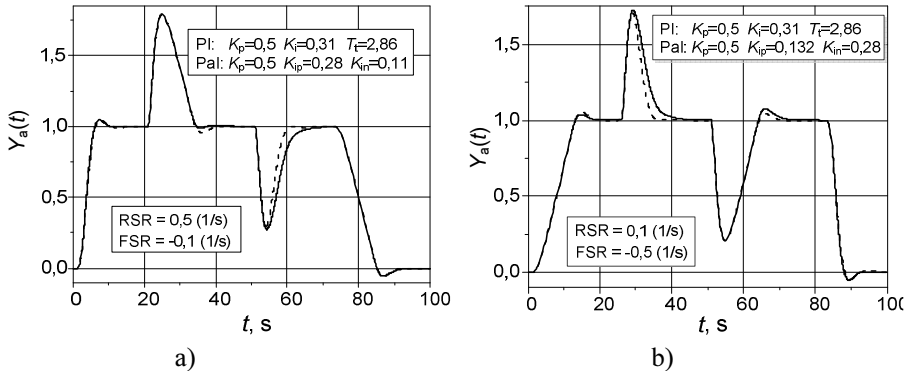
Valdymo sistemos su vykdyklio tempo ribojimu kokybės rodikliams pagerinti dažnai naudojamas PI reguliatorius su išsisiūbavimo reiškinio slopinimu (angl. *PI controller with the antiwindup*). Tokio valdyklio struktūrinė schema pateikta 2.18 paveiksle (C. Bohn, D. P. Atherton 1995; H.-B. Shin 1998); Jame, atsiradus vykdyklio tempo ribojimui, yra sukuriamas signalas  $e_s(t)$ . Šis signalas, padaugintas iš koeficiento  $1/T_t$ , yra atimamas iš signalo, einančio į integralinį narį. Tokiu būdu, atsiradus vykdyklio tempo ribojimui, yra silpninamas reguliatoriaus integralinio nario poveikis vykdykliui.



**2.18 pav.** Valdymo sistemos, kurioje naudojamas PI reguliatorius su išsisiūbavimo reiškinio slopinimu, struktūrinė schema

**Fig. 2.18.** The block diagram of the control system based on the PI controller with the tracking anti-windup

Tokios valdymo sistemos atsakas į vienetinį nuostatos impulsą, po kurio seka teigiamas ir neigiamas vienetiniai valdomojo objekto trikdžiai, pateiktas 2.19 paveiksle. Ten pat pateikti ir valdymo sistemos atsakai kai naudojamas PaI reguliatorius.



**2.19 pav.** Objekto  $G_7(s) = e^{-1s}/(s+1)^2$  su vykdyklio tempo ribojimu valdymo sistemos su PaI (išstinė linija) ir PI su įsisiūbavimo reiškinio slopinimu (brūkšninė linija) reguliatoriais atsakas į nuorodos vienetinį impulsinį pokytį ir valdomojo objekto vienetinius teigiamą ir neigiamą trikdžius, esant įvairioms vykdyklio tempo ribojimo  $RSR$  ir  $FSR$  vertėms

**Fig. 2.19.** Set point unit pulse and load disturbance response of control system of the plant  $G_7(s) = e^{-1s}/(s+1)^2$  with the actuator rate limitation based on the PaI (solid lines) and PI with the tracking anti-windup (dashed lines) controllers for various values of actuator parameters  $RSR$  and  $FSR$

Matome, kad PI reguliatorius su įsisiūbavimo reiškinio slopinimu, lyginant su PaI reguliatoriumi, leidžia tik nežymiai (10%) sumažinti atsako į trikdį pereinamojo proceso trukmę. Tačiau PI reguliatorius su įsisiūbavimo reiškinio slopinimu, lyginant su PaI reguliatoriumi, turi du trūkumus: jam realizuoti būtina papildomai matuoti vykdyklio išėjimo parametą  $U_a(t)$  (palyginkite 2.16 pav. ir 2.18 pav.); šis valdiklis, šalia įprastų PI reguliatoriams parametų, turi papildomą  $T_i$  parametą, kuris yra nežinomas daugeliui pramonėje dirbančių inžinierių, todėl komplikuoja jiems reguliatoriaus suderinimą valdomojo objekto dinamikai.

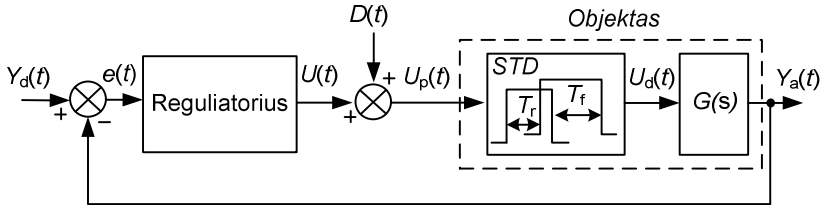
## 2.4. Objektų su vėlinimo asimetrija valdymas asimetriniu proporciniu-integriniu reguliatoriumi

Vėlinimu pasižymi valdomieji objektai, kuriuose yra pernešama medžiaga. Tokiomis savybėmis, pavyzdžiui, pasižymi vandens arba suskystintų dujų tiekimo sistemos. Uždelsimas yra nulemasas tuo, kad transportuojama medžiaga negali momentaliai būti pernešta, pvz. vanduo iš gręžinio negali būti be vėlinimo pateiktas vartotojui. Atskirais atvejais valdomojo objekto atsako vėlinimas gali



būti skirtingas valdomajam parametru didėjant ir mažėjant, t.y. objekto dinamikos asimetriją gali nulemti objekto vėlinimo asimetrija.

Objekto su vėlinimo asimetrija valdymo sistemos struktūrinė schema, kurioje valdomajame objekte yra išskirtas vėlinimo blokas, pateikta 2.20 paveiksle.



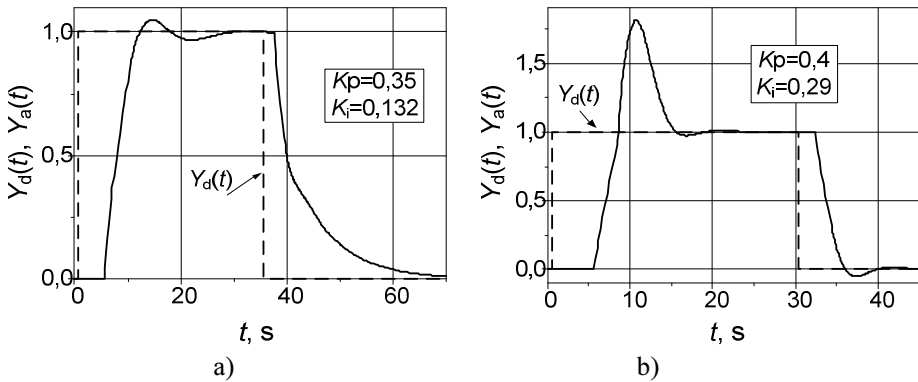
**2.20 pav.** Objekto su vėlinimo asimetrija valdymo sistemos struktūrinė schema  
**Fig. 2.20.** The block diagram of the control system of the plant with the response delay asymmetry

Panagrinėkime objektą su atsako uždelimo asimetrija, kurio perdavimo funkcija yra ši:

$$G_a(s) = \frac{e^{-Ts}}{(s+1)}, \quad T = \begin{cases} 5, & dU_p(t)/dt \geq 0 \\ 2, & dU_p(t)/dt < 0 \end{cases} \quad (2.6)$$

$$G_b(s) = \frac{e^{-Ts}}{(s+1)}, \quad T = \begin{cases} 2, & dU_p(t)/dt \geq 0 \\ 5, & dU_p(t)/dt < 0 \end{cases} \quad (2.7)$$

Objekto  $G_a(s)$  atsakas į vienetinį impulsinį poveikį pateiktas 1.2 paveiksle. Šio objekto su vėlinimo asimetrija valdymo sistemos atsako į vienetinį nuostatos impulsą pereinamieji procesai kai naudojamas PI reguliatorius pateikti 2.21 paveiksle. Jei PI reguliatoriaus koeficientai priderinti objekto dinamikai atitinkančiai vėlinimą  $T = 5$  s, kurį objektas turi kai jo įėjimo signalas yra didinamas (2.21 a pav.), tuomet gauname ilgą atsako pereinamojo proceso trukmę ( $t_r = 25$  s) objekto parametru mažėjant. Jei reguliatoriaus koeficientai priderinti objekto dinamikai atitinkančiai atsako vėlinimą  $T = 2$  s, kurį objektas turi kai jo įėjimo signalas yra mažinamas (2.21 b pav.), tuomet gauname didelį perregulavimą ( $M = 80\%$ ), objekto parametru didėjant.

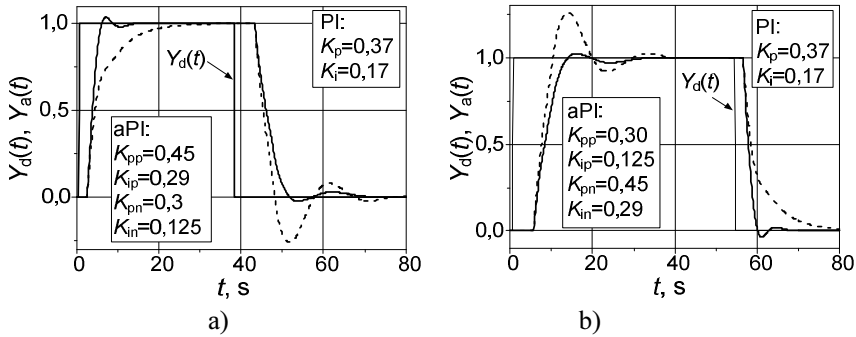


**2.21 pav.** Objekto  $G_a(s)$  su vėlinimo asimetrija valdymo sistemos atsakas į nuostatos impulsinį pokytį kai valdymui naudojamas PI reguliatorius su skirtingais koeficientais

**Fig. 2.21.** The set point pulse response of the control system of the plant  $G_a(s)$  with the response delay asymmetry based on the PI controller with various parameters

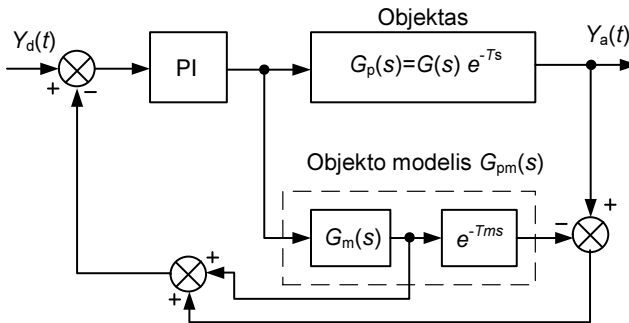
Tam tikrą kompromisą tarp atsako perinamojo proceso, objekto parametrai didėjant ir mažėjant, galima pasiekti naudojant tarpines PI reguliatoriaus koeficientų  $K_p$  ir  $K_i$  vertes (2.22 pav., brūkšninė linija). Ten pat pateikti atsako pereinamieji procesai, kai naudojamas aPI reguliatorius, realizuojantis algoritmą (2.4). Matome, kad šiuo atveju aPI reguliatorius, lyginant su PI reguliatoriumi leidžia pereinamojo proceso trukmę sumažinti 2,2–3,5 karto, o perreguliaciją 5 kartus. Objektų su atsako vėlinimu valdymui dažnai naudojamas Smito prediktorius (*Smith predictor*), kurio principai aprašyti (O.J.M. Smith 1959)(C. C. Hang *et al* 1980; D. M. Schneider 1988; T. Hagglund 1992; M. R. Matausek, a.D. Micic 1996) o jo modifikacijos – (D. L. Laughlin, M. Morari 1987; J.-J. Huang, D. B. DeBra 2000; W. Zhang *et al* 2002) darbuose. Reguliatoriaus taikymas konkrečių objektų valdymui pateiktas (J. F. Donoghue 1977; G. K. McMillan 1983) darbuose.

Smito prediktorius turi realizuoti objekto modelį, kuriame turi būti išskirtas vėlinimo narys  $e^{-Ts}$ . PI reguliatoriaus su Smito prediktoriumi struktūrinė schema pateikta 2.23 paveiksle.



**2.22 pav.** Valdymo sistemos atsakai į nuostatos impulsinį pokytį naudojant aPI (ištiesinė linija) ir PI (brūkšninė linija) reguliatorius, kai valdomi objektai su vėlinimo asimetrija  $G_b(s)$  (a) ir  $G_a(s)$  (b)

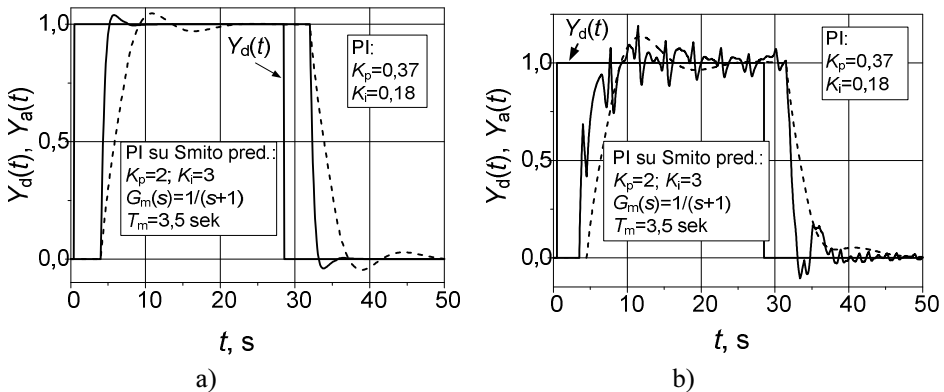
**Fig. 2.22.** The set point unit pulse response of the control system of the plants with the response delay asymmetry  $G_b(s)$  (a) ir  $G_a(s)$  (b) based on the aPI (solid lines) and PI (dashed lines) controllers



**2.23 pav.** Valdymo sistemos, kurioje naudojamas PI reguliatorius su Smito prediktoriumi, struktūrinė schema

**Fig. 2.23.** The block diagram of the control system based on the PI controller with the Smith predictor

Objekto modelis, kurį turi realizuoti reguliatorius turi tenkinti sąlygą  $G_m(s) = G(s)$  ir  $T_m = T$  (O.J.M. Smith 1959). Lyginant su įprastiniu PI reguliatoriumi, PI reguliatoriaus su Smito numatytoju leidžia sumažinti objekto su atsako vėlinimu valdymo sistemos atsako pereinamojo proceso trukmę. Tokios valdymo sistemos atsako į impulsinį poveikį pereinamieji procesai, valdant objektą su simetrine ir asimetrine dinamika, pateikti atitinkamai – 2.24a ir 2.24b paveiksluose.



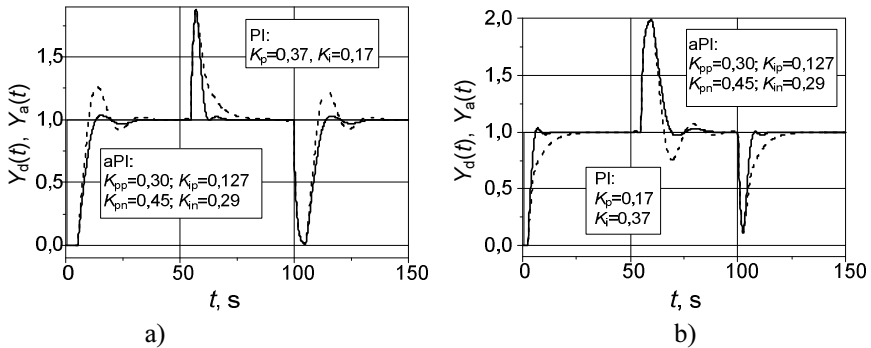
**2.24 pav.** Objekto su vėlinimo asimetrija valdymo sistemos atsakas į nuostato impulsinį pokytį kai valdymui naudojami PI su Smito prediktoriumi (ištisinė linija) ir PI (brūkšninė linija) reguliatoriai. Valdomojo objekto perdavimo funkcija  $G(s) = e^{-T_s}/(s+1)$ , kur  $T = T_r = T_f = 3,5$  s (objektas be atsako uždelimo asimetrijos) (a);  $T = T_r = 4$  s (kai  $U(t)/dt \geq 0$ ) ir  $T = T_f = 3$  s (kai  $U(t)/dt < 0$ ) (objektas su atsako uždelimo asimetrija) (b)

**Fig. 2.24.** The set point pulse response of the control system based on the PI controller with the Smith predictor (solid line) and a PI controller (dashed line). The plant transfer function  $G(s) = e^{-T_s}/(s+1)$ , where  $T = T_r = T_f = 3.5$  s (plant with symmetric response delay) (a);  $T = T_r = 4$  s when  $U(t)/dt \geq 0$  and  $T = T_f = 3$  s when  $U(t)/dt < 0$  (plant with the response delay asymmetry) (b)

Matome, kad valdant objektą su simetrine dinamika, t. y. kai  $T$  pastovus, PI reguliatoriaus su Smito numatytoju leidžia pasiekti trumpesnę pereinamojo proceso trukmę, lyginant su įprastiniu PI reguliatoriumi (2.24a pav.). Tačiau net esant nedidelei objekto atsako vėlinimo asimetrijai ( $T_r = 4$  s,  $T_f = 3$  s) valdymo sistema su Smito prediktoriumi pradeda dirbti nestabiliai (2.24b pav., ištisinė linija). Šiuo atveju valdymo sistema su įprastiniu PI reguliatoriumi dirba stabiliai (2.24b pav., brūkšninė linija), tačiau dėl objekto dinamikos asimetrijos padidėja pereinamojo proceso trukmė ir perreguliavimas (palyginkite pereinamuosius procesus pateiktus brūkšnine linija 2.23a ir 2.23b pav.)

Objekto su vėlinimo asimetrija valdymo sistemos atsako į trikdžius tyrimų rezultatai pateikti 2.25 paveiksle. Matome, kad aPI reguliatorius, lyginant su PI reguliatoriumi, leidžia sumažinti 1,4–3,1 karto atsako į trikdžius pereinamojo proceso trukmę.

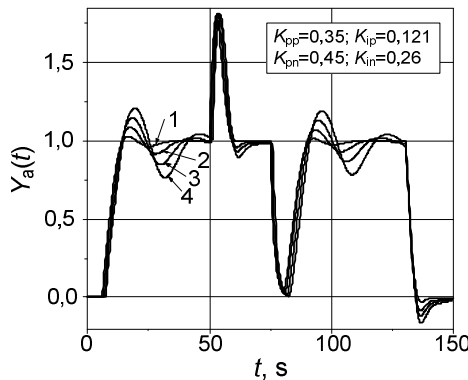
Atlkti analizuojamos valdymo sistemos su aPI reguliatoriumi tyrimai, esant valdomojo objekto vėlinimo neapibrėžtumui. Gauti tyrimų rezultatai, kai objekto atsako vėlinimas padidėja iki 30%, pateikti 2.26 paveiksle.



**2.25 pav.** Valdymo sistemos atsakas į nuostatos vienetinį šuolį, po kurio seka vienetinis teigiamas ir neigiamas tikdys, naudojant aPI (ištiesinė linija) ir PI (brūkšninė linija) reguliatorius, kai valdomi objektai su vėlinimo asimetrija  $G_a(s)$  (a) ir  $G_b(s)$  (b)

**Fig. 2.25.** The set point unit step response followed by the positive and negative unit load disturbances of the control system of the plants  $G_a(s)$  (a) and  $G_b(s)$  (b) with the response delay asymmetry based on the aPI (solid line) and PI (dashed line) controllers

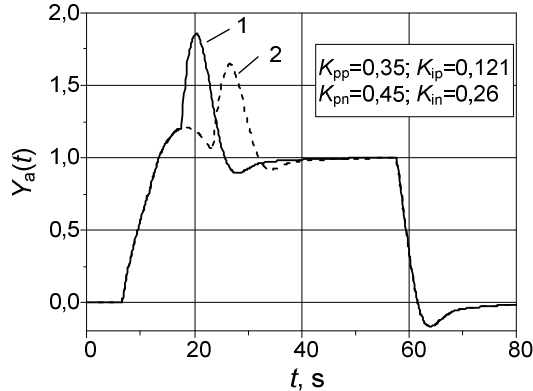
Matome, kad tirto objekto su atsako vėlinimo asimetrija valdymo sistema su aPI reguliatoriumi, esant nagrinėtam objekto parametro neapibrėžtumui, veikia stabiliai.



**2.26 pav.** Valdymo sistemos, kurios perdavimo funkcija yra  $G_8(s) = e^{-Ts}/(1,5s+1)$  atsakas į nuostato impulsinį pokytį ir teigiamą bei neigiamą trikdžius, kai valdymui naudojamas aPI reguliatorius. Valdomojo objekto parametrai: 1 – objekto atsako uždelsimas  $T = 5$  s kai  $U(t)/dt \geq 0$  ir  $T = 2$  s kai  $U(t)/dt < 0$ ; 2 –  $T$  padidintas 10%; 3 – 20%; 4 – 30%

**Fig. 2.26.** The set point unit pulse and unit load disturbances response of the control system of the plant  $G_8(s) = e^{-Ts}/(1.5s+1)$  based on the aPI controller: 1 – plant response delay  $T = 5$  s when  $U(t)/dt \geq 0$  and  $T = 2$  s when  $U(t)/dt < 0$ ; 2 –  $T$  is increased by 10%; 3 – by 20%; 4 – by 30%

Taip pat valdymo sistema ištirta atvežui, kai esant padidintam objekto atsako vėlinimui, nepasibaigus sistemos atsako į nuostatos šuolį pereinamajam procesui, sistemą veikia teigiamas trikdys (2.27 pav.).



**2.27 pav.** Valdymo sistemos atsakas į nuostatos impulsinį pokytį ir teigiamą trikdį, kai valdymui naudojamas aPI reguliatorius, kai trikdys paveikia sistemą momentu  $t = 13$  s (1) ir  $t = 18$  s (2). Valdomas objektas

$$G_s(s) = e^{-Ts}/(1,5s+1), \text{ kur } T = 6,5 \text{ s kai } U(t)/dt \geq 0 \text{ ir } T = 2,6 \text{ s kai } U(t)/dt < 0$$

**Fig. 2.27.** The set point unit pulse and positive unit load disturbance response of the control system based on the aPI controller: 1 – load disturbance affects the control system at moment  $t = 13$  s, 2 – at moment  $t = 18$  s.

Plant  $G_s(s) = e^{-Ts}/(1.5s+1)$ , where  $T = 6.5$  s when  $U(t)/dt \geq 0$  and  $T = 2.6$  s when  $U(t)/dt < 0$

Matome (2.27 pav.), kad sistema veikia stabiliai net tuo atveju, kai išėjimo parametrai pasiekus maskimalų nuokrypį nuo nuostatos, ją veikia trikdys.

## 2.5. Asimetrinis proporcinis-integralinis-diferencialinis reguliatorius ir jo taikymas objektų su asimetrine dinamika valdymui

Praktikoje PID reguliatorius yra naudojamas rečiau nei PI. Priežastis ta, kad diferencialinis narys daro PID reguliatorių jautrų elektromagnetiniams trukdžiams, taip pat dėl didesnio parametru kiekio jį sudėtingiau priderinti valdomajam objektui. Tačiau, jei būtina maža pereinamojo proceso trukmė ir reguliatorių neveikia elektromagnetiniai trukdžiai, tikslinga naudoti PID reguliatorių. Šiame skyriuje panagrinėsime asimetrinio PID (aPID) reguliatoriaus taikymą objektų su laiko pastoviosios asimetrija valdymui. Pasiūlytas aPID reguliatoriaus algoritmas, kai reguliatoriaus parametrai perjungiami keičiantis valdymo paklaidos

ženklui, kuris yra analogiškas aPI algoritmui (2.4), yra šis (A. Baskys, V. Zlosnikas 2006a):

$$U(t) = K_p(t) \cdot e(t) + \int_{t_0}^t K_i(\tau) \cdot e(\tau) d\tau + K_d(t) \frac{de(t)}{dt},$$

$$K_p(t) = K_{pp}, K_i(\tau) = K_{ip}, K_d(t) = K_{dp} \mid e(t) \geq 0,$$

$$K_p(t) = K_{pn}, K_i(\tau) = K_{in}, K_d(t) = K_{dn} \mid e(t) < 0,$$
(2.8)

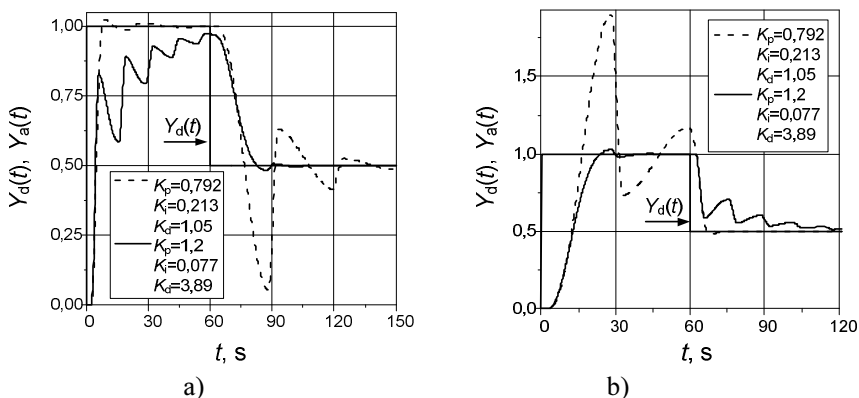
čia  $K_{pp}$ ,  $K_{ip}$ ,  $K_{dp}$  ir  $K_{pn}$ ,  $K_{in}$ ,  $K_{dn}$  yra proporcinio, integralinio ir diferencialinio reguliatoriaus narių koeficientai, kurie veikia kai valdymo paklaida yra teigiama ir neigiama;  $t_0$  yra laiko momentas kai algoritmas pradeda veikti. Kai  $K_{pp} = K_{pn}$ ,  $K_{ip} = K_{in}$  ir  $K_{dp} = K_{dn}$ , aPID valdymo algoritmas sutampa su PID algoritmu.

Ištirkime objektų su  $\tau$  asimetrija valdymo sistemą, kurioje naudojami PID ir aPID reguliatoriai. Nagrinėjamų valdomųjų objektų perdavimo funkcijos yra šios:

$$G_9(s) = \frac{e^{-2s}}{(\tau s + 1)^3}, \quad \tau = \begin{cases} 1, & dY_a(t)/dt \geq 0 \\ 5, & dY_a(t)/dt < 0 \end{cases},$$
(2.9)

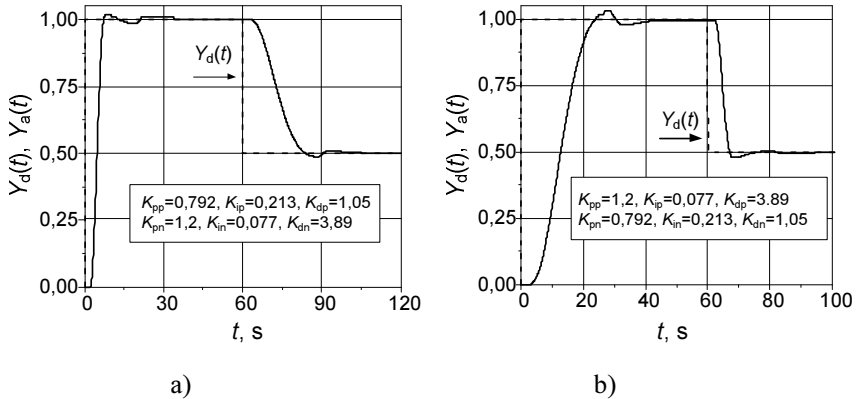
$$G_{10}(s) = \frac{e^{-2s}}{(\tau s + 1)^3}, \quad \tau = \begin{cases} 5, & dY_a(t)/dt \geq 0 \\ 1, & dY_a(t)/dt < 0 \end{cases}.$$
(2.10)

Tiriamų objektų su  $\tau$  asimetrija valdymo sistemos atsakų į nuostatos šuolius pereinamieji procesai, kai naudojami PID ir aPID reguliatoriai pateikti 2.28 ir 2.29 paveiksluose. Ten pat pateikti ir reguliatorių parametrai.

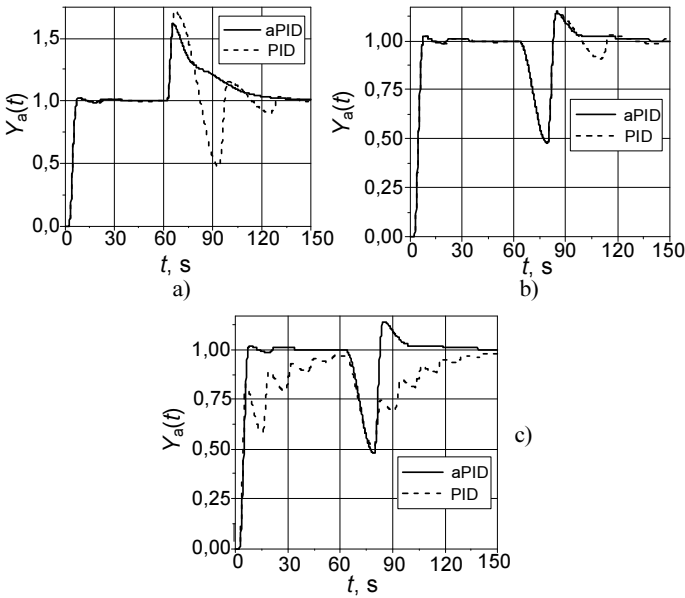


**2.28 pav.** Objektų  $G_9(s)$  (a) ir  $G_{10}(s)$  (b) su laiko pastoviosios asimetrija valdymo sistemos atsakas į nuostatos  $Y_d(t)$  šuolius, naudojant PID reguliatorių

**Fig. 2.28.** The unit step response followed by the  $Y_d(t)$  drop of the control system with plants  $G_9(s)$  (a) and  $G_{10}(s)$  (b) based on the PID controller



**2.29 pav.** Objektų  $G_9(s)$  (a) ir  $G_{10}(s)$  (b), su laiko pastoviosios asimetrija, valdymo sistemos atsakas į nuostatos  $Y_d(t)$  šuolius, naudojant aPID reguliatorių  
**Fig. 2.29.** The set point unit step response followed by the  $Y_d(t)$  drop of the control system with plants  $G_9(s)$  (a) and  $G_{10}(s)$  (b) based on the aPID controller



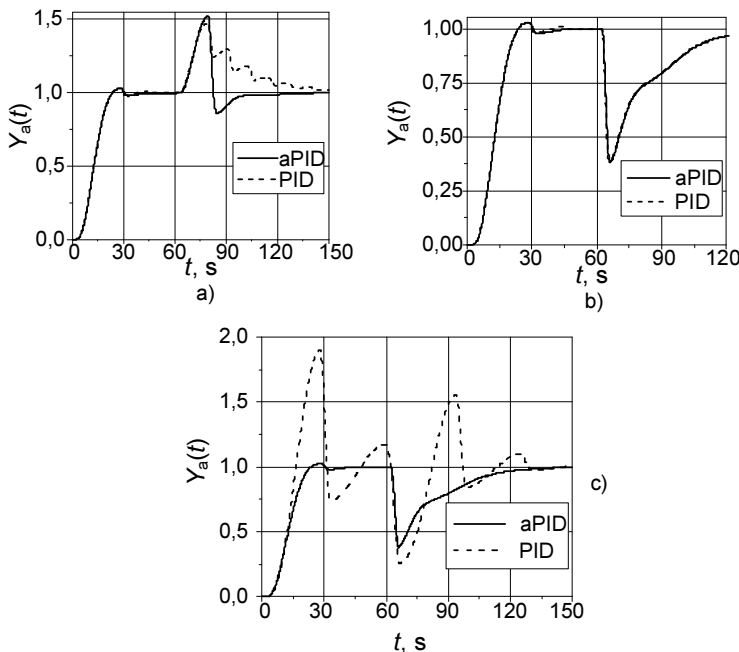
**2.30 pav.** Objekto  $G_9(s)$  valdymo sistemos su PID ir aPID reguliatoriais atsakas į vienetinį nuostatos šuolį, teigiamą (a) ir neigiamą (b, c) trikdžius kai PID reguliatoriaus parametrais priderinti atvejams:  $\tau = 1$  (a, b) ir  $\tau = 5$  (c)  
**Fig. 2.30.** Set point unit step response followed by the positive (a) and negative (b, c) unit load disturbances of the control system with plant  $G_9(s)$  based on PID and aPID controllers. The PID controller is adjusted for dynamics of the plant  $G_9(s)$  associated with  $\tau = 1$  (a, b) and  $\tau = 5$  (c)



Matome, kad taikant objektų su laiko pastoviosios asimetriją  $G_9(s)$  ir  $G_{10}(s)$  valdymui aPID reguliatorių, lyginant su PID reguliatoriumi, pasiekama iki 6 kartų trumpesnė atsako į nuostatos šuolius pereinamojo proceso trukmė ir iki 20 kartų mažesnis perreguliavimas (palyginkite atsako į nuostatos pokytį pereinamuosius procesus pateiktus 2.28 paveiksle su pateiktais 2.29 paveiksle).

Valdymo sistemos atsako į trikdžius tyrimo rezultatai pateikti 2.30 ir 2.31 paveiksluose.

Matome, kad aPID reguliatorius, lyginant su PID reguliatoriumi, tirtiems objektams su laiko pastoviosios asimetriją leidžia sumažinti 1,2–2 kartus atsako teigiamus trikdžius pereinamojo proceso trukmę.



**2.31 pav.** Objekto  $G_{10}(s)$  valdymo sistemos su PID ir aPID reguliatoriais atsakas į teigiamą (a) ir neigiamą (b, c) trikdžius kai PID reguliatoriaus parametrais priderinti atvejams:  $\tau = 5$  (a, b) ir  $\tau = 1$  (c)

**Fig. 2.31.** Set point unit step response followed by the positive (a) and negative (b, c) unit load disturbances of the control system with plant  $G_{10}(s)$  based on PID and aPID controllers. The PID controller is adjusted for dynamics of the plant associated with  $\tau = 5$  (a, b) and  $\tau = 1$  (c)

## 2.6. Antrojo skyriaus išvados

1. Sukurti asimetriniai aPI ir aPID regulatoriai skiriasi nuo PI ir PID tuo, kad tai yra regulatoriai su keičiamais koeficientais, kurių vertės yra diskretiškai pakeičiamos, keičiantis valdomojo parametro laiko išvestinės arba valdymo paklaidos ženklui.

2. Sukurtų aPI ir aPID reguliatorių derinimo procesas yra ypatingas tuo, kad jų koeficientų parinkimo metu į reguliatorių galima žiūrėti kaip į du atskirus PI arba PID reguliatorius, derinamus prie dviejų atskirų tiesinių objektų. Todėl asimetrinius reguliatorius patrauklu naudoti pramonėje, nes inžinieriai žino PI ir PID reguliatorių derinimo principus.

3. aPI reguliatorius, realizuojantis valdymo algoritmą, kuriame reguliatoriaus parametrai perjungiami keičiantis valdomojo parametro laiko išvestinės ženklui, tirtiems objektams su laiko pastoviosios asimetrija ( $\tau = 1$  s, kai  $Y_a(t)/dt \geq 0$ ,  $\tau = 5$  s, kai  $Y_a(t)/dt < 0$ ) leidžia, lyginant su PI reguliatoriumi, 1,6–4 karto sumažinti atsako į nuostatos pokyčius pereinamojo proceso trukmę, iki 14 kartų – perreguliuojimą ir 1,2–2 kartus – atsako į teigiamus trikdžius pereinamojo proceso trukmę. Tokius pat kiekybinius rezultatus leidžia pasiekti ir aPI reguliatorius, kuriame reguliatoriaus parametrai perjungiami keičiantis valdymo paklaidos ženklui.

4. PaI reguliatorius, kuris yra atskiras aPI reguliatoriaus atvejis, lyginant su PI reguliatoriumi, užtikrina aukštesnius objektų su vykdiklio tempo ribojimo asimetrija valdymo kokybės rodiklius. Tirtiems objektams, kurių  $RSR = 0,5$ ,  $FSR = -0,1$ , jis leidžia gauti 1,7–6 kartus trumpesnius valdymo sistemos atsako į nuostatos pokyčius pereinamuosius procesus, 10 kartų mažesnę perreguliuojimą ir 1,7 karto mažesnę atsako į teigiamus trikdžius pereinamojo proceso trukmę.

5. PI reguliatorius su įsisiūbavimo reiškinio slopinimu, lyginant su PaI reguliatoriumi, leidžia nežymiai (10%) sumažinti atsako į trikdį pereinamąjį procesą. Tačiau PI reguliatorius su įsisiūbavimo reiškinio slopinimu, lyginant su PaI reguliatoriumi, turi trūkumus: jam realizuoti būtina papildomai matuoti vykdiklio išėjimo parametą; šis reguliatorius, šalia įprastų PI reguliatoriams parametų, turi papildomą parametą, kuris yra nežinomas daugeliui pramonėje dirbančių inžinierių, todėl komplikuoja jiems reguliatoriaus derinimą valdomojo objekto dinamikai.

6. aPI reguliatorius, lyginant su PI reguliatoriumi, tirtiems objektams su vėlinimo asimetrija ( $T = 2$  s, kai  $U(t)/dt \geq 0$  ir  $T = 5$  s, kai  $U(t)/dt < 0$ ) leidžia 2,2–3,5 karto sumažinti valdymo sistemos atsako į nuostatos pokyčius pereinamojo proceso trukmę, 5 kartus – perreguliuojimą ir 1,4–3,1 kartus – atsako į teigiamus trikdžius pereinamojo proceso trukmę.

7. Naudojant objekto su vėlinimo asimetrija valdymui PI reguliatorių su Smito prediktoriumi (angl. *Smith Predictor*), valdymo sistema, esant 25% tiriamojo objekto atsako vėlinimo asimetrijai, dirba nestabiliai.

8. aPID reguliatorius, lyginant su PID reguliatoriumi, tirtiems objektams su laiko pastoviosios asimetrija ( $\tau = 1$  s, kai  $Y_a(t)/dt \geq 0$ ,  $\tau = 5$  s, kai  $Y_a(t)/dt < 0$ ) leidžia 6 kartus sumažinti valdymo sistemos atsako į nuostatos pokyčius pereinamojo proceso trukmę, 20 kartų – perreguliavimą ir 1,2–2 kartus – atsako į teigiamus trikdžius pereinamojo proceso trukmę.



---

## Asimetrinių reguliatorių taikymas tiesinių objektų valdymui

Skyriuje aprašomi asimetrinių reguliatorių aPI, aPID ir PID reguliatoriaus su nuostatos stebėjimu tyrimo rezultatai, taikant juos tiesinių objektų valdymui, siekiant sumažinti valdymo sistemos atsako į trikdžius pereinamojo proceso trukmę.

Skyriaus tematika paskelbti 4 autoriaus straipsniai (A. Baskys, V. Zlosnikas 2006b, 2006c, 2008; A. Baskys *et al* 2008).

### 3.1. Asimetrinio proporcinio-integralinio reguliatoriaus taikymas tiesinių objektų valdymui

Pagrindinis valdymo sistemos tikslas – palaikyti nustatytą valdomojo parametro vertę, keičiantis valdomojo objekto darbo sąlygoms (objektą veikiant trikdžiams). Valdymo sistemos atsako į trikdį pereinamojo proceso trukmė ir perreguliavimas turi būti galimai mažesni, t.y. turi būti pasiektas galimai geresnis trikdžio filtravimas (angl. *load disturbance rejection*) (C. L. Phillips, J. M. Parr 1984; H. Panagopoulos *et al* 1997; J. Chandrasekar *et al* 2006; C. K. Lee, N. M. Kwok 1993; N. Hur *et al* 2000; A. Soltoggio 2004).

Iš kitos pusės yra pageidautina, kad ir sistemos atsako į nuostatos pokyti pereinamojo proceso trukmė ir perreguliuojimas būtų galimai mažesni.

Lygtis surišanti valdomąjį objekto parametru su nuostata ir trikdžiu yra ši (A. Baskys *et al* 2008)

$$Y_a(s) = Y_d(s) \frac{G_c(s) G_p(s)}{1 + G_c(s) G_p(s)} + D(s) \frac{G_p(s)}{1 + G_c(s) G_p(s)}, \quad (3.1)$$

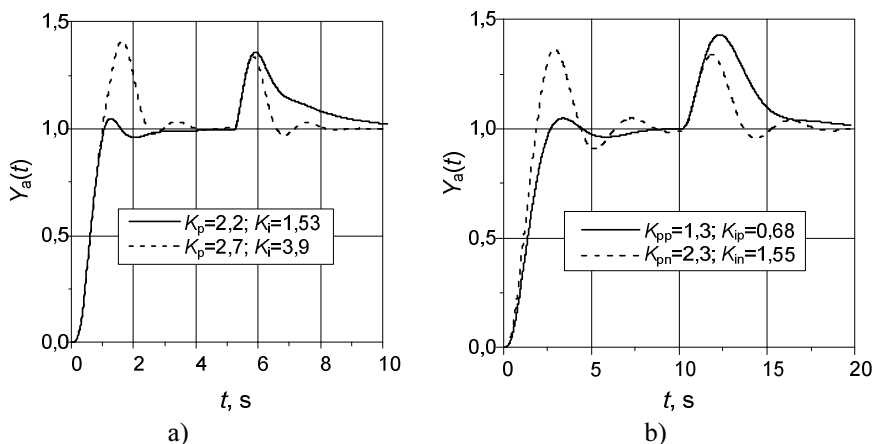
čia  $G_c(s)$  reguliatoriaus perdavimo funkcija,  $G_p(s)$  objekto perdavimo funkcija,  $D(s)$  trikdys. Kuo mažesnė nario  $G_p(s)/[(1 + G_c(s)G_p(s))]$  vertė žemiems dažniams, tuo geresnis yra pasiekiamas trikdžio filtravimas, t.y. didėjant  $G_c(s)$  vertei žemiems dažniams, trikdžio filtravimas gerėja. Naudojant PI reguliatorių, tai gali būti pasiekama didinant reguliatoriaus koeficientų  $K_p$  ir  $K_i$  vertes. Tačiau  $G_c(s)$  vertė apspendžia ir atsaką į nuostatos pokyti (3.1). Didelės reguliatoriaus koeficientų vertės gali nulemti ilgą atsako į nuostatos pokyti pereinamąjį procesą ir didelį perreguliuojimą todėl, bendru atveju, reguliatoriaus parametru vertės, leidžiančios gauti kokybišką atsaką į nuostatos pokyti ir trikdį, nesutampa.

Daugumos pramonėje sutinkamų objektu dinamika gali būti aprašyta pirmos ir antros eilės perdavimo funkcijomis su uždelsimu (Y. Huang, S. Yasunobu 2000; G. J. Silva *et al* 2003). Analizuosime objektus kuriu perdavimo funkcijos yra šios (A. Baskys, V. Zlosnikas 2006b):

$$G_{11}(s) = \frac{e^{-0,3s}}{s+1}, \quad (3.2)$$

$$G_{12}(s) = \frac{e^{-0,2s}}{(s+1)^2}. \quad (3.3)$$

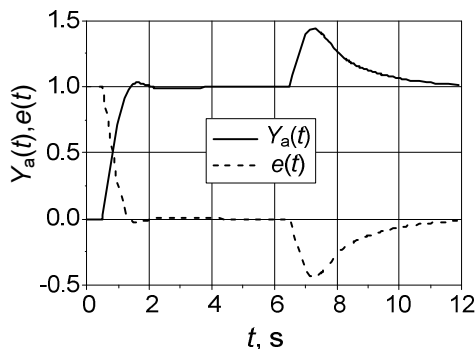
Šiu objektu uždarnosios valdymo sistemos (1.7 pav.), kurioje naudojamas PI reguliatorius, atsakai į nuostatos šuolį, po kurio seka teigiamas trikdys, gauti modeliuojant programa *Simulink*, pateikti 3.1 paveiksle. Vienu atveju reguliatoriaus koeficientai buvo parinkti taip, kad, kad gauti minimalią sistemos atsako į nuostatos šuolį pereinamojo proceso trukmę (ištisinė linija 3.1 pav.), kitu – atsako į trikdį (brūkšninė linija 3.1 pav.). Matome, kad nagrinėjamu atveju neįmanoma tuo pat metu pasiekti minimalios atsaku į nuostatos šuolį ir trikdį pereinamųjų procesu trukmės. Taip pat, parenkant reguliatoriaus koeficientus, siekiant trumpiausio atsako į trikdį trukmės, gauname didelį perreguliuojimą atsako į nuostatos šuolį metu.



**3.1 pav.** Valdymo sistemos su PI reguliatoriumi atsakai į vienetinį nuostatos šuolį, po kurio seka teigiamas vienetinis trikdys, skirtingoms reguliatoriaus koeficientų  $K_p$  ir  $K_i$  vertėms, kai valdomi objektai  $G_{11}(s)$  (a) ir  $G_{12}(s)$  (b)

**Fig. 3.1.** Unit step response followed by positive unit disturbance of control systems with plants  $G_{11}(s)$  (a) and  $G_{12}(s)$  (b) based on PI controller with different values of controller constants  $K_p$  and  $K_i$

Panagrinėkime valdymo paklaidos atsaką į nuostatos šuolį, po kurio seka teigiamas trikdys, pateiktą 3.2 paveiksle.



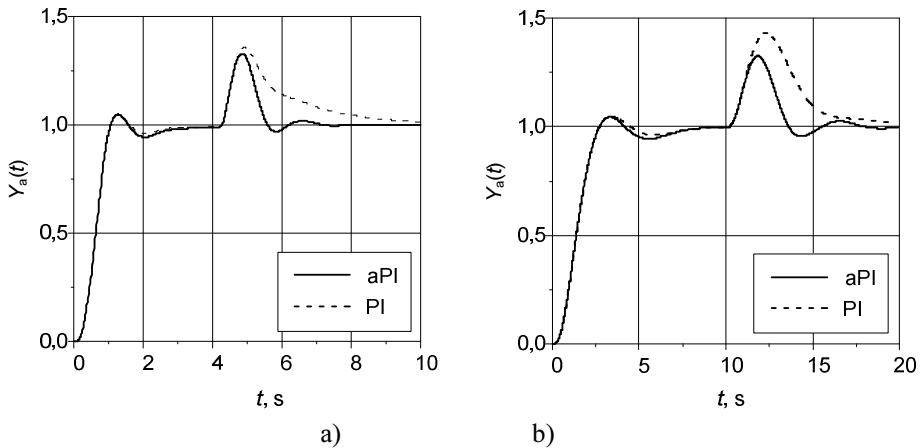
**3.2 pav.** Valdymo paklaidos ir valdomojo parametro atsakas į nuostatos šuolį, po kurio seka teigiamas trikdys

**Fig. 3.2.** The variation of control error and plant output during the set point unit step response followed by the positive unit load disturbance

Matome, kad atsako į nuostatos šuolį metu valdymo paklaida praktiškai visą laiką yra teigiama, o atsako į teigiamą trikdį metu – neigiama. Tai reiškia, kad norint tuo pat metu pasiekti kokybiško atsako į nuostatos šuolį ir į teigiamą trikdį tikslinga naudoti asimetrinius aPI ir aPID reguliatorius, realizuojančius (2.4)

ir (2.8) valdymo algoritmus, kuriuose koeficientų vertės perjungiamos keičiantis valdymo paklaidos ženklui.

Objektų  $G_{11}(s)$  ir  $G_{12}(s)$  valdymo sistemos su PI ir aPI reguliatoriais atsakai į vienetinį nuostatos šuolį, po kurio seka teigiamas vienetinis trikdys, pateikti 3.3 paveiksle.



**3.3 pav.** Valdymo sistemos su aPI ir PI reguliatoriais atsakai į vienetinį nuostatos šuolį, po kurio seka teigiamas vienetinis trikdys, kai valdomi objektai  $G_{11}(s)$  (a) ir  $G_{12}(s)$  (b)

**Fig. 3.3.** Unit step response followed by the positive unit disturbance of control systems with plants  $G_{11}(s)$  (a) and  $G_{12}(s)$  (b) based on aPI and PI controllers

PI reguliatoriaus koeficientai priderinti trumpiausiai atsako į nuostatos šuolį pereinamojo proceso trukmei pasiekti. Matome, kad aPI reguliatorius, lyginant su PI reguliatoriumi, leidžia tiriamiems objektams 1,5–3 kartus sumažinti atsako į teigiamą trikdį pereinamojo proceso trukmę, nebloginant atsako į nuostatos šuolį pereinamojo proceso kokybės rodiklių. Reguliatorių koeficientai pateikti 3.1 lentelėje.

**3.1 lentelė.** Reguliatorių koeficientų vertės

**Table 3.1.** Values of controller constants

Reguliatorius Objektas	aPI	PI
$G_{11}(s)$	$K_{pp}=2,2, K_{ip}=1,53, K_{pn}=2,7, K_{in}=3,9$	$K_p=2,2, K_i=1,53$
$G_{12}(s)$	$K_{pp}=1,3, K_{ip}=0,68, K_{pn}=2,3, K_{in}=1,55$	$K_p=1,3, K_i=0,68$



## 3.2. Asimetrinio proporcinio-integralinio-diferencialinio reguliatoriaus taikymas tiesinių objektų valdymui

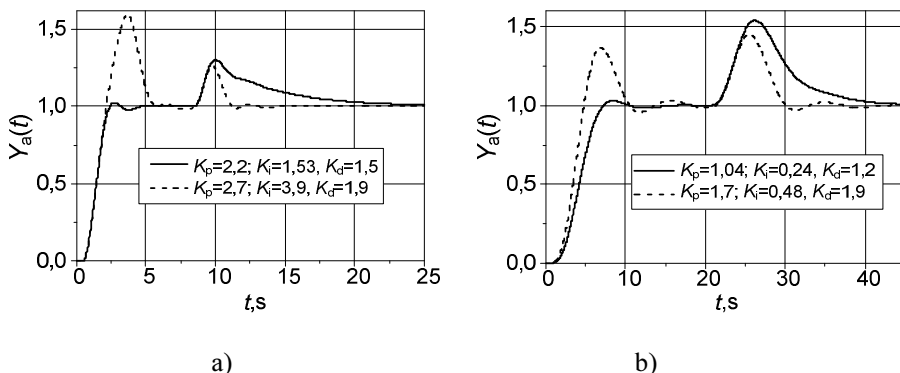
Norint pasiekti geresnio trikdžio filtravimo, valdant tiesinius objektus vietoje PID reguliatoriaus galima naudoti pasiūlytą aPID reguliatorių, realizuojantį valdymo algoritmą (2.8). Ištyrime valdymo sistemą su aPID reguliatoriumi, valdant tiesinius objektus, kurių perdavimo funkcijos yra šios:

$$G_{13}(s) = \frac{e^{-0,5s}}{s+1} \quad (3.4)$$

$$G_{14}(s) = \frac{1}{(s+1)^5}. \quad (3.5)$$

Šios perdavimo funkcijos aprašo tipinę pramonėje valdomų objektų dinamiką (H. Panagopoulos *et al* 1997; B. Kristiansson, B. Lennartson 2002; A. Baskys, V. Zlosnikas 2008).

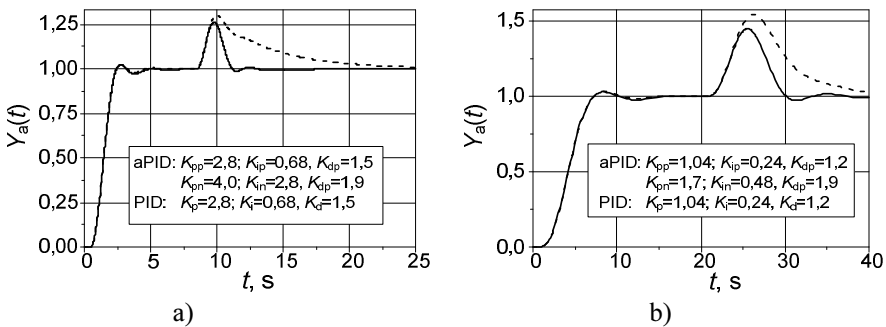
Objektų  $G_{13}(s)$  ir  $G_{14}(s)$  uždarnosios valdymo sistemos (1.7 pav.), kurioje naudojamas PID reguliatorius, atsakai į nuostatos šuolį, po kurio seka teigiamas trikdys, pateikti 3.4 paveiksle. (A. Baskys, V. Zlosnikas 2008). Vienu atveju reguliatoriaus koeficientai buvo parinkti taip, kad gauti kokybišką sistemos atsaką į nuostatos šuolį (ištininė linija 3.4 pav.), kitu – į trikdį (brūkšninė linija 3.4 pav.).



**3.4 pav.** Valdymo sistemos su PID reguliatoriumi atsakai į vienetinį nuostatos šuolį, po kurio seka teigiamas vienetinis trikdys, skirtingoms reguliatoriaus koeficientų  $K_p$ ,  $K_i$  ir  $K_d$  vertėms, kai valdomi objektai  $G_{13}(s)$  (a) ir  $G_{14}(s)$  (b).  
**Fig. 3.4.** Unit set point step response followed by positive unit load disturbance of the control system with plants  $G_{13}(s)$  (a) and  $G_{14}(s)$  (b) based on the PID controller with different values of constants  $K_p$ ,  $K_i$  and  $K_d$ .

Matome, kad nagrinėjamu atveju neįmanoma tuo pat metu pasiekti kokybiško sistemos atsako į nuostatos šuolį ir trikdį. PID reguliatoriaus galimybės šiuo atveju yra ribotos, nes jis turi mažai laisvės laipsnių, derinant jo parametrus valdomojo objekto dinamikai.

Objektų  $G_{13}(s)$  ir  $G_{14}(s)$  valdymo sistemos su PID ir aPID reguliatoriais atsakai į vienetinį nuostatos šuolį, po kurio seka teigiamas vienetinis trikdys pateikti 3.5 paveiksle. PID reguliatoriaus koeficientai priderinti trumpiausiai atsako į nuostatos šuolį pereinamojo proceso trukmei pasiekti. Matome, kad aPID reguliatorius, lyginant su PID reguliatoriumi, leidžia tiriamiems objektams 2–5 kartus sumažinti atsako į teigiamą trikdį trukmę, nebloginant atsako į nuostatos šuolį pereinamojo proceso kokybės rodiklių. Reguliatorių koeficientai pateikti 3.5 paveiksle.

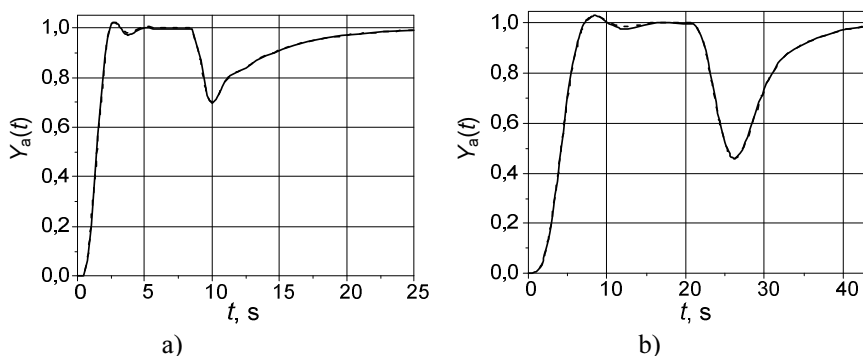


**3.5 pav.** Valdymo sistemos atsakai į vienetinį nuostatos šuolį, po kurio seka teigiamas vienetinis trikdys, valdant objektus  $G_{13}(s)$  (a) ir  $G_{14}(s)$  (b), kai naudojamas aPID (ištisinė linija) ir PID (brūkšninė linija) reguliatoriai

**Fig. 3.5.** Unit set point step response followed by the positive unit load disturbance of the control system with plants  $G_{13}(s)$  (a) and  $G_{14}(s)$  (b) based on aPID (solid line) and PID (dashed line) controllers

Kadangi aPID reguliatorius turi šešis, o ne tris, kaip PI reguliatorius, koeficientus, gali atrodyti, kad aPID reguliatorių yra komplikuoja priderinti valdomajam objektui. Faktiškai, jo derinimo metodika tokia pati kaip ir PID reguliatoriaus, nes koeficientų derinimo užduotis pasidalina į du atskirus etapus. Pirmajame etape derinami koeficientai  $K_{pp}$ ,  $K_{ip}$  ir  $K_{dp}$ , siekiant reikiamų atsako į nuostatos šuolį pereinamojo proceso parametrų, antrajame – derinami koeficientai  $K_{pn}$ ,  $K_{in}$  ir  $K_{dn}$ , siekiant reikiamų atsako į teigiamą trikdį pereinamojo proceso parametrų. Abu derinimo etapai atliekami žinomais PID reguliatorių derinimo metodais.

Taip pat buvo atlikti valdymo sistemos su aPID reguliatoriumi tyrimai, kai sistemą veikia neigiamas trikdys. Tyrimo rezultatai pateikti 3.6 paveiksle.



**3.6 pav.** Valdymo sistemos atsakai į vienetinį nuostatos šuolį, po kurio seka neigiamas vienetinis trikdys, valdant objektus  $G_{13}(s)$  (a) ir  $G_{14}(s)$  (b), kai naudojamas aPID (ištininė linija) ir PID (brūkšninė linija) reguliatoriai

**Fig. 3.6.** Unit set point step response followed by the negative unit load disturbance of the control system with plants  $G_{13}(s)$  (a) and  $G_{14}(s)$  (b) based on the aPID (solid line) and PID (dashed line) controllers

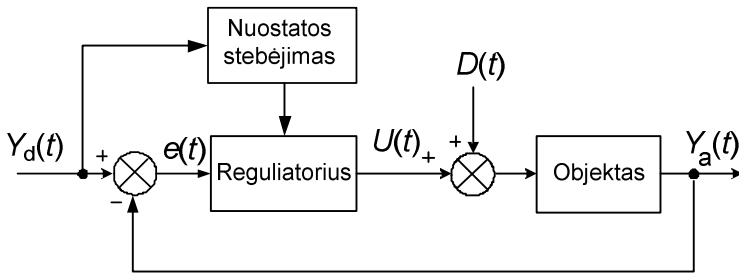
Gauti tyrimo rezultatai parodo, kad šiuo atveju pereinamieji procesai, tiek naudojant aPID, tiek PID reguliatorius, sutampa. Taip yra todėl, kad veikiant neigiamam trikdžiui, kaip ir nuostatos šuolio metu, valdymo paklaida visą laiką, išskyrus momentą kai  $Y_a(t) > Y_d$ , išlieka teigiama. Dėl šios priežasties aPID reguliatoriuje koeficientai  $K_{pn}$ ,  $K_{in}$ ,  $K_{dn}$  nėra įjungiami neigiamojo trikdžio metu.

### 3.3. Proporcinis-integralinis-diferencialinis reguliatorius su nuostatos stebėjimu

Atlikti asimetrinių aPI ir aPID reguliatorių tyrimai valdant tiesinius objektus parodė, kad jais, priešingai PI ir PID reguliatoriams, galima tuo pat metu pasiekti trumpiausią atsako į nuostatos pokytį ir atsako į teigiamą trikdį pereinamųjų procesų trukmes. Tačiau, tokiu atveju aPI ir aPID reguliatoriai neleidžia pasiekti trumpiausios atsako į neigiamą trikdį pereinamojo proceso trukmės, nes neigiamo trikdžio metu šiuose reguliatoriuose koeficientų vertės yra nustatomos trumpiausiai atsako į nuostatos šuolį pereinamojo proceso trukmei gauti.

Pasiekti trumpiausio pereinamojo proceso tiek atsako į nuostatos šuolį, tiek atsakų į teigiamą ir neigiamą trikdžius metu galima naudojant pasiūlytą PID reguliatorių su nuostatos stebėjimu (A. Baskys *et al* 2008). Šiam reguliatoriui yra teikiama ne tik informacija apie valdymo paklaidos vertę, kaip tai daroma valdymo sistemose su PI, PID, aPI ir aPID reguliatoriais, bet ir informacija apie nuostatos vertės pasikeitimą. Valdymo sistemos struktūrinė schema, kurioje naudojamas PID reguliatorius su nuostatos stebėjimu, pateikta 3.7 paveiksle. Reguliatorius struktūroje su nuostatos stebėjimu gali dirbti dviejuose režimuose:

atsako į nuostatos pokytį režime; atsako į trikdį režime. Pereinant iš vieno režimo į kitą yra pakeičiamos reguliatoriaus koeficientų vertės. Dažniausiai valdymo sistemą veikia trikdžiai, todėl reguliatorius pagal nutylėjimą dirba atsako į trikdį režime, t.y. su koeficientais priderintais trumpiausiam atsako į trikdį pereinamajam procesui gauti.



3.7. pav. Valdymo sistemos, kurioje naudojamas reguliatorius su nuostatos stebėjimu, struktūrinė schema

Fig. 3.7. The block diagram of the control system with the set point observation

Jei reguliatorius fiksuoja nuostatos pokytį, jis pradeda veikti atsako į nuostatos pokytį režime, t.y. pakeičia reguliatoriaus koeficientų vertes į tokias, prie kurių yra pasiekiamas trumpiausias atsako į nuostatos pokytį pereinamasis procesas. Regulatorius dirba šiame režime trukmę, kuri lygi pereinamojo proceso trukmei  $t_s$ , po to vėl yra gražinamas į atsako į trikdį režimą. PID reguliatoriaus su nuostatos stebėjimu algoritmas yra šis

$$U(t) = K_p(t) e(t) + \int_{t_0}^t K_i(\tau) e(\tau) d\tau + K_d(t) \frac{de(t)}{dt},$$

$$K_p(t) = K_{ps}, \quad K_i(\tau) = K_{is}, \quad K_d(t) = K_{ds} \quad | \quad t_c < t \leq t_c + t_s ;$$

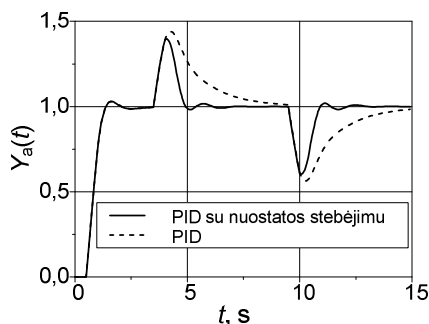
$$K_p(t) = K_{pd}, \quad K_i(\tau) = K_{id}, \quad K_d(t) = K_{dd} \quad | \quad t \leq t_c, \quad t > t_c + t_s,$$
(3.6)

čia  $K_{ps}$ ,  $K_{is}$ ,  $K_{ds}$  yra proporcinis, integralinis ir diferencialinis koeficientai, kurie veikia laiku kai reguliatorius dirba atsako į nuostatos pokytį režime, o  $K_{pd}$ ,  $K_{id}$ ,  $K_{dd}$  yra atitinkami koeficientai veikiantys atsako į trikdį režime,  $t_0$  laiko momentas kai algoritmas pradeda veikti,  $t_c$  nuostatos pokyčio fiksavimo laiko momentas. Koeficientai  $K_{ps}$ ,  $K_{is}$ ,  $K_{ds}$  derinami taip, kad gauti norimą atsako į nuostatos pokytį pereinamąjį procesą, koeficientai  $K_{pd}$ ,  $K_{id}$ ,  $K_{dd}$  – siekiant reikiamų atsako į trikdžius pereinamojo proceso parametru. Abu derinimo etapai atliekami žinomais PID reguliatorių derinimo metodais. PID reguliatorius su nuostatos stebėjimu buvo tiriamas *Simulink* programa, valdant tiesinius objektus, kurių perdavimo funkcijos pateiktos 3.2 lentelėje. Ten pat pateiktos ir reguliatorių koeficientų vertės.

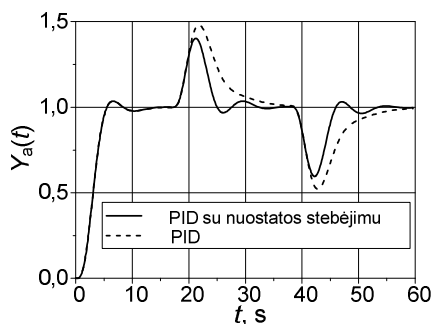
## 3.2 lentelė. PID regulatoriaus koeficientai

Table 3.2. PID controller constants

Valdymo sistemos struktūra	Valdomojo objekto perdavimo funkcija	
	$G_{16}(s) = e^{-0.5s}/(1+s)$	$G_{17}(s) = 1/(1+s)^4$
PID su nuostatos stebėjimu	$K_{ps} = 1,60$ $K_{is} = 1,17$ $K_{ds} = 0,20$ $K_{pd} = 2,60$ $K_{id} = 3,20$ $K_{dd} = 0,45$	$K_{ps} = 1,20$ $K_{is} = 0,32$ $K_{ds} = 0,90$ $K_{pd} = 1,90$ $K_{id} = 0,62$ $K_{dd} = 1,10$
PID	$K_p = 1,60$ $K_i = 1,17$ $K_d = 0,20$	$K_p = 1,20$ $K_i = 0,32$ $K_d = 0,90$



a)



b)

**3.8 pav.** Valdymo sistemos atsakai į vienetinį nuostatos šuolį, po kurio seka teigiamas ir neigiamas vienetiniai trikdžiai, valdant objektus  $G_{16}(s)$  (a) ir  $G_{17}(s)$  (b), kai naudojamas PID reguliatorius (brūkšninė linija) ir PID reguliatorius su nuostatos stebėjimu (ištisinė linija)

**Fig. 3.8.** The set point unit step response followed by positive and negative unit load disturbances of the control systems of plants  $G_{16}(s)$  (a) and  $G_{17}(s)$  (b) with PID controller and PID controller with the set point observation

Gauti atsakų pereinamieji procesai pateikti 3.8 paveiksle. Jie palyginti su pereinamaisiais procesais gautais naudojant PID reguliatorių. Matome, kad PID reguliatorius su nuostatos stebėjimu, lyginant su PID reguliatoriumi, leidžia tiriamiems objektams 2–3 kartus sumažinti atsako į teigiamą ir neigiamą trikdžius pereinamojo proceso trukmę, nebloginant atsako į nuostatos šuolį pereinamojo proceso kokybės rodiklių.

### 3.4. Trečiojo skyriaus išvados

1. Bendru atveju PI ir PID reguliatorių koeficientų vertės, prie kurių pasiekiamos trumpiausios atsako į nuostatos pokytį ir atsako į trikdį pereinamojo proceso trukmės, nesutampa.

2. aPI ir aPID reguliatoriai turi daugiau laisvės laipsnių, derinant juos valdomojo objekto dinamikai, todėl jie tuo pat metu leidžia pasiekti trumpiausią atsako į nuostatos pokytį ir atsako į teigiamą trikdį pereinamojo proceso trukmę.

3. aPI reguliatorius, lyginant su PI reguliatoriumi, leidžia tiriamiems tiesiniams objektams 1,5–3 kartus, o aPID reguliatorius, lyginant su PID reguliatoriumi, 2–6 kartus sumažinti atsako į teigiamą trikdį pereinamojo proceso trukmę, nebloginant atsako į nuostatos šuolį pereinamojo proceso kokybės rodiklių.

4. Atsako į neigiamą trikdį pereinamieji procesai, naudojant PID ir aPID reguliatorius sutampa, t.y. šiuo atveju aPID reguliatorius neturi privalumų, lyginant jį su PID reguliatoriumi.

5. PID reguliatorius su nuostatos stebėjimu, lyginant su PID reguliatoriumi, leidžia tiriamiems tiesiniams objektams 2–3 kartus sumažinti atsako į teigiamą ir neigiamą trikdžius pereinamojo proceso trukmę.

# 4

---

## Valdymo sistemų su asimetriniais reguliatoriais stabilumo analizė ir eksperimentinis tyrimas

Skyriuje aprašomi valdymo sistemų su asimetriniais reguliatoriais stabilumo tyrimai. Pateikti asimetrinių aPI ir PaI reguliatorių eksperimentiniai tyrimų rezultatai, valdant asimetrinės dinamikos objektus.

Skyriaus tematika paskelbti 2 autoriaus straipsniai (A. Baskys, V. Zlosnikas 2006a; A. Baskys *et al* 2009).

### 4.1. Valdymo sistemų su asimetriniais reguliatoriais tyrimas dažniniais metodais

Naudojant Popovo kriterijų ištirti stabilumą įmanoma tik tiesinių objektų valdymo sistemoms su asimetriniais reguliatoriais, kurių struktūra turi tik vieną perjungėją, nes tik valdymo sistemoms su tokiais reguliatoriais įmanoma atskirti tiesinę ir netiesinę sistemos dalis ir taikyti jų tyrimui dažninius metodus. Darbe nagrinėjamų valdymo sistemų tarpe, tokią struktūrą turi sistemos su aP ir PaI reguliatoriais.

Nagrinėjami aP (asimetrinis proporcinis) ir PaI (proporcinis asimetrinis integralinis) reguliatoriai yra atskiri aPI reguliatoriaus atvejai, kurių algoritmai yra šie:

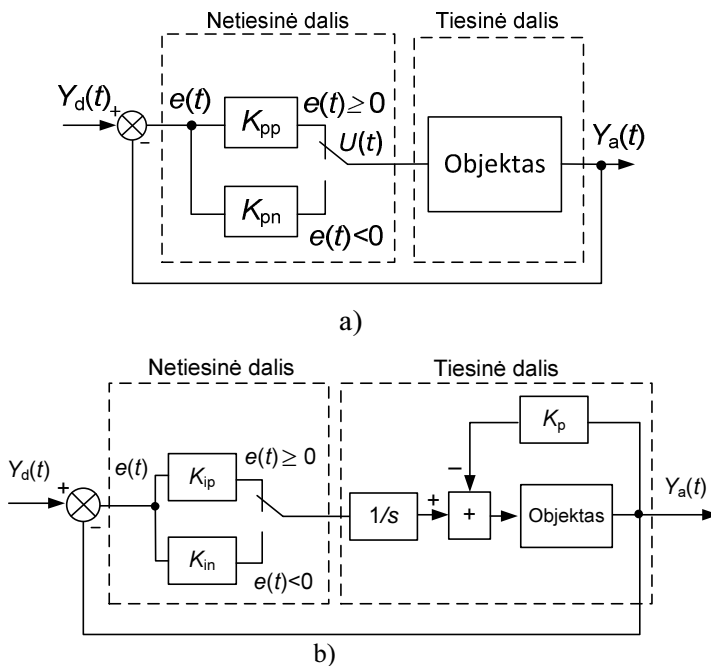
aP reguliatoriaus algoritmas

$$U_p(t) = K_p(t) e(t), \begin{cases} K_p(t) = K_{pp}, & e(t) \geq 0 \\ K_p(t) = K_{pn}, & e(t) < 0 \end{cases} \quad (4.1)$$

PaI reguliatoriaus algoritmas

$$U_p(t) = K_p e(t) + \int_{t_0}^t K_i(\tau) e(\tau) d\tau, \begin{cases} K_i(t) = K_{ip}, & e(t) \geq 0 \\ K_i(t) = K_{in}, & e(t) < 0 \end{cases} \quad (4.2)$$

Kaip jau buvo minėta, norint taikyti tiesinio objekto valdymo sistemai su asimetriniu reguliatoriu Popovo kriterijus, reikia atskirti sistemos tiesinę dalį nuo netiesinės. Nagrinėjamų tiesinių objektų valdymo sistemų su aP ir PaI reguliatoriais struktūros, kuriose yra atskirtos tiesinė ir netiesinė dalys pateiktos 4.1a ir 4.1b paveiksluose.



**4.1 pav.** Tiesinių objektų valdymo sistemų struktūrinės schemas, naudojant aP (a) ir PaI (b) reguliatorius, kuriose atskirtos tiesinė ir netiesinė sistemos dalys

**Fig. 4.1.** The block diagrams of the linear plant control systems with the separated linear and nonlinear parts based on the aP (a) and PaI (b) controllers

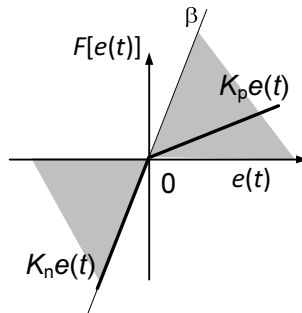


Valdymo sistemų, pateiktų 4.1 paveiksle, netiesinės dalies funkcija aprašoma išraiška:

$$F[e(t)] = K(t) \cdot e(t) \quad \begin{cases} K(t) = K_p, & e(t) \geq 0 \\ K(t) = K_n, & e(t) < 0 \end{cases} \quad (4.3)$$

čia  $K(t)$  yra funkcija, kurios vertė yra apsprendžiama paklaidos  $e(t)$  ženklu ir kuri gali įgyti dvi diskretines vertes  $K_p$  ir  $K_n$ , kur  $K_p$  at reguliatoriui atitinka  $K_{pp}$ , o  $K_n$  atitinkamai  $-K_{pn}$  ir  $K_{in}$ .

Netiesinės reguliatoriaus dalies funkcijos priklausomybės nuo valdymo paklaidos grafikas pateiktas 4.2 paveiksle.



4.2 pav. Netiesinės reguliatoriaus dalies funkcijos  $F[e(t)]$  priklausomybė nuo paklaidos

Fig. 4.2. The nonlinear function  $F[e(t)]$  dependence on error

Kaip matome iš 4.2 paveikslo, nagrinėjamu atveju Popovo kriterijus yra taikytinas, nes netiesinės dalies funkcija  $F[e(t)]$  randasi tarp abscisių ašies ir  $\beta \cdot e(t)$  funkcijos, t.y.  $0 < F[e(t)] < \beta \cdot e(t)$ .

Tokiu atveju pagal Popovo kriterijų sistema yra stabili jei tenkina reikalavimą:

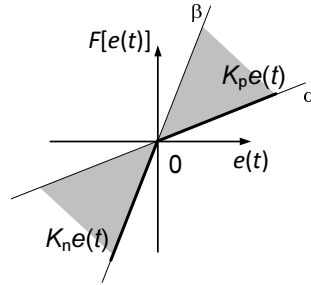
$$\operatorname{Re}[(1 + j\omega q) \cdot W(j\omega)] + \frac{1}{\beta} > 0, \quad (4.4)$$

čia  $q$  yra realus skaičius,  $W(j\omega)$  valdymo sistemos tiesinės dalies perdavimo funkcija.

Nagrinėjamų valdymo sistemų su asimetriniais reguliatoriais netiesinės dalies funkciją gali būti apribota iš dvejų pusių (4.3 pav.), todėl jai galima taikyti apskritiminį kriterijų. Pagal jį valdymo sistema, kurios netiesinės dalies funkcija yra apribota dviem tiesinėmis funkcijomis  $\alpha e(t) < F[e(t)] < \beta e(t)$  ir tiesinė dalis tenkina reikalavimą

$$\operatorname{Re}[(1 + \alpha \cdot W^*(j\omega)) \cdot (1 + \beta \cdot W(j\omega))] \geq 0, \quad (4.5)$$

skaitoma stabili. Čia  $W(j\omega)=U(\omega)+jV(\omega)$ ,  $W^*(j\omega)=U(\omega)-jV(\omega)$ .



4.3 pav. Netiesinės funkcijos  $F[e(t)]$  grafikas  
Fig. 4.3. Graph of the nonlinear function  $F[e(t)]$

## 4.2. Valdymo sistemų su asimetriniais reguliatoriais stabilumo tyrimas naudojant *Off-Axis* kriterijų

*Cho ir Narendra* pasiūlyta Popovo kriterijaus modifikacija (Y.-S. Cho, K. S. Narendra 1968; C. J. Harris, R. K. Husband 1981), kuri dar vadinama *Off-Axis* kriterijumi, leidžia praplėsti netiesinės sistemos stabilumo tyrimų ribas. Kriterijaus taikymas skirtingų netiesinių valdymo sistemų stabilumo tirimui pateikti (K. Cao *et al* 2010; X. Huang *et al* 2010) ir (O. Okuyama *et al* 1998; Y. Okuyama, F. Takemori 1999) darbuose.

*Off-Axis* kriterijus taikytinas, jei netiesinės dalies funkcija  $F[e(t)]$  yra monotoniška. Nagrinėjamų reguliatorių atveju taip ir yra, todėl šis kriterijus gali būti taikomas sistemų su asimetriniais reguliatoriais stabilumo analizei.

Pagal šį kriterijų, taikant papildomą monotoniškumo sąlyga, sistema skaitoma stabili jei tenkina reikalavimą

$$\operatorname{Re} \left[ \frac{\alpha \cdot W(j\omega) + 1}{\beta \cdot W(j\omega) + 1} Z(j\omega) \right] > 0. \quad (4.6)$$

Valdymo sistemų tyrimas, naudojant *Off-Axis* kriterijų, buvo atliktas *Mathead* programa. Buvo ištirtos valdymo sistemos su aP ir PaI reguliatoriais, valdant tiesinius objektus, kurių perdavimo funkcijos yra šios (Cho & Narendra, 1968; V. Zlosnikas *et al* 2011):

$$G_{15}(s) = \frac{e^{-sT_d}}{4s^2 + s + 1}, \quad (4.7)$$

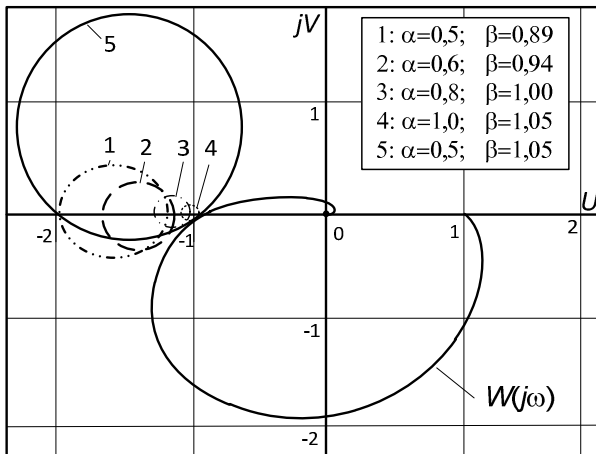
$$G_{16}(s) = \frac{3(s+1)}{s^2(s^2 + s + 25)}. \quad (4.8)$$

Atskyrus tiriamų valdymo sistemų tiesines ir netiesines dalis, kompleksinėje plokštumoje braižomos tiesinės dalies *Naikvisto* grafikas. Jeigu sistemą sudarytų tik šis tiesinis objektas, tai jos stabilumo sritis parodytų *Naikvisto* grafikas. Tuo atveju kai sistemoje yra netiesiškumas, *Naikvisto* kriterijaus taikyti negalima bet galima taikyti apskritiminį ir *Off-Axis* kriterijus. Remiantis apskritiminiu kriterijumi sistemos stabilumas nagrinėjamas analizuojant tiesinės dalies *Naikvisto* grafiko susikirtimo taškus su apskritimu, kuris kerta kompleksinės plokštumos realiosios ašies neigiamą pusę taškuose  $(0, -1/\alpha)$  ir  $(0, -1/\beta)$  ir apskritimo centras randasi realioje ašyje. Sistema skaitoma stabili, jei jos tiesinės dalies *Naikvisto* grafikas nekerta arba tik liečiasi su nubraižytu apskritimu.

*Off-Axis* kriterijus skiriasi nuo apskritiminio tuo, kad jis parodo kad sistema yra stabili ir tuo atveju, kai apskritimo centras nėra realioje ašyje.

Būtina pabrėžti faktą, kad jei pagal *Naikvisto* kriterijų tiesinei daliai sistema yra nestabili, apskritiminis ir *Off-Axis* kriterijai negali būti taikomi.

Objekto, kurio perdavimo funkcija  $G_{15}(s)$ , grafikai valdymo sistemos su aP reguliatoriumi stabilumo tyrimui, naudojant apskritiminį ir *Off-Axis* kriterijus, pateikti 4.4 paveiksle.



**4.4 pav.** Objekto, kurio perdavimo funkcija  $G_{15}(s)$ , grafikai, valdymo sistemos su aP reguliatoriumi stabilumo tyrimui, naudojant apskritiminį ir *Off-Axis* kriterijus

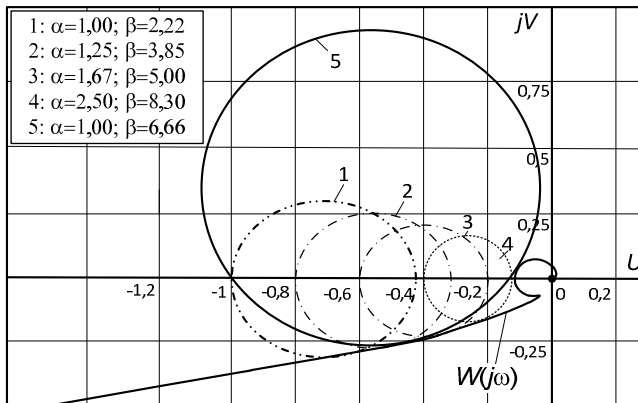
**Fig. 4.4.** The plots for the stability analysis of control system with the plant  $G_{15}(s)$  and aP controller using Circle and *Off-Axis* criterions

Iš gautų grafikų matosi, kad didėjant skirtumui tarp  $\alpha$  ir  $\beta$  koeficientų, kurie atitinka aP reguliatoriaus koeficientus  $K_{pp}$  ir  $K_{pn}$ , valdymo sistemos stabilaus darbo zona siaurėja.

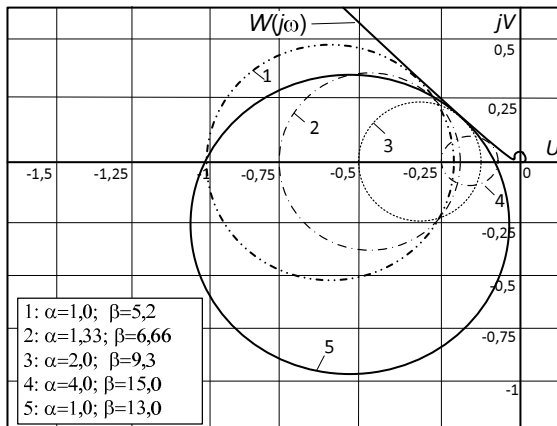
Pagal *Off-Axis* kriterijų, kuris įvertina netiesinės dalies netiesiškumo monotoniškumą, nustatytos stabilaus darbo zonos yra platesnės nei gautos naudojant apskritiminį kriterijų (4.4 pav.).

Jei vietoje aP regulatoriaus objekto  $G_{15}(s)$  valdymui naudoti PaI, tokiai valdymo sistemai negalima taikyti apskritiminį ir *Off-axis* kriterijus, nes pagal *Naikvisto* kriterijų tiesinei daliai sistema yra nestabili. Tačiau objekto  $G_{16}(s)$ , valdymo sistemos su PaI regulatoriumi tiesinė dalis pagal *Naikvisto* kriterijų yra stabili. Šiai valdymo sistemai, naudojant apskritiminį ir *Off-Axis* kriterijus sudaryti grafikai, pateikti 4.5 ir 4.6 paveiksluose.

Šiuo atveju taip pat matome, kad nustatytos stabiliaus darbo zonos yra platesnės nei gautos naudojant apskritiminį kriterijų (4.5 ir 4.6 pav.).



**4.5 pav.** Objekto, kurio perdavimo funkcija  $G_{16}(s)$ , grafikai valdymo sistemos su aP regulatoriumi stabilumo tyrimui, naudojant apskritiminį ir *Off-Axis* kriterijus  
**Fig. 4.5.** The plots for the stability analysis of control system with the plant  $G_{16}(s)$  and aP controller using Circle and *Off-Axis* criterions



**4.6 pav.** Objekto, kurio perdavimo funkcija  $G_{16}(s)$ , grafikai valdymo sistemos su PaI regulatoriumi tyrimui, naudojant apskritiminį ir *Off-Axis* kriterijus  
**Fig. 4.6.** The plots for the stability analysis of control system with the plant  $G_{16}(s)$  and PaI controller using Circle and *Off-Axis* criterions

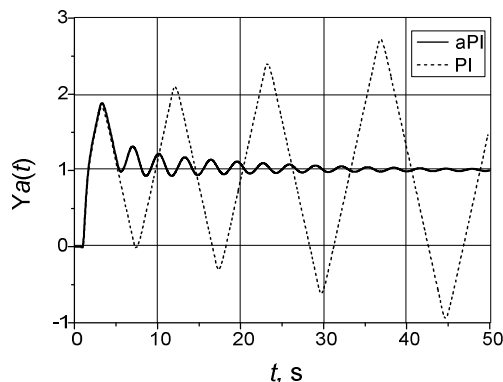
Stabilumo tyrimo rezultatai yra patikrinti *Matlab/Simulink* programa. Tyrimai patvirtina faktą, kad apskritiminius ir *Off-Axis* kriterijai yra pakankami o ne būtini, nes jei pagal juos sistema yra stabili, tai ji tikrai yra stabili. Iš kitos pusės, jei pagal šiuos kriterijus sistema yra nestabili, tai nereiškia kad ji iš tikrųjų yra nestabili.

Taip pat tyrimais nustatyta, kad kai kurios valdymo sistemos, kurios naudojant P ir PI reguliatorius yra nestabilios, tampa stabiliomis naudojant aP ir PaI reguliatorius.

Pavyzdžiui, tokį atvejį turime kai objektas su laiko pastoviosios asimetrija, kurio perdavimo funkcija

$$G(s) = \frac{e^{-1s}}{(\tau s + 1)}, \quad \tau = \begin{cases} 0,5, & dY_a(t)/dt \geq 0 \\ 5, & dY_a(t)/dt < 0 \end{cases}$$

yra valdomas aPI ir PI reguliatoriais. Tokios valdymo sistemos atsakas į vienetini nuostatos šuolį pateiktas 4.7 paveiksle.



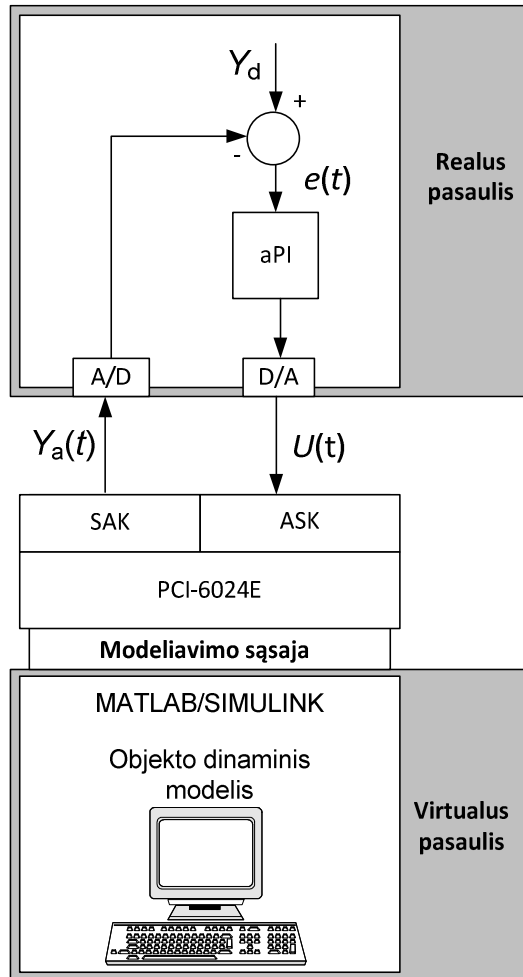
**4.7 pav.** Valdymo sistemos su PI ir aPI reguliatoriais, atsakas į teigiamą vienetini nuostatos šuolį, kai PI reguliatoriaus koeficientai  $K_p = 1$ ,  $K_i = 1,7$  aPI koeficientai  $K_{pp} = 1$ ,  $K_{ip} = 1,7$ ,  $K_{pn} = 1$ ,  $K_{in} = 0,4$

**Fig. 4.7.** Unit step response of control system, based on aPI and PI controllers. Constants of PI controller  $K_p = 1$ ,  $K_i = 1,7$  and aPI  $K_{pp} = 1$ ,  $K_{ip} = 1,7$ ,  $K_{pn} = 1$ ,  $K_{in} = 0,4$

### 4.3. Eksperimentinis asimetrinio proporcinio-integralinio reguliatoriaus tyrimas *hardware in the loop* metodika

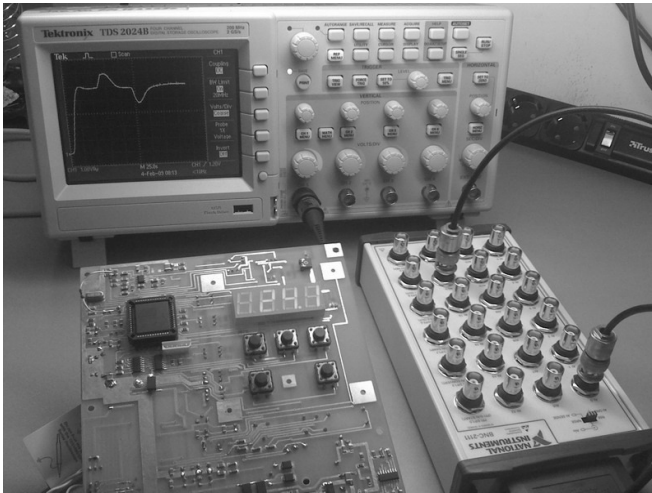
Eksperimentiniams tyrimams buvo naudojamas aPI reguliatoriaus maketas, realizuotas naudojant mikrovaldiklį. Reguliatorius buvo tiriamas naudojant HIL metodiką (EE 2009 Nr7). Šios metodikos įgyvendinimui naudojama speciali

analogas/skaičius ir skaičius/analogas plokštė PCI-6024E asmeniniam kompiuteriui. Ši plokštė realizuoja ryšį tarp realaus reguliatoriaus ir virtualaus valdomojo objekto sudaryto programa *Simulink*. Valdymo sistemos, kurios įgyvendinimui naudojama HIL metodika, struktūrinė schema pateikta 4.8 paveiksle, o nuotrauka – 4.9 paveiksle.



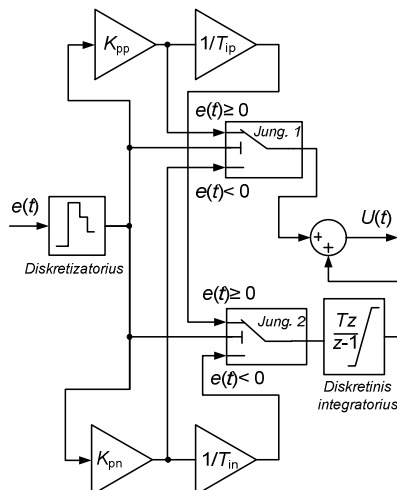
**4.8 pav.** Valdymo sistemos, įgyvendintos naudojant HIL metodiką, struktūrinė schema

**Fig. 4.8.** The block diagram of the control system based on the HIL technique



**4.9 pav.** Valdymo sistemos tyrimo stendas, naudojant HIL metodiką (kairėje aPI reguliatoriaus maketas, dešinėje – analogas-skaičius, skaičius-analogas plokštė PCI-6024E, prijungta prie kompiuterio su instaliuota *Simulink* programa  
**Fig. 4.9.** The investigation stand of control system based on the HIL technique (the aPI controller is on the left, the connector block of multifunctional PC board PCI-6024E, which is connected to the PC with the installed *Simulink* software– on the right)

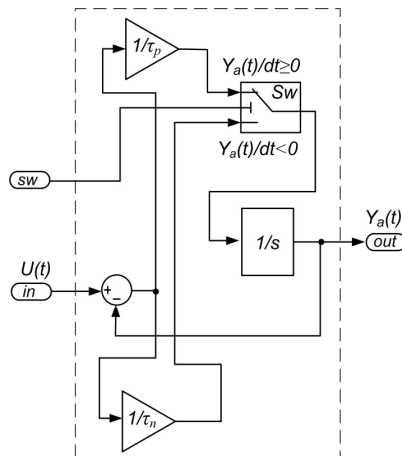
Skaitmeninio reguliatoriaus su mikrovaldikliu, kuris realizuoja aPI valdymo algoritmą (2.4), struktūrinė schema pateikta 4.10 paveiksle.



**4.10 pav.** Skaitmeninio aPI reguliatoriaus struktūrinė schema  
**Fig. 4.10.** The block diagram of digital aPI controller

Joje *Zero-Order Hold* blokas diskretizuoja valdymo paklaidos  $e(t)$  signalą, kuris tiekiamas į reguliatoriaus įėjimą. Blokai  $K_{pp}$ ,  $1/T_{ip} = K_{ip}$  nustato reguliatoriaus parametrus kai  $e(t) \geq 0$ , o  $K_{pn}$ ,  $1/T_{in} = K_{in}$  – kai  $e(t) < 0$ . Blokas *diskretinis integruatorius* skaitmeniniu būdu integruoja valdymo paklaidos signalą ir apriboja integravimo rezultatą tokiu būdu, kad reguliatoriaus signalas neišeitų už nustatytų apribojimų dėl integralinės grandies įtakos. Integralo vertės ribojimas yra būtinas įsisiūbavimo (angl. *windup*) reiškiniui išvengti. Reguliatorius įgyvendintas naudojant AT89C51AC3 mikrovaldiklį.

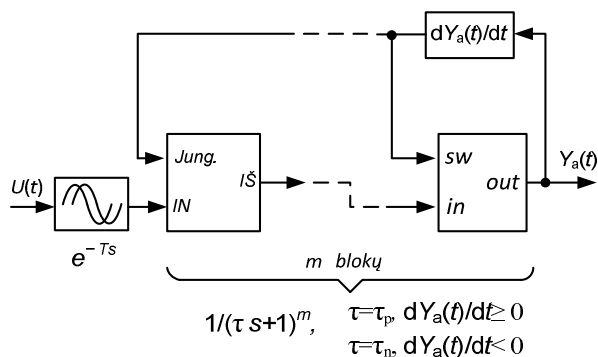
Reguliatoriaus tyrimui naudojant HIL metodiką būtina turėti valdomojo objekto modelį *Simulink* programai. Atliekant asimetrinės dinamikos objektų su laiko pastoviosios asimetrija valdymo sistemų tyrimus, kurių rezultatai pateikti II disertacijos skyriuje, buvo manoma, kad naudojant standartinius *Simulink* programos blokus neįmanoma sudaryti adekvatų tokių objektų modelį (žr. 1.9 pav.), todėl minėtiems tyrimams buvo naudojama elektroninių sistemų modeliavimo programa *Spice*. Su šiuo teiginiu sutiko ir darbo, pristatyto 32-je IEEE Industrinės elektronikos konferencijoje IEEE IECON'06 (A. Baskys, V. Zlosnikas 2006a), recenzentas. Tačiau, disertacinio darbo eigoje, disertantui pavyko sukurti adekvatų objekto su laiko pastoviosios asimetrija modelį naudojant standartinius *Simulink* programos blokus. Šis modelis aprobuotas publikacijoje (A. Baskys *et al* 2009). Pirmosios eilės perdavimo funkcija aprašomam objektui sukurta modelis pateiktas 4.11 paveiksle, o bendras modelis  $m$ -sios eilės perdavimo funkcija aprašomam objektui su atsako vėlinimu – 4.12 paveiksle.



4.11 pav. Objekto su laiko pastoviosios asimetrija, aprašomo 1-osios eilės perdavimo funkcija, *Simulink* modelis

Fig. 4.11. The model of 1-st orders plant with the asymmetric dynamics for the software *Simulink*





**4.12 pav.** Objekto su laiko pastoviosios asimetrija, aprašomo  $m$ -osios eilės perdavimo funkcija su vėlinimu, *Simulink* modelis

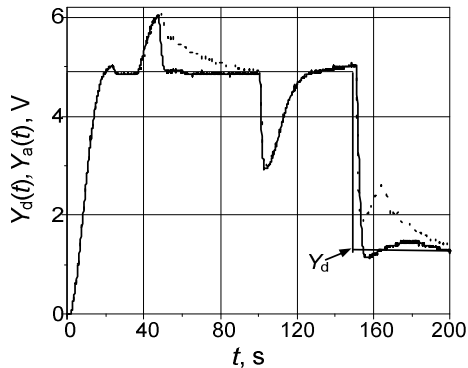
**Fig. 4.12.** The model of the  $m$ -order plant with time constant asymmetry and response delay for the software *Simulink*

Pirmosios eilės perdavimo funkcijos modelis (blokinė schema) susideda iš integratoriaus  $1/s$ , dviejų stiprinimo blokų  $1/\tau_p$  and  $1/\tau_n$ , jungiklio bloko ir sumavimo bloko. Nesunku pastebėti, kad tokio modelio perdavimo funkcija yra  $1/(\tau_p s+1)$ , kai  $dY_a(t)/dt \geq 0$  ir  $1/(\tau_n s+1)$ , kai  $dY_a(t)/dt < 0$ , t.y. stiprinimo blokų parametrai  $\tau_p$  ir  $\tau_n$  atitinka objekto laiko pastoviąsias, kurias asimetrinės dinamikos objektas turi atitinkamai objekto parametrai didėjant ir mažėjant. Kadangi perjungiamieji stiprinimo blokai nustatantys laiko pastoviąsias randasi prieš integratoriaus bloką, tokio modelio atsakas, skirtingai nuo modelio pateikto 1.9 paveiksle, yra tolydus ir atitinka realaus objekto su laiko pastoviosios asimetrija atsaką.

Bendras objekto su laiko pastoviosios asimetrija modelis, kuriame gali būti įvertinamas ir atsako vėlinimas, pateiktas 4.12 paveiksle. Jis sudarytas iš  $m$  nuosekliai sujungtų pirmosios eilės perdavimo funkcijų blokų, pateiktų 4.11 paveiksle, objekto parametro laiko išvestinės  $dY_a(t)/dt$  ženklo stebėjimo bloko, kuris valdo laiko pastoviosios perjungimo jungiklius ir vėlinimo bloko  $e^{-Ts}$ , kur  $T$  atsako vėlinimo laikas. Naudojant HIL tyrimo metodiką buvo tiriamas aPI reguliatoriaus maketo darbas valdant objektą, aprašomą perdavimo funkcija

$$G(s) = \frac{e^{-1s}}{(\tau s+1)^2}, \quad \tau = \begin{cases} 2, & dY_a(t)/dt \geq 0 \\ 0,2, & dY_a(t)/dt < 0 \end{cases} \quad (4.9)$$

Gautas valdymo sistemos atsakas į nuostatos impulsinį pokytį ir teigiamą bei neigiamą trikdžius kai naudojamas aPI ir PI reguliatoriai pateiktas 4.13 paveiksle. Ten pat pateiktos ir reguliatorių koeficientų vertės. Pereinamasis procesas buvo matuojamas oscilografu TDS2024B, kurio matavimo paklaida įtampos ašyje 0,4 %, laiko ašyje 0,05%.



**4.13 pav.** Valdymo sistemos atsakas į nuostatos impulsinį pokytį ir teigiamą bei neigiamą trikdžius kai naudojamas aPI (ištininė linija) ir PI (brūkšninė linija) reguliatoriai. PI reguliatoriaus koeficientai ( $K_p=0,8$ ,  $K_i=0,1$ ) priderinti objekto dinamikai kurią jis turi objekto parametrai didėjant. aPI reguliatoriaus parametrai yra šie:  $K_{pp}=0,8$ ,  $K_{pn}=0,5$ ,  $K_{ip}=0,1$ ,  $K_{in}=0,5$  s

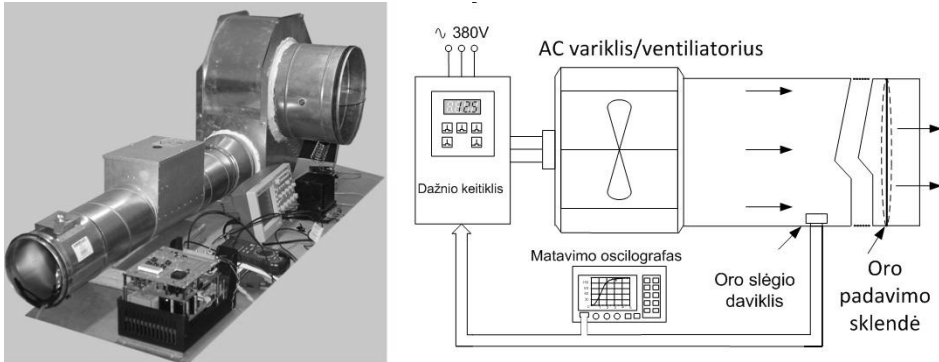
**Fig. 4.13.** Set point pulse and load disturbance response of the control system based on the aPI (solid line) and PI (dotted line) controllers. The PI controller parameters ( $K_p=0,8$ ,  $K_i=0,1$ ) are adjusted for the dynamics of the plant, which corresponds to the rise of controlled parameter. Parameters of aPI controller:  $K_{pp}=0,8$ ,  $K_{pn}=0,5$ ,  $K_{ip}=0,1$ ,  $K_{in}=0,5$  s

Gauti eksperimentinių tyrimų rezultatai rodo, kad tirtu atveju aPI reguliatorius, lyginant su PI reguliatoriumi, leidžia 3–4 kartus sumažinti atsako pereina- mojo proceso trukmę valdomajam parametrai mažėjant.

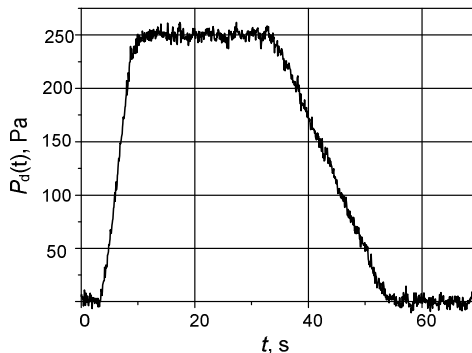
## 4.4. Eksperimentinis vėdinimo valdymo sistemos su Proporciniu-asimetriniu Integraliniu reguliatoriumi tyrimas

PaI reguliatorius buvo panaudotas pramoninių vėdinimo sistemų ventiliatorių pavarų su trifaziais asinchroniniais varikliais, maitinamais dažnio keitikliu, valdymui. Jis yra realizuotas naudojant mikrovaldiklį 89C51AC3 ir yra sudėtinė dažnio keitiklio, sukurto Fizinių ir technologijos mokslų centro Elektroninių sistemų laboratorijoje, dalis. Valdant ventiliatoriaus sukimosi greitį, juo yra reguliuojamas skirtuminis oro slėgis vėdinimo sistemoje. Naudojant vėdinimo sistemos maketą (4.14 pav.) buvo atlikti eksperimentiniai sistemos skirtuminio oro slėgio ( $P_d$ ) atsako į nuorodos impulsinį šuolį ir į valdomojo objekto trikdžius (oro sklendės padėties pakeitimą) tyrimai. Tiriamos vėdinimo sistemos atsakas į impulsinį poveikį pateiktas 4.15 paveiksle. Matome, kad sistema turi asimetrinę dinamiką – oro slėgio didėjimo sparta yra didesnė nei mažėjimo. Tiriamos sistemos dinamiką nulemia dažnio keitiklio, kuris čia veikia kaip vykdyklis dinami-

ka. Duotu atveju turime sistemą su vykdyklio tempo ribojimu (angl. *actuator rate limitation*). Tyrimai rodo (A. Baskys, V. Zlosnikas 2009b), kad tokiai asimetrinės dinamikos sistemai kokybiškai valdyti pakanka aPI reguliatoriuje komutuoti tik integralinį koeficientą, t.y. naudoti PaI reguliatorių.



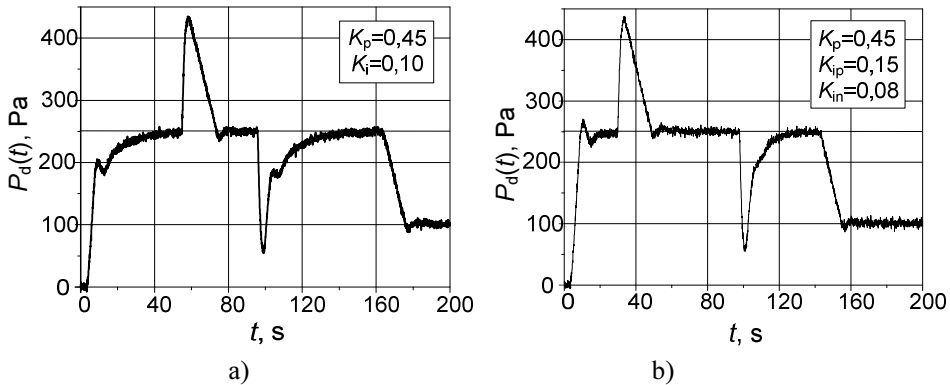
4.14 pav. Vėdinimo valdymo sistemos tyrimų stendas  
Fig. 4.14. Ventilation control system investigation stand



4.15 pav. Vėdinimo sistemos tyrimo stendo skirtuminio oro slėgio atsakas į impulsinį poveikį

Fig. 4.15. The differential air pressure pulse response of the investigated ventilation system stand

Gauti eksperimentiniai vėdinimo valdymo sistemos atsako tyrimo rezultatai (4.16 pav.) parodė, kad tirtu atveju PaI reguliatorius, lyginant su PI reguliatoriumi, leidžia 4 kartus sutrumpinti atsako į nuostatos šuolį ir 1,6 karto atsako į neigiamą trikdį pereinamųjų procesų trukmę.



**4.16 pav.** Vėdinimo valdymo sistemos skirtuminio oro slėgio atsakas į impulsinį nuorodos pokytį (į nuorodos šuolį  $P_d(t) = 250$  Pa, po to į šuolišką nuorodos sumažėjimą iki vertės  $P_d(t) = 100$  Pa) ir į valdomojo objekto trikdžius (oro sklendės padėties pakeitimą), naudojant PI reguliatorių su parametrais priderintais sistemos dinamikai, kurią ji turi slėgiui mažėjant (a) ir PaI reguliatorių (b)

**Fig. 4.16.** The differential air pressure  $P_d(t)$  set point pulse (set point 250 Pa step followed by drop up to 100 Pa) response of the ventilation control system followed by the load disturbances (air valve position change) based on the PaI controller (b) and PI controller adjusted to dynamics of the system associated with the fall of  $P_d(t)$  (a)

Sistemos pereinamasis procesas matuotas oscilografu TDS2024B, kurio matavimo paklaida įtampos ašyje  $\pm 0,4$  %, laiko ašyje  $\pm 0,05$  %. Skirtuminiam oro slėgiui matuoti panaudotas jutiklis DRF-500 U, kurio matavimo paklaida  $\pm 1$  %.

## 4.5. Ketvirtojo skyriaus išvados

1. Valdymo sistemų su asimetriniais reguliatoriais stabilumo tyrimui gali būti pritaikyti Popovo, *Off-Axis* ir apskritiminis kriterijai.
2. Norint taikyti Popovo, *Off-Axis* ir apskritiminį stabilumo tyrimo kriterijus, būtina pertvarkyti netiesinės sistemos struktūrą taip, kad būtų atskirtos jos tiesinė ir netiesinė dalys.
3. Naudojant Popovo, *Off-Axis* ir apskritiminį kriterijus, ištirti stabilumą įmanoma tik tiesinių objektų valdymo sistemoms su aP (asimetriniu proporciniu) ir PaI reguliatoriais, nes tik šioms valdymo sistemoms įmanoma atskirti tiesinę ir netiesinę sistemos dalis ir taikyti jų tyrimui dažninius metodus.
4. Tyrimai parodė, kad tiesinių objektų valdymo sistemose su aP reguliatoriumi, didėjant skirtumui tarp aP reguliatoriaus koeficientų  $K_{pp}$  ir  $K_{pn}$ , siaurėja valdymo sistemos stabilaus darbo zona.

5. Tikrinant stabilumo tyrimo rezultatus *Simulink* programa, patvirtina, kad apskritiminis ir *Off-axis* kriterijai yra pakankami, o ne būtini, nes jeigu pagal juos sistema yra stabili, tai ji tikrai yra stabili. Iš kitos pusės, jei pagal šiuos kriterijus sistema yra nestabili, tai nereiškia, kad ji iš tikrųjų yra nestabili.
6. Nustatyta, kad tirta pirmosios eilės objekto su vėlinimu valdymo sistema, kuri naudojant PI reguliatorių yra nestabili, tampa stabilia naudojant aPI reguliatorių.
7. Gauti eksperimentinių tyrimų rezultatai naudojant HIL metodiką parodė, kad tirta antrosios eilės objekto su vėlinimu valdymo sistema su aPI reguliatoriumi, lyginant su sistema, kurioje naudojamas PI reguliatorius, leidžia 3–4 kartus sumažinti atsako pereinamojo proceso trukmę, mažėjant valdomajam parametru.
8. Atliekant eksperimentinius vėdinimo valdymo sistemos tyrimus nustatyta, kad PaI reguliatorius, lyginant su PI reguliatoriumi, konkrečiai tiriamajai sistemai leidžia 4 kartus sutrumpinti atsako į nuostatos šuolį ir 1,6 karto – atsako į neigiamą trikdį pereinamųjų procesų trukmes.



---

## Bendrosios išvados

1. Daugelio valdomųjų objektų dinamika yra asimetrinė, todėl plačiai pramonėje naudojami PI ir PID reguliatoriai, valdant objektus su asimetrine dinamika, neleidžia tuo pat metu pasiekti valdomojo parametro kokybiško pereinamojo proceso parametrui didėjant ir mažėjant.

2. Sukurti asimetriniai aPI ir aPID reguliatoriai su keičiamais koeficientais, kurių vertės yra diskretiškai pakeičiamos, keičiantis valdomojo parametro laiko išvestinės arba valdymo paklaidos ženklui ir kurių derinimui tinka PI ir PID reguliatorių derinimo principai.

3. aPI reguliatorius tirtiems objektams su laiko pastoviosios, vykdyklio tempo ribojimo ir vėlinimo asimetrija, lyginant su PI reguliatoriumi, leidžia 1,2–6 karto sumažinti atsako į nuostatos pokyčius pereinamojo proceso trukmę, 5–14 kartų perreguliuojimą ir 1,2–4 karto atsako į teigiamus trikdžius pereinamojo proceso trukmę.

4. aPID reguliatoriaus taikymas objektų su laiko pastoviosios asimetrija valdymo sistemose vietoje PID reguliatoriaus, tiriamiems objektams 6 kartus sumažina valdymo sistemos atsako į nuostatos šuolius pereinamojo proceso trukmę, 20 kartų perreguliuojimą ir 1,2–2 kartus atsako į teigiamus trikdžius pereinamojo proceso trukmę.

5. aPI regulatoriaus taikymas tiesiniams objektams, lyginant su PI regulatoriumi, leidžia analizuotiems objektams 1,5–3 kartus, o aPID reguliatorius, lyginant su PID regulatoriumi, 2–5 kartus, sumažinti atsako į teigiamą trikdį pereinamojo proceso trukmę, nebloginant atsako į nuostatos šuolį pereinamojo proceso kokybės rodiklių.

6. PID regulatoriaus su nuostatos stebėjimu vietoje PID regulatoriaus taikymas tiesiniams objektams valdyti, 2–3 kartus sumažina analizuojamiems objektams atsako į teigiamą ir neigiamą trikdžius pereinamųjų procesų trukmes.

7. Naudojant Popovo, *Off-Axis* ir apskritiminį kriterijus, ištirti stabilumą įmanoma tik tiesinių objektų valdymo sistemoms su asimetriniais reguliatoriais, kurių struktūra turi tik vieną perjungėją, pvz. sistemos su aP ir PaI reguliatoriais, nes tik valdymo sistemoms su tokiais reguliatoriais įmanoma atskirti tiesinę ir netiesinę sistemos dalis

8. Atlikti eksperimentiniai tyrimai parodė, kad aPI ir PaI reguliatoriai, lyginant su PI, leidžia pasiekti 1,6–4 kartus trumpesnes atsako į nuostatos pokyčius ir trikdžius pereinamųjų procesų trukmes, valdant tirtus objektus su laiko pastoviosios ir vykdiklio tempo ribojimo asimetrija.



---

## Literatūra ir šaltiniai

- De Arruda, G. H. M.; Barros, P. R. 2003. Relay-based gain and phase margins PI controller design, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 52(5): 1548–1553.
- Åström, K. J.; Häggglund, T. 2000. Benchmark systems for PID control, in *Proc. IFAC Workshop* 165–166.
- Åström, K. J.; Häggglund, T. 2001. The future of PID control, *Control Engineering Practice* 9: 1163–1175.
- Basilio, J. C.; Matos, S. R. 2002. Design of PI and PID controllers with transient performance specification, *IEEE Transactions on Education* 45(4): 364–370.
- Berenguel, M.; Camacho, E. F.; Garcia-Martin, F.J.; Rubio, F.R. 1999. Temperature control of a solar furnace, *IEEE Control Systems Magazine* 19(1): 8–24.
- Bohn, C.; Atherton, D. P. 1995. An analysis package comparing PID anti-windup strategies, *IEEE Control Systems Magazine* 15(2): 34–40.
- Boiko, I.; Sun, X.; Tamayo, E. 2008. Variable-structure PI controller for tank level process, in *American Control Conference IEEE*, 4697–4702.
- Boiko, I.; Sun, X.; Tamayo, E. 2009. Performance analysis and tuning of variable-structure PID controllers for level process, in *Control Applications, (CCA) Intelligent Control, (ISIC)* 268–273.
- Boyd, S.; Yang, Q. 1989. Structured and simultaneous Lyapunov functions for system stability problems, *International Journal of Control* 49(6)(49): 2215–2240.
- Bonenn, Z. 1968. The circle criterion and describing function analysis, *Automatic Control, IEEE Transactions on* 13(5): 588–589.

- Bowen, C.; Maode, Y. 2008. Variable structure adaptive controller for robot manipulator based on desired trajectory compensation, in *2008 27th Chinese Control Conference IEEE*, 394–397.
- Branicky, M. S. 1998. Multiple Lyapunov Functions and Other Analysis Tools for Switched and Hybrid Systems, *IEEE Transactions on Automatic Control* 43(4)(43): 475–482.
- Cao, K.; Gao, X. Z.; Ban, X.; Huang, X. 2010. Stability analysis for a type of proportional T-S fuzzy control systems using the off-axis circle criterion, in *Fuzzy Systems (FUZZ)* 1–6.
- Chandrasekar, J.; Liu, L.; Patt, D.; Friedmann, P. P.; Bernstein, D.S. 2006. Adaptive Harmonic Steady-State Control for Disturbance Rejection, *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 14(6): 993–1007.
- Cheng, D.; Guo, L.; Lin, Y.; Wang, Y. 2005. Stabilization of switched linear systems, *Automatic Control, IEEE Transactions on* 50(5): 661–666.
- Cho, Y. S.; Narendra, K. S. 1968. An off-axis circle criterion for stability of feedback systems with a monotonic nonlinearity, *Automatic Control, IEEE Transactions on* 13(4): 413–416.
- Dayawansa, W. P.; Martin, C. F. 1999. A converse Lyapunov theorem for a class of dynamical systems which undergo switching, *IEEE Transactions Automatic Control* (44): 751–760.
- Dal, M.; Jezernik, K. 2006. Experimental Comparison of Discrete Time Sliding Mode and Conventional, PI Current Controllers for IM Drives, in *Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC 2006* 1155–1160.
- Donoghue, J. F. 1977. A Comparison of the Smith Predictor and Optimal Design Approaches for Systems with Delay in the Control, *Industrial Electronics and Control Instrumentation, IEEE Transactions on IECI-24*(1): 109–117.
- Dote, Y.; Saitoh, T. 1991. Stability analysis of variable-structured PI controller by fuzzy logic for servo system, in *International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation IEEE*, 363–365.
- Freidovich, L. B.; Khalil, H. K. 2003. Logic-based switching for the control of a class of nonlinear systems, in *Decision and Control, 42nd IEEE Conference On* 1059–1064.
- Gantt, J. A.; Rochelle, K. A.; Gatzke, E.P. 2007. Type 1 Diabetic Patient Insulin Delivery Using Asymmetric PI Control, *Submitted to Chemical Engineering Communications* 194(5): 586–602.
- Gokcek, C. 2004. Stability analysis of periodically switched linear systems using Floquet theory, *Mathematical Problems in Engineering* 1: 1–10.
- Grabowski, P.; Callier, F.M. 2006. On the Circle Criterion for Feedback Systems with both Unbounded Observation and Control, in *Decision and Control, 45th IEEE Conference On* 753–758.
- Guerra, R. E. H.; Schmitt-Braess, G.; Haber, R. H.; Alique, A.; Alique, J.R. 2003. Using circle criteria for verifying asymptotic stability in PI-like fuzzy control systems: application to the milling process, *Control Theory and Applications* 150(6): 619–627.
- Guzman, J. L.; Astrom, K. J.; Dormido, S.; Hagglund, T.; Berenguel, M.; Piguet, Y. 2008. Interactive learning modules for PID control, *IEEE Control Systems Magazine* 28(5): 118–134.
- Hagglund, T. 1992. A predictive PI controller for processes with long dead times, *IEEE Control Systems Magazine* 12(1): 57–60.
- Hang, C. C.; Tan, C. H.; Chan, W. P. 1980. A Performance Study of Control Systems with Dead Time, *IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation* 27(3): 234–241.
- Harris, C. J.; Husband, R. K. 1981. Off-axis multivariable circle stability criterion, *Control Theory and Applications* 128(5): 215–218.

- Ho, E.; Sen, P. 1990. A microcontroller-based induction motor drive system using variable structure strategy with decoupling, *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 37(3): 227–235.
- Hu, B.; Xu, X.; Michel, A. N.; Antsaklis, P. J. 1999. Robust stabilizing control laws for a class of second-order switched systems, in *American Control Conference* 2960–2964.
- Huang, Y.; Yasunobu, S. 2000. A general practical design method for fuzzy PID control from conventional PID control, *Ninth IEEE International Conference on Fuzzy Systems* 969–972.
- Huang, J. J.; DeBra, D. B. 2000. Automatic tuning of Smith-predictor design using optimal parameter mismatch, in *Decision and Control, 39th IEEE Conference On* 3307–3312 vol.4.
- Huang, X.; Cao, K.; Ban, X.; Gao, X. Z. 2010. Stability analysis of the simplest t-s fuzzy control system using the off-axis circle criterion, in *Control and Automation (ICCA), 8th IEEE International Conference* 187–191.
- Hur, N.; Nam, K.; Won, S. 2000. A two-degrees-of-freedom current control scheme for deadtime compensation, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 47(3): 557–564.
- Ibrir, S. 2007. Circle-criterion observers for dynamical systems with positive and non-positive slope nonlinearities, in *American Control Conference* 260–265.
- Ivanauskas, A. 2005. *Automatinio Valdymo Teoriniai Pagrindai* Technologija: Kaunas.
- Jafarov, E. M.; Parlakci, M. N. A.; I Stefanopoulos, Y. 2005. A new variable structure PID-controller design for robot manipulators, *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 13(1): 122–130.
- Jelic, A. M.; Vasiljevic, D. M. 1996. Analysis of switching regulators by phase portrait technique, *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications* 43(3): 235–239.
- Johansson, M.; Rantzer, A. 1998. Computation of piecewise quadratic Lyapunov functions for hybrid systems, *Automatic Control, IEEE Transactions on* 43(4): 555–559.
- Kang, H.; Vachtsevanos, G. J. 1990. Nonlinear Fuzzy Control Based on The Vector Fields of The Phase Portrait Assignment Algorithm, in *American Control Conference, 1990* 1479–1484.
- Kelly, R.; Moreno, J. 2001. Learning PID structures in an introductory course of automatic control, *IEEE Transactions on Education* 44(4): 373–376.
- Khan, B. Z.; Lehman, B. 1996. Setpoint PI controllers for systems with large normalized dead time, *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 4(4): 459–466.
- Knospe, C. 2006. PID control, *IEEE Control Systems Magazine* 26(1): 30–31.
- Kou, S.; Han, K. W. 1975. Limitations of the describing function method, *Automatic Control, IEEE Transactions on* 20(2): 291–292.
- Kristiansson, B.; Lennartson, B. 2002. Robust and optimal tuning of PI and PID controllers, *Control Theory and Applications* 149(1): 17–25.
- Laughlin, D. L.; Morari, M. 1987. Smith Predictor Design for Robust Performance, in *American Control Conference* 637–642.
- Lee, C. K.; Kwok, N. M. 1993. Disturbance rejection in a brushless DC motor velocity control system using a variable structure controller, in *Control Applications, Second IEEE Conference On* 709–714.
- Lee, D. 2003. Automatic P/PI speed control for industry servo drives using on-line spectrum analysis of torque command, *IEEE International Symposium on Industrial Electronics* 216–221.
- Li, Y.; Ang, K. H.; Chong, G. C. Y. 2006. PID control system analysis and design, *IEEE Control Systems Magazine* 26(1): 32–41.

- Li, Y.; Feng, W.; Tan, K.C.; Zhu, X. K.; Guan, X.; Ang, K. H. 1998. PIDeasy and automated generation of optimal PID controllers, *3rd Asia-Pacific Conf. Control and Measurement* 29–33.
- Liu, J.; You, X.; Zheng, T. Q. 2009. Sliding-mode variable structure current controller for field oriented controlled linear induction motor drive, in *Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC '09. IEEE 6th International* 1036–1039.
- Lo, J. C.; Lin, Y. T.; Liao, W. C. 2011. Generalized stabilizing controllers for fuzzy systems via Circle criterion, in *Fuzzy Systems (FUZZ)* 1294–1298.
- Lota, J.; Al-Janabi, M.; Kale, I. 2006. Stability analysis of higher-order delta-sigma modulators using the describing function method, in *Circuits and Systems, ISCAS 2006. Proceedings. IEEE International Symposium On* 4 pp.–596.
- Lu, Z.; Kawamura, S.; Goldenburg, A. A. 1995. An approach to sliding-mode based control, *Robotics and Automation* 11(5): 754–759.
- Luis, J. 2006. Interactive learning modules for PID control, *IEEE Control Systems Magazine* (October): 7–12.
- Matausek, M. R.; a.D. Micic 1996. A modified Smith predictor for controlling a process with an integrator and long dead-time, *IEEE Transactions on Automatic Control* 41(8): 1199–1203.
- Materassi, D.; Innocenti, G.; Genesio, R.; Basso, M. 2007. A composite circle criterion, in *Decision and Control, 2007 46th IEEE Conference On* 4459–4464.
- Materassi, D.; Salapaka, M.; Basso, M. 2006. A less conservative circle criterion, in *American Control Conference* 4.
- McMillan, G. K. 1983. A Performance Comparison between a Smith Predictor and a PID Controller for Control Valve Hysteresis and Process Non-Self-Regulation, in *American Control Conference* 343–348.
- Moore, J. 1968. A circle criterion generalization for relative stability, *Automatic Control, IEEE Transactions on* 13(1): 127–128.
- Smith, O. J. M. 1959. A controller to overcome dead-time, *ISA Transactions* 6(2): 28–33.
- Okuyama, Y.; Takemori, F. 1999. An off-axis circle criterion for feedback systems containing a single time-invariant nonlinearity, in *American Control Conference* 1623–1626.
- Okuyama, O.; Takemori, F.; Chen, H. 1998. An off-axis circle criterion for feedback control systems with a sector nonlinearity, in *SICE '98. Proceedings of the 37th SICE Annual Conference. International Session Papers* 1057–1062.
- Panagopoulos, H.; Astrom, K. J.; Hagglund, T. 1997. A numerical method for design of PI controllers, in *IEEE International Conference on Control Applications* Ieee, 417–422.
- Parra-Vega, V.; Arimoto, S.; Liu, Y. H.; Hirzinger, G.; Akella, P. 2003. Dynamic sliding PID control for tracking of robot manipulators: theory and experiments, *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 19(6): 967–976.
- Peleties, P.; Decarlo, R. A. 1991. Asymptotic stability of m-switched systems using Lyapunov-like functions, in *American Control Conference* 1679–1684.
- Phillips, C. L.; Parr, J. M. 1984. Robust Design of a Digital PID Predictor Controller, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 31(4): 328–332.
- Pillai, V. K.; Nelson, H. D. 1988. On an Extension of the Describing Function Method, in *American Control Conference* 2168–2173.
- Rahiman, W.; Li, B.; Wu, B.; Ding, Z. 2007. Circle Criterion Based Nonlinear Observer Design For Leak Detection In Pipelines, in *Control and Automation, 2007. ICCA 2007. IEEE International Conference On* 2993–2998.

- Rao, M.; Rao, P. 1970. A comment on the discrete describing function method, *Automatic Control, IEEE Transactions on* 15(2): 270–271.
- Rinkeviciene, R. 1999. *Automatinio Valdymo Teorija* Technika.
- Rocco, P. 1996. PID Control for Industrial Robot Arms, *IEEE Transactions on Robotics* 12(4): 606–614.
- Sanders, S. R. 1993. On limit cycles and the describing function method in periodically switched circuits, *Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, IEEE Transactions on* 40(9): 564–572.
- Schndtt-Braess, G. 2002. A generalized circle criterion and its fields of application, in *Control Applications* 1100–1105 vol.2.
- Schneider, D. M. 1988. Control of processes with time delays, *IEEE Transactions on Industry Applications* 24(2): 186–191.
- Shayman, M. A. 1984. Phase Portrait of the Riccati Equation from the Periodic Control Problem, in *American Control Conference* 250–257.
- Shim, H.; Noh, D.; Seo, J. 1998. Common Lyapunov function for exponentially stable nonlinear systems, in *In 4th SIAM Conference on Control & Its Applications* 1218–1223.
- Shin, H. B. 1998. New antiwindup PI controller for variable-speed motor drives, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 45(3): 445–450.
- Shiriaev, A.; Johansson, R.; Robertsson, A. 2003. Sufficient conditions for dynamical output feedback stabilization via the circle criterion, in *Decision and Control, 42nd IEEE Conference On* 4682–4687 Vol.5.
- Shumsky, S. A. 1992. Phase portrait characteristics of random neural networks, in *Neuroinformatics and Neurocomputers* 145–156.
- Silva, G. J.; Datta, A.; Bhattacharyya, S. P. 2002. New results on the synthesis of PID controllers, *IEEE Transactions on Automatic Control* 47(2): 241–252.
- Silva, G. J.; Datta, A.; Bhattacharyya, S. P. 2003. On the stability and controller robustness of some popular PID tuning rules, *IEEE Transactions on Automatic Control* 48(9): 1638–1641.
- Soltoggio, A. 2004. GP and GA in the design of a constrained control system with disturbance rejection, *Intelligent Control, Proceedings of the 2004* 477–482.
- Sridhar, R. 1960. A general method for deriving the describing functions for a certain class of nonlinearities, *Automatic Control, IRE Transactions on* 5(2): 135–141.
- Suyitno, A.; Fujikawa, J.; Kobayashi, H.; Dote, Y. 1993. Variable-structured robust PI controller by fuzzy logic for servomotor, in *Industrial Electronics, ISIE'93 - Budapest., IEEE International Symposium On* 734–739.
- Vidal-Idiarte, E.; Martinez-Salamero, L.; Guinjoan, F.; Calvente, J.; Gomariz, S. 2004. Sliding and fuzzy control of a boost converter using an 8-bit microcontroller, *Electric Power Applications* 151(1): 5–11.
- Wang, Y.; Wang, Z.; JunYang; Pei, R. 2005. Speed regulation of induction motor using sliding mode control scheme, in *Industry Applications Conference, Fourtieth IAS Annual Meeting* 72–76.
- Wicks, M. A.; Peleties, P.; DeCarlo, R. A. 1994. Construction of piecewise Lyapunov function for stabilizing switched systems, in *Proceedings of the 35th IEEE Conference on Decision and Control* 3492–3497.
- Wilson-Jones, R.; Wellstead, P. E. 1994. A generalised phase portrait for piecewise linear system analysis, in *Control '94. International Conference On* 85–88 vol.1.

Wu, D.; Chen, K. 2012. Frequency Domain Analysis of Nonlinear Active Disturbance Rejection Control via the Describing Function Method, *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*.

Xu, M.; Li, S. 2004. A PI type self-tuning fuzzy controller with receding horizon optimization, in *Fuzzy Systems, IEEE International Conference On* 733–738.

Zhang, W.; Wang, W.; He, X.; Xu, X. 2002. Analytical formulas for the new two degree-of-freedom Smith predictor, in *Intelligent Control and Automation, Proceedings of the 4th World Congress On* 569–572.

---

# Autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašas

## **Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose**

Baskys, A.; Zlosnikas, V. 2006b. Asymmetric PI controller for mechatronic systems, *Solid state phenomena* 113, 25–28. ISSN 1012-0394. (ISI Web of Science).

Baskys A., Zlosnikas V. 2006d. Control of plants with asymmetric dynamics, *Elektronika i sviaz*, No 2, p. 49–53. ISSN 1811-4512.

Zlosnikas, V.; Baskys, A. 2008. PID controller with the enhanced disturbance rejection, *Electronics and Electrical Engineering* 5(85): 65–68. ISSN 1392-1215. (ISI Web of Science).

Zlosnikas, V.; Baskys, A.; Gobis, V. 2009. Investigation of asymmetric PI controller using hardware-in-the-loop simulation system, *Electronics and Electrical Engineering* 7(95): 7–10. ISSN 1392-1215. (ISI Web of Science).

Zlosnikas, V.; Baskys, A.; Gobis, V. 2011. Stability Analysis of Control Systems with the Asymmetric Controllers using Frequency Domain Criterion, *Electronics and Electrical Engineering* 5(111): 63–66. ISSN 1392-1215. (ISI Web of Science).

## **Straipsniai kituose leidiniuose**

Baskys, A.; Zlosnikas, V. Controller for plants with the asymmetric dynamics, in *The Proc. of Int. Baltic Electronics conf. BEC 2006* (2–4, October 2006c, Tallinn, Estonia): 145–148. ISSN 1736–3705, ISBN 1-4244-0414-2.

Baskys, A.; Zlosnikas, V. Asymmetric PID controller, in *The Proc. of 32nd IEEE Industrial electronics conf. IEEE-IECON 2006* (6–10 November, 2006a, Paris, France) 219–223. ISSN 1553-572X.

Baskys A.; Gobis V; Zlosnikas V. Control system with the set point observation, in *The Proc. of 13th Int. Power Electronics and Motion Control conf., EPE–PEMC 2008* (1–3 September 2008, Poznan): 1155–1158. ISBN-978-1-4244-1742-1.

Baskys, A.; Zlosnikas, V. Control of plant with dynamics asymmetry caused by the actuator rate saturation change, in *The Proc. of IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEEE IEMDC 2009* (3–6 May, Miami, USA, 2009b): 292–297. ISBN: 978-1-4244-4252-2.

Baskys, A.; Zlosnikas, V. Control of system with the switched actuator rate limitation, in *the Proc of 13th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2009* ( 8–10 September, Barcelona , Spain, 2009a): 1–8. ISBN 978-9-0758-1500-9.

Baskys A.; Zlosnikas V. Control of the plant with the response delay asymmetry, in *The Proc. of 14th Int. Power Electronics and Motion Control conf., EPE–PEMC 2010* (6–8 September 2010, Ohrid, Macedonia): T5–102–106. ISBN 978-1-4244-7845-5.



Valerijus ZLOSNIKAS

DAŽNIO KEITIKLIŲ ASIMETRINIŲ REGULIATORIŲ  
KŪRIMAS IR TYRIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,  
elektros ir elektronikos inžinerija (01T)

DEVELOPMENT OF ASYMMETRIC CONTROLLERS  
FOR FREQUENCY CONVERTERS

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,  
Electrical and Electronic Engineering (01T)

2013 05 03. 8 sp. I. Tiražas 20 egz.  
Vilniaus Gedimino technikos universiteto  
leidykla „Technika“,  
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,  
<http://leidykla.vgtu.lt>  
Spausdino UAB „Ciklonas“  
J. Jasinskio g. 15, 01111 Vilnius