



UNIVERZITET U NIŠU  
ELEKTRONSKI FAKULTET



**Staniša Lj. Perić**

**SAVREMENE TEHNIKE UPRAVLJANJA SISTEMOM  
PROTIV BLOKIRANJA TOČKOVA**

doktorska disertacija

Niš, 2015.



UNIVERZITET U NIŠU  
ELEKTRONSKI FAKULTET



**Staniša Lj. Perić**

# **SAVREMENE TEHNIKE UPRAVLJANJA SISTEMOM PROTIV BLOKIRANJA TOČKOVA**

doktorska disertacija

Tekst ove doktorske disertacije

stavlja se na uvid javnosti,

u skladu sa članom 30., stav 8. Zakona o visokom obrazovanju

("Sl. glasnik RS", br. 76/2005, 100/2007 - autentično tumačenje, 97/2008, 44/2010, 93/2012, 89/2013 i  
99/2014)

## **NAPOMENA O AUTORSKIM PRAVIMA:**

Ovaj tekst se smatra rukopisom i samo se saopštava javnosti (član 7. Zakona o autorskim i srodnim  
pravima, "Sl. glasnik RS", br. 104/2009, 99/2011 i 119/2012).

Nijedan deo ove doktorske disertacije ne sme se koristiti  
ni u kakve svrhe, osim za upoznavanje sa sadržajem pre odbrane.

Niš, 2015.



UNIVERSITY OF NIS  
FACULTY OF ELECTRONIC ENGINEERING



**Staniša Lj. Perić**

**ADVANCED CONTROL TECHNIQUES IN ANTI-LOCK  
BRAKING SYSTEMS**

PhD dissertation

Niš, 2015.

## Podaci o disertaciji

### I Autor

Ime i prezime	Staniša Lj. Perić
Datum i mesto rođenja	03.11.1985. god., Kladovo
Sadašnje zaposlenje	Univerzitet u Nišu Elektronski fakultet, Niš Katedra za automatiku

### II Doktorska disertacija

Naslov	Savremene tehnike upravljanja sistemom protiv blokiranja točkova
Broj stranica	168
Broj slika	75
Broj tabela	8
Broj bibliografskih jedinica	181
Ustanova i mesto gde je disertacija urađena	Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet, Niš
Naučna oblast	Elektrotehničko i računarsko inženjerstvo
Uža naučna oblast	Automatika
UDK broj	T125 (681.518.52+681.5.01):62-529.3/.5
Mentor	Prof. dr Dragan Antić, redovni profesor

### III Ocena i odbrana

Datum prijave teme disertacije	15.09.2014. god.
Datum javne prezentacije teme za doktorsku disertaciju	29.12.2014. god.
Broj odluke i datum prihvatanja teme disertacije	NSV 8/20-01-003/15-010 od 16.03.2015. god.

Komisija za ocenu podobnosti teme disertacije	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Dragan Antić, redovni profesor, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet</li><li>2. Goran S. Đorđević, redovni profesor, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet</li><li>3. Vlastimir Nikolić, redovni profesor, Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet</li><li>4. Darko Mitić, docent, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet</li><li>5. Marko Milojković, docent, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet</li></ol>
---	---

Komisija za odbranu disertacije	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Dragan Antić, redovni profesor, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet</li><li>2. Goran S. Đorđević, redovni profesor, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet</li><li>3. Vlastimir Nikolić, redovni profesor, Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet</li><li>4. Darko Mitić, docent, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet</li><li>5. Marko Milojković, docent, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet</li></ol>
---------------------------------	---

Datum odbrane

## **Zahvalnica**

*Koristim ovu priliku da izrazim zahvalnost svom mentoru prof. dr Draganu Antiću na dragocenoj stručnoj pomoći i stalnom podsticaju tokom izrade disertacije. Takođe, izuzetnu zahvalnost dugujem kolegama doc. dr Darku Mitiću, doc. dr Marku Milojkoviću i doc. dr Saši Nikoliću za pomoć i savete tokom naučno-istraživačkog rada i izrade ove disertacije.*

*Hvala i ostalim kolegama sa Katedre za automatiku na iskazanom razumevanju tokom bavljenja naučnim radom i podstreku da njegovi rezultati dobiju zvaničnu formu.*

*Svim svojim prijateljima dugujem zahvalnost za razumevanje pošto im nisam uvek bio na raspolaganju tokom poslednjih nekoliko godina.*

*Ogromnu zahvalnost dugujem svojim roditeljima i bratu na stalnoj i bezrezervnoj podršci tokom izrade ove disertacije.*

*I na kraju, posebno se zahvaljujem svojoj verenici Nataši čija ljubav, strpljenje, razumevanje i podrška su mi, umnogome, olakšali da završim doktorsku disertaciju.*

*Autor*

*Septembar, 2015.*

## Rezime

### Savremene tehnike upravljanja sistemom protiv blokiranja točkova

Cilj istraživanja doktorske disertacije predstavlja mogućnost primene savremenih tehnika upravljanja u sistemu protiv blokiranja točkova (ABS) kod vozila, s ciljem povećanja bezbednosti putnika u saobraćaju prilikom naglog kočenja. Dat je kompletan istorijski pregled razvoja ABS-a i predstavljene su osnovne komponente ovog sistema. Imajući u vidu da je testiranje novoprojektovanih algoritama nepraktično na realnom sistemu, u disertaciji je upotrebljena laboratorijska maketa ABS-a. Dalje, izvršeno je modeliranje ovog sistema primenom različitih metoda modeliranja i, na taj način, dobijeno je nekoliko modela, pri čemu je svaki od njih korišćen prilikom projektovanja nekog od predloženih upravljanja. Pošto je pokazano da je model koji opisuje dinamiku ABS-a dosta nelinearan, poseban akcenat stavljen je na primeni kliznih režima, kako u vremenski-kontinualnom, tako i u diskretnom domenu. Ovde je izvršena modifikacija postojećih i projektovanje novih algoritama upravljanja.

Takođe, analizirane su mogućnosti kombinovanja upravljanja s kliznim režimom s različitim inteligentnim metodama upravljanja, kao što su fazi sistemi, genetički algoritmi i neuronske mreže, a sve radi prevazilaženja nedostataka pojedinih metoda upravljanja i poboljšanja performansi sistema. Fazi teorija i genetički algoritmi su upotrebljeni prilikom podešavanja parametara zakona upravljanja, čime je eliminisana potreba da se parametri podešavaju metodom pokušaja i greške. U oblasti neuronskih mreža, uvedene su značajne modifikacije u tradicionalnom sistemu sa adaptivnim neuro-fazi zaključivanjem (ANFIS), pri čemu su u određenom sloju umetnute skoro ortogonalne funkcije. Dalja adaptacija mreže izvršena je spoljašnjim stimulansom u vidu lučenja hormona iz zležde endokrinog sistema. Takođe, projektovana je nova struktura koja se sastoji od skoro ortogonalne endokrine neuronske mreže i nelinearne autoregresivne neuronske mreže sa spoljašnjim ulazom (NARX) koja je upotrebljena prilikom predikcije greške modeliranja.

Na kraju, neophodno je naglasiti da je opravdanost uvođenja i efikasnost predloženih algoritama upravljanja verifikovana nizom laboratorijskih eksperimenata uz komparativnu analizu dobijenih rezultata s rezultatima primene poznatih algoritama i metoda upravljanja.

**Ključne reči:** ABS, klizni režimi, ortogonalni filtri, minimalna varijansa, fazi regulator, genetički algoritam, neuronska mreža, ANFIS, NARX

## Summary

### Advanced control techniques in anti-lock braking systems

The main goal of research in this PhD dissertation is to investigate the possibilities of application of modern control methods in anti-lock braking system (ABS), in order to increase the safety of passengers in traffic during vehicle emergency braking. The complete historical overview of ABS development is also presented, as well as the basic components of the system. Bearing in mind that the testing of newly designed algorithms is impractical on the real system, the laboratory experimental setup of ABS is used. The modeling of system using different methods is performed first, resulting in several models, where each of them could be used during the design of a specific control method. Since it is demonstrated that the model describing the dynamics of ABS is quite nonlinear, a special emphasis is placed on the use of sliding mode control, both in the continuous- and discrete-time domains.

This dissertation also analyzes the possibility of combining sliding mode control with different intelligent control methods, such as fuzzy control systems, genetic algorithms and neural networks, all with the aim of overcoming the shortcomings of the certain control methods and improving system performances. Fuzzy control theory and genetic algorithms are implemented in setting the parameters of control laws, eliminating the need to adjust the parameters by trial and error method. In the domain of neural networks, the significant modifications in the traditional adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) are introduced, whereby almost orthogonal functions are inserted in particular network layer. The further network adaptation is performed by introducing external stimulus in the form of hormone secretion from the glands of the endocrine system. It is also designed a new structure consisting of almost orthogonal endocrine neural networks and nonlinear autoregressive neural network with external input (NARX) that is used during the prediction of modeling error.

In the end, it is important to emphasize that the justification for introducing and the effectiveness of the proposed control algorithms are verified by a series of laboratory experiments with a comparative analysis of the obtained results with the results of the application of well-known control methods.

**Keywords:** ABS, sliding mode, orthogonal filters, minimum variance, fuzzy regulator, genetic algorithm, neural network, ANFIS, NARX

## **Registar skraćenica**

### **A**

ABS - sistem protiv blokiranja točkova

ANFIS - sistem sa adaptivnim neuro-fazi zaključivanjem

### **D**

DUKKR - digitalno upravljanje s kvazi-kliznim režimom

DUKR - digitalno upravljanje s kliznim režimom

### **F**

FKR - fazi-klizni regulator

### **M**

MIMO - sistem sa više ulaza i više izlaza

### **N**

NARX - nelinearna autoregresivna neuronska mreža sa spoljašnjim ulazom

NUKKR - neuronska mreža s kvazi-kliznim režimom

### **P**

PWM - širinsko-impulsna modulacija

### **R**

RBF - funkcija sa radijalnim bazisom

RFNM - rekurentna fazi-neuronska mreža

RNM - rekurentna neuronska mreža

### **S**

SISO - sistem s jednim ulazom i jednim izlazom

SKG - srednja kvadratna greška

SOEANFIS - skoro ortogonalni endokrini ANFIS

SOENM - skoro ortogonalna endokrini neuronska mreža

SUPS - sistem upravljanja promenljive strukture

### **U**

UKR - upravljanje s kliznim režimom

UMV - upravljanje minimalnom varijansom

UPS - upravljanje promenljive strukture

UPSKR - upravljanje promenljive strukture s kliznim režimom

UUNM - učitelj-učenik neuronska mreža



## Spisak slika

Slika 1.1 Istorijski razvoj ABS-a.....	- 7 -
Slika 1.2 Komponente hidrauličnog sistema za kočenje.....	- 9 -
Slika 1.3 Šematski prikaz vakuumskog pojačavača sile kočenja.....	- 9 -
Slika 1.4 Šematski prikaz disk kočnice.....	- 10 -
Slika 1.5 Šematski prikaz doboš kočnice.....	- 11 -
Slika 1.6 Glavni kočioni cilindar.....	- 11 -
Slika 1.7 Regulator sile kočenja prema zadnjim točkovima.....	- 12 -
Slika 1.8 Osnovne komponente ABS-a.....	- 12 -
Slika 1.9 Blok dijagram upravljačke jedinice ABS-a.....	- 13 -
Slika 1.10 Grafički prikaz modulatora kočionog pritiska.....	- 14 -
Slika 1.11 a) Lokacija senzora na točku, b) Princip rada senzora.....	- 14 -
Slika 1.12 a) Izlazni napon na samom senzoru, b) Merenje broja obrtaja Holovim senzorom. .....	- 15 -
Slika 1.13 Varijante ugradnje ABS-a na putničkim vozilima, a) jednokanalni sistem, b) dvokanalni sistem, c) trokanalni sistem, d) četvorokanalni sistem.....	- 16 -
Slika 1.14 Ponašanje vozila: a) bez ABS-a, b) sa ABS-om.....	- 18 -
Slika 1.15 Laboratorijska maketa ABS-a.....	- 20 -
Slika 1.16 Glavni prozor aplikacije za rad sa laboratorijskom maketom ABS-a.....	- 22 -
Slika 1.17 Prozor sa ručnim podešavanjima laboratorijske makete ABS-a.....	- 22 -
Slika 1.18 Primer demo verzije relejnog kontrolera.....	- 23 -
Slika 2.1 Simulacioni blok dijagram ABS-a.....	- 26 -
Slika 2.2 Simulacioni rezultati kada vozilo nije opremljeno ABS-om.....	- 27 -
Slika 2.3 Simulacioni rezultati kada je vozilo opremljeno ABS-om.....	- 28 -
Slika 2.4 Grafički model ABS-a.....	- 29 -
Slika 2.5 Blok šema podešavajućeg skoro ortogonalnog filtra Minc-Ležandrovog tipa.....	- 37 -
Slika 2.6 Struktura filtra sa dve sekcije.....	- 38 -
Slika 2.7 Originalni i aproksimirani signal dobijen pomoću skoro ortogonalnog filtra sa dve sekcije.....	- 40 -
Slika 2.8 Bond graf model normalne sile na osnovu (2.34).....	- 43 -
Slika 2.9 Bond graf model na osnovu (2.35).....	- 44 -
Slika 2.10 Bond graf model na osnovu (2.36).....	- 44 -
Slika 2.11 Bond graf model ABS-a.....	- 46 -

Slika 3.1 <i>Fazni portreti dve nestabilne strukture</i> .....	- 48 -
Slika 3.2 <i>Fazni portret sistema promenljive strukture</i> .....	- 49 -
Slika 3.3 <i>Pojava četeringa na kliznoj hiperpovršini</i> .....	- 54 -
Slika 3.4 <i>Saturaciona funkcija i rezultujući granični sloj u faznoj ravni</i> .....	- 55 -
Slika 4.1 <i>Prikaz <math>\mu</math>-<math>\lambda</math> krive za različite uslove na putu</i> .....	- 62 -
Slika 4.2 <i>Prikaz <math>\mu</math>-<math>\lambda</math> krive za suvi asfalt pri različitim brzinama vozila</i> .....	- 63 -
Slika 4.3 <i>Simulacioni rezultati dobijeni primenom tradicionalnog UKR-a za <math>M_c=1</math></i> .....	- 67 -
Slika 4.4 <i>Simulacioni rezultati dobijeni primenom tradicionalnog UKR-a s eliminacijom četeringa za <math>M_c=1</math></i> .....	- 67 -
Slika 4.5 <i>Simulacioni rezultati dobijeni primenom tradicionalnog UKR-a za <math>M_c=10</math></i> .....	- 68 -
Slika 4.6 <i>Simulacioni rezultati dobijeni primenom tradicionalnog UKR-a s eliminacijom četeringa za <math>M_c=10</math></i> .....	- 68 -
Slika 4.7 <i>Eksperimentalni rezultati dobijeni primenom tradicionalnog UKR-a za <math>M_c=10</math></i> .....	- 69 -
Slika 4.8 <i>Eksperimentalni rezultati dobijeni primenom tradicionalnog UKR-a s eliminacijom četeringa za <math>M_c=10</math></i> .....	- 69 -
Slika 4.9 <i>Simulacioni rezultati dobijeni primenom integralnog UKR-a za <math>M_c=1</math></i> .....	- 70 -
Slika 4.10 <i>Simulacioni rezultati dobijeni primenom integralnog UKR-a s eliminacijom četeringa, za <math>M_c=1</math></i> .....	- 71 -
Slika 4.11 <i>Simulacioni rezultati dobijeni primenom integralnog UKR-a za <math>M_c=10</math></i> .....	- 71 -
Slika 4.12 <i>Simulacioni rezultati dobijeni primenom integralnog UKR-a s eliminacijom četeringa, za <math>M_c=10</math></i> .....	- 72 -
Slika 4.13 <i>Eksperimentalni rezultati dobijeni primenom integralnog UKR-a za <math>M_c=10</math></i> ....	- 72 -
Slika 4.14 <i>Eksperimentalni rezultati dobijeni primenom integralnog UKR-a s eliminacijom četeringa za <math>M_c=10</math></i> .....	- 73 -
Slika 4.15 <i>Simulacioni rezultati dobijeni primenom UKR-a s proporcionalno plus konstantnim zakonom dosezanja za <math>M_p=2</math> i <math>M_c=1</math></i> .....	- 74 -
Slika 4.16 <i>Eksperimentalni rezultati dobijeni primenom UKR-a s proporcionalno plus konstantnim zakonom dosezanja za <math>M_p=10</math> i <math>M_c=4</math></i> .....	- 75 -
Slika 4.17 <i>Simulacioni rezultati dobijeni primenom UKR-a s eksponencijalnim zakonom dosezanja za <math>M_c=10</math>, <math>\gamma=0,1</math>, <math>r=1</math> i <math>\beta=500</math></i> .....	- 78 -
Slika 4.18 <i>Eksperimentalni rezultati dobijeni primenom UKR-a s eksponencijalnim zakonom dosezanja za <math>M_c=10</math>, <math>\gamma=0,1</math>, <math>r=1</math> i <math>\beta=500</math></i> .....	- 79 -
Slika 4.19 <i>Simulacioni rezultati dobijeni primenom ortogonalnog UKR-a</i> .....	- 86 -
Slika 4.20 <i>Eksperimentalni rezultati dobijeni primenom relejnog upravljanja</i> .....	- 87 -

Slika 4.21 Eksperimentalni rezultati dobijeni primenom ortogonalnog UKR-a. ....	- 87 -
Slika 4.22 Zavisnost indeksa performansi i kompleksnosti kontrolera.....	- 89 -
Slika 5.1 Simulacioni rezultati primene zakona upravljanja (5.25). ....	- 96 -
Slika 5.2 Eksperimentalni rezultati primene zakona upravljanja (5.25). ....	- 97 -
Slika 5.3. Simulacioni rezultati primene zakona upravljanja (5.46). ....	- 102 -
Slika 5.4 Eksperimentalni rezultati primene zakona upravljanja (5.46). ....	- 102 -
Slika 5.5 Simulacioni rezultati primene zakona upravljanja (5.55). ....	- 105 -
Slika 5.6 Eksperimentalni rezultati primene zakona upravljanja (5.55). ....	- 106 -
Slika 5.7 Eksperimentalni rezultati primene zakona upravljanja (5.55) za $\lambda_{k+1}^{ref} = 0,3$ .....	- 106 -
Slika 5.8 Simulacioni rezultati primene zakona upravljanja (5.76). ....	- 111 -
Slika 5.9 Eksperimentalni rezultati primene zakona upravljanja (5.76). ....	- 112 -
Slika 6.1 Strukturna blok šema UKR-a s dodatnim fazi blokom. ....	- 117 -
Slika 6.2 Funkcije pripadnosti $M_c$ -fazi bloka. ....	- 118 -
Slika 6.3 Funkcije pripadnosti $M_p$ -fazi bloka. ....	- 118 -
Slika 6.4 Simulacioni rezultati primene zakona upravljanja (6.6). ....	- 119 -
Slika 6.5 Eksperimentalni rezultati primene zakona upravljanja (6.6). ....	- 120 -
Slika 6.6 Simulacioni rezultati primene zakona upravljanja (6.18). ....	- 125 -
Slika 6.7 Eksperimentalni rezultati primene zakona upravljanja (6.18). ....	- 126 -
Slika 6.8 Struktura neuronske mreže upotrebljene za modeliranje objekta upravljanja... -	132 -
Slika 6.9 Struktura neuronske mreže upotrebljene za predikciju greške modeliranja. ....	- 133 -
Slika 6.10 Simulacioni rezultati primene zakona upravljanja (6.32). ....	- 136 -
Slika 6.11 Eksperimentalni rezultati primene zakona upravljanja (6.32). ....	- 136 -

## Spisak tabela

Tabela 1.1 Hronološki prikaz statističkih podataka razvoja ABS-a. ....	- 8 -
Tabela 2.1 Vrednosti parametara ABS modela.....	- 31 -
Tabela 2.2 Optimalne vrednosti parametara skoro ortogonalnog filtra. ....	- 39 -
Tabela 4.1 Parametri linearizovanih modela sistema za različite opsege radne oblasti. ...	- 84 -
Tabela 4.2 Vrednosti parametara filtara. ....	- 63 -
Tabela 4.3 Komparativna analiza različitih metoda upravljanja.....	- 88 -
Tabela 6.1 Poređenje različitih struktura neuronskih mreža.....	- 137 -
Tabela 6.2 Komparativna analiza tradicionalne i unapređene ANFIS mreže. ....	- 137 -

# Sadržaj

<b>Uvod</b> .....	- 1 -
<b>1 ABS - istorija razvoja, komponente, podela i osnovni princip rada</b> .....	- 5 -
1.1 Istorijski pregled .....	- 5 -
1.2 Komponente standardnog kočionog sistema .....	- 8 -
1.2.1 Pojačavač sile kočenja .....	- 9 -
1.2.2 Izvršni organi sistema za kočenje .....	- 10 -
1.2.3 Glavni kočioni cilindar .....	- 11 -
1.2.4 Regulator kočenja .....	- 11 -
1.3 Komponente ABS-a .....	- 12 -
1.3.1 Centralna upravljačka jedinica.....	- 13 -
1.3.2 Modulator kočionog pritiska.....	- 13 -
1.3.3 Senzori broja obrtaja na točkovima .....	- 14 -
1.4 Podela ABS-a.....	- 15 -
1.5 Osnovni princip rada ABS-a.....	- 18 -
1.6 Opis laboratorijske makete ABS-a.....	- 19 -
<b>2 Modeliranje ABS-a</b> .....	- 24 -
2.1 Dosadašnji rezultati.....	- 24 -
2.2 Simulacioni model ABS-a .....	- 25 -
2.2.1 Simulacioni rezultati ponašanja vozila bez ABS-a.....	- 27 -
2.2.2 Simulacioni rezultati ponašanja vozila sa ABS-om.....	- 27 -
2.3 Model ABS-a u vremenski-kontinualnom domenu .....	- 28 -
2.3.1 Matematički model ABS-a .....	- 28 -
2.3.2 Model ABS-a u odnosu na proklizavanje točka .....	- 32 -
2.4 Model ABS-a u vremenski-diskretnom domenu .....	- 33 -
2.5 Modeliranje ABS-a ortogonalnim filtrima.....	- 34 -
2.5.1 Projektovanje skoro ortogonalnog filtra .....	- 35 -
2.5.2 Modeliranje dinamičkih sistema .....	- 37 -
2.5.3 Ortogonalni model ABS-a .....	- 38 -
2.6 Modeliranje ABS-a primenom bond grafova .....	- 40 -
2.6.1 Osnovni elementi .....	- 41 -
2.6.2 Sistemska procedura za dobijanje bond graf modela.....	- 42 -

2.6.3 Bond graf model ABS-a .....	- 43 -
<b>3 Teorijske osnove upravljanja s kliznim režimom .....</b>	<b>- 47 -</b>
3.1 Definicija kliznog režima.....	- 48 -
3.2 Dinamika sistema u kliznom režimu.....	- 50 -
3.2.1 Linearni sistemi.....	- 50 -
3.2.2 Nelinearni sistemi .....	- 51 -
3.2.3 Vremenski-diskretni sistemi .....	- 52 -
3.3 Problem četeringa .....	- 53 -
3.4 Upravljanje s kliznim režimom.....	- 55 -
3.4.1 Uslov dosezanja .....	- 55 -
3.4.2 Upravljački zakon dosezanja .....	- 56 -
3.5 Primena UKR-a pri praćenju zadate trajektorije i pitanje robustnosti.....	- 58 -
<b>4 ABS s UKR-om u vremenski-kontinualnom domenu .....</b>	<b>- 60 -</b>
4.1 Dosadašnji rezultati.....	- 60 -
4.2 Princip rada regulatora na osnovu $\mu$ - $\lambda$ krive .....	- 61 -
4.3 Različiti tipovi UKR-a i njihova primena na ABS .....	- 63 -
4.3.1 Tradicionalni UKR .....	- 65 -
4.3.1.1 Simulacioni rezultati .....	- 66 -
4.3.1.2 Eksperimentalni rezultati .....	- 68 -
4.3.2 Integralni UKR .....	- 69 -
4.3.2.1 Simulacioni rezultati .....	- 70 -
4.3.2.2 Eksperimentalni rezultati .....	- 72 -
4.3.3 UKR s proporcionalno plus konstantnim zakonom dosezanja .....	- 73 -
4.3.3.1 Simulacioni rezultati .....	- 74 -
4.3.3.2 Eksperimentalni rezultati .....	- 75 -
4.3.4 UKR s eksponencijalnim zakonom dosezanja.....	- 75 -
4.3.4.1 Simulacioni rezultati .....	- 77 -
4.3.4.2 Eksperimentalni rezultati .....	- 78 -
4.4 Sinteza UKR-a zasnovanog na ortogonalnom modelu ABS-a .....	- 79 -
4.4.1 Motivacija .....	- 79 -
4.4.2 Sinteza UKR-a za linearne sisteme s konačnim stabilnim nulama.....	- 80 -
4.4.3 Primena na ABS.....	- 83 -
4.4.3.1 Simulacioni rezultati .....	- 86 -
4.4.3.2 Eksperimentalni rezultati .....	- 86 -

<b>5 ABS s UKR-om u vremenski-diskretnom domenu .....</b>	<b>- 90 -</b>
5.1 Dosadašnji rezultati.....	- 90 -
5.2 Različiti tipovi DUKKR-a i njihova primena na ABS.....	- 91 -
5.2.1 Jedan pristup projektovanju DUKKR-a zasnovanog na modelu ulaz-izlaz.....	- 93 -
5.2.1.1 Simulacioni rezultati .....	- 96 -
5.2.1.2 Eksperimentalni rezultati .....	- 97 -
5.2.2 DUKKR zasnovan na modelu ulaz-izlaz s digitalnim integratorom .....	- 97 -
5.2.2.1 Simulacioni rezultati .....	- 102 -
5.2.2.2 Eksperimentalni rezultati .....	- 102 -
5.2.3 DUKKR zasnovan na modelu ulaz-izlaz s digitalnim integratorom i estimatorom greške modeliranja .....	- 103 -
5.2.3.1 Simulacioni rezultati .....	- 105 -
5.2.3.2 Eksperimentalni rezultati .....	- 105 -
5.3 Sinteza DUKKR-a zasnovanog na ortogonalnom modelu ABS-a i korišćenju UMV-a ...	- 107 -
5.3.1 Motivacija .....	- 107 -
5.3.2 DUKKR zasnovan na UMV-u .....	- 107 -
5.3.3 Primena na ABS.....	- 110 -
5.3.3.1 Simulacioni rezultati .....	- 111 -
5.3.3.2 Eksperimentalni rezultati .....	- 112 -
<b>6 Hibridne metode upravljanja ABS-om.....</b>	<b>- 113 -</b>
6.1 Upravljanje zasnovano na primeni fazi-kliznih režima .....	- 113 -
6.1.1 Dosadašnji rezultati.....	- 115 -
6.1.2 Projektovanje UKR-a s dodatnim fazi blokom.....	- 116 -
6.1.2.1 Simulacioni rezultati .....	- 119 -
6.1.2.2 Eksperimentalni rezultati .....	- 119 -
6.2 Upravljanje zasnovano na primeni fazi-kliznih režima i genetičkih algoritama ....	- 120 -
6.2.1 Dosadašnji rezultati.....	- 122 -
6.2.2 Projektovanje FKR-a s genetičkim algoritmom .....	- 122 -
6.2.2.1 Simulacioni rezultati .....	- 125 -
6.2.2.2 Eksperimentalni rezultati .....	- 126 -
6.3 Upravljanje zasnovano na primeni kliznih režima i neuronskih mreža.....	- 126 -
6.3.1 Dosadašnji rezultati.....	- 127 -

6.3.2 Projektovanje UKR-a sa estimatorom greške modeliranja dobijenim uz pomoć neuronske mreže .....	- 129 -
6.3.2.1 Simulacioni rezultati .....	- 135 -
6.3.2.2 Eksperimentalni rezultati .....	- 136 -
<b>Zaključak</b> .....	- 138 -
<b>Doprinosi doktorske disertacije</b> .....	- 141 -
<b>Literatura</b> .....	- 142 -
<b>Kratka biografija autora</b> .....	- 156 -
<b>Spisak referenci autora</b> .....	- 157 -

# Uvod

Moderna industrija neprestano nameće nove zahteve za razvojem i primenom sistema automatskog upravljanja s ciljem postizanja što većeg kvaliteta svojih proizvoda. Ovaj trend je naročito izražen u oblasti auto industrije, koja posvećuje veliku pažnju povećanju bezbednosti putnika, uvođenjem novih sistema u vozilima, koji bi trebalo da poboljšaju njihovu upravljivost u različitim uslovima korišćenja. To se, prvenstveno, postiže sistemima koji omogućavaju korekciju dejstva vozača u vožnji, upravljanje kretanjem vozila, sprečavanje blokiranja točkova, kontrolu pogonskih sila i dr. Neki od pomenutih sistema rade autonomno, dok ostali deluju u interakciji s drugim sistemima kojima je vozilo opremljeno.

Pored stalnih unapređivanja karakteristika samog motornog vozila u pogledu aerodinamičnosti, stabilnosti i karakteristika pogonskog agregata, najznačajniji elementi razvoja savremenih motornih vozila predstavljaju sistemi aktivne i pasivne zaštite i sigurnosti. Za razliku od sistema pasivne bezbednosti (vazdušni jastuci, pojasevi...), čiji je zadatak da ublaže posledice saobraćajnih nezgoda na putnike, zahtev koji se postavlja pred sisteme aktivne bezbednosti je pomoć vozaču u kritičnim situacijama tokom vožnje, kao što su naglo kočenje, prolazak kroz krivinu, izbegavanje iznenadnih prepreka na putu, a sve u cilju smanjenja rizika od nesreće usled ishitrene reakcije vozača. Jedan od najznačajnijih sistema aktivne bezbednosti je sistem protiv blokiranja točkova tzv. ABS<sup>1</sup>.

Problem blokiranja točkova pri naglom kočenju i gubitak upravljivosti vozila tom prilikom uočen je veoma rano, ali je njegovo intenzivnije rešavanje počelo pre 60-ak godina. Prvi ABS za vozila proizveden je od strane Bosh-a 1980. godine. Od tada, do danas, razvijen je veliki broj algoritama za upravljanje ABS-om, koji su manje-više uspešno rešavali problem upravljivosti vozila u situacijama naglog kočenja na različitim podlogama. Međutim, očuvanje upravljivosti, uz smanjenje dužine zaustavnog puta, ostaje aktuelni inženjerski problem, koji otvara prostor za dalja istraživanja u oblasti razvoja i primene novih algoritama za upravljanje ABS-om.

Model koji opisuje dinamiku ABS-a izrazito je nelinearan usled nelinearnih karakteristika samog procesa kočenja. Pored toga, na sistem deluju spoljašnji poremećaji, koji ne mogu da se predvide, a parametri sistema variraju u toku normalne eksploatacije. Usled toga, kao jedan od logičnih izbora za upravljanje ABS-om nameće se upravljanje promenljive

---

<sup>1</sup> eng. Anti-lock Braking System



strukture s kliznim režimom (UPSKR), upravo zbog svoje robustnosti na promenu parametara i dejstvo spoljašnjih poremećaja.

Upravljanje promenljive strukture (UPS) pripada klasi nelinearnih zakona upravljanja, pri čemu je klizni režim od posebnog značaja kod ovih algoritama, a nastaje kada upravljanje obezbedi kretanje fazne tačke sistema po prethodno definisanoj kliznoj hiperpovršini, određenoj tzv. prekidačkom funkcijom. Glavni nedostatak UPSKR-a je pojava četeringa, koji može da pobudi nemodeliranu dinamiku i izazove habanje mehaničkih delova sistema.

Glavna ideja kod projektovanja algoritama za upravljanje ovim sistemom vodi se činjenicom da jačina kočionog pritiska treba da zadovolji uslov maksimalnog kočenja, a da se pri tome ne prouzrokuje blokiranje točkova, odnosno da se održi najbolje trenje točkova s površinom po kojoj se vozilo kreće. Ovaj cilj može da se ostvari obezbeđivanjem željenog koeficijenta prijanjanja točkova vozila, koji određuje odnos između sile trenja, generisane tokom ubrzanja ili kočenja, i normalnog opterećenja vozila. Pokazano je da je ovaj koeficijent u nelinearnoj zavisnosti od proklizavanja točka, koje se definiše kao relativna razlika između brzine vozila i brzine točka. U većini dosadašnjih istraživanja, ABS kontroler napravljen je tako da kontroliše proklizavanje točka, s tim da koeficijent prijanjanja točkova vozila ostvari svoju maksimalnu vrednost. Uglavnom se željeno proklizavanje točka bira tako da bude konstantno.

U ovoj disertaciji poseban akcenat biće stavljen upravo na projektovanje i analizu ponašanja ABS-a sa različitim algoritmima upravljanja s kliznim režimom (UKR) ili algoritmima na bazi kombinacije nekoliko savremenih tehnika upravljanja od kojih je jedna uvek UKR. Shodno tome, disertacija je podeljena u šest poglavlja. Svako poglavlje (osim prvo) počinje kratkim pregledom izložene materije i dosadašnjim rezultatima, a nastavlja sa detaljnim opisom razmatrane problematike. Na kraju poglavlja, za svaki od algoritama izvršene su računarske simulacije, obavljeni realni eksperimenti na laboratorijskoj maketi ABS-a i data detaljna analiza dobijenih rezultata.

U prvom poglavlju data je kratka istorija razvoja ABS-a. Pošto ABS predstavlja dodatnu opremu u savremenim vozilima, pri čemu vozilo može da funkcioniše i bez njega, ali je u znatnoj meri poboljšano funkcionisanje sa njim, najpre su predstavljene komponente standardnog kočionog sistema s kratkim funkcionalnim opisom. Nakon toga, opisane su komponente ABS-a i data je njegova podela u odnosu na broj ugrađenih aktuatora i senzora. Na kraju ovog poglavlja, dat je osnovni princip rada ABS-a s ciljem jasnijeg praćenja doktorske disertacije, kao i opis laboratorijske makete ABS-a, koja je upotrebljena prilikom svih simulacionih i eksperimentalnih validacija algoritama upravljanja.

U drugom poglavlju doktorske disertacije, posebna pažnja posvećena je modeliranju ABS-a. Polazeći od diferencijalnih jednačina, koje opisuju dinamiku sistema, uspostavljene su neophodne matematičke relacije i razvijen je matematički model ABS-a u vremenski-kontinualnom domenu. Kako bi se dobijeni model prilagodio zahtevanom zadatku upravljanja (održavanje konstantne vrednosti proklizavanja), izveden je novi oblik modela ABS-a u funkciji od proklizavanja točka. Primenom procesa diskretizacije, u sledećem koraku, dobijen je diskretni model ABS-a. Na kraju, primenom bond graf tehnike modeliranja i ortogonalnih filtara dobijenu su novi modeli ABS-a, koji imaju nekoliko prednosti u odnosu na druge postojeće modele. Svi ovi modeli upotrebljeni su prilikom projektovanja algoritama u narednim poglavljima doktorske disertacije.

Uzimajući u obzir činjenicu da su svi projektovani algoritmi upravljanja zasnovani na teoriji sistema promenljive strukture s kliznim režimom ili klizni režimi čine bar jedan deo upravljačke logike, u trećem poglavlju dat je kratak pregled teorijske osnove UPS-a s posebnim osvrtom na klizne režime. U ovom poglavlju date su neophodne matematičke relacije za razumevanje primene UKR-a kod vremenski kontinualnih linearnih i nelinearnih, kao i diskretnih sistema. Takođe, opisan je jedan od najvećih nedostataka ove metode upravljanja tzv. četering. Na kraju poglavlja, data je i matematička osnova u slučaju praćenja zadate trajektorije na ulazu sistema. Problem praćenja konstantne referentne vrednosti na ulazu je deo prethodno razmatranog problema i njegovo rešavanje rezultuje projektovanjem sistema automatskog upravljanja tipa regulatora.

Četvrto poglavlje ispituje mogućnost primene nekoliko algoritama UKR-a u vremenski-kontinualnom domenu. Najpre je data matematička osnova opisanih algoritama, počevši od tradicionalnog UKR-a, preko integralnog UKR-a, upravljanja s proporcionalno plus konstantnim zakonom dosezanja, pa sve do UKR-a zasnovanom na eksponencijalnom zakonu dosezanja. Koristeći model koji je dobijen primenom ortogonalnih filtara, projektovan je algoritam upravljanja koji se, takođe, zasniva na kliznom režimu. Korišćenjem ortogonalnih filtara, za različite radne tačke, generisani su različiti modeli u vidu funkcije prenosa drugog reda s konačnom stabilnom nulom za koje je projektovan UKR.

Predmet istraživanja petog poglavlja je projektovanje i primena digitalnih upravljanja s kliznim režimom (DUKR) na osnovu modela ABS-a u vremenski-diskretnom domenu. Najpre je dat prikaz kratke istorije digitalnih upravljanja s kvazi-kliznim režimom (DUKKR) i dosadašnji rezultati na polju primene u upravljanju ABS-om, a nakon toga opisana su tri različita algoritma DUKKR-a projektovanih na osnovu modela ulaz-izlaz. U cilju eliminacije četeringa, relejna komponenta zakona upravljanja filtrirana je kroz digitalni integrator.

Dodatno, ubacivanjem estimirane vrednosti signala greške u zakon upravljanja postignuta je veća tačnost u stacionarnom stanju. Kao još jedan od načina upravljanja, predložena je kombinacija DUKKR-a i upravljanja minimalne varijanse (UMV), zadržavajući pritom dobre osobine obe metode. Prilikom projektovanja ovog algoritma upravljanja iskorišćen je već dobijeni model ABS-a na bazi ortogonalnih filtara. Svaki od algoritama upravljanja prilagođen je za primenu na ABS, i verifikovan je korišćenjem digitalnih simulacija i eksperimenata na laboratorijskoj maketi.

Šesto poglavlje ispituje mogućnosti kombinacija dveju i više savremenih tehnika upravljanja s ciljem stvaranja hibridnog kontrolera testiranog u laboratorijskim uslovima na maketi ABS-a. Najpre, projektovan je regulator na osnovu fazi teorije i teorije UKR-a, pri čemu su parametri UKR-a s proporcionalno plus konstantnim zakonom dosezanja podešeni uz pomoć fazi pravila, koji zavise od udaljenosti fazne trajektorije sistema od klizne hiperpovršine i brzine prilaza vektora stanja kliznoj hiperpovršini. Nakon toga, u regulator s fazi-klizni režimom uveden je genetički algoritam, koji prilikom definisanja prekidačke funkcije nalazi optimalno rešenje za njene parametre. Takođe, u okviru ovog poglavlja, projektovan je kontroler kombinacijom neuronskih mreža i DUKKR-a, pri čemu su neuronske mreže upotrebljene za modeliranje objekta upravljanja i predikciju greške modeliranja.

Potrebno je naglasiti, da je jedan deo rezultata, neposredno proisteklih ili vezanih za ovu disertaciju, već verifikovan u naučnim radovima objavljenim u međunarodnim časopisima sa (bez) IMPACT faktorom i zbornicima sa međunarodnih i domaćih konferencija koji su citirani u okviru literature. Na kraju, dati su doprinosi ove disertacije, izvedeni su zaključci i predstavljeni su mogući dalji pravci istraživanja, zasnovani na rezultatima prikazanim u disertaciji.

# 1 ABS - istorija razvoja, komponente, podela i osnovni princip rada

Prvo poglavlje doktorske disertacije posvećeno je upoznavanju ABS-a kao glavnog objekta upravljanja. S tim u vezi, data je kratka istorija koja obuhvata prve etape razvoja ABS-a, kao i pregled trenutne upotrebe ovog sistema. Pošto je ABS zapravo pridružena oprema standardnom kočionom sistemu, ukratko su opisane glavne komponente koje čine osnovni kočioni sistem kod savremenih vozila, a zatim i komponente koje pripadaju ABS-u. Nakon toga, data je podela ABS-a prema broju ugrađenih senzora i aktuatora u kočionom vodu i opisan je osnovni princip rada ovog sistema. Na kraju, detaljno je opisana laboratorijska maketa ABS-a, koja je korišćena za eksperimentalno testiranje projektovanih algoritama upravljanja u disertaciji.

## 1.1 Istorijski pregled

ABS predstavlja elektronski sistem čiji je glavni cilj da spreči blokiranje točkova prilikom naglog kočenja, obezbeđujući na taj način najbolje moguće trenje točkova s površinom po kojoj se vozilo kreće. Ovo neposredno dovodi do bolje upravljivosti vozila, što rezultuje smanjenjem dužine zaustavnog puta i povećanjem bezbednosti putnika.

U literaturi se za pojavu ABS-a vezuju dva datuma i rad dva inženjera-istraživača. Patent nemačkog inženjera i naučnika Karla Veselsa<sup>2</sup> iz 1928. godine u vidu regulatora koji upravlja silom kočenja može da se smatra početkom razvoja ovog sistema. Međutim, ovaj patent je ostao samo na nivou koncepta. Osam godina nakon toga, 1936., kompanija čiji je vlasnik bio Robert Bosch napravila je sličan sistem, ali ni on nije otišao dalje od faze testiranja (Lawes, 2014).

Neki izvori, za same početke razvoja ABS-a vezuju i rad francuskog istraživača Gabrijela Voizina<sup>3</sup> iz 1929. godine, koji je ABS prvobitno razvijao za upotrebu kod aviona. Ovi sistemi koriste zamajac i ventil povezan na hidrauličnu liniju koja snabdeva kočione cilindre (Internet dokument, 2014(a)). Zamajac je vezan za bubanj koji radi istom brzinom kao i točak. Prilikom normalnog kočenja, bubanj i zamajac bi trebalo da se okreću istom

---

<sup>2</sup> Karl Wessels, nemački inženjer i naučnik.

<sup>3</sup> Gabriel Voisin, francuski pionir u auto- i avionskoj industriji.

brzinom. Međutim, ako točak usporava, onda će i bubanj da učini isto, ostavljajući zamajac da se okreće bržim tempom. Ovo uzrokuje otvaranje ventila, omogućavajući tako da mala količina kočione tečnosti zaobiđe glavni cilindar i ode u lokalni rezervoar, što dovodi do smanjenja pritiska u cilindru i otpuštanja kočnica. Upotreba bubnja i zamajca znači da je ventil otvoren samo kada se točak okreće. U fazi testiranja, zabeleženo je poboljšanje od 30% kod performansi kočenja, jer su piloti mogli odmah da primene punu silu kočnica umesto postepenog povećavanja pritiska kako bi pronašli trenutak klizanja. Dodatna pogodnost bila je eliminacija mogućnosti nagorevanja ili zapaljivanja guma (Flight International, 1953).

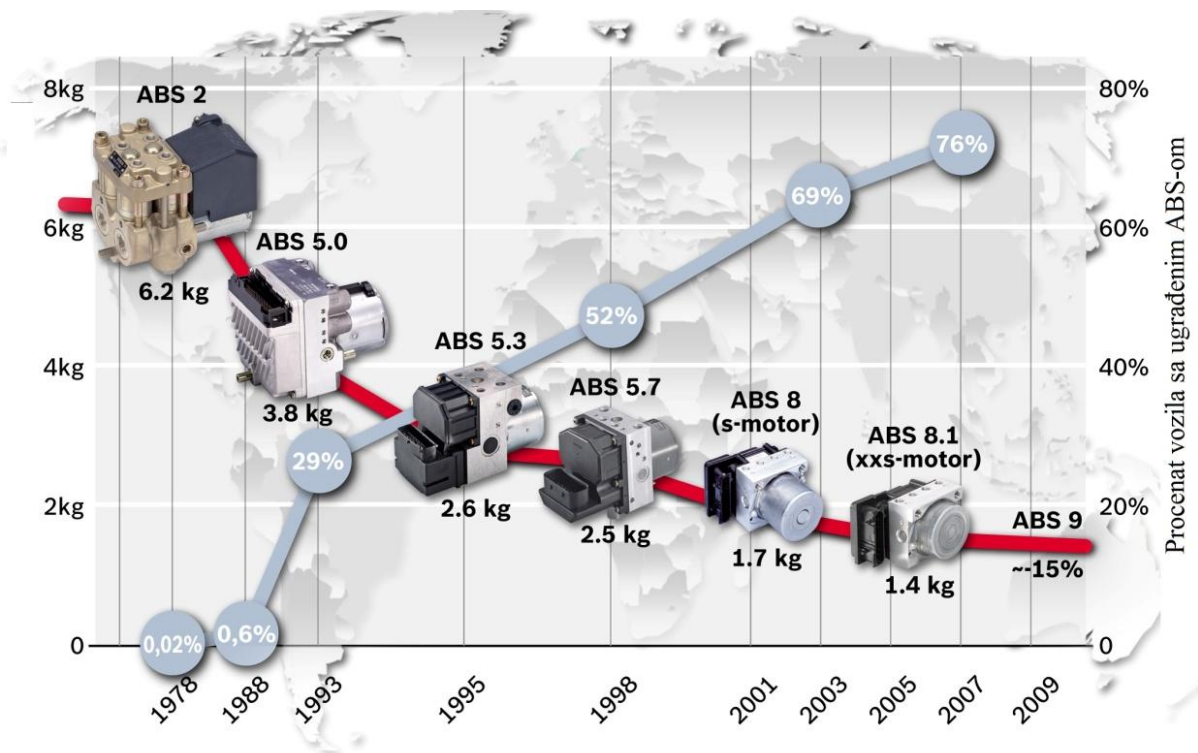
Sve do početka Drugog svetskog rata, stanje na ovom polju ostaje nepromenjeno i svaka zamisao ostaje samo na papiru. Tek 1941. godine, prvi regulator protiv blokiranja točkova je eksperimentalno testiran, ali su dobijeni rezultati bili poprilično skromni (Tigelaar, 2011). Međutim, i pored toga sistem protiv proklizavanja i dalje nalazi svoju primenu u avio-industriji.

Do ranih 1950-ih, sistem proklizavanja *Dunlop Maxaret* bio je u širokoj upotrebi u avijaciji u Velikoj Britaniji, kod aviona kao što su Avro Vulcan i Handley Page Victor, Vickers Viscount, Vickers Valiant, kao i kod kasnijih aviona kao što su Vickers VC10, Havker Siddelei Trident, Havker Siddelei 125, Havker Siddelei HS 748 (Flightglobal, 2014). Sistem *Maxaret*, uz smanjenje dužine zaustavnog puta i do 30% na ledu ili u vlažnim uslovima, povećavao je i životni vek guma.

Bez obzira na početni neuspeh primene kod drumskih vozila, prvi eksperimenti su postavili zahteve za dalji razvoj sistema: potrebni su senzori koji će pratiti brzinu okretanja točkova i centralna upravljačka jedinica za obradu tih podataka i upravljanje kočnicama. U početku senzori su bili mehanički, i kao takvi nisu mogli da se ugrađuju u automobile jer su bili manje preciznosti i pouzdanosti (potreban je ispravan rad senzora u svim uslovima, bilo da je senzor mokar ili prljav). Zbog toga, bilo je potrebno pronaći novo rešenje.

Zajedničkim radom inženjera kompanija *Daimler-Benz* i *TELDIX*, razvijen je beskontaktni merač brzine 1967. godine, čiji je rad baziran na merenju induktivnosti (Internet dokument, 2008). Sledeći korak je bio razvijanje upravljačke jedinice, čiji je zadatak bio da obradi signale sa senzora i proračuna kočionu silu. Uprkos ograničenjima koje je nametala tehnologija tog doba (doba analogne tehnike) i nepostojanju digitalnih integrisanih kola, kompanija *Daimler-Benz* konstruisala je prvu centralnu upravljačku jedinicu i prvu generaciju ABS-a predstavila svetu 12. decembra 1970. godine.

S razvojem elektronike uporedo se razvijao i ABS, pa se tek pojavom integriranih kola mogla proizvesti dovoljno mala upravljačka jedinica sposobna da prati podatke sa senzora i, u kratkom vremenu, upravlja ventilima za kontrolu pritiska. Kompaniji *Bosch* bilo je potrebno pet godina za razvoj prvog digitalnog kontrolera za potrebe testiranja, a nakon tri godine (1978.), počela je i serijska proizvodnja i ugradnja u luksuzne automobile marke Mercedes (Internet dokument, 2014(b)). Nakon 1984. godine, ABS je postao deo standardne opreme svih automobila marke Mercedes. To je bila druga generacija ovog sistema. Na slici 1.1, dat je istorijski prikaz razvoja ABS-a. Kao što može da se vidi, sistem je godinama postajao sve manji, efikasniji i robustniji. Takođe, početno pulsiranje pedale kočnice, koje ukazuje na aktiviranje ABS-a, danas je u velikoj meri smanjeno.



Slika 1.1 Istorijski razvoj ABS-a<sup>4</sup>.

ABS, koji se ugrađuje u današnje automobile, je sistem devete generacije koji je kompanija *Bosch* predstavila 2010. godine (Fu, 2000). Pretpostavlja se da je, od početka primene 1978. godine, u automobile širom sveta ugrađeno više od 100,000,000 ABS-a (Internet dokument, 2014(c); Internet dokument, 2014(d)). Ostale godine značajne za razvoj ABS-a prikazane su u tabeli 1.1.

<sup>4</sup> Slika preuzeta sa web adrese <http://www.bosch.co.jp/en/press/images/group-0807-05-03-original.jpg>

Tabela 1.1 *Hronološki prikaz statističkih podataka razvoja ABS-a.*

1981.	Proizvedeno 100,000 primeraka. Počinje ugradnja u teretna vozila.
1985.	Počinje ugradnja sistema u američka putnička vozila.
1986.	Proizveden milioniti primerak.
1992.	Proizveden deset milioniti primerak.
1993.	Izlazak na tržište pete generacije sistema.
1999.	Proizveden pedeset milioniti primerak sistema.
2000.	60% proizvedenih automobila poseduje ABS.
2001.	Serijska proizvodnja osme generacije sistema.
2010.	Predstavljanje sistema devete generacije.

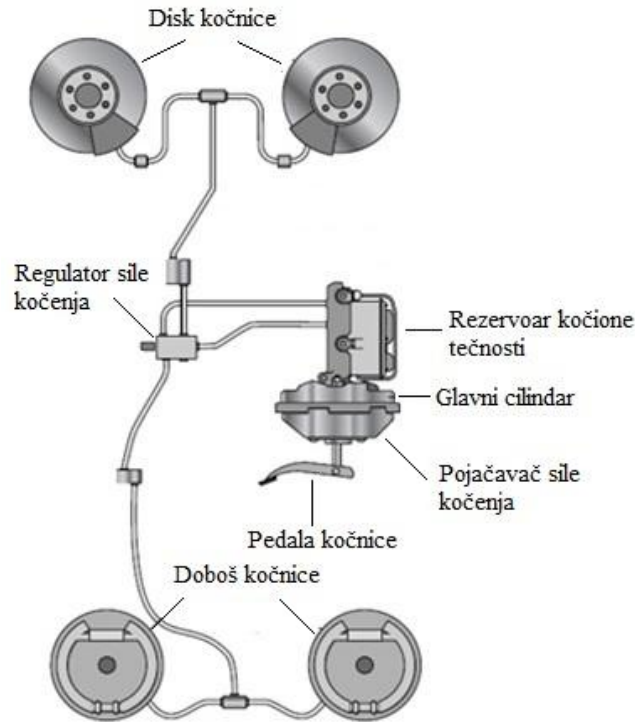
Na kraju, bitno je napomenuti i to da je razvoj jednog ovakvog tehnološkog sistema u velikoj meri smanjio broj saobraćajnih nezgoda u svetu, i time sačuvao veliki broj života.

## 1.2 Komponente standardnog kočionog sistema

Sa aspekta bezbednosti saobraćaja, uređaj za zaustavljanje je jedan od najvažnih uređaja na motornom vozilu. Kočenje je suprotan proces od ubrzavanja i omogućava vozaču da na odgovarajući način prilagodi brzinu uslovima puta i saobraćaja. Bezbednost vožnje, odnosno bezbednost svih učesnika u saobraćaju, u velikoj meri zavisi od mogućnosti kočenja vozila u svim uslovima saobraćaja. Iz ovog razloga, ispravnost sistema za kočenje je jedan od najvažnijih elemenata ukupne tehničke ispravnosti vozila.

Najčešće primenjivani sistemi za kočenje su hidraulični i pneumatski sistemi. Dok se hidraulični sistemi koriste prevashodno u putničkim vozilima, pneumatski sistemi kočenja koriste se za teretna vozila (Omerhodžić, 2013). Na slici 1.2 predstavljene su komponente hidrauličnog sistema za kočenje kod putničkih automobila.

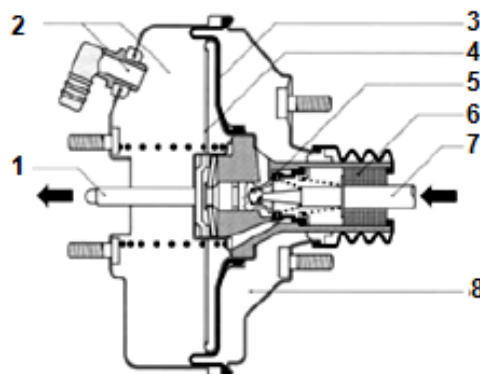
Kada vozač pritisne pedalu kočnice određenom silom, ona se posredstvom poluga prenosi do pojačavača sile kočenja. Nakon toga, dolazi do delovanja na klip glavnog kočionog cilindra kojim se ulje iz rezervoara potiskuje u vodove sistema za kočenje. Pritisak, koji se stvori delovanjem glavnog kočionog cilindra na ulje, prenosi se do izvršnih kočionih cilindara koji su smešteni na točkovima. U daljem tekstu, osnovni principi rada svih pojedinačnih komponenti, koje čine pomenuti kočioni sistem, biće objašnjeni u kratkim crtama.



Slika 1.2 Komponente hidrauličnog sistema za kočenje<sup>5</sup>.

### 1.2.1 Pojačavač sile kočenja

Pojačavač sile kočenja ima funkciju da pojača silu kojom vozač deluje na pedalu kočnice. Time se vozaču olakšava upravljanje sistemom za kočenje i povećava komfor pri upravljanju vozilom. Dva najčešće korišćena tipa pojačavača sile kočenja su vakuumski i hidraulički. Na slici 1.3 prikazan je vakuumski pojačavač sile kočenja zajedno sa svim njegovim pojedinačnim komponentama (Omerhodžić, 2013):



Slika 1.3 Šematski prikaz vakuumskog pojačavača sile kočenja. 1° Izlazni klip prema glavnom cilindru, 2° Vakumska komora, 3° Membrana, 4° Radni klip, 5° Upravljački ventil, 6° Filter vazduha, 7° Ulazni klip (sa pedale kočnice), 8° Radna komora.

<sup>5</sup> Slika preuzeta sa web adrese <http://images.military.com/media/offduty/auto-center/figure4-14.jpg>

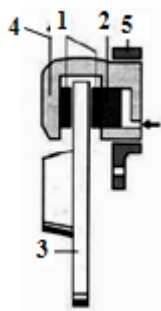


Vakuumski pojačavač sile kočenja za svoj rad koristi potpritisak u usisnoj grani motora ili posebne vakuum pumpe za pojačavanje sile s pedale kočnice. To se postiže pomoću dve komore međusobno odvojene membranom, gde je vakuumska komora (2) spojena sa usisnom granom sa potpritisakom, a radna komora (8), preko upravljačkog ventila (5), spojena sa atmosferom. Razlika pritiska između ove dve komore omogućava pojačavanje sile kojom se deluje preko pedale kočnice. Hidraulički pojačavač sile kočenja funkcioniše na sličan način, s tim što se kod njega za rad koristi neki od fluida umesto vazduha.

### 1.2.2 Izvršni organi sistema za kočenje

Pod izvršnim organima sistema za kočenje vozila se podrazumevaju disk i doboš kočnice sa izvršnim cilindrima. Oni imaju ulogu da transformišu pritisak fluida u moment kočenja, a to se postiže trenjem dva elementa.

Disk kočnica (slika 1.4) je vrsta kočnice koja se montira na točak i onda usporava okretanje točka uz pomoć trenja izazvanog pritiskom kočione pločice na diskove kočnica. Kočioni disk se obično pravi od livenog gvožđa, ali u nekim slučajevima može da bude i od kompozita poput ugljenih vlakna-ojačani ugljenik<sup>6</sup> ili kompozita keramičkih matrica<sup>7</sup>. Da bi se točak zaustavio, paknovima se deluje na obe strane diska, a prouzrokovano trenje izaziva usporavanje kočionog diska ili kompletno zaustavljanje točka. Kočnice pretvaraju trenje u toplotu, a ako su kočnice previše vruće one postaju manje efikasne. Taj fenomen je poznat kao "izbledele kočnice" (*eng.* brake fade). Šematski prikaz disk kočnica dat je na slici 1.4.



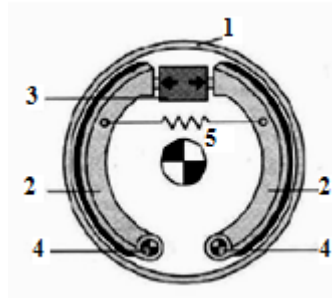
Slika 1.4 Šematski prikaz disk kočnice. 1° Kočioni paknovi, 2° Klip, 3° Disk, 4° Klješta, 5° Oslonci.

Doboš kočnica, prikazana na slici 1.5, je kočnica koja koristi trenje izazvano nizom "papuča" ili paknova koji pritiskaju rotacioni deo točka u obliku bubnja. Termin doboš kočnica obično označava kočnicu kod koje papuče pritiskaju unutrašnju površinu bubnja.

<sup>6</sup> *eng.* Carbon fibre-reinforced carbon (skraćeno C/C).

<sup>7</sup> *eng.* Ceramic matrix composites (skraćeno CMCs).

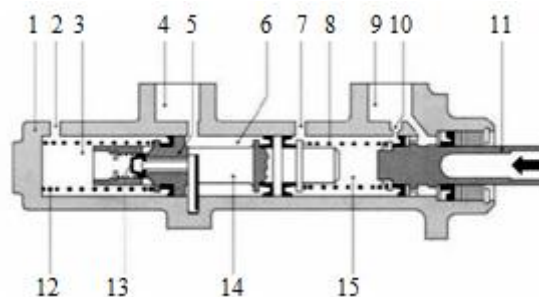
Kada papuče pritiskaju spoljnu stranu bubnja, onda se te kočnice obično nazivaju kopča kočnice.



Slika 1.5 Šematski prikaz doboš kočnice. 1° Doboš, 2° Kočioni paknovi, 3° Kočioni cilindar, 4° Oslonci, 5° Povratna opruga.

### 1.2.3 Glavni kočioni cilindar

Glavni kočioni cilindar ima zadatak da prenese silu s pedale kočnice na izvršne organe kočionog sistema smeštenih na točkovima vozila. Proces kočenja započinje i upravlja se preko ovog cilindra. Zahteva se da kočioni sistem na vozilu bude izveden s najmanje dva nezavisna kruga, kako bi sistem bio operativan u slučaju havarije na nekom delu instalacije. Glavni cilindar prikazan je na slici 1.6.

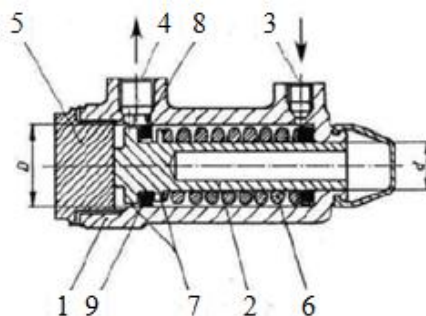


Slika 1.6 Glavni kočioni cilindar. 1° Kućište cilindra, 2°, 7° Spoj za vodove pod pritiskom prema izvršnim organima kočionog sistema (za sekundarni i primarni krug, respektivno), 3°, 15° Komora pod pritiskom (za sekundarni i primarni krug, respektivno), 4°, 9° Vod za kompezacioni rezervoar (za sekundarni i primarni krug, respektivno), 5° Plutajući klip, 6° Međukomora, 8°, 12° Opruga, 10° Prelivni otvor, 11° Potisni klip (sa pojačavača sile kočenja), 13° Centralni ventil, 14° Međuklip.

### 1.2.4 Regulator kočenja

U procesu kočenja dolazi do preraspodele opterećenja koja deluju na točkove prednje i zadnje osovine. U slučaju da postoji veće opterećenje na prednjim točkovima, veća sila može

da se prenese na podlogu. Zbog toga je neophodno da se smanji sila kočenja na zadnjoj osovini. Ovo se postiže pomoću regulatora sile kočenja koji je prikazan na slici 1.7

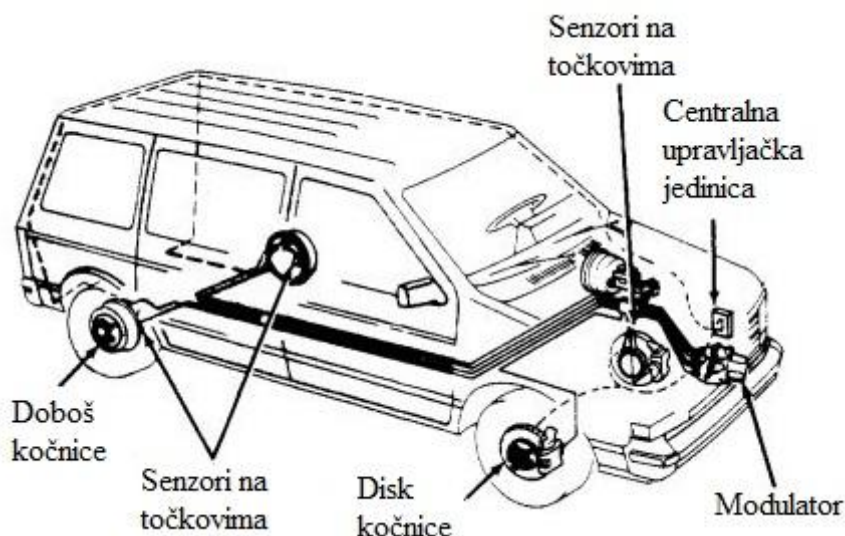


Slika 1.7 Regulator sile kočenja prema zadnjim točkovima. 1° Kućište, 2° Klip regulatora, 3° Dovodni otvor, 4° Odvodni otvor, 5° Graničnik, 6° Opruga, 7° Nosač opruge.

Regulator sile kočenja nalazi se u vodu prema točkovima zadnje osovine. Pri niskim pritiscima u kočionoj instalaciji, klip regulatora (2) ostaje u krajnjem levom položaju. Kočiona tečnost nesmetano prolazi kroz regulator, tako da je pritisak u vodu prema točku zadnje osovine jednak pritisku u vodu prema točkovima prednje osovine. Porastom pritiska u instalaciji, klip regulatora se pomera udesno, i u trenutku kada pritisak dostigne zadatu vrednost, pri kojoj počinje regulacija, ventil se zatvara.

### 1.3 Komponente ABS-a

ABS predstavlja dodatnu opremu u savremenim vozilima i on, pored komponenti standardnog kočionog sistema, sadrži sledeće elemente (slika 1.8): centralnu upravljačku jedinicu, modulator pritiska u kočionom sistemu, senzore broja obrtaja na točkovima.

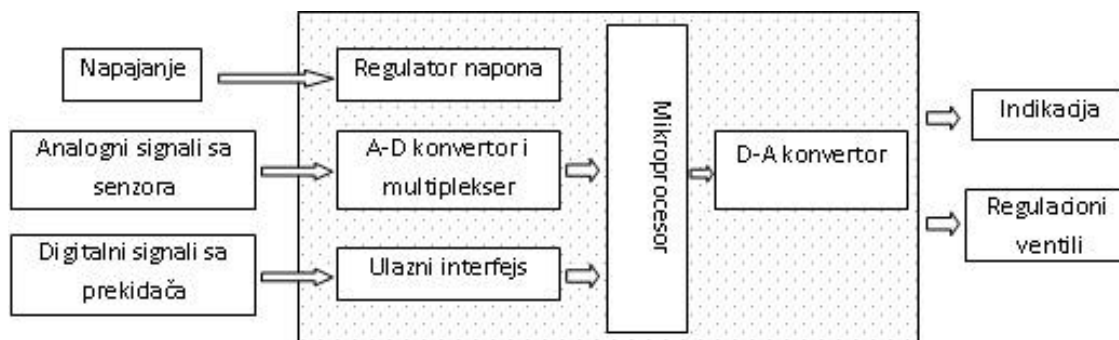


Slika 1.8 Osnovne komponente ABS-a.

Radi boljeg razumevanja osnovnog principa rada ABS-a, u daljem tekstu ukratko biće objašnjeni svi njegovi delovi.

### 1.3.1 Centralna upravljačka jedinica

Centralna upravljačka jedinica predstavlja najvažniju komponentu ABS-a. Ona je zapravo računar koji prima, pojačava i filtrira signale sa senzora, uz pomoć kojih, s druge strane, proračunava ugaonu brzinu i ubrzanje točka. Ukoliko se na osnovu dobijenih signala, detektuje mogućnost blokiranja točkova, tada računar šalje signal kojim aktivira ventil u modulatoru pritiska, kako bi regulisao pritisak u svakom izvršnom kočionom cilindru zasebno. Pored toga, upravljačka jedinica ima funkciju kontrole ispravnosti pojedinih komponenata kočionog sistema, kao i indikacije iste na instrument tabli vozila. Na slici 1.9, prikazana je blok šema upravljačke jedinice, koja bliže opisuje njene komponente i način prenosa podataka.



Slika 1.9 Blok dijagram upravljačke jedinice ABS-a.

### 1.3.2 Modulator kočionog pritiska

Modulator pritiska, predstavljen na slici 1.10, predstavlja elektro-hidraulički sklop čiji je zadatak regulacija pritiska u kočionom sistemu. Svoj zadatak obavlja upravljajući ventilima. Može se reći da modulator predstavlja vezu između glavnog kočionog cilindra i izvršnih kočionih cilindara na točkovima. Ukoliko ne primaju komande od upravljačke jedinice, ventili modulatora dozvoljavaju fluidu da slobodno cirkuliše i on ne utiče na pritisak u kočnicama. Upravljačka jedinica šalje dve vrste komandi modulatoru i to da:

- promeni pritisak fluida u kočnicama, ili,
- zadrži isti pritisak.

Modulator obično ima dva solenoida. Kada je ventil modulatora odvojena celina, on mora da upravlja dodatnim protokom fluida, pa tako, u svoju konstrukciju uključuje još dva veća ventila membrane, koji se kontrolišu uz pomoć solenoida. Pored toga, on ima i tri

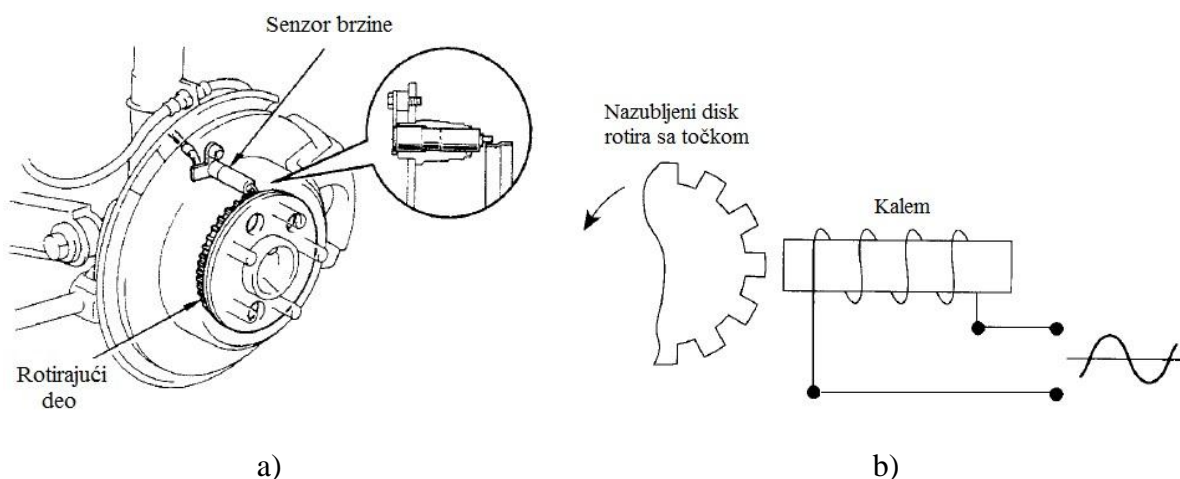
otvora: ulazni otvor (za snabdevanje) koji služi za dotok fluida, otvor za isporuku koji šalje fluid u kočioni prostor, i izduvni otvor koji ispušta fluid iz tog prostora. Obično, kada centralna upravljačka jedinica detektuje moguće blokiranje točkova, ona aktivira solenoide da zatvore otvor za snabdevanje fluidom i otvara izduvni otvor. Kada je dovoljno fluida otišlo i ne postoji više opasnost od blokiranja, izduvni otvor se zatvara i upravljačka jedinica će u zavisnosti od situacije, ili da zadrži ulazni otvor zatvorenim kako bi se održao trenutni pritisak, ili da otvori ulazni otvor i na taj način dozvoli pritisku da se poveća.



Slika 1.10 Grafički prikaz modulatora kočionog pritiska<sup>8</sup>.

### 1.3.3 Senzori broja obrtaja na točkovima

Za merenje broja obrtaja točkova najčešće se primenjuju elektromagnetni senzori, odnosno, senzori sa Holovim efektom<sup>9</sup>. Senzori su smešteni na samom točku kao što je to prikazano na slici 1.11a.

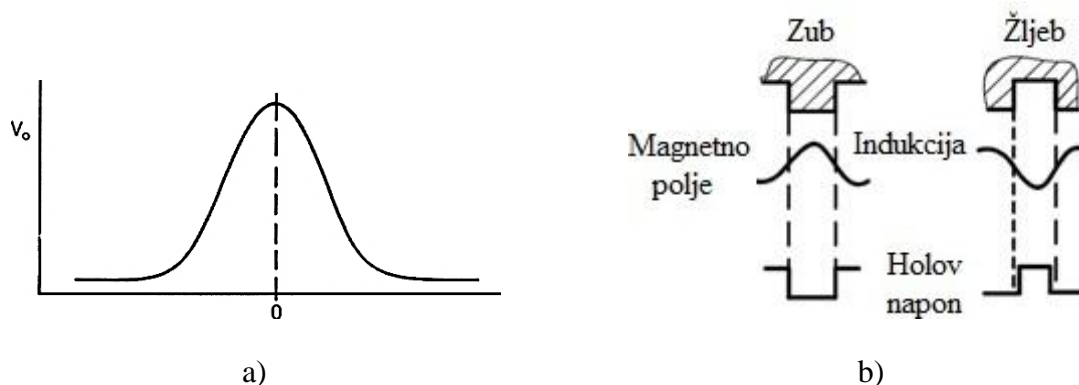


Slika 1.11 a) Lokacija senzora na točku, b) Princip rada senzora.

<sup>8</sup> Slika preuzeta sa web adrese <http://www.beamalarm.com/image/abs/modulator%20valve.jpg>

<sup>9</sup> Holov efekat je pojava kod koje se u materijalu, čvrstog agregatnog stanja, kroz koji je propuštena struja i koji je postavljen u magnetnom polju, javlja napon čiji je pravac normalan na pravac magnetnog polja.

Rad senzora baziran je na Holovom efektu tj. kada je zubac rotirajućeg diska izvan prostora između polova magneta, gustina magnetnog fluksa je mala (slika 1.11b). Kako se približava polovima magneta, magnetna permeabilnost raste pa i gustina fluksa raste proporcionalno površini koju zauzima zubac. Fluks magnetnog polja je najjači kada se zubac nalazi tačno između polova magneta. Ovo pojačanje magnetnog polja utiče na Holov element, pa se u njemu indukuje napon oblika kao na slici 1.12a. Zavisno od broja obrtaja nazubljenog diska menja se i frekvencija dobijenog napona (slika 1.12b).



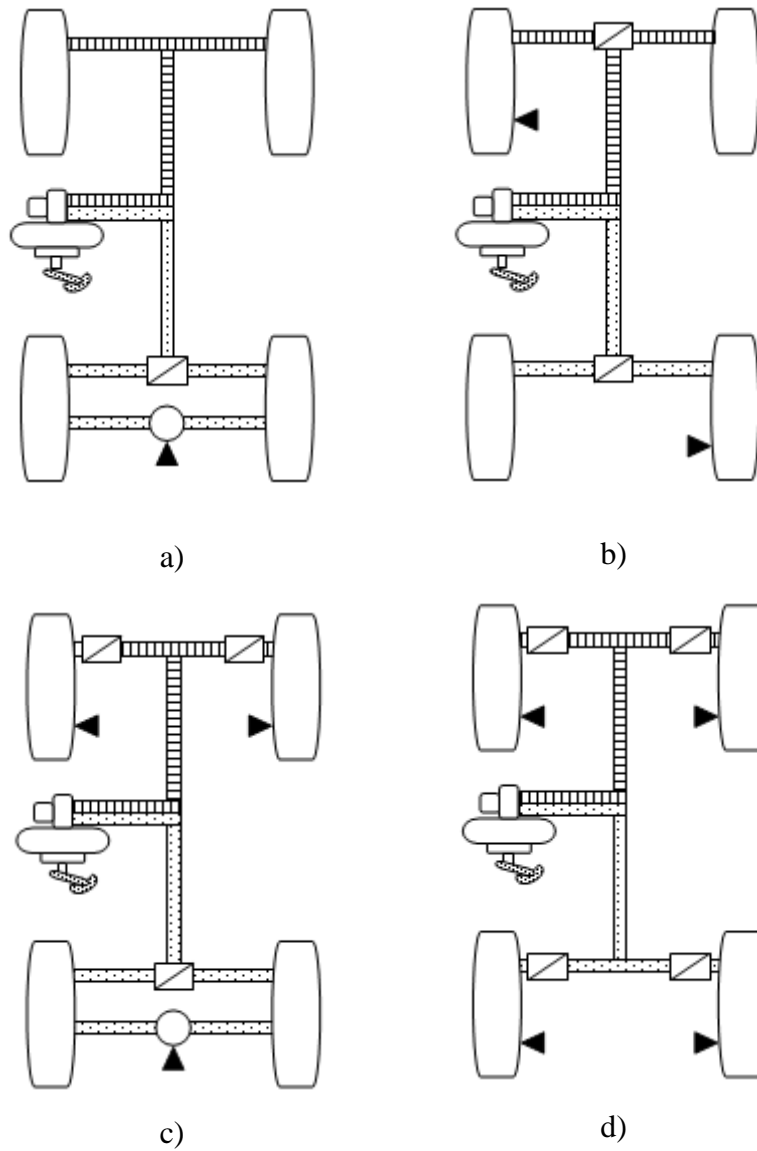
Slika 1.12 a) Izlazni napon na samom senzoru, b) Merenje broja obrtaja Holovim senzorom.

## 1.4 Podela ABS-a

Kada se automobil posmatra kao celina, tada postoje razne šeme ugradnje ABS-a i razne strategije regulisanja sile kočenja. Na automobilima se, u današnje vreme, ABS izvodi po šemama prikazanim na slici 1.13. U ovom slučaju radi se o kočionom sistemu s paralelnim kočionim krugovima. Prema broju senzora i broju nezavisno kontrolisanih točkova, ABS može da se podeli u više grupa i to na (Demić, 2008):

- jednokanalne sisteme,
- dvokanalne sisteme,
- trokanalne sisteme, i
- četvorokanalne sisteme.

Kod dvokanalnih sistema, jednostavnije i jeftinije varijante ABS-a imaju senzor broja obrtaja samo na jednom od prednjih točkova i samo na jednom od zadnjih točkova (slika 1.13b). Oba prednja i oba zadnja točka imaju po jedan aktuator, pa ovaj sistem ima dva regulaciona kanala. Mana ovog sistema je što ne obezbeđuje stabilnost kočenja i upravljivost vozila pri kočenju na putu sa različitim koeficijentima prijanjanja točkova.



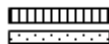
**Legenda:**



- senzor obrtaja točka



- regulacioni ventil (aktuator)



- kočioni krugovi

Slika 1.13 Varijante ugradnje ABS-a na putničkim vozilima, a) jednokanalni sistem, b) dvokanalni sistem, c) trokanalni sistem, d) četvorokanalni sistem.

Kod trokanalnog sistema, sile kočenja prednjih točkova se regulišu ponaosob, odnosno, svaki točak ima po jedan senzor i aktuator, a sile kočenja zadnjih točkova se regulišu zajedno tj. senzor se nalazi u glavnom prenosniku, a za oba točka postoji jedan aktuator (slika 1.13c). U ovoj konfiguraciji postoje tri regulaciona kanala. Regulacija sile kočenja točkova prednje osovine se u ovoj varijanti često sprovodi i po strategiji "Select high". To znači da se ignoriše signal o težnji točka koji prvi teži ka blokiranju, čime se faktički i omogućava njegovo blokiranje, ali s druge strane u potpunosti se iskorišćava raspoloživa sila prijanjanja za kočenje drugog točka. Ovim činom se, takođe, izbegava narušavanje stabilnosti automobila pri kočenju. "Select high" sistem je povoljniji sa stanovišta performansi kočenja, odnosno dužine zaustavljanja na klizavim putevima, a pruža i bolje uslove pri kočenju u krivini.

Četvorokanalni sistem je najefikasnija, ali i najskuplja varijanta ABS-a. U ovom slučaju se na svakom točku nalazi poseban senzor, poseban aktuator i četiri regulaciona kanala upravljačke jedinice, pa se sila kočenja svakog točka reguliše ponaosob (slika 1.13d). Mana ove strategije regulisanja se ogleda u tome što na putevima levi i desni točak iste osovine često imaju značajno različite koeficijente prijanjanja (npr. zbog vode koja se skuplja na desnoj ivici puta). U takvim uslovima, pri kočenju, desni točak iste osovine težiće ranije blokiranju nego levi. Centralna upravljačka jedinica ABS-a smanjiće tada ranije silu kočenja na tom točku, što će da dovede, usled različitih sila kočenja levog i desnog točka, do obrtnog momenta koji narušava stabilnost kretanja. Iz tog razloga se, za drugi kočioni krug (zadnji točkovi), često koristi "Select low" strategija regulisanja (Demić, 2008).

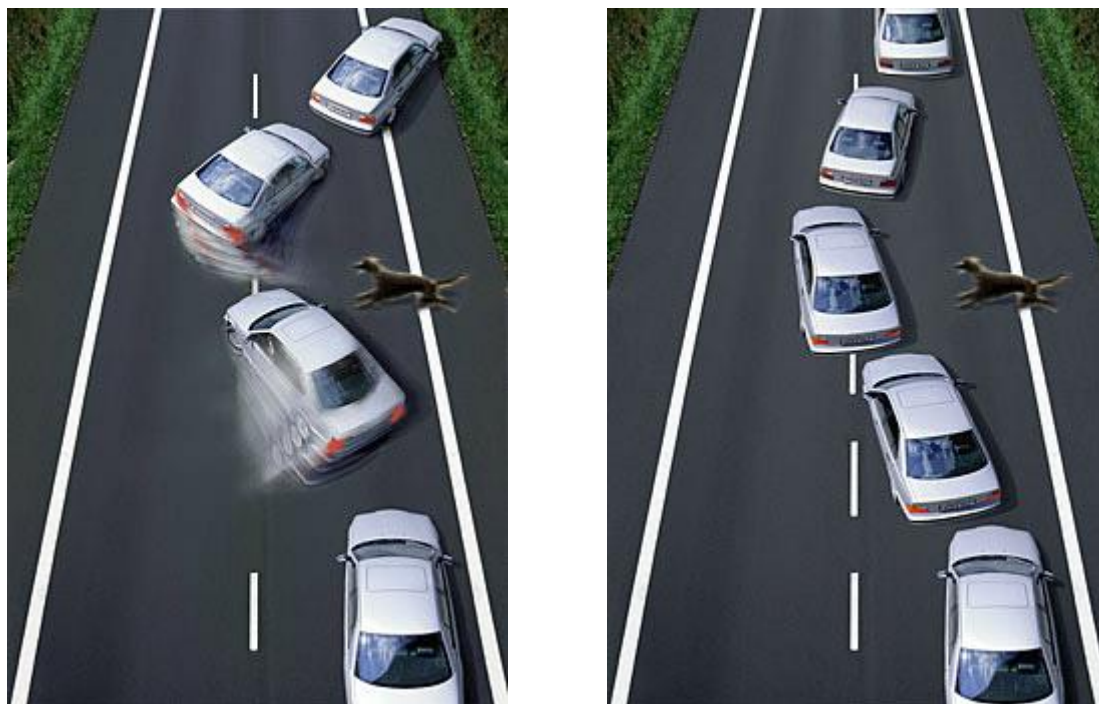
Suština ove strategije je da se sile kočenja oba točka zadnje osovine regulišu na osnovu signala točka koji prvi teži blokiranju. Time se izbegava destabilizacija vozila, ali se propušta potpuno iskorišćavanje raspoložive sile prijanjanja za kočenje točka koji se nalazi u boljim uslovima prijanjanja za podlogu. Međutim, neiskorišćeni deo raspoložive sile prijanjanja tog točka sada ostaje kao rezerva za suprotstavljanje bočnom klizanju automobila (koje može da bude izazvano različitim silama kočenja točkova prednje osovine, koje su pojedinačno regulisane).

Primenom "Select low" sistema postižu se sasvim zadovoljavajući rezultati u pogledu stabilnosti, pri čemu se efikasno sprečava blokiranje točkova, pa i gubitak stabilnosti koji je posledica blokiranja. U pogledu performansi, posebno dužine zaustavnog puta kočenja, na vrlo klizavim putevima (npr. na ledu), put kočenja se znatno produžava, u poređenju sa kočioniom putem vozila bez ABS-a.



## 1.5 Osnovni princip rada ABS-a

Iznenadna i brza reakcija vozača zbog prepreke na putu može da dovede do toga da točkovi blokiraju u toku kočenja, a posledica toga je nemogućnost upravljanja vozilom i klizanje po podlozi, pa čak, i sletanje sa puta. U takvoj situaciji aktivira se ABS koji ima sposobnost predviđanja blokiranja jednog ili više točkova. Na slici 1.14 ilustrovano je kako je upravljivost vozilom sačuvana ukoliko je vozilo opremljeno ABS-om.



Slika 1.14 Ponašanje vozila: a) bez ABS-a, b) sa ABS-om<sup>10</sup>.

ABS funkcioniše tako što senzori na točkovima konstantno prikupljaju informacije o jačini snage kočenja. Kada je kočenje toliko intenzivno da može doći do blokiranja točka, procesor u centralnoj upravljačkoj jedinici šalje informaciju hidrauličnom sistemu koji otvara elektromagnetne ventile. Ovim se smanjuje pritisak ulja u hidrauličnom sistemu, a samim tim i sila na kočnim oblogama. Čim dođe do ponovnog okretanja točka, senzor šalje tu informaciju procesoru, koji hidrauličnom sistemu šalje povratnu informaciju da zatvori elektromagnetne ventile i time ponovo maksimalno obnovi silu kočenja, sve dok ne dođe do ponovnog blokiranja točka.

<sup>10</sup> Slika preuzeta sa web adrese <http://www.motorna-vozila.com/abs-sistem-protiv-blokiranja-kocnica>

Sistemi su prilagođeni da što više puta u jedinici vremena ponavljaju operaciju menjanja pritiska u kočionom vodu, kako bi točak tokom jednog punog kruga okretanja nekoliko puta bio blokiran i odblokiran. Rad sistema manifestuje se kao pulsiranje pedale kočnice, što bi trebalo svi vozači da znaju kako se u kritičnom trenutku ne bi zbunili i eventualno smanjili pritisak na pedalu.

Promene pritiska se dešavaju vrlo brzo (3-5 puta u sekundi) zahvaljujući primeni elektromagnetnih regulacionih ventila. Opisani mehanizam se ponavlja dovoljno brzo tako da je točak stalno blizu granice blokiranja kako bi se ostvarila maksimalna efikasnost kočenja, a da se pritom ne narušava upravljivost vozila.

Dakle, u kritičnim situacijama treba pritisnuti pedalu maksimalnom silom, a za ostalo pobrinuće se elektronika. Naravno, treba okretati volan da bi se izbegla prepreka. Nedavno uvedeni ABS-ovi u prestižne modele automobila eliminišu pulsiranje pedale kočnice, ali je za sada takav broj automobila mali.

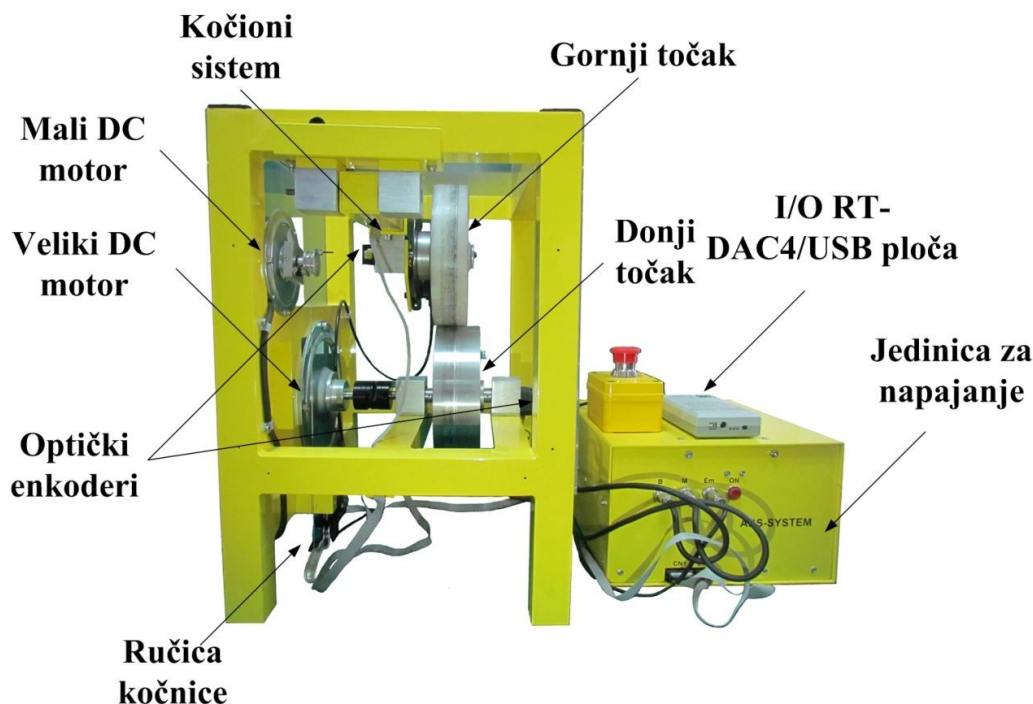
Drugim rečima, ABS se aktivira u poslednjem trenutku pred proklizavanje, tako da nema potrebe za doziranim kočenjem, što najviše pomaže neiskusnim vozačima. Nedovoljno iskusni vozači danas uz pomoć ABS-a mogu da koče izuzetno oštro, a da im, pri tome, bezbednost vožnje nije ugrožena kao što je to slučaj sa vozilima bez ABS-a. Na klizavoj podlozi, kiši, snegu i ledu, ABS je od neprocenjive pomoći, jer se i iskusnim vozačima dešava da im automobil prokliza. Koliko to može da bude opasno, nije potrebno posebno naglašavati.

## 1.6 Opis laboratorijske makete ABS-a

Svaki projektovani algoritam upravljanja u disertaciji biće ispitan kako digitalnom simulacijom, tako i u realnim uslovima. Za eksperimentalnu validaciju istraživanja upotrebljena je laboratorijska maketa napravljena od strane poljskog proizvođača *Inteco*, prikazana na slici 1.15 (Inteco, 2008). Hardverski deo ovog sistema čine:

- mehanička jedinica koja se sastoji od rama, dva točka i dva motora jednosmerne struje,
- I/O RT-DAC/USB ploča (upravljačka logika je smeštena na XILINX čipu),
- interfejs koji povezuje računar i RT-DAC ploču, i
- jedinica za napajanje

Za implementaciju algoritama upravljanja koristi se ABS Control/Simulation Toolbox koji radi u MATLAB®/Simulink® okruženju.



Slika 1.15 Laboratorijska maketa ABS-a.

Laboratorijska maketa ABS-a sastoji se od dva točka u međusobnom kontaktu. Donji točak imitira relativno kretanje puta i ima glatku površinu, koja može da se prekrije nekim određenim materijalom, u cilju bolje simulacije površine po kojoj se vozilo kreće, dok gornji točak predstavlja točak vozila.

Kočioni sistem, montiran na gornjem točku, preko hidraulične spojnice povezan je sa ručicom kočnice (SHIMANO BRM486) koju preko čelične sajle pokreće mali motor jednosmerne struje (GPN9, 20VDC, 5.5A, 75W, maksimalni broj obrtaja neopterećenog DC motora oko 3000 obr/min). Donji točak je povezan s velikim motorom jednosmerne struje (DC GPM16, 28VDC, 12.8A, 300W, maksimalni broj obrtaja neopterećenog DC motora oko 6000 obr/min), čiji je glavni zadatak ubrzavanje točka, dok je tokom faze kočenja njegovo napajanje isključeno. Pošto prilikom ubrzavanja točka motor troši veliku struju, u sistem je ugrađen interfejs koji sadrži dva otpornika povezana redno sa DC motorom kako bi se ograničila početna potrošnja struje. Upravljački signali za oba motora su u opsegu od 0,0 do +1,0, pri čemu 0,0 odgovara nultom upravljanju, dok +1,0 odgovara maksimalnoj vrednosti upravljanja.

Oba motora se upravljaju širinski-impulsno modulisanim<sup>11</sup> (PWM) signalima učestanosti od 3,5 kHz. Prescaler vrednostima podešavaju se PWM frekvencije, a rezolucija

<sup>11</sup> eng. Pulse Width Modulation

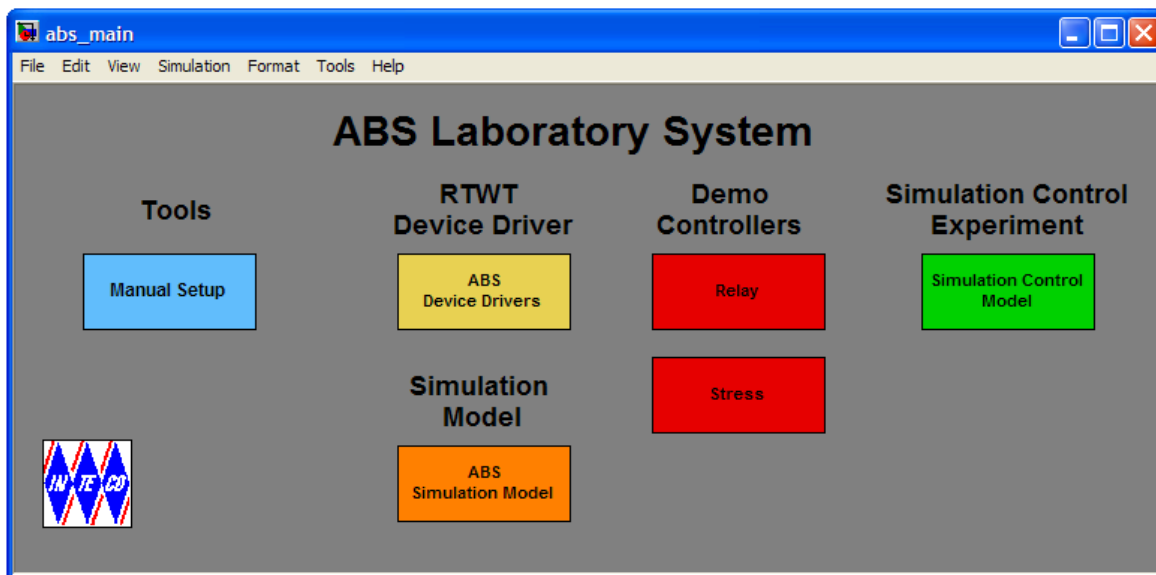
može da bude 8- ili 12-bitna. Dok 8-bitna rezolucija omogućava PWM-u da radi na visokim frekvencijama, 12-bitna omogućava PWM-u da postigne visoku tačnost izlaza. Kod 12-bitnog moda jedan PWM period sadrži 4095 impulsa ulazne prescaler frekvencije, a kod 8-bitnog jedan PWM period sadrži 255 impulsa ulazne prescaler frekvencije. Ulazna (bazna frekvencija) PWM kanala je podešena na 40MHz. Ova frekvencija se deli brojačem (prescaler), i na taj način se stvara PWM bazni period i period tzv. "H" stanja. Vrednosti prescaler-a se kreću u opsegu [0; 65535]. Frekvencija PWM signala se određuje na osnovu formula:

$$f_{PWM} = \frac{40MHz}{(prescaler + 1) \cdot 255} \text{ za 8-bitni mod, i}$$

$$f_{PWM} = \frac{40MHz}{(prescaler + 1) \cdot 4095} \text{ za 12-bitni mod.}$$

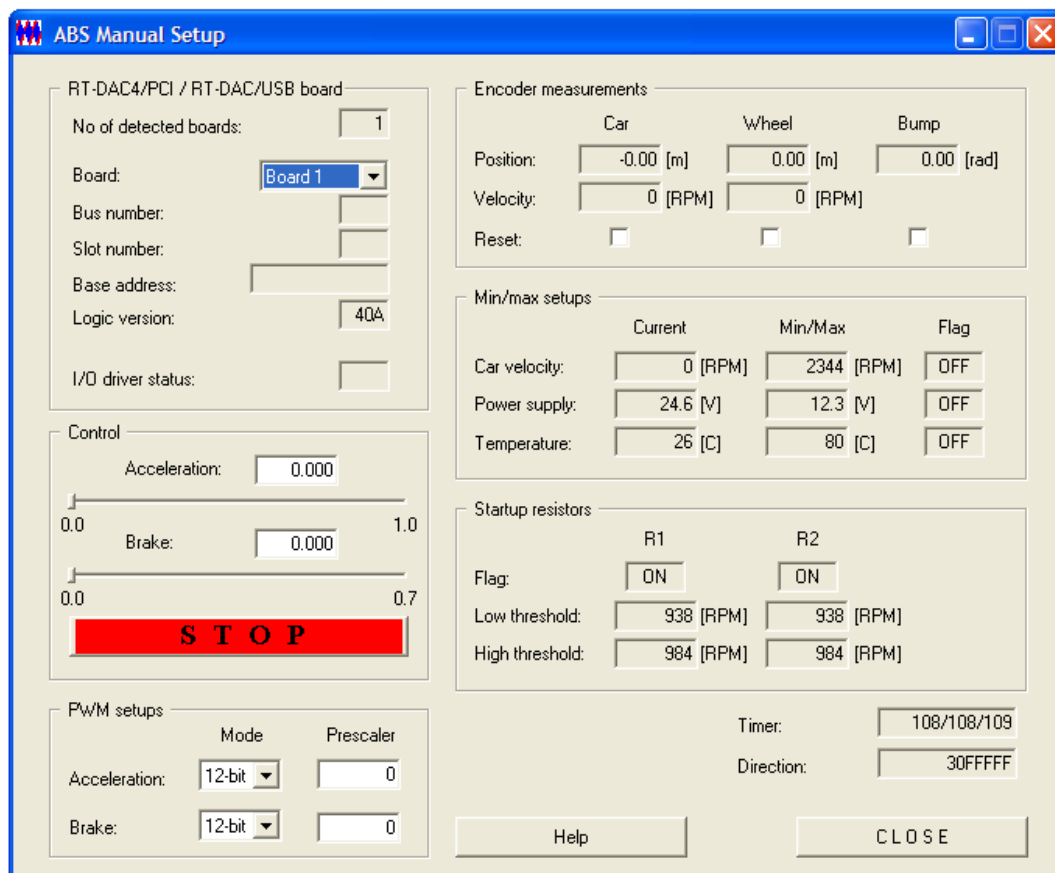
Optički enkoderi, oznake HEDM - 5505 J06, koji su postavljeni na osovine oba točka, mere ugaone pomeraje gornjeg i donjeg točka s tačnošću od 0,175°. Ovi uglovi su konvertovani preko RT-DAC ploče kako bi se dobile pozicije oba točka. Svaki enkoder se sastoji od sočiva sa LED izvorom, integrisanog kola sa detektorima i izlaznog kola, kao i enkoderskog točka koji rotira između emitora i detektora IC zraka. Pošto se ugaone brzine točkova ne mere, one se estimiraju korišćenjem Ojlerove formule s periodom odabiranja od 0.5 ms. Sistem poseduje i hardversko STOP dugme kojim se prekidaju svi upravljački signali, sistem se isključuje, a sve upravljačke vrednosti se postavljaju na nultu vrednost.

Laboratorijska ABS maketa je pomoću hardverskog interfejsa povezan s računarom, pri čemu su sve funkcije interfejsa dostupne preko ABS Toolbox-a, koji radi direktno u MATLAB®/Simulink® i RTWT toolbox okruženju. Instalacijom diska koji dolazi uz sam uređaj i ukucavanjem komande *abs\_main* u kontrolni prozor Matlab-a ulazi se u okruženje za rad sa ABS-om (slika 1.16).



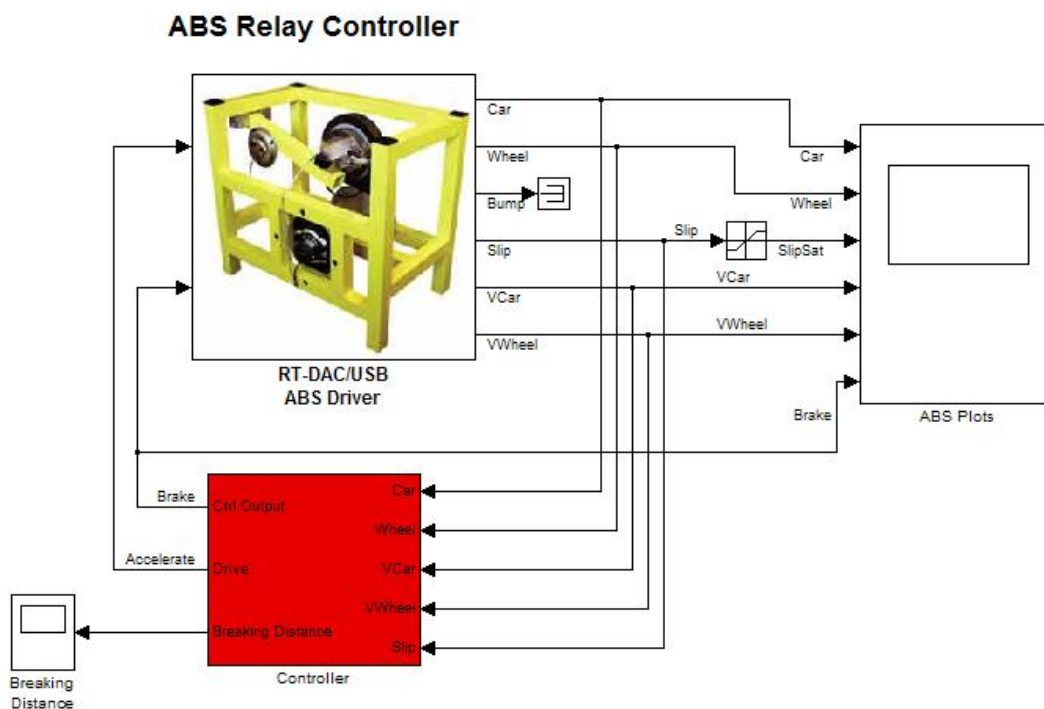
Slika 1.16 Glavni prozor aplikacije za rad sa laboratorijskom maketom ABS-a.

Na slici 1.17 prikazan je prozor aplikacije u kome je moguće izvršiti ručna podešavanja sistema. Naime, sistem, između ostalog, nudi i mogućnost izbora frekvencije PWM signala (8- ili 12-bitni), vrednost prescalera, daje osnovne informacije vezane za vrednost pozicije sa enkodera itd.



Slika 1.17 Prozor sa ručnim podešavanjima laboratorijske makete ABS-a.

Nakon upoznavanja sa osnovama sistema i njegovim principom rada, aplikacija nudi mogućnost simuliranja i eksperimentalnog testiranja u realnom vremenu preko kontrolera koji su već projektovani (slika 1.18).



Slika 1.18 Primer demo verzije relejnog kontrolera.

Na kraju, ostavljena je mogućnost korisniku da projektuje svoje algoritme za upravljanje ABS-om, čija se implementacija vrši jednostavnim programiranjem u okviru Simulink-a.

Da bi ABS na pravilan način bio implementiran u vozilo, odnosno da na pravi način deluje na vozilo, potrebno je da se predvidi ponašanje vozila u različitim uslovima vožnje. Eksperimentalno određivanje dinamičkih karakteristika vozila je skupo, pa se umesto toga primenjuju matematički modeli zasnovani na zakonima dinamike. Upravo će ovo biti tematika koja će detaljnije da se razradi u narednom poglavlju.

## 2 Modeliranje ABS-a

U ovom poglavlju biće reči o modeliranju prethodno opisane laboratorijske makete ABS-a. Pri tome, posmatra se samo kretanje jednog točka pri čemu je zanemaren međusobni uticaj ostalih točkova vozila. Takođe, razmatra se samo longitudinalno kretanje vozila (lateralno i vertikalno kretanje je zanemareno). Na kraju, otpor kotrljanja je, takođe, zanemaren, jer je veoma mali prilikom kočenja. Važno je napomenuti da ovakav uprošćeni model ne opisuje u potpunosti realni sistem, ali prikazuje njegovu dinamiku u dovoljnoj meri da se može smatrati zadovoljavajućim.

Najpre, dat je kratak pregled literature u kojoj se opisuju različiti modeli ABS-a, a nakon toga prikazan je simulacioni model ABS-a, kao i simulacioni rezultati kočenja sa ABS-om i bez njega, kako bi se uvideo značaj njegovog ugrađivanja u savremena vozila. Dalje, opisani su modeli ABS-a u vremenski-kontinualnom i vremenski-diskretnom domenu. Takođe, izvršena je linearizacija modela primenom ortogonalnih filtara, a sve u cilju projektovanja algoritama upravljanja u narednim poglavljima, gde se ovakva struktura modela pokazala kao veoma pogodna. Na kraju, kao ilustracija još jedne tehnike za dobijanje modela ABS-a, upotrebljena je bond graf tehnika modeliranja, čija se osnovna prednost ogleda u mogućnosti kombinovanja više fizičkih domena i dobijanja jednog jedinstvenog modela, kao i jednostavnije nadogradnje tako dobijenog modela.

### 2.1 Dosadašnji rezultati

Razvoj dinamičkog modela ABS-a je opisan u (Infantini, 2005). Model je razvijen tako da može da se koristi za simulaciju velikog broja situacija, koje se javljaju prilikom kočenja. Model kočenja, prilikom kretanja vozila po pravoj liniji, prezentovan je u (Will, 2000). Ovaj model uključuje longitudinalnu dinamiku vozila, dinamiku gume i površine po kojoj se vozilo kreće. Tako razvijen model testiran je na asfaltnoj površini, a za moment kočenja upotrebljen je odskočni signal. Model koji je značajno uprošćen, ali oslikava u dovoljnoj meri ponašanje realnog ABS-a, prikazan je u (Wellstead, 1997). Autori u (Ozdalyan, 1998) koriste ADAMS računarske programe za potrebe modeliranja i simulacije performansi ABS-a. U (Kazemi, 2000) razmatra se model automobila s četiri točka i sedam stepeni slobode. Proklizavanjem svakog točka upravlja se individualno tako da ono ostaje u željenom opsegu za bilo koje uslove na putu.

Pojednostavljeni model vozila s četiri točka, koji ne uzima u obzir lateralnu dinamiku i koji opisuje jednačinama mehaničko kretanje točka i dinamiku hidrauličnog sistema kočenja, opisan je u (Drakunov, 1995; Song, 2005). U ovim radovima je za model gume uzet dobro poznati Pacejka<sup>12</sup> model (Bakker, 1982). U (Wu, 2003) primenjen je prilaz s mašinskog stanovišta, i projektovan je model vozila s četiri točka, pri čemu su u model uključene jednačine koje opisuju sve elemente jednog standardnog kočionog sistema, kao što su glavni kočioni cilindar, hidraulični modulator pritiska, itd. Jedan od najkompletnijih modela, sa osam stepeni slobode, opisan je u (Zheng, 2006), gde je uzeta u obzir lateralna i vertikalna dinamika, bočno kretanje, dinamika valjanja i jednačine okretanja sva četiri točka.

S druge strane, veliki je broj radova koji se bave modeliranjem jedne četvrtine vozila, gde se u razmatranje uzima samo jedan točak dok se ostali, kao i njihov međusobni uticaj, zanemaruju. Za potrebe ispitivanja efikasnosti predloženog algoritma u (Mauer, 1995), razvijen je matematički model ABS-a s nelinearnom elastičnom suspenzijom za jednu četvrtinu vozila. U (Sharkawy, 2010) određen je model jedne četvrtine vozila u prostoru stanja, pri čemu je za model gume upotrebljen model razvijen u (Burckhard, 1993). Sličan pristup je primenjen u (Precup, 2010), pri čemu je u model u prostoru stanja uvedena još jedna jednačina koja opisuje dinamiku aktuatora. U (Hamzah, 2007) izveden je matematički model jedne četvrtine vozila sa zanemarenim efektom prigušenja između mase vozila i točka. Linearizovani model laboratorijske makete, proizvedene od strane poljske firme *Inteco*, pokazan je u (Rădac, 2008). U (Oniz, 2007; Kayacan, 2008; Kayacan, 2009; Topalov, 2009(a); Oniz, 2009) se, takođe, vrši modeliranje prethodne opisane laboratorijskog makete ABS-a.

## 2.2 Simulacioni model ABS-a

U cilju demonstracije ponašanja vozila sa ABS-om i bez njega, kao i upoznavanja sa osnovnim pojmovima koji se sreću kod ovih sistema, u ovom odeljku prikazan je simulacioni model ABS-a. Izvršene se simulacije u Matlab-u, koje su pokazale da su zaustavni put i bezbednost putnika u velikoj meri poboljšani ukoliko se koristi pomenuti sistem.

Simulacija se vrši pod pretpostavkom da se vozilo kreće (koči) pravolinijski po suvom asfaltu, gde je prijanjanje točka na podlogu okarakterisano tzv.  $\mu$ - $\lambda$  krivom (u ovom slučaju realizovanoj u formi look-up tabele).

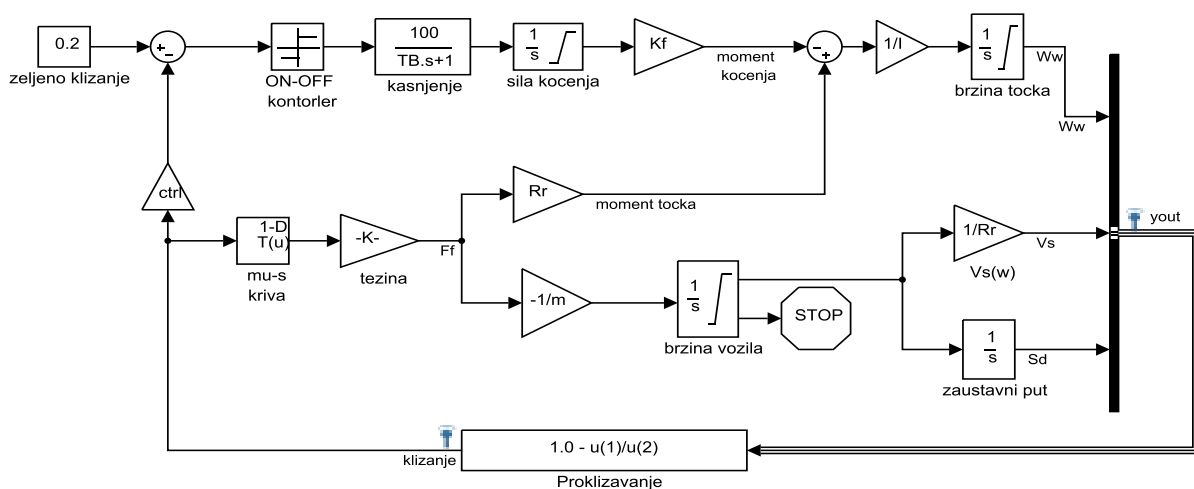
---

<sup>12</sup> Hans Bastiaan Pacejka, holandski ekspert za dinamiku vozila.



Cilj projektovanog regulatora je da se obezbedi konstantna vrednost proklizavanja  $\lambda$  (relativna razlika između brzina vozila i točka), pri kojoj sila trenja (koeficijent prijanjanja točkova  $\mu$ ) ima maksimalnu vrednost. Više o ovoj temi biće reči u odeljku kada se bude govorilo o načinu projektovanja algoritama zasnovanih na UKR-u (Poglavlje 4). Upravljanje ABS-om ilustrovano je korišćenjem vrši se jednostavnog ON-OFF kontrolera koji na svom izlazu daje vrednosti +1 ili -1, kako bi se vrednost proklizavanja zadržala u željenim granicama. Podešavanjem vrednosti klizanja može da se vrši regulacija kočionog pritiska.

Primenom jednačina opisanim u (Internet dokument, 2015) dobija se model sistema u Simulink-u, koji je dat na slici 2.1.



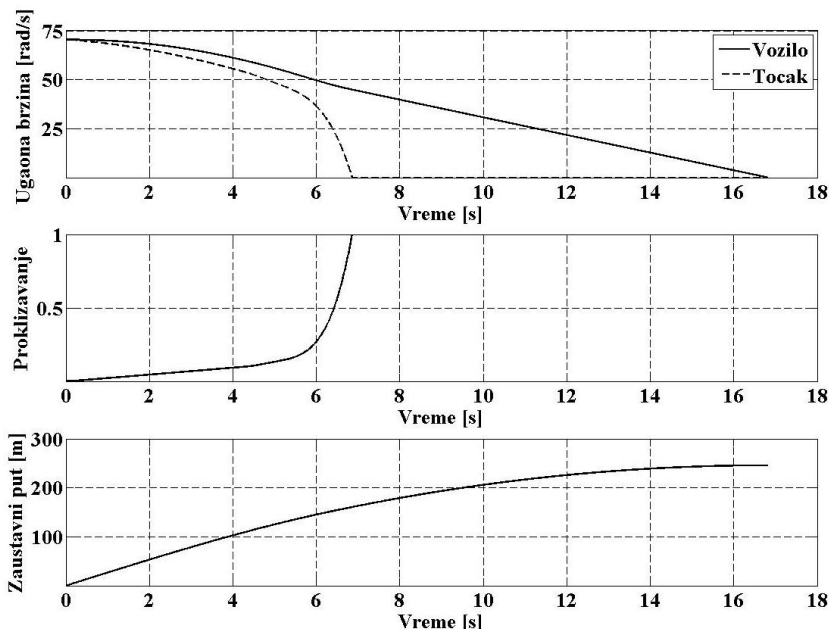
Slika 2.1 Simulacioni blok dijagram ABS-a.

Promena, odnosno, upravljanje kočionim pritiskom se obavlja ON-OFF kontrolerom na osnovu znaka signala greške između željene i stvarne vrednosti proklizavanja. Za željenu vrednost klizanja uzima se vrednost 0,2 (odjeljak 4.2). Signal sa izlaza kontrolera vodi se u inercijalni element prvog reda, koje modelira kašnjenje u vodu kroz koji prolazi kočiono ulje. Nakon toga, signal se propušta kroz integrator, čiji izlaz predstavlja kočioni pritisak, odnosno kočioni moment koji deluje na točak.

Za određivanje brzine vozila potreban je podatak o usporenju, a to se dobija deljenjem sile trenja i težine vozila. Da bi dobili podatak o momentu, koji stvara sila trenja, moramo da pomnožimo silu trenja s poluprečnikom točka. Ukupni moment, koji deluje na točak, dobija se oduzimanjem ova dva momenta. Podatak o ugaonoj brzini točka dobija se integracijom količnika ukupnog momenta i momenta inercije. Kako bi se sprečile negativne vrednosti ubrzanja i brzine prilikom simulacije, koristi se integrator sa ograničenjima.

## 2.2.1 Simulacioni rezultati ponašanja vozila bez ABS-a

Na slici 2.2 prikazane su ugaone brzine vozila i točka, proklizavanje, kao i zaustavni put kada je isključena povratna sprega ( $ctrl=0$  na slici 2.1), respektivno.



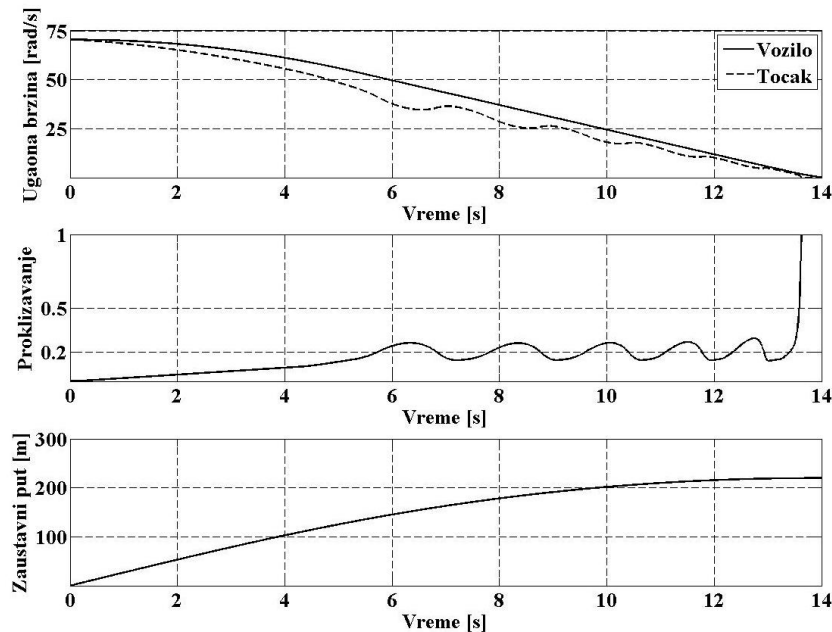
Slika 2.2 Simulacioni rezultati kada vozilo nije opremljeno ABS-om.

Sa slike vidimo da do blokiranja točka dolazi nakon 7 sekundi, u trenutku kada točak prestaje da se okreće, tj. brzina točka jednaka je nuli. U tom trenutku nastaje proklizavanje točka, tj. proklizavanje je jednako jedinici. Kada se desi opisana situacija, vozilo postaje nestabilno, odnosno neupravljivo, jer je točak ukočen i on prosto klizi po površini po kojoj se kreće, što predstavlja neželjeno ponašanje vozila i potencijalno opasnu situaciju. Sa slike može da se očitava vrednost dužine zaustavnog puta vozila koja iznosi negde oko 245m.

## 2.2.2 Simulacioni rezultati ponašanja vozila sa ABS-om

Na slici 2.3 prikazane su ugaone brzine točka i vozila, proklizavanje kao, i zaustavni put kada je uključena povratna sprega ( $ctrl=1$  na slici 2.1), respektivno. Sa slike može da se uoči kako ugaona brzina vozila linearno opada, a da se ugaona brzina točka menja s promenom kočionog momenta. Vrednost proklizavanja oscilira oko željene vrednosti od 0,2, ali je perioda oscilovanja poprilično velika. Međutim, upoređivanjem rezultata simulacija sa slika 2.2 i 2.3 vidimo da se, korišćenjem kontrolera, zaustavni put smanjio za oko 25 metara, a da je vreme potrebno da se vozilo zaustavi smanjeno sa 17 na 14 sekundi.

Na ovaj način, upravljivost vozilom je sačuvana, što dovodi do zaključka da bi se dodatnim unapređivanjem algoritma upravljanja mogli postići zavidni rezultati u pogledu bezbednosti putnika prilikom naglog zaustavljanja vozila.

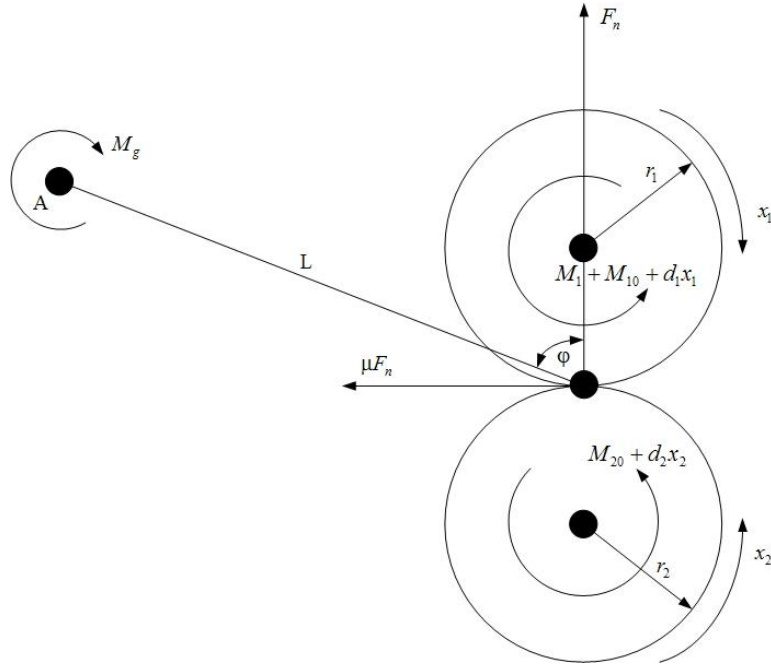


Slika 2.3 Simulacioni rezultati kada je vozilo opremljeno ABS-om.

## 2.3 Model ABS-a u vremenski-kontinualnom domenu

### 2.3.1 Matematički model ABS-a

Slika 2.4 prikazuje grafički model ABS-a jedne četvrtine vozila, što podrazumeva da se prilikom modeliranja razmatra samo jedan točak vozila, dok su preostali točkovi i njihov međusobni uticaj zanemareni. Brzina vozila jednaka je proizvodu ugaone brzine donjeg točka i njegovog poluprečnika, dok je brzina točka vozila jednaka proizvodu ugaone brzine gornjeg točka i njegovog poluprečnika. Kao što može da se vidi sa slike 2.4, na gornji točak deluju tri momenta sile: kočioni moment  $M_1$ , moment sile trenja gornjeg ležaja i moment sile trenja između točkova, dok na donji točak deluju dva momenta sile: moment sile trenja donjeg ležaja i moment sile trenja između točkova. Pored ovih, na donji točak deluju još dve sile, a to su gravitaciona sila gornjeg točka i sila pritiska amortizera. Prilikom usporavanja vozila, moment sile kočenja deluje na gornji točak, usporavajući ga na taj način.



Slika 2.4 Grafički model ABS-a.

Koristeći II Njutnov zakon, dinamika gornjeg i donjeg točka može da se predstavi sledećim jednačinama:

$$J_1 \dot{x}_1 = F_n r_1 s \mu(\lambda) - d_1 x_1 - s_1 M_{10} - s_1 M_1, \quad (2.1)$$

$$J_2 \dot{x}_2 = -F_n r_2 s \mu(\lambda) - d_2 x_2 - s_2 M_{20}, \quad (2.2)$$

pri čemu su:  $x_1$  i  $x_2$  ugaone brzine gornjeg i donjeg točka,  $r_1$  i  $r_2$  poluprečnici gornjeg i donjeg točka,  $J_1$  i  $J_2$  momenti inercije,  $d_1$  i  $d_2$  koeficijenti viskoznog trenja,  $M_{10}$  i  $M_{20}$  statična trenja, gornjeg i donjeg točka.  $\mu(\lambda)$  je koeficijent proporcije ranije pomenut kao koeficijent prijanjanja točkova vozila, a  $s$ ,  $s_1$  i  $s_2$  su pomoćne promenljive određene sa:

$$\begin{aligned} s &= \text{sgn}(r_2 x_2 - r_1 x_1), \\ s_1 &= \text{sgn}(x_1), \\ s_2 &= \text{sgn}(x_2). \end{aligned} \quad (2.3)$$

Kao što može da se vidi iz (2.1) i (2.2), sila trenja je proporcionalna normalnoj sili  $F_n$  (delovanje gornjeg na donji točak). Obično se ova sila smatra konstantnom, pri čemu se njene varijacije tretiraju kao deo nemodelirane dinamike. U disertaciji se neće primenjivati takav pristup, već će ova sila da se proračunava na osnovu sume momenata sila, koji se javljaju u tački A (slika 2.4) kao:

$$F_n = \frac{M_g + s_1 M_1 + s_1 M_{10} + d_1 x_1}{L(\sin \varphi - s\mu(\lambda) \cos \varphi)}, \quad (2.4)$$

gde  $M_g$  objedinjuje gravitacioni moment sile i moment sile amortizera koji deluju na ravnotežnu polugu,  $L$  je udaljenost između tačke kontakta točkova i ose rotacije poluge, dok je  $\varphi$  ugao između normale u tački kontakta točkova i linije  $L$ .

Pri normalnim uslovima kretanja vozila, ugaona brzina točka jednaka je ugaonoj brzini vozila, dok se tokom ubrzanja ili kočenja ove brzine međusobno razlikuju, a tu razliku nazivamo proklizavanje točka  $\lambda$  i detaljno opisujemo sa:

$$\lambda = \begin{cases} \frac{r_2 x_2 - r_1 x_1}{r_2 x_2}, r_2 x_2 \geq r_1 x_1, x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \\ \frac{r_1 x_1 - r_2 x_2}{r_1 x_1}, r_2 x_2 < r_1 x_1, x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \\ \frac{r_2 x_2 - r_1 x_1}{r_2 x_2}, r_2 x_2 < r_1 x_1, x_1 < 0, x_2 < 0, \\ \frac{r_1 x_1 - r_2 x_2}{r_1 x_1}, r_2 x_2 \geq r_1 x_1, x_1 < 0, x_2 < 0, \\ 1, x_1 < 0, x_2 \geq 0, \\ 1, x_1 \geq 0, x_2 < 0. \end{cases} \quad (2.5)$$

Na osnovu (2.5) može da se zaključi da vrednost proklizavanja jednaka nuli označava jednakost brzina točka i vozila, a da vrednost jednaka jedinici znači da se točak blokirao, odnosno da je došlo do proklizavanja. Koeficijent prijanjanja točkova vozila  $\mu(\lambda)$  je nelinearna funkcija proklizavanja točka i nekih drugih fizičkih promenljivih. Sledeća jednačina opisuje jedan od postojećih modela ovog koeficijenta:

$$\mu(\lambda) = \frac{w_4 \lambda^p}{a + \lambda^p} + w_3 \lambda^3 + w_2 \lambda^2 + w_1 \lambda. \quad (2.6)$$

Zamenom (2.4) u (2.1) i (2.2), i imajući u vidu da je:

$$S(\lambda) = \frac{s\mu(\lambda)}{L(\sin \varphi - s\mu(\lambda) \cos \varphi)}, \quad (2.7)$$

početni model sistema može da se napiše kao:

$$\dot{x}_1 = S(\lambda, x_1, x_2)(c_{11}x_1 + c_{12}) + c_{13}x_1 + c_{14} + (c_{15}S(\lambda, x_1, x_2) + c_{16})s_1(x_1)M_1, \quad (2.8)$$

$$\dot{x}_2 = S(\lambda, x_1, x_2)(c_{21}x_1 + c_{22}) + c_{23}x_1 + c_{24} + c_{25}S(\lambda, x_1, x_2)s_1(x_1)M_1, \quad (2.9)$$

pri čemu su koeficijenti određeni sa:

$$c_{11} = \frac{r_1 d_1}{J_1}, \quad c_{12} = \frac{(s_1 M_{10} + M_g) r_1}{J_1}, \quad c_{13} = -\frac{d_1}{J_1}, \quad c_{14} = -\frac{s_1 M_{10}}{J_1}, \quad c_{15} = \frac{r_1}{J_1}, \quad c_{16} = -\frac{1}{J_1}, \quad c_{21} = -\frac{r_2 d_1}{J_2},$$

$$c_{22} = -\frac{(s_1 M_{10} + M_g) r_2}{J_2}, \quad c_{23} = -\frac{d_2}{J_2}, \quad c_{24} = -\frac{s_2 M_{20}}{J_2}, \quad c_{25} = -\frac{r_2}{J_2}.$$

Vrednosti parametara matematičkog modela date su u tabeli 2.1 i koristiće se, nadalje, prilikom simulacija i eksperimenata u realnom vremenu.

Tabela 2.1 Vrednosti parametara ABS modela.

Parametar	Vrednost	Jedinica
$r_1$	$99,5 \cdot 10^{-3}$	m
$r_2$	$99 \cdot 10^{-3}$	m
$J_1$	$7,5281 \cdot 10^{-3}$	kgm <sup>2</sup>
$J_2$	$25,603 \cdot 10^{-3}$	kgm <sup>2</sup>
$d_1$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	kgm <sup>2</sup> /s
$d_2$	$2,25 \cdot 10^{-4}$	kgm <sup>2</sup> /s
$M_{10}$	$3 \cdot 10^{-3}$	Nm
$M_{20}$	$93 \cdot 10^{-3}$	Nm
$M_g$	19,6181	Nm
$\varphi$	65,61	°
$w_1$	-0,04240011450454	
$w_2$	0,00000000029375	
$w_3$	0,03508217905067	
$w_4$	0,40662691102315	
$L$	0,370	m
$p$	2,09945271667129	
$a$	0,00025724985785	

Kočioni moment  $M_1$  može da se izvede iz jednačine koja opisuje dinamiku aktuatora kojim se deluje na kočioni mehanizam:

$$\dot{M}_1 = c_{31}(b(u) - M_1), \quad (2.10)$$

pri čemu konstanta  $c_{31}$  ima vrednost 20,37. Funkcija  $b(u)$  može da se aproksimira jednačinom:

$$b(u) = \begin{cases} b_1 u + b_2, & u \geq u_0, \\ 0, & u < u_0, \end{cases} \quad (2.11)$$

gde su:  $b_1 = 15,24$ ,  $b_2 = -6,21$ ,  $u_0 = 0,415$ .

Jednačine (2.8)-(2.11) u potpunosti opisuju dinamiku razmatranog ABS-a. Međutim, potrebna je izvesna modifikacija modela, kako bi bio pogodan za projektovanje algoritama upravljanja.

### 2.3.2 Model ABS-a u odnosu na proklizavanje točka

Nakon faze ubrzavanja, u kojoj je donji točak dostigao željenu brzinu, počinje faza kočenja. U fazi kočenja brzina točka opada, dok sila koja deluje na točak raste, što dovodi do proklizavanja između točka vozila i površine puta. Brzina točka biće manja od brzine vozila tj. važiće  $r_2 x_2 \geq r_1 x_1$ , a kako je  $x_1 > 0$  i  $x_2 > 0$ , na osnovu (2.5), proklizavanje točka može da predstavi kao:

$$\lambda = \frac{r_2 x_2 - r_1 x_1}{r_2 x_2}. \quad (2.12)$$

Uzevši u obzir da je sada  $s = s_1 = s_2 = 1$ , model sistema dat jednačinama (2.8) i (2.9), postaje:

$$\dot{x}_1 = S(\lambda)(c_{11}x_1 + c_{12}) + c_{13}x_1 + c_{14} + (c_{15}S(\lambda) + c_{16})M_1, \quad (2.13)$$

$$\dot{x}_2 = S(\lambda)(c_{21}x_1 + c_{22}) + c_{23}x_1 + c_{24} + c_{25}S(\lambda)M_1. \quad (2.14)$$

Kao što je već napomenuto, u većini radova je ABS regulator projektovan tako da obezbeđuje konstantnu vrednost proklizavanja, pri kojoj sila trenja (koeficijent prijanjanja točkova vozila) ima maksimalnu vrednost (više o ovoj temi govoriće se u odeljku 4.1). Shodno tome, sada treba da se odredi model ABS-a u kome je proklizavanje točka veličina kojom se upravlja. Diferenciranjem (2.12) dobija se:

$$\dot{\lambda} = -\frac{r_1}{r_2 x_2} \dot{x}_1 + \frac{r_1 x_1}{r_2 x_2^2} \dot{x}_2. \quad (2.15)$$

Uvođenjem (2.13) i (2.14) u (2.15) i vodeći računa da je  $x_1 = \frac{r_2(1-\lambda)x_2}{r_1}$ , konačni model ABS-a je izveden je u sledećem obliku:

$$\dot{\lambda} = f(\lambda, x_2) + g(\lambda, x_2)M_1, \quad x_2 \neq 0, \quad (2.16)$$

gde je:

$$f(\lambda, x_2) = - \left( (S(\lambda)c_{11} + c_{13})(1-\lambda) + \frac{r_1}{r_2x_2}(S(\lambda)c_{12} + c_{14}) \right) + \frac{(1-\lambda)}{x_2} \left( \left( S(\lambda)c_{21} \frac{r_2}{r_1}(1-\lambda) + c_{23} \right) x_2 + S(\lambda)c_{22} + c_{24} \right), \quad (2.17)$$

$$g(\lambda, x_2) = - \frac{r_1}{r_2x_2} \left( c_{15}S(\lambda) + c_{16} - \frac{r_2}{r_1}c_{25}S(\lambda)(1-\lambda) \right). \quad (2.18)$$

Ovaj model korišćen je u disertaciji prilikom projektovanja algoritama upravljanja u vremenski-kontinualnom domenu, kao i za određivanje ekvivalentnog modela u vremenski-diskretnom domenu.

## 2.4 Model ABS-a u vremenski-diskretnom domenu

U cilju implementacije algoritama upravljanja u vremenski-diskretnom domenu, potrebno je da se izvrši diskretizacija modela ABS-a, opisanog jednačinama (2.16), (2.17) i (2.18). U literaturi je dostupno nekoliko načina diskretizacije kao što su:

- Ojlerova diskretizaciona metoda (metoda prednjih razlika),
- Ojlerova diskretizaciona metoda (metoda zadnjih razlika).
- Tustinova metoda - bilinearna transformacija,
- Runge-Kuta metoda,
- ZOH (*eng.* Zero-Order Hold) metoda,
- Metoda poklapanja polova i nula itd.

Svaka od navedenih metoda ima svojih prednosti i nedostataka, a izbor metode se pravi u zavisnosti od željene primene. U disertaciji primenjena je prva direktna metoda Ojlera (Internet dokument, 2014(e)) po kojoj  $\frac{d}{dt}$  može da se smatra približnim sa  $\frac{z-1}{T}$ , ili



uopštenije  $\frac{d(\cdot)}{dt} \sim \frac{(\cdot)_{k+1} - (\cdot)_k}{T}$ , gde je  $T$  perioda diskretizacije a  $z$  predstavlja kompleksnu promenljivu. Imajući ovo u vidu, model ABS-a (2.16) može da se predstavi sada kao:

$$\left(\frac{z-1}{T}\right)\lambda = f(\lambda, x_2) + g(\lambda, x_2)M_1. \quad (2.19)$$

Jednostavnim sređivanjem prethodnog izraza dobija se:

$$z\lambda = \lambda + Tf(\lambda, x_2) + Tg(\lambda, x_2)M_1, \quad (2.20)$$

ili:

$$\lambda_{k+1} = \lambda_k + Tf_k(\lambda, x_2) + Tg_k(\lambda, x_2)M_{1k}. \quad (2.21)$$

Ukoliko uvedemo smene:

$$\begin{aligned} f_k^d &= \lambda_k + Tf_k(\lambda, x_2), \\ g_k^d &= Tg_k(\lambda, x_2), \end{aligned} \quad (2.22)$$

tada sistem (2.21) po svojoj formi odgovara sistemu (2.16) i može da se napiše kao:

$$\lambda_{k+1} = f_k^d + g_k^d M_{1k}, \quad (2.23)$$

gde je:  $f_k^d = \lambda_k + Tf_k(\lambda, x_2)$  i  $g_k^d = Tg_k(\lambda, x_2)$ .  $f_k$ ,  $g_k$ , i  $M_{1k}$  predstavljaju vrednosti od  $f$ ,  $g$  i  $M_1$  u  $k$ -tom vremenskom trenutku.  $f_k^d$  i  $g_k^d$  predstavljaju glatke nelinearne funkcije, i uvodi se pretpostavka da je  $g_k^d$  pozitivna i ograničena funkcija. Iz poslednje jednačine se, takođe, može da se uoči da je model ABS-a u diskretnom domenu zapravo linearan u odnosu na upravljački signal  $M_{1k}$ , što će se kasnije pokazati kao veoma povoljna okolnost prilikom projektovanja digitalnih algoritama upravljanja.

## 2.5 Modeliranje ABS-a ortogonalnim filtrima

U (Precup, 2011), vrši se modeliranje laboratorijske makete ABS-a. Ustanovljeno je da ovaj sistem na uspešan način može da se predstavi funkcijom prenosa drugog reda (za nulte početne uslove), oblika:

$$G(s) = \frac{\lambda(s)}{M_1(s)} = \frac{k_g(1+sT_1)}{(1+sT_2)(1+sT_3)}, \quad (2.24)$$

gde su:  $k_g$  pojačanje,  $T_1, T_2, T_3$  vremenske konstante sistema. Vrednosti parametara funkcije prenosa (2.24) su  $k_g = 0,008$ ,  $T_1 = 111,433$ ,  $T_2 = 96,382$ ,  $T_3 = 0,013$  (Precup, 2011).

Uzimajući ovo u obzir, u ovom odeljku izvršeno je modeliranje ABS-a primenom ortogonalnih filtara, koji su se, kroz mnogobrojne radove (Antić, 2012; Milojković, 2012; Perić, 2014), već pokazali kao efikasan alat prilikom modeliranja nelinearnih dinamičkih sistema.

### 2.5.1 Projektovanje skoro ortogonalnog filtra

Tokom poslednjih godina razvijeni su novi tipovi ortogonalnih filtara (Danković, 2009(a)), skoro ortogonalnih filtara (eng. *almost orthogonal filters*) Danković, 2009(b)), poboljšanih skoro ortogonalnih filtara (eng. *improved almost orthogonal filters*) (Antić, 2012), ortogonalni filtri s kompleksnim nulama i polovima (Milojković, 2013) i generalizovani kvazi-ortogonalni filtri (Nikolić, prihvaćen za publikovanje). Ovi filtri pokazali su se kao veoma dobar matematički aparat prilikom modeliranja dinamičkih sistema (Milojković, 2010), upravljanja dinamičkim sistemima (Nikolić, 2010) i aproksimacije realnih signala koje generišu industrijski sistemi (Antić, 2012; Milojković, 2013). Takođe, ovi filtri u kombinaciji s genetičkim algoritmima mogu da se koriste za ispitivanje osetljivosti modela dinamičkih sistema (Nikolić, 2014).

U ovom odeljku, koristimo skoro ortogonalne filtre koji sadrže meru nesavršenosti  $\varepsilon$  (konstanta,  $\varepsilon \approx 0$ ) svih elemenata od kojih je sistem izrađen (Milojković, 2010). Ove konstante određuju se serijom eksperimenata (Antić, 2012).

**Definicija 2.1:** Definišimo šiftovane skoro ortogonalne Minc-Ležandrove polinome  $L_n^{(\delta)}(x)$  kao:

$$L_n^{(\delta)}(x) = \sum_{i=0}^n A_{n,i}^{\delta} x^i. \quad (2.25)$$

U (2.25),  $\delta$  predstavlja konstantu, koja je u direktnoj relaciji sa konstantom  $\varepsilon$ , tj. važi  $\delta = 1 + \varepsilon \approx 1$ , ( $0 < \varepsilon \ll 1$ ). Parametar  $\delta$  predstavlja meru nesavršenosti, koja potiče od praktične realizacije samog filtra. Napomenimo da varijacije vrednosti parametra  $\delta$  sadrže sve uticaje nesavršenih elemenata, nesavršenosti modela, kao i uticaj šumova na izlaz sistema. Opseg parametra  $\delta$  određuje se nizom eksperimenata.

Smenom  $x = e^{-t}$  u (2.25) i primenom Laplasove transformacije, dobijamo funkciju prenosa pogodnu za projektovanje predloženih šiftovanih skoro ortogonalnih filtara Minc<sup>13</sup>-Ležandrovog<sup>14</sup> tipa:

$$W_n^{(\delta)}(s) = k \frac{\prod_{i=1}^{n-1} (s - p_i \delta)}{\prod_{i=1}^n (s + p_i)} = \frac{k (s - p_1 \delta)(s - p_2 \delta) \dots (s - p_{n-1} \delta)}{(s + p_1)(s + p_2) \dots (s + p_n)}. \quad (2.26)$$

Razvoj izraza (2.26) u parcijalne razlomke daje:

$$W_n^{(\delta)}(s) = k \sum_{i=1}^n \frac{a_{n,i}(\delta)}{(s + p_i)}, \quad (2.27)$$

gde su koeficijenti  $a_{n,i}(\delta)$  definisani kao:

$$a_{n,i}(\delta) = k \frac{\prod_{k=1, k \neq i}^{n-1} (s_k - p_i \delta)}{\prod_{k=1, k \neq i}^n (s_k + p_i)}. \quad (2.28)$$

Korišćenjem transformacije  $f(s) = \bar{s} = -s$ , polovi  $p_i$  se preslikavaju u nule locirane u desnoj poluravni. Posle primene inverzne Laplasove transformacije na relaciju (2.27), dobija se sekvenca ortogonalnih racionalnih funkcija u vremenskom domenu:

$$\varphi_i^{(\delta)}(t) = \sum_{i=1}^n a_{n,i}(\delta) e^{-it}. \quad (2.29)$$

Uvođenjem smene  $e^{-t} = x$  u (2.29), dobijamo šiftovane Minc-Ležandrove ortogonalne polinome. Primitimo da ukoliko polovi imaju vrednost  $p_i \in Z$ ,  $i = 0, 1, \dots, n$  dobijamo poboljšane skoro ortogonalne polinome  $P_n^{(\delta)}(x)$ , definisane preko sledećih izraza:

$$P_n^{(\delta)}(x) = \sum_{i=0}^n A_{n,i}^{\delta} x^i, \quad (2.30)$$

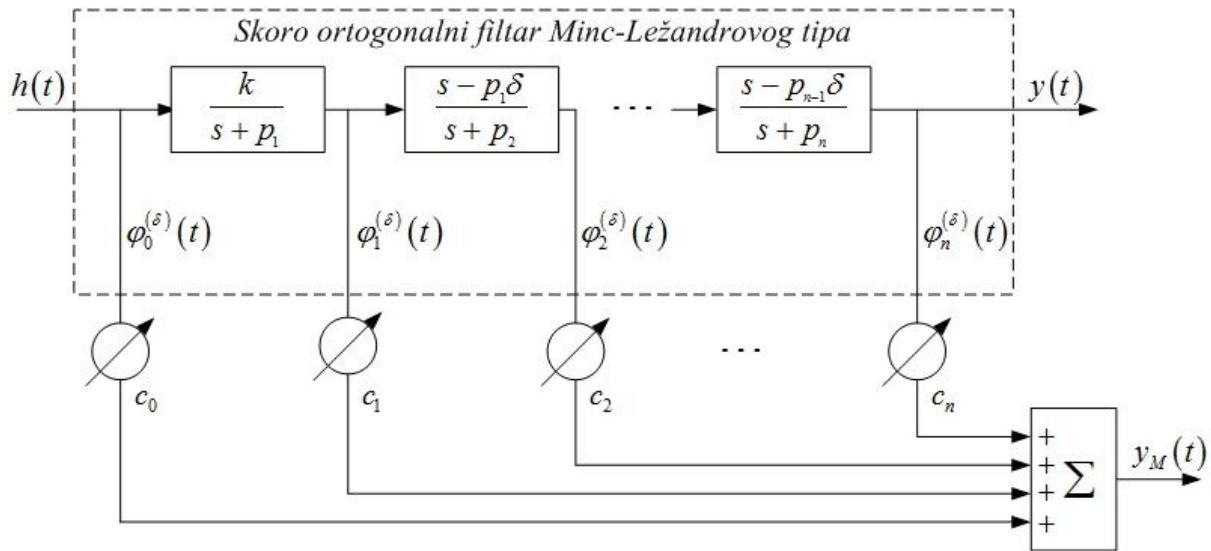
gde je:

<sup>13</sup> Herman Müntz (1884-1956), nemački matematičar

<sup>14</sup> Adrien-Marie Legendre (1752-1833), francuski matematičar

$$A_{n,i}^{\delta} = (-1)^{n+i} \frac{\Gamma(n\delta + i + 1)}{\Gamma(n\delta + 1) i! (n-i)!}. \quad (2.31)$$

Primetimo da je funkcija prenosa (2.26) pogodna za praktičnu realizaciju (Antić, 2012; Nikolić, 2010). Na slici 2.5 prikazana je struktura poboljšanog skoro ortogonalnog filtra Minc-Ležandrovog tipa, pri čemu je ulaz Hevisajdov odskočni impuls  $h(t)$  (Perić, 2014).



Slika 2.5 Blok šema podešavajućeg skoro ortogonalnog filtra Minc-Ležandrovog tipa.

U (Antić, 2012), pokazano je da su ortogonalni signali  $\varphi_i^{(\delta)}(t)$ , koje generiše ovaj filtar veoma pogodni za razne primene u analizi i sintezi tehničkih sistema. Prilikom modeliranja konkretnog, nepoznatog sistema, parametri  $c_i$  se podešavaju tako da model sa slike 2.5 odgovara što je moguće više nepoznatom sistemu.

## 2.5.2 Modeliranje dinamičkih sistema

U cilju aproksimacije realnih signala može da se iskoristi sledeći izraz:

$$y_M(t) \approx \sum_{i=0}^n c_i \varphi_i^{(\delta)}(t), \quad (2.32)$$

gde  $\varphi_i^{(\delta)}(t)$  predstavlja šiftovane Minc-Ležandrove skoro ortogonalne funkcije generisane pomoću skoro ortogonalnog filtra prikazanog na slici 2.5.

Proces modeliranja počinje tako što se isti ulazni signal dovede i na nepoznati sistem (čiji se model traži) i na model sa slike 2.5. Sledeći korak je formiranje razlike izlaznih signala sistema i modela, kao i formiranje srednje kvadratne greške:

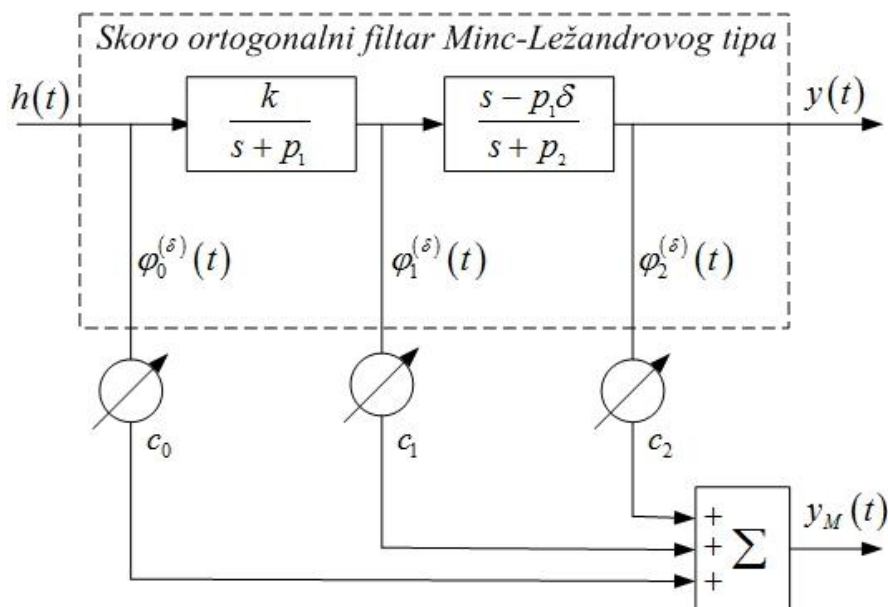
$$J = \frac{1}{T} \int_0^T (y_S(t) - y_M(t))^2 dt, \quad (2.33)$$

gde  $y_S(t)$  i  $y_M(t)$  predstavljaju izlaze sistema i modela, respektivno.

Parametri filtra  $k$ ,  $p_i$ , i  $c_i$  se, potom, podešavaju sve dok se ne postigne minimalna vrednostfunkcije (2.33), tj. dok se ne dobije najbolji model nepoznatog sistema u smislu minimalne srednje kvadratne greške (Antić, 2012). Optimalno podešavanje parametara postiže se nekom od tehnika optimizacije, na primer primenom genetičkih algoritama. Kompletan proces modeliranja opisan je u (Antić, 2012; Milojković, 2010).

### 2.5.3 Ortogonalni model ABS-a

Prilikom modeliranja ABS-a, izabrani podesivi skoro ortogonalni filtar, s dve sekcije, ima strukturu prikazanu na slici 2.6. Vrednost parametra  $\delta$  iznosi 1,002837. Urađeno je više nezavisnih eksperimenata u cilju minimizacije srednje kvadratne greške, odnosno kriterijumske funkcije (2.33). Pošto filtar ima dve sekcije, vrši se podešavanje 6 nepoznatih parametara  $k$ ,  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $c_0$ ,  $c_1$  i  $c_2$ . Sledeći korak je formiranje razlike signala  $y_S(t)$  i signala sa izlaza filtra  $y_M(t)$ , kao i izračunavanje srednje kvadratne greške date izrazom (2.33). Optimalne vrednosti parametara izabranog skoro ortogonalnog filtra određuju se korišćenjem genetičkog algoritma.



Slika 2.6 Struktura filtra sa dve sekcije.

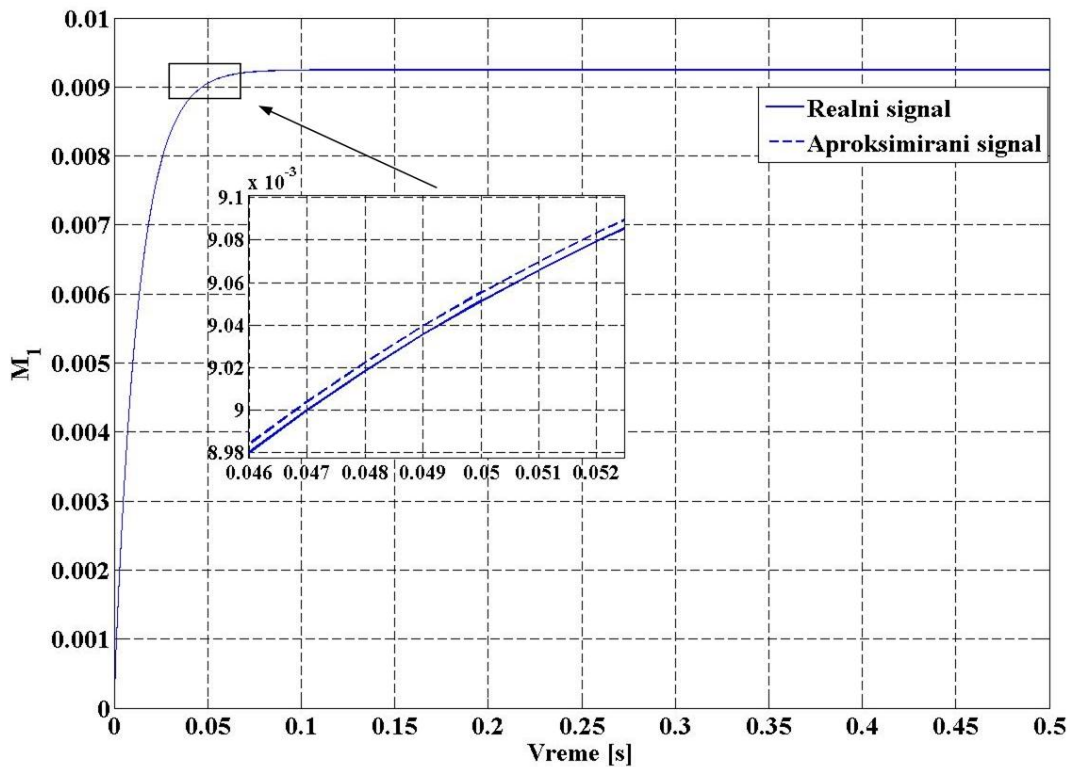
Genetički algoritam, koji je iskorišćen u eksperimentu, ima sledeće parametre: početnu populaciju od 300 jedinki, broj generacija 100, stohastičku uniformnu selekciju, reprodukciju uz 10 elitnih jedinki i Gausovu mutaciju sa skupljanjem. Hromozom ima strukturu koja se sastoji od 6 parametara kodiranih realnim brojevima  $k$ ,  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $c_0$ ,  $c_1$  i  $c_2$ . Cilj eksperimenta je bio da se postigne što manja srednje kvadratna greška tj. da se dobije najbolja moguća aproksimaciona funkcija realnog signala u smislu minimalne srednje kvadratne greške. Zbog toga je relacija (2.33) iskorišćena kao optimizaciona funkcija genetičkog algoritma. Ukupno vreme eksperimenta je 5s. S obzirom da je za brzinu konvergencije genetičkog algoritma ka optimalnim rešenjima, vrlo bitan procesor računara, treba istaći da je u eksperimentima korišćen računar s procesorom *Intel (R) Xeon (R), CPU E5-1660 3.30GHz* sa *8GB RAM* memorije. U tabeli 2.2 dati su rezultati optimalnih vrednosti parametara  $k$ ,  $p_i$ , i  $c_i$  dobijenih pomoću genetičkog algoritma, kao i vremena potrebno genetičkom algoritmu za podešavanje traženih parametara ( $T_s$ ).

Tabela 2.2 *Optimalne vrednosti parametara skoro ortogonalnog filtra.*

Parametar	Vrednost
$k$	0,0065
$p_1$	76,9230
$p_2$	0,0103
$c_0$	0,0000047
$c_1$	109,44429
$c_2$	0,0000120548
$J_{min}$	$2,312654 \cdot 10^{-8}$
$T_s$ [min]	5,2

Originalni signal i signal dobijen aproksimacijom prikazani su na slici 2.7, sa koje može da se uoči visok stepen podudarnosti originalnog signala i signala dobijenog pomoću skoro ortogonalnog filtra. Signali se praktično preklapaju, što se najbolje primećuje na uvećanom delu grafika.

Ovako dobijeni ortogonalni model ABS-a pokazaće se kao veoma pogodan prilikom realizacije algoritma upravljanja opisanog u odeljku 4.4.



Slika 2.7 Originalni i aproksimirani signal dobijen pomoću skoro ortogonalnog filtra sa dve sekcije.

## 2.6 Modeliranje ABS-a primenom bond grafova

Neophodni koraci, koji su uključeni prilikom modeliranja nekog sistema, kao što su postavljanje jednačina za svaki od osnovnih fizičkih sistema, sortiranje ovih jednačina i njihovo rešavanje, postaju dugotrajni kada je sistem složen i multidisciplinarne prirode. Najčešće korišćen alat koji omogućava jedinstven pristup fizičkom modeliranju različitih disciplina je primena bond grafova (Karnopp, 2000; Mukherjee, 2006; Borutzky, 2004; Samantaray, 2008).

Bond grafovi, nastali sedamdesetih godina prošlog veka, danas su veoma aktuelni kao univerzalni pristup za modeliranje raznorodnih fizičkih sistema. Glavna prednost ove tehnike modeliranja je što se zasniva na osnovnom fizičkom zakonu - zakonu održanja energije. Bond grafovi se sa uspehom koriste za modeliranje raznih mehaničkih, hidrauličkih, termičkih, električnih, hemijskih sistema, kao i njihove kombinacije. Prednost modeliranja takvih sistema bond grafovima sastoji se u tome što oni omogućuju dekompoziciju modela složenih sistema na podsisteme sa prostijim modelima, čime se olakšava analiza i simulacija jednog složenog sistema.

To znači da se formiranje modela veoma složenih sistema može da izvrši formiranjem bond grafova prostijih podsistema i njihovim objedinjavanjem (Bos, 1986; Cho, 1998). Štaviše, efikasni algoritmi upravljanja mogu da se izvedu iz analize strukture bond grafa (Gawthrop, 1995; Dauphin-Tanguy, 1999; Ngwompo, 1999 Pathak, 2008). Iz gore navedenih razloga, bond graf modeli se intenzivno koriste za projektovanje mehatroničkih sistema (Gawthrop, 1991; Granda, 2002).

Dinamički model sistema nekog vozila je zapravo sistem s više energetske domena koji uključuju mehanički, hidraulički, pneumatički, elektronski, električni, hemijski (baterije ili gorivne ćelije), termalni domen, itd. Kao što je već rečeno, bond graf tehnika je idealan alat da se razvije jedan integrisani model takvog sistema, koji će spojiti nekoliko energetske domena u jedan jedinstveni. Iako se ABS zapravo sastoji iz samo nekoliko energetske domena, bond graf modeliranje se ovde koristi da ostavi otvorenu mogućnost za dodavanje novih modela dinamičkih komponenti (npr. IC motor, električni pogon, gorivne ćelije, prenosni sistem, itd.), i da se na taj način napravi još adekvatniji model koji će do detalja da opiše njegovu dinamiku.

Bond graf modeliranje je iskorišćeno u studijama vezanim za dinamiku kretanja vozila u okviru (Hrovat, 2000; Filippini, 2007). Nelinearni dinamički model vozila s četiri točka, sa električnim kontrolisanim kočnicama i upravljanjem je razvijen u (Margolis, 2001). U (Pacejka, 1985) dat je jedinstveni model vozila, uz pomoć bond graf tehnike. Model motora, zajedno sa modelima pogonskog mehanizma i modelom dinamike vozila prikazan je u (Louca, 2001).

### 2.6.1 Osnovni elementi

Bond graf se sastoji od elemenata koji razmenjuju energiju preko veza kojima su spojeni. Bond se predstavlja polustrelicom koja ukazuje na pozitivan smer protoka energije (snage) između međusobno povezanih elemenata bond grafova. Snaga koja se prenosi je proizvod dve promenljive - naprezanja i protoka. Naprezanje i protok imaju drugačiju interpretaciju za različite sisteme. Osnovna tri elementa, koja se koriste pri modeliranju bond grafovima, su akumulator protoka, akumulator naprezanja i otporni element. U daljem tekstu dat je kratak opis najčešće upotrebljivanih elemenata.

**Transformator (TF).** Oni ne stvaraju, akumuliraju i rasipaju energiju. Služe za prenos snage i prenose faktore snage - naprezanje i protok. Naprezanje na izlaznom kraju je skalirano odnosom transformatora u odnosu na naprezanje na ulaznom kraju. Ukoliko odnos transformacije nije konstantan, reč je modulisanom transformatoru MTF.



**Rezistivni element ( $R$ ).** Elementi ovog tipa koriste se kada su naprezanje i protok direktno povezani. To su nedinamički sistemi koji rasipaju energiju u okolinu. Idealni su zbog toga što disipiraju, a ne akumuliraju energiju (električni otpor, prigušivači kod mehaničkih sistema, otpori trenja fluidnih cevi itd.). Ukoliko je vrednost rezistivnog elementa promenljiva, tj. ukoliko može da upravlja vrednošću otpornika, tada je reč o modulisanom otporniku sa oznakom MR.

**Žirator ( $GY$ ).** Za razliku od transformatora, koji uspostavljaju relacije naprezanje-naprezanje, protok-protok, žirator služi za prenos energije bez gubitka, ali povezuje ulazno naprezanje sa izlaznim protokom. Primeri žiratora su pumpa, turbina i elektromotor. Ukoliko koeficijent žiratora  $r$  nije konstantan, već zavisi od spoljnih veličina, radi se o modulisanom žiratoru MGY.

**Izvor ( $S$ ).** "S" element ili izvor predstavlja idealni izvor koji generiše ili naprezanje ili protok, tako da postoje izvor naprezanja  $S_e$  i izvor protoka  $S_f$ . Prefiks M označava da se radi o modulisanom izvoru tj. da je generisani signal promenljiv u vremenu.

**Akumulator naprezanja ( $I$ ).** Akumulator naprezanja povezuje izlazno naprezanje preko integrala ulaznog protoka. U bond graf terminologiji se ovakvi elementi često nazivaju i elementima inercije i koriste se za označavanje kalema kod električnih sistema i mase kod mehaničkih sistema.

**Paralelna 0-veza.** Ova veza ima najmanje dva pristupna kraja, uglavnom tri i više. Njom se obezbeđuje isto naprezanje, dok je algebarska suma protoka jednaka nuli.

**Serijska 1-veza.** Njom se obezbeđuje isti protok, dok je algebarska suma naprezanja jednaka nuli.

Kauzalitetom se predstavljaju ulaz i izlaz bond grafa i prostiranje energije i on je osnova na kojoj počiva generisanje sortiranog sistema jednačina, iz koga mogu da se odrede sve promenljive u bond grafu. Po konvenciji položaj crte kauzalnosti označava smer naprezanja ili protoka. On definiše da promenljiva naprezanja uvek ide ka crti kauzalnosti, a promenljiva protoka od nje.

## 2.6.2 Sistemska procedura za dobijanje bond graf modela

Sistemska metoda dobijanja bond graf modela iz idealnog fizičkog modela može da se pojednostavi odgovarajućom procedurom (Broenink, 2001). Ona sadrži grubu identifikaciju procesa i osnovnih elemenata, generiše strukturu veza, postavlja bond graf elemente i po mogućstvu pojednostavljuje bond graf model. Procedura dobijanja modela može da se predstavi sledećim koracima:

1. odrediti fizičke domene koji egzistiraju u sistemu i izvršiti identifikaciju svih osnovnih elemenata C, I, R, Se, Sf, TF i GY. Svaki element se obeležava drugačije zbog identifikacije;
2. obeležiti u idealnom fizičkom modelu sve izvore naprezanja ili protoka;
3. identifikovati sva ostala naprezanja i protoke dajući im jedinstvene oznake;
4. formirati konstitutivne relacije između naprezanja i protoka pomoću 1- i 0-veze;
5. povezati bondovima sve 1- i 0-veze;
6. izvršiti pojednostavljivanje bond graf modela ukoliko je to moguće.;
7. odrediti kauzalitet bond graf modela.

### 2.6.3 Bond graf model ABS-a

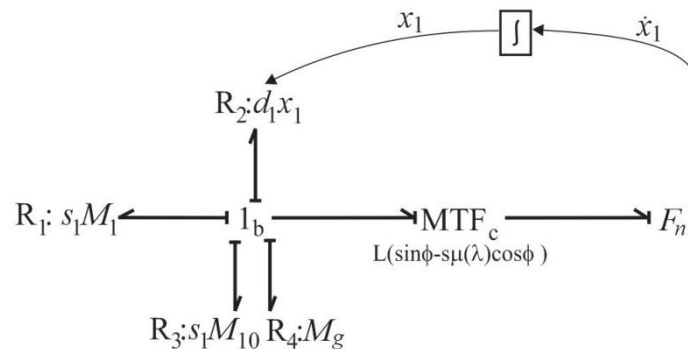
Kao što je već pokazano u odeljku 2.3.1, celokupna dinamika ABS-a opisana je diferencijalnim jednačinama (2.1) i (2.2). Ponovićemo još jednom jednačine u modifikovanom obliku, zbog lakšeg praćenja bond graf modela prikazanog na slici 2.11.

$$F_n = \frac{M_g + s_1 M_1 + s_1 M_{10} + d_1 x_1}{L(\sin \varphi - s\mu(\lambda) \cos \varphi)}, \quad (2.34)$$

$$J_1 \dot{x}_1 = \frac{M_g + s_1 M_1 + s_1 M_{10} + d_1 x_1}{L(\sin \varphi - s\mu(\lambda) \cos \varphi)} r_1 s\mu(\lambda) - s_1 M_1 - d_1 x_1 - s_1 M_{10}, \quad (2.35)$$

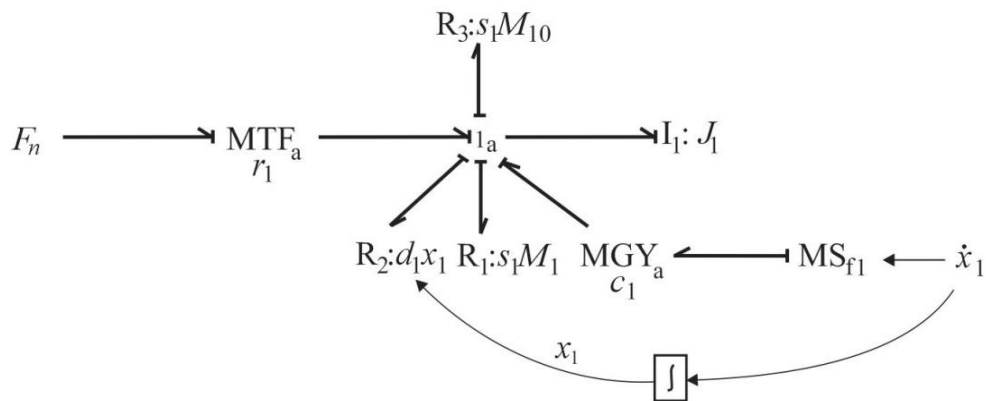
$$J_2 \dot{x}_2 = \frac{M_g + s_1 M_1 + s_1 M_{10} + d_1 x_1}{L(\sin \varphi - s\mu(\lambda) \cos \varphi)} r_2 s\mu(\lambda) - d_2 x_2 - s_2 M_{20}. \quad (2.36)$$

Normalna sila predstavljena portom  $1_b$  je zapravo grafička prezentacija jednačine (2.34) i može da se uoči sa slike 2.8 da ona u svojoj strukturi ima četiri otporna elementa  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$ . Sada se ova energija preko  $MTF_c$  elementa sa koeficijentom modulacije  $L(\sin \varphi - s\mu(\lambda) \cos \varphi)$ , prenosi do porta 0 gde se uz pomoć senzora  $D_e$  meri njena vrednost.



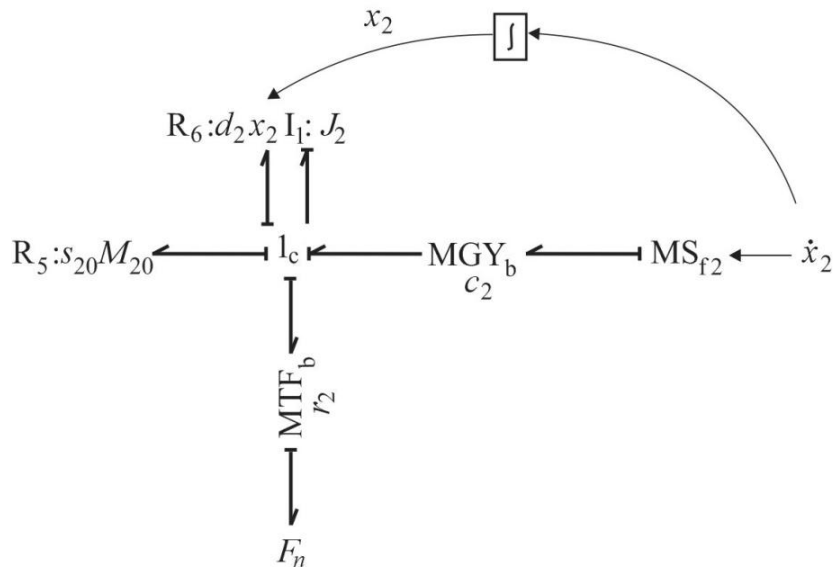
Slika 2.8 Bond graf model normalne sile na osnovu (2.34).

Sada se od rotacionog kretanja preko MTF<sub>a</sub> elementa s koeficijentom modulacije  $r_1$ , energija transformiše u normalnu silu  $F_n$ , koja zapravo predstavlja vezu sa istim naprezanjem. Ukupna brzina označena sa  $l_a$  predstavlja vezu sa zajedničkim protokom (ista sila), i sastoji se od 6 bonda: tri otporna elementa  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ , inercijalnog elementa  $I_1$ , modulisanog transformatora i modulisanog žiratora. Kao ulazna informacija u sistem koristi se brzina točka vozila  $MS_{f1}$  (data tabelarno), koja se transformiše u rotaciono kretanje pomoću žiratora  $MGY_a$  ( $c_1$  označava koeficijent modulacije). Odgovarajuća prezentacija jednačine (2.35) je data na slici 2.9.



Slika 2.9. Bond graf model na osnovu (2.35).

Ista analogija važi za drugi točak koji animira kretanje puta. Kao ulazna informacija dovodi se brzina donjeg točka  $MS_{f2}$ , koja se transformiše u rotaciono kretanje pomoću žiratora  $MGY_b$  s koeficijentom modulacije  $c_2$  i dolazi do porta  $1_c$ .



Slika 2.10. Bond graf model na osnovu (2.36).

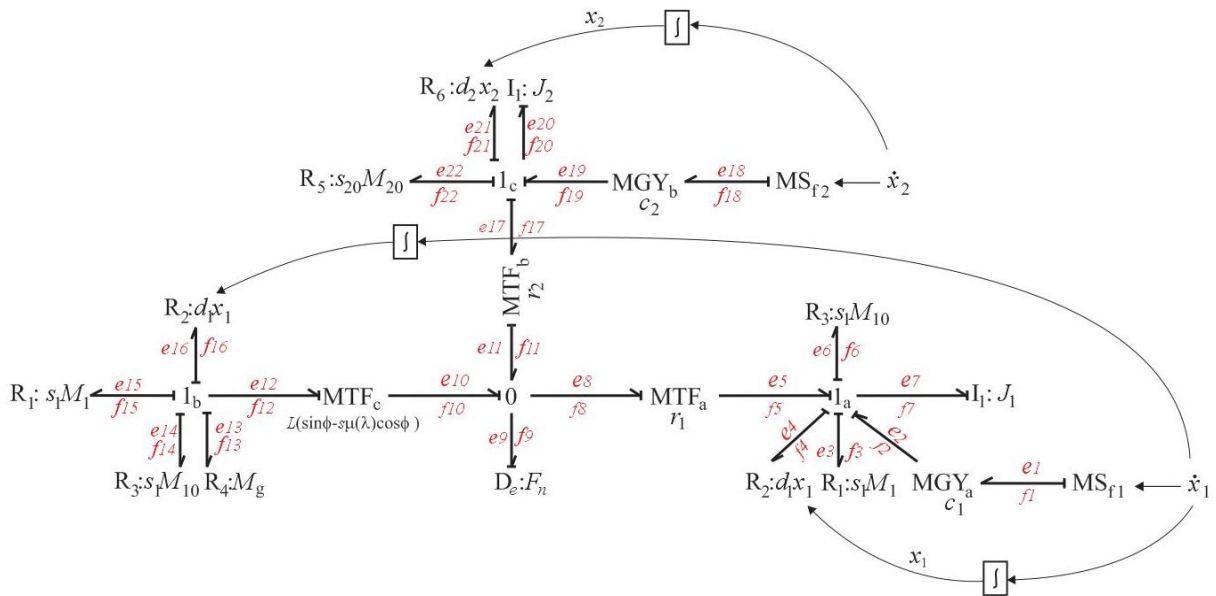
Sada se port  $1_c$  deli na dva otporna elementa  $R_5$ ,  $R_6$  i jedan inercijalni element  $I_2$ , i preko elementa  $MTF_b$  s koeficijentom transformacije  $r_2$  dovodi na port za normalnu silu 0. Ovo je zapravo grafička prezentacija funkcije (2.36) i predstavljena je na slici 2.10.

Na slici 2.11 prikazan je ukupan bond graf model ABS-a, pri čemu važe sledeće algebarske jednačine:

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{1}_a \begin{cases} f_2 = f_3 = f_4 = f_5 = f_6 = f_7 \\ e_7 = e_5 + e_2 - e_3 - e_4 - e_6 \end{cases} \\
 & \mathbf{1}_b \begin{cases} f_{12} = f_{13} = f_{14} = f_{15} = f_{16} \\ e_{12} = e_{13} + e_{14} + e_{15} + e_{16} \end{cases} \\
 & \mathbf{1}_c \begin{cases} f_{19} = f_{20} = f_{21} = f_{22} = f_{17} \\ e_{20} = e_{17} + e_{19} - e_{21} - e_{22} \end{cases} \\
 & \mathbf{0} \begin{cases} e_8 = e_9 = e_{10} = e_{11} \\ f_8 = f_{10} - f_{11} \end{cases} \\
 & \mathbf{MTF}_a \begin{cases} e_5 = e_8 r_1 \\ f_5 = f_8 r_1 \end{cases} \\
 & \mathbf{MTF}_b \begin{cases} e_{17} = e_{11} r_2 \\ f_{17} = f_{11} r_2 \end{cases} \\
 & \mathbf{MTF}_c \begin{cases} e_{10} = e_{12} L(\sin \phi - s \mu(\lambda) \cos \phi) \\ f_{10} = f_{12} L(\sin \phi - s \mu(\lambda) \cos \phi) \end{cases} \\
 & \mathbf{MGY}_a \begin{cases} e_1 = c_1 f_2 \\ f_1 = c_1 e_2 \end{cases} \\
 & \mathbf{MGY}_b \begin{cases} e_{18} = c_2 f_{18} \\ f_{18} = c_2 e_{19} \end{cases}
 \end{aligned}$$

gde je  $f$  zapravo protok (brzina), a  $e$  predstavlja naprežanje (sila).

Kao što može da se primeti sa slike 2.11, dodavanje novih elemenata i celina na već postojeći bond graf model ABS-a je veoma jednostavno i ne predstavlja napor u poređenju s prethodnom opisanim modelima, koji su dobijeni primenom neke od drugih tehnika modeliranja.



Slika 2.11. Bond graf model ABS-a.

Dobijeni modeli (vremenski-kontinualni, vremenski-diskretni, ortogonalni i bond graf) ABS-a mogu da se koriste za projektovanje kontrolera na bazi savremenih tehnika upravljanja. U disertaciji, poseban akcenat biće stavljen na projektovanje algoritama upravljanja zasnovanih na teoriji sistema upravljanja promenljive strukture s kliznim režimom, odnosno kombinaciji sa ostalim tehnikama upravljanja, pa će se u narednom poglavlju opisati osnovni pojmovi i matematička osnova UKR-a kako bi se olakšalo dalje praćenje sadržaja doktorske disertacije.

### 3 Teorijske osnove upravljanja s kliznim režimom

U prethodnom poglavlju pokazano je da je model ABS-a izrazito nelinearan usled nelinearnih karakteristika samog procesa kočenja. Pored toga, na sistem deluju spoljašnji poremećaji, koji se ne mogu predvideti, a parametri sistema variraju u toku normalne eksploatacije. Usled toga, kao logičan izbor za upravljanje ABS-om, nameće se neka od robustnih tehnika upravljanja, kao što su adaptivno upravljanje, prediktivno upravljanje, sistemi upravljanja promenljive strukture i druge. Ove tehnike su u stanju da garantuju ostvarivanje ciljeva upravljanja, uprkos nepreciznosti u modeliranju i/ili neodređenosti parametara modela.

Među postojećim metodologijama, sistemi upravljanja promenljive strukture (SUPS) izdvajaju se svojom jednostavnošću i robustnošću (Gao, 1993; Hung, 1993; Emelyanov, 1963). SUPS su dinamički nelinearni sistemi automatskog upravljanja čija se struktura menja u zavisnosti od stanja u kome se sistem trenutno nalazi. Kod SUPS-a moguća su tri režima kretanja: kretanje po singularnim trajektorijama, kretanje s preključenjima i kretanje u kliznom režimu. Od posebnog značaja je klizni režim kretanja (Utkin, 1993), koji će biti u velikoj meri iskorišćen prilikom projektovanja svih algoritama upravljanja ABS-a, pa je u ovom poglavlju dat kratak osvrt na ovaj prilaz u upravljanju, uključujući sve neophodne pojmove, matematičke relacije, kao i njegove prednosti i mane.

Ovaj optimalan režim kretanja nastaje kada se upravljanje izabere tako da se stanje sistema kreće duž unapred definisane klizne hiperpovršine. Time se postižu dobre osobine SUPS-a, kao što su redukcija reda dinamike sistema, unapred definisan karakter kretanja sistema, robustnost ili invarijantnost sistema u odnosu na dejstvo spoljašnjih poremećaja i promene parametra sistema. Iz navedenih osobina proizilazi još jedna prednost kliznih režima, a to je eliminacija potrebe za potpunim modelom sistema. Upravljanje u kliznom režimu je tokom godina prihvaćeno kao efikasno sredstvo za projektovanje robustnih regulatora radi upravljanja složenim, nelinearnim objektima upravljanja višeg reda, koji rade u neodređenim uslovima. Kako je klizni režim kretanja dominantan i željeni oblik kretanja kod SUPS-a, kao sinonim za upravljanje promenljive strukture često se koristi UKR.

Klizni režimi su pokazali primenljivost u mnogim praktičnim problemima mehanike, robotike, električnih mašina, procesnog upravljanja, upravljanja vozilima i kretanjem, itd. Detaljna analiza vremenski-kontinualnih sistema upravljanja promenljive strukture data je u

(Utkin, 1977; Utkin, 1978). Osnovne informacije o nelinearnim sistemima promenljive strukture mogu se pronaći u (DeCarlo, 1988), a o digitalnim u (Mitić, 2006).

### 3.1 Definicija kliznog režima

Kao što je već istaknuto, termin "upravljanje promenljive strukture" potiče, pre svega, od strukture regulatora, koja se menja pod dejstvom određene logike, a s ciljem postizanja željene dinamike sistema. Radi razumevanja osnovnih principa, na kojima se zasniva teorija sistema promenljive strukture, analizirajmo sistem drugog reda koji je dat sledećom diferencijalnom jednačinom:

$$\ddot{x} + a_2 \dot{x} + a_1 x = u, \quad (3.1)$$

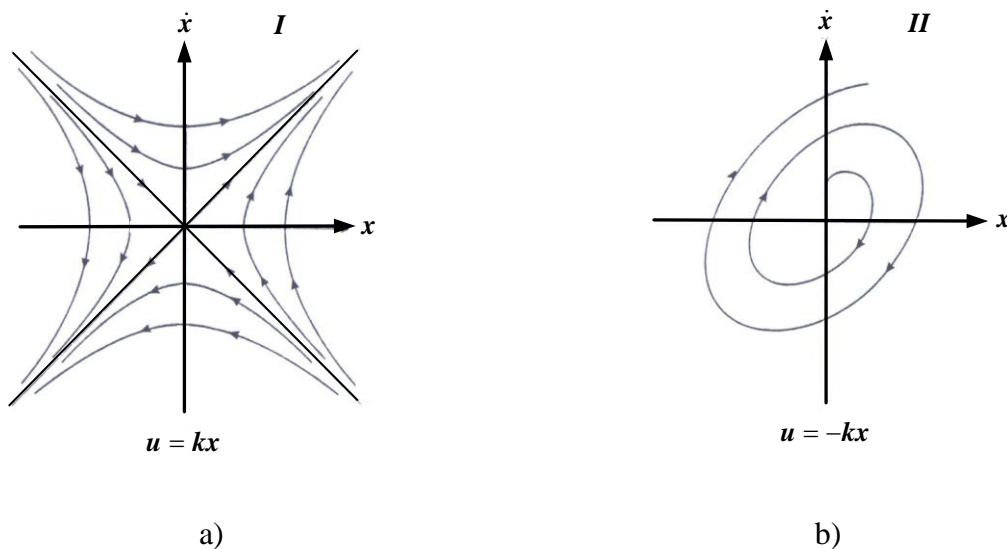
pri čemu upravljanje (kvazi-relejno) ima sledeći oblik:

$$u = -k |x| \operatorname{sgn}(s), \quad (3.2)$$

gde je:

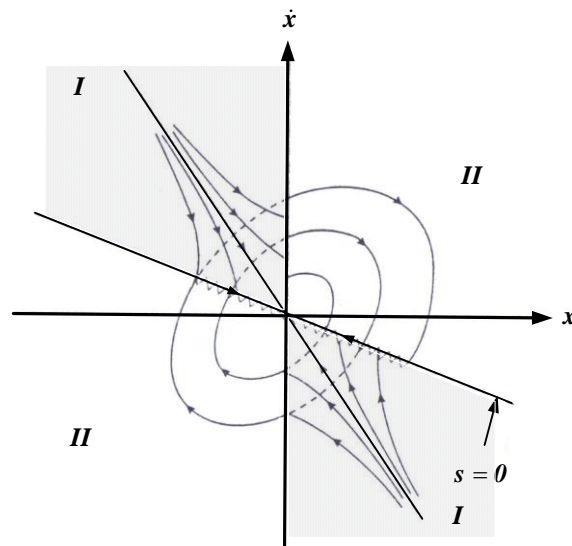
$$s = \lambda x + \dot{x}, \quad (3.3)$$

i predstavlja kliznu pravu, a  $k$  konstantu pojačanja. U slučaju kada je  $a_1 = 0$  i  $a_2 < 0$ , sistem se sastoji od dve pojedinačno nestabilne strukture ( $u = kx$  i  $u = -kx$ ) čiji su fazni portreti prikazani na slikama 3.1a i 3.1b.



Slika 3.1 Fazni portreti dve nestabilne strukture.

Prave  $s=0$  i  $x=0$  su prekidačke prave na kojima dolazi do izmene struktura i diskontinuiteta upravljanja. Pravilnim izborom parametra  $c$  (nagib prekidačke prave manji od nagiba asimptote prve strukture), za bilo koje početne uslove, stanje sistema doseže do prekidačke prave  $s=0$ , nakon čega dolazi do sučeljavanja faznih trajektorija i nastupa klizni režim duž te prave (slika 3.2).



Slika 3.2 Fazni portret sistema promenljive strukture.

Kretanje sistema promenljive strukture sastoji se od tri faze: *faze padanja*, *faze kliznog režima (klizanja)* i *stacionarnog stanja*, pri čemu prve dve faze predstavljaju prelazni proces. Kretanje sistema u kliznom režimu je optimalno kretanje kod sistema upravljanja promenljive strukture, pošto sistem tada poseduje niz dobrih i željenih osobina. Sa slike 3.2 može da se primeti da klizni režim nastaje samo ako su u okolini prekidačke prave trajektorije struktura sistema usmerene ka toj pravoj (ako su međusobno sučeljene). Zbog toga, do kliznog režima dolazi na prekidačkoj pravoj  $s = \lambda x + \dot{x} = 0$ , ali ne i na pravoj  $x = 0$ .

Analizom kretanja sistema drugog reda u kliznom režimu (slika 3.2), mogu da se izvedu važni zaključci (Milosavljević, 2002). Uvođenjem kliznog režima dobija se nova, veštačka trajektorija, koja nije svojstvena ni jednoj od struktura sistema. Problem određivanja jednačine kretanja u kliznom režimu proizilazi iz činjenice da diferencijalna jednačina, koja opisuje dinamiku sistema, nije definisana u tačkama gde njena desna strana ima diskontinuitete, odnosno nije analitička zbog toga što egzistencija i jednoznačnost njenog rešenja nisu garantovani u tim tačkama. Da bi se analizirao sistem, kada se on nalazi u kliznom režimu, neophodno je da se odredi pomoćna jednačina idealnog kliznog režima.



U idealnom kliznom režimu (beskonačno velika frekvencija promene strukture upravljanja), dinamika sistema se opisuje relacijom  $\dot{x} = -cx$  što je diferencijalna jednačina prvog reda, pa se može da zaključi da se kretanje nelinearnog sistema u kliznom režimu opisuje linearnom diferencijalnom jednačinom nižeg reda u odnosu na polazni sistem. Takođe, sistem poseduje robusnost u odnosu na dejstvo spoljašnjeg poremećaja i promenu parametara, jer kretanje u kliznom režimu ne zavisi od parametara objekta, već samo od koeficijenta nagiba klizne prave (rešenje diferencijalne jednačine kliznog režima je  $x(t) = x(t_1)e^{-\lambda(t-t_1)}$ ). Pošto u režimu klizanja po kliznoj pravoj ( $s = 0$ ) važi  $\dot{s} = \lambda\dot{x} - a_2\dot{x} - a_1x + u = 0$ , umesto diskontinualnog upravljanja, do istog kretanja sistema se može doći i primenom kontinualnog tzv. ekvivalentnog upravljanja  $u_e = a_1x + (a_2 - \lambda)\dot{x}$ . Ekvivalentno upravljanje se može da posmatra kao pomoćna metoda u analizi kliznih režima, koja predstavlja srednju vrednost diskontinualnog upravljanja  $u$  na kliznoj hiperpovršini.

## 3.2 Dinamika sistema u kliznom režimu

### 3.2.1 Linearni sistemi

Razmotrimo linearni sistem predstavljen u sledećem obliku:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}, \quad (3.4)$$

gde:  $\mathbf{x} \in R^n$  predstavlja vektor stanja sistema, a  $\mathbf{u} \in R^m$  vektor upravljačkih ulaza (Kwan, 1995; Basin, 2012; Zarrabi, 2011).

Za  $m$  ulaza se u prostoru stanja definiše  $m$  hiperravni:

$$s_i = \mathbf{c}_i^T \mathbf{x}; \quad i=1, 2, \dots, m. \quad (3.5)$$

Definišimo i kliznu hiperpovršinu kao presek svih  $m$  hiperravni koje prolaze kroz koordinatni početak:

$$S = \left\{ \mathbf{x} \in R^n : \mathbf{s}(\mathbf{x}) = [s_1 \ s_2 \ \dots \ s_m]^T = \mathbf{C}\mathbf{x} = 0 \right\}, \quad (3.6)$$

gde je  $\mathbf{C}$  matrica dimenzija  $m \times n$ :  $\mathbf{C} = [c_1 \ c_2 \ \dots \ c_n]^T$ , a  $\mathbf{s}(\mathbf{x})$  predstavlja vektor prekidačkih funkcija  $s_i(\mathbf{x})$  koje definišu promenu struktura upravljanja na sledeći način:

$$u_i = \begin{cases} u_i^+(\mathbf{x}, t), & s_i(\mathbf{x}) > 0 \\ u_i^-(\mathbf{x}, t), & s_i(\mathbf{x}) < 0 \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (3.7)$$

Jednačine kretanja sistema u kliznom režimu mogu da se dobiju primenom metode ekvivalentnog upravljanja (Draženović, 1969; Utkin, 1999). Osnovna ideja ove metode sastoji se u izračunavanju ekvivalentnog upravljanja, koje će da obezbedi da trajektorija sistema ostane na kliznoj hiperpovršini. Uslov za to je:

$$\dot{s} = \mathbf{CAx} + \mathbf{CBu} = 0. \quad (3.8)$$

Pod pretpostavkom postojanja inverzne matrice  $(\mathbf{CB})^{-1}$ , iz jednačine (3.8) može da se dobije izraz za ekvivalentno upravljanje:

$$\mathbf{u}_e = -(\mathbf{CB})^{-1} \mathbf{CAx}. \quad (3.9)$$

Iz (3.9) i (3.4) izvodi se dinamika sistema u kliznom režimu kao:

$$\dot{\mathbf{x}}_e = \left[ \mathbf{I} - \mathbf{B}(\mathbf{CB})^{-1} \mathbf{C} \right] \mathbf{Ax}_e = \mathbf{A}_e \mathbf{x}_e. \quad (3.10)$$

Diskontinualno upravljanje  $\mathbf{u}$  u sebi sadrži visokofrekventnu i niskofrekventnu komponentu. Visokofrekventni deo se filtrira od strane sistema, pa na klizanje utiče samo niskofrekventni deo. To znači da ekvivalentno upravljanje u stvari fizički predstavlja srednju vrednost diskontinualnog upravljanja.

S obzirom na to da u kliznom režimu važi  $\mathbf{Cx} = 0$ , gde je  $\mathbf{C}_{m \times n}$ , zaključujemo da se, pri klizanju,  $m$  stanja sistema mogu da izraze kao linearna kombinacija preostalih  $(n-m)$  stanja. To znači da se dinamika sistema tada redukuje na diferencijalnu jednačinu  $(n-m)$ -tog reda.  $\mathbf{A}_e$  ne zavisi od upravljanja i ima  $(n-m)$  sopstvenih vrednosti na osnovu kojih se biraju parametri prekidačke površine, tako da karakterističan polinom dinamike sistema u kliznom režimu bude Hurvicov.

### 3.2.2 Nelinearni sistemi

Razmotrimo sada nelinearni sistem predstavljen diferencijalnom jednačinom u opštem obliku:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})\mathbf{u}, \quad (3.11)$$

gde je:  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$  vektor stanja sistema,  $\mathbf{f}(\mathbf{x}) \in \mathbb{R}^n$ ,  $\mathbf{g}(\mathbf{x}) \in \mathbb{R}^{n \times m}$  su kontinualne funkcije, a  $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^m$  je upravljački ulaz (Ramirez, 1992; Lu, 1997; Mahmoud, 2008).

Definišimo i kliznu hiperpovršinu kao skup  $m$  prekidačkih površina:

$$S = \left\{ \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n : s(\mathbf{x}) = [s_1(\mathbf{x}), \dots, s_m(\mathbf{x})]^T = \mathbf{0} \right\}. \quad (3.12)$$

Diferenciranje  $s(\mathbf{x})$  u vremenu duž trajektorije (3.11) i izjednačavanje dobijenog izraza sa nulom daje:

$$\dot{s}(\mathbf{x}) = \frac{\partial s}{\partial \mathbf{x}} f(\mathbf{x}) + \frac{\partial s}{\partial \mathbf{x}} g(\mathbf{x})u = 0. \quad (3.13)$$

Iz jednačine (3.13) dobija se sledeći izraz za ekvivalentno upravljanje:

$$u_e = - \left[ \frac{\partial s}{\partial \mathbf{x}} g(\mathbf{x}) \right]^{-1} \frac{\partial s}{\partial \mathbf{x}} f(\mathbf{x}), \quad (3.14)$$

pri čemu je egzistencija inverzne matrice  $\left[ \frac{\partial s}{\partial \mathbf{x}} g(\mathbf{x}) \right]^{-1}$  potreban uslov za postojanje rešenja.

Zamena jednačine (3.14) u jednačinu (3.11) generiše izraz koji opisuje dinamiku sistema u kliznom režimu:

$$\dot{\mathbf{x}}_e = \left[ \mathbf{I} - g(\mathbf{x}_e) \left[ \frac{\partial s}{\partial \mathbf{x}_e} g(\mathbf{x}_e) \right]^{-1} \frac{\partial s}{\partial \mathbf{x}_e} \right] f(\mathbf{x}_e). \quad (3.15)$$

### 3.2.3 Vremenski-diskretni sistemi

Princip projektovanja UKR-a u vremenski-diskretnom domenu, u velikoj je meri sličan strukturi upravljanja u vremenski-kontinualnom domenu. Međutim, karakteristike digitalnih UKR-a se od vremenski-kontinualnih razlikuju u dva aspekta. Prvo, kod DUKR-a nije moguće ostvariti idealno klizanje stanja sistema po kliznoj hiperpovršini, već se trajektorija sistema nalazi u uskom pojasu oko nje. Razlog ovome je to što vrednost upravljačkog signala može da se menja samo u tačno određenim vremenskim trenucima, određenih periodom diskretizacije, dok je između trenutaka uzorkovanja vrednost upravljačkog signala konstantna (Furuta, 1990). Ovakvo kretanje sistema naziva se kvazi-klizni režimom kretanja. Drugo, ne može da se tačno definiše ekvivalentno upravljanje koje će trajektoriju sistema održati na kliznoj hiperpovršini (Su, 1993). Na taj način, DUKR ne poseduje osobine invarijantnosti na neodređenost parametara i spoljašnje poremećaje, kao što je to bio slučaj kod vremenski-kontinualnih sistema (Utkin, 1994).

Uzmimo u razmatranje vremenski-diskretnan sistem opisan sledećim modelom:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1} &= \boldsymbol{\phi} \mathbf{x}_k + \boldsymbol{\Gamma} \mathbf{u}_k, \\ \mathbf{y}_k &= \mathbf{C} \mathbf{x}_k, \end{aligned} \quad (3.16)$$

sa matricama određenim sa:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_k &= \mathbf{x}(kT), \mathbf{y}_k = \mathbf{y}(kT), \\ \boldsymbol{\phi} &= e^{AT}, \boldsymbol{\Gamma} = \int_0^T e^{A\tau} d\tau \mathbf{B}. \end{aligned} \quad (3.17)$$

Definišimo sada kliznu hiperpovršinu u obliku:

$$s_k = \mathbf{G}\mathbf{x}_k, \quad (3.18)$$

$\mathbf{G}$  se bira tako da ekvivaletno upravljanje sistema (3.16) obezbedi kretanje sistema po hiperpovršini  $s_k = s_{k+1}$ , za svako  $k$  i ima oblik:

$$\mathbf{u}_k = \mathbf{F}_{eq} \mathbf{x}_k, \quad (3.19)$$

gde je:

$$\mathbf{F}_{eq} = -(\mathbf{G}\boldsymbol{\Gamma})^{-1} \mathbf{G}(\boldsymbol{\phi} - \mathbf{I}), \quad (3.20)$$

Zakon upravljanja se sada određuje u obliku:

$$\mathbf{u}_k = (\mathbf{F}_{eq} + \mathbf{F}_D) \mathbf{x}_k, \quad (3.21)$$

pri čemu je  $\mathbf{F}_{eq}$  opisano sa (3.20), a  $\mathbf{F}_D$  je diskontinualni zakon upravljanja, gde  $i$ -ti element ima konstantnu vrednost između uzorkovanja i opisan je sa:

$$f_i = \begin{cases} f_i^+, & \text{za } (\mathbf{G}\boldsymbol{\Gamma})s_k x_{ki} < -\delta_i, \\ 0, & \text{za } -\delta_i < (\mathbf{G}\boldsymbol{\Gamma})s_k x_{ki} \leq \delta_i, \\ f_i^-, & \text{za } (\mathbf{G}\boldsymbol{\Gamma})s_k x_{ki} > \delta_i, \end{cases} \quad (3.22)$$

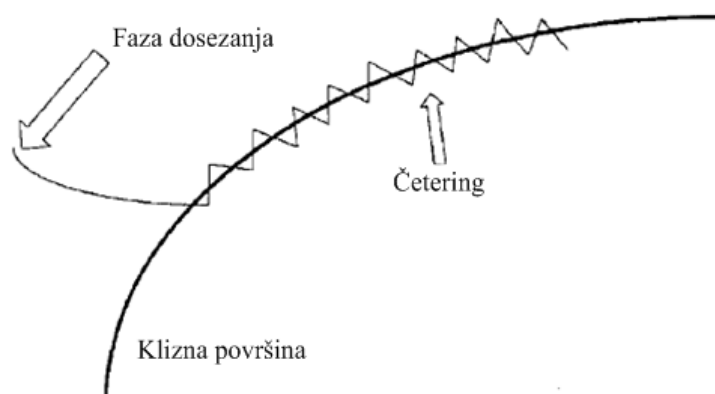
gde  $x_{ki}$  predstavlja  $i$ -ti element od  $\mathbf{x}_k$ , a  $\delta_i$  je definisano sa:

$$\delta_i = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n |x_{ki}| |x_{kj}| f_0 (\mathbf{G}\boldsymbol{\Gamma})^2, \quad 0 < f_0 < \left| \frac{2}{\mathbf{G}\boldsymbol{\Gamma} \sum_{j=1}^n |t_{1j}|} \right|. \quad (3.23)$$

### 3.3 Problem četeringa

Idealni klizni režim u praksi ne postoji, jer bi podrazumevao promenu strukture upravljanja beskonačnom brzinom. U realnim uslovima, usled konačnog vremena komutacije struktura, koje čine sistem promenljive strukture, što je posledica nesavršenosti prekidanja

kao što su prisustvo vremenskog kašnjenja prekidača, histerezis i neuračunate male vremenske konstante u aktuatoru, javljaju se neželjene oscilacije visoke frekvencije u kliznom režimu koje nazivamo četering (eng. *chattering*). Četering (slika 3.3) može da pobudi visokofrekvencijsku nemodeliranu dinamiku sistema i tako da dovede do neželjenih odziva sistema, pa čak i nestabilnosti. Takođe, može da izazove habanje mehaničkih delova sistema i velike toplotne gubitke u električnim kolima. Predloženi su različiti algoritmi upravljanja u cilju ublažavanja i eliminacije četeringa (Hung, 1993; Slotine, 1984).

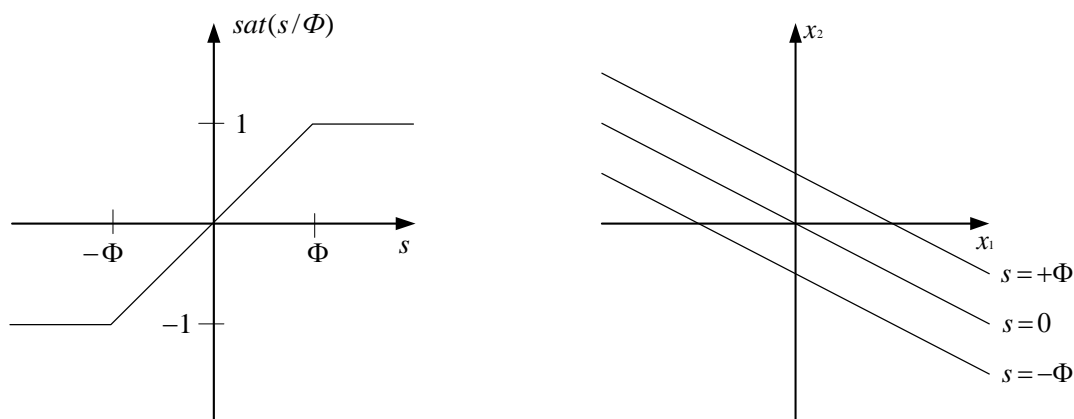


Slika 3.3 Pojava četeringa na kliznoj hiperpovršini.

Uzrok pojave četeringa (stanje sistema prelazi naizmenično s jedne na drugu stranu klizne prave pri kretanju ka ravnotežnom stanju) je velika promena upravljačke promenljive, tj. njen relejni karakter. Zbog toga se došlo na ideju da se prekidačka *signum* funkcija koja se javlja u upravljanju  $\text{sgn}(s)$ , u okolini klizne hiperpovršine, zameni kontinualnom aproksimacijom, tj. saturacionom funkcijom (funkcijom zasićenja) koja predstavlja kombinaciju relejnog i linearnog delovanja:

$$\text{sat}\left(\frac{s}{\Phi}\right) = \begin{cases} -1 & \text{za } \frac{s}{\Phi} \leq -1, \\ +1 & \text{za } \frac{s}{\Phi} \geq +1, \\ \frac{s}{\Phi} & \text{za } \left|\frac{s}{\Phi}\right| < +1. \end{cases} \quad (3.24)$$

Ovako modifikovano upravljanje se naziva i *upravljanje s graničnim slojem* (*boundary layer*) (Slotine, 1984; Šabanović, 2004), gde parametar  $\Phi$  definiše debljinu graničnog sloja, tj. region u kome je upravljanje linearno (slika 3.4).



Slika 3.4 Saturaciona funkcija i rezultujući granični sloj u faznoj ravni.

Međutim, kod ovog algoritma upravljanja u okolini prekidačke hiperpovršine i u stanju ravnoteže gubi se klizni režim, pa može da se govori samo o približnom uspostavljanju kliznog režima i o ispunjenju njihovih odlika od kojih je najvažnija robusnost.

### 3.4 Upravljanje s kliznim režimom

Pri projektovanju regulatora promenljive strukture, koji se bazira na kliznom režimu, potrebno je, najpre, u faznom prostoru odrediti kliznu hiperpovršinu (za sisteme drugog reda – kliznu pravu) koja određuje željenu dinamiku sistema. Zatim, treba odrediti diskontinualni zakon upravljanja promenljive strukture, takav da svako stanje sistema dovodi do klizne hiperpovršine za konačno vreme, a zatim je na njoj zadržava uspostavljajući klizni režim.

#### 3.4.1 Uslov dosezanja

Za ostvarenje postavljenog zadatka, treba da se obezbedi da stanje sistema iz bilo kog polaznog položaja van klizne hiperpovršine za konačno vreme dospe na kliznu hiperpovršinu čija je jednačina  $s(\mathbf{x}) = 0$ , a zatim, da se tu fazne trajektorije struktura sistema sučeljavaju. Za obezbeđivanje dovođenja stanja sistema u ravnotežno stanje dovoljno je da se pokaže da je ono globalno asimptotski stabilno po Ljapunovu (Perruquetti, 2002). U tu svrhu uvodi se funkcija Ljapunova:

$$V(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{2} s^2(\mathbf{x}), \quad (3.25)$$

koja je pozitivno definitna svuda, osim u ravnotežnom stanju  $s(\mathbf{x}) = 0$ , gde je jednaka nuli.

Tada se uslov dosezanja klizne hiperpovršine, odnosno padanja na nju, svodi na:

$$\dot{V}(\mathbf{x}, t) = s(\mathbf{x})\dot{s}(\mathbf{x}) < 0, \quad (3.26)$$

dok uslov dosezanja za konačno vreme ima sledeći oblik:

$$\dot{V}(\mathbf{x}, t) = s(\mathbf{x})\dot{s}(\mathbf{x}) \leq -\eta|s(\mathbf{x})|, \quad \eta > 0, \quad (3.27)$$

tj.

$$\dot{s}(\mathbf{x})\operatorname{sgn}(s) \leq -\eta. \quad (3.28)$$

U bliskoj okolini klizne hiperpovršine  $s(\mathbf{x})=0$ , dovoljni uslovi egzistencije kliznog režima mogu da se zapišu u sledećem obliku:

$$\lim_{s(\mathbf{x}) \rightarrow 0^+} \dot{s}(\mathbf{x}) < 0, \quad \lim_{s(\mathbf{x}) \rightarrow 0^-} \dot{s}(\mathbf{x}) > 0. \quad (3.29)$$

### 3.4.2 Upravljački zakon dosezanja

Važna karakteristika sistema promenljive strukture je invarijantnost na perturbacije parametara sistema i spoljne poremećaje kada se nalazi u kliznom režimu. Međutim, ova osobina ne važi u režimu padanja, pre nego se uspostavi klizni režim. Većina poznatih tehnika projektovanja sistema promenljive strukture zahteva da se stanje sistema dovede na kliznu hiperpovršinu za konačno vreme, ne vodeći računa o dinamici sistema u ovom periodu. Ova činjenica nam onemogućava određivanje brzine kojom sistem dolazi u klizni režim, a istovremeno uzrokuje pojavu četeringa oko klizne hiperpovršine.

Kako dovođenje do kliznog režima predstavlja značajan deo prelaznih režima sistema promenljive strukture, u novije vreme se posebna pažnja posvećuje specifikaciji zakona upravljanja koji daje željenu dinamiku sistema prilikom dovođenja sistema u klizni režim (Hung, 1993). Zakon dosezanja mora da zadovolji uslov dosezanja (3.26), da bi se obezbedila egzistencija kliznog režima na kliznoj hiperpovršini.

Izbor dinamike sistema promenljive strukture pri padanju može da se omogućiti specificiranjem dinamike funkcije preključenja  $s(\mathbf{x})$ , uzimajući u obzir (3.28), diferencijalnom jednačinom oblika:

$$\dot{s}(\mathbf{x}) = -\eta \operatorname{sgn}(s), \quad \eta > 0. \quad (3.30)$$

Više nije potrebno verifikovati uslove padanja, jer su oni sadržani u diferencijalnoj jednačini funkcije  $s(\mathbf{x})$ . Specificiranjem dinamike funkcije  $s(\mathbf{x})$  može da se odredi brzina kojom se stanje sistema približava kliznoj hiperpovršini, pri čemu je brzina konvergencije određena konstantom  $\eta$ .

Konstanta  $\eta$  bi trebalo da bude dovoljno velika kada je stanje sistema daleko od klizne hiperpovršine u cilju skraćanja vremena doseganja. Dovoljno veliko diskontinualno upravljanje je neophodno da bi uslov doseganja bio ispunjen uprkos neodređenosti parametara sistema i delovanju spoljnih poremećaja. Kada je stanje sistema na pragu dostizanja klizne hiperpovršine, poželjno je da pojačanje  $\eta$  bude što manje kako bi se ublažio četering.

Nakon biranja dinamike režima padanja, određuje se zakon upravljanja. Diferenciranjem  $s(\mathbf{x})$  po vremenu duž trajektorije (3.11) dobija se:

$$\dot{s}(\mathbf{x}) = \frac{\partial s}{\partial \mathbf{x}} f(\mathbf{x}) + \frac{\partial s}{\partial \mathbf{x}} g(\mathbf{x})u = -\eta \operatorname{sgn}(s). \quad (3.31)$$

Rešavanjem (3.31), za zakon upravljanja imamo:

$$u = -\left[ \frac{\partial s}{\partial \mathbf{x}} g(\mathbf{x}) \right]^{-1} \left[ \frac{\partial s}{\partial \mathbf{x}} f(\mathbf{x}) + \eta \operatorname{sgn}(s) \right], \quad (3.32)$$

uz uslov postojanja inverzije matrice u jednačini.

Za linearne sisteme, predstavljene izrazom (3.4), (3.32) postaje:

$$u = -(\mathbf{CB})^{-1} [\mathbf{CAx} + \eta \operatorname{sgn}(s)]. \quad (3.33)$$

Zakon upravljanja predstavlja zbir ekvivalentnog upravljanja i diskontinualnog dela upravljanja, koje obezbeđuje kretanje stanja sistema ka izabranoj kliznoj hiperpovršini za konačno vreme ( $u = u_e + u_r$ ). Kao što je već rečeno, princip projektovanja upravljanja za vremenski-diskretne sisteme sličan je kao i za sisteme u vremenski-kontinualnom domenu, pa ovde neće biti posebno predstavljena njihova matematička osnova.

Ako neodređenosti u modelu sistema i jednačinama stanja možemo da ograničimo s gornje strane konstantama:

$$\begin{aligned} f &= \hat{f} + \Delta f \quad \text{gde je } |\Delta f| < F = \text{const}, \\ g &= \hat{g} + \Delta g \quad \text{gde je } |\Delta g| < G = \text{const}, \end{aligned} \quad (3.34)$$



tada se ova ograničenja mogu da uključe u konstantu  $\eta$  i, na taj način, oforme novo, kompozitno pojačanje  $K$ , koje rezultira robustnim zakonom upravljanja:

$$u = - \left[ \frac{\partial s}{\partial \mathbf{x}} \hat{g}(\mathbf{x}) \right]^{-1} \left[ \frac{\partial s}{\partial \mathbf{x}} \hat{f}(\mathbf{x}) + K \operatorname{sgn}(s) \right]. \quad (3.35)$$

### 3.5 Primena UKR-a pri praćenju zadate trajektorije i pitanje robustnosti

Neka je model sistema opisan diferencijalnom jednačinom oblika:

$$\mathbf{x}^{(n)} = f(\mathbf{x}, t) + g(\mathbf{x}, t)u + d, \quad (3.36)$$

gde je:  $\mathbf{x} = (x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)})^T$  vektor stanja sistema,  $d$  - spoljašnji poremećaj,  $u$  - upravljačka promenljiva, a  $f$  - nelinearna funkcija stanja sistema  $x$  i, eksplicitno, vremena  $t$ :

$$f(\mathbf{x}, t) = \hat{f}(\mathbf{x}, t) + \Delta f(\mathbf{x}, t), \quad (3.37)$$

pri čemu je  $\hat{f}$  procenjena vrednost funkcije  $f$ , a  $\Delta f$  predstavlja neodređenost modela. Problem sinteze upravljanja je obezbeđivanje da stanje sistema  $x$  prati željeno stanje  $x_d$  u prisustvu neodređenosti modela i delovanja spoljnih poremećaja (Slotine, 1983).

Pretpostavimo da su poznate maksimalne vrednosti  $\Delta f$ ,  $d$ ,  $x_d^{(n)}$  i da iznose  $\tilde{F}$ ,  $D$ ,  $v$ , respektivno, odnosno:

$$|\Delta f| \leq \tilde{F}(\mathbf{x}, t); |d| \leq D(\mathbf{x}, t); |x_d^{(n)}| \leq v. \quad (3.38)$$

Ako je greška praćenja:

$$\mathbf{e} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_d = (e, \dot{e}, \dots, e^{(n-1)})^T, \quad (3.39)$$

tada se klizna hiperpovršina definiše kao:

$$\begin{aligned} s(\mathbf{x}, t) &= 0, \\ s(\mathbf{x}, t) &= \left( \frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} e, \quad c \geq 0. \end{aligned} \quad (3.40)$$

Nadalje u cilju pojednostavljenja, bez umanjavanja opštosti, može da se posmatra sistem drugog reda za koji važi:

$$\begin{aligned} s &= \lambda e + \dot{e}, \\ \dot{s} &= \lambda \dot{e} + \ddot{e} = \lambda \dot{e} + \ddot{x} - \ddot{x}_d. \end{aligned} \quad (3.41)$$

S obzirom na to da važe ista razmatranja kao u odeljku 3.4.2, iz uslova dosezanja (3.26) se dobija:

$$s\dot{s} = s(\lambda \dot{e} + f(\mathbf{x}, t) + g(\mathbf{x}, t)u + d - \ddot{x}_d) \leq -\eta|s|. \quad (3.42)$$

U cilju uspostavljanja kliznog režima, bira se sledeće upravljanje:

$$u = -g^{-1}\left(\hat{f} + \lambda \dot{e} + K(\mathbf{x}, t) \operatorname{sgn}(s)\right), \quad K(\mathbf{x}, t) > 0, \quad (3.43)$$

gde je prvi član kompenzacioni, a drugi upravljački. Sada se iz nejednakosti (3.42) može da dobije sledeće ograničenje koje je potrebno da se ispuni da bi uslov dosezanja bio ispunjen i da bi greška praćenja trajektorije ostala u zadatim granicama:

$$K(\mathbf{x}, t)_{\max} \geq \tilde{F} + D + \nu + \eta. \quad (3.44)$$

Da bi se izbegle velike promene upravljačke promenljive, može da se iskoristi upravljanje s graničnim slojem, što dovodi do zakona upravljanja:

$$u = -g^{-1}\left(\hat{f} + \lambda \dot{e} + K(\mathbf{x}, t) \operatorname{sat}\left(\frac{s}{\Phi}\right)\right); \quad \Phi > 0, \quad K(\mathbf{x}, t) > 0. \quad (3.45)$$

Kada je referentni ulaz konstantan, imamo sistem tipa regulatora pa je problem upravljanja jednostavniji, jer je referentni ulaz unapred poznat u svakom trenutku.

## 4 ABS s UKR-om u vremenski-kontinualnom domenu

Imajući u vidu da je model ABS-a izrazito nelinearan, i da bi za njegovo upravljanje bila idealna neka od robustnih tehnika upravljanja, u ovom poglavlju opisano je i implementirano nekoliko algoritama upravljanja zasnovano na primeni UKR-a u vremenski-kontinualnom domenu. Najpre, dat je pregled trenutnog stanja primene UKR-a kod ABS-a, a nakon toga, opisan je način projektovanja regulatora koji treba da obezbedi maksimalnu vrednost koeficijenta prijanjanja točkova vozila na površinu po kojoj se kreće. Dalje, data je matematička osnova opisanih algoritama, počevši od tradicionalnih UKR-a, preko integralnog UKR-a, upravljanja s proporcionalno plus konstantnim zakonom dosezanja, pa sve do UKR-a na bazi eksponencijalnog zakona dosezanja. Na kraju, projektovan je UKR na osnovu ortogonalnog modela ABS-a. U ovom slučaju, celokupna radna oblast je podeljena na segmente, pri čemu je za svaki od segmenata pronađen odgovarajući linearizovani model primenom skoro ortogonalnih filtara. Nakon toga, za svaki od segmenata je projektovan UKR, pri čemu prebacivanje između zakona upravljanja zavisi samo od ulaznog signala. Svi algoritmi su testirani simulacijom na digitalnom računaru i kroz eksperimente na laboratorijskoj maketi ABS-a, a data je i analiza dobijenih rezultata.

### 4.1 Dosadašnji rezultati

Aktuelnost i atraktivnost rešavanja problema upravljanja ABS-om može da se ustanovi i na osnovu velikog broja naučnih radova, projekata i patenata. Mnogi naučni radovi se bave implementacijom upravljanja ABS-om korišćenjem kliznih režima u vremenski-kontinualnom domenu. Rezultati digitalne simulacije ABS-a s tradicionalnim UKR-om, pri čemu je prilikom projektovanja upravljanja zanemarena dinamika hidrauličnog kočenja, dati su u (Hamzah, 2007). Tradicionalni UKR, pojačan tzv. "sivom" teorijom sistema<sup>15</sup> prikazan je u (Oniz, 2007; Kayacan 2009). U ovim radovima, upotrebljen je "sivi" prediktor za estimaciju ugaone brzine točka i linearne brzine vozila. U (Chun, 2004), upravljanje proklizavanjem točka je izvršeno neposrednim upravljanjem momentom motora, pri čemu je

---

<sup>15</sup> *eng.* grey system theory, označava novu metodologiju koja se fokusira na studiju problema koji u sebi uključuju nedostatak informacija.

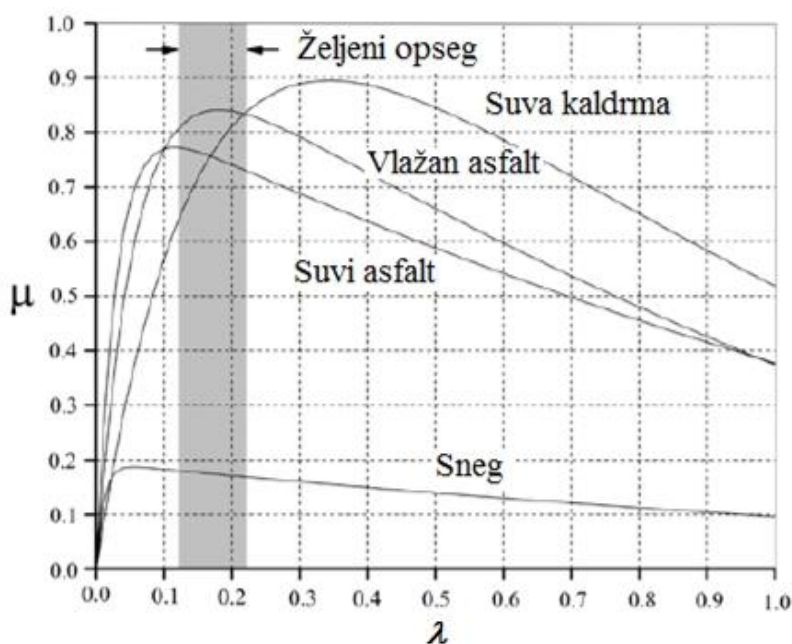
pokretna klizna hiperpovršina upotrebljena da se obezbedi kretanje stanja sistema po kliznoj hiperpovršini. Problem četeringa je razmatran u (Harifi, 2008), a kao rešenje ovog problema uvedena je integralna prekidačka funkcija. Ovo rešenje je, takođe, primenjeno i u slučaju projektovanja UKR-a za hibridni električni kočioni sistem (Song, 2005). Kombinacija UKR-a i observera s kliznim režimom opisana je u (Unsal, 1999). U (Drakunov, 1995), projektovan je UKR koji obezbeđuje maksimalnu vrednost sile trenja između točka i površine po kojoj se kreće vozilo tokom faze kočenja, a bez prethodne poznate informacije optimalne vrednosti proklizavanja. Adaptivni UKR prikazan je u (El Hadri, 2002) s ciljem praćenja trajektorije vozila. Predloženi algoritam upravljanja koristi razliku između brzina vozila i točka (označeno kao proklizavanje brzina) kao upravljačku veličinu, za razliku od svih prethodnih koji proklizavanje definišu kao relativnu razliku između pomenutih brzina. Adaptivni zakon upravljanja, upotrebljen za estimaciju koeficijenta prijanjanja vozila na površinu po kojoj se kreće, je kombinovan s tradicionalnim UKR-om, a stabilnost celokupnog sistema je dokazana pomoću Ljapunove teorije stabilnosti. Integracija UKR-a i širinsko impulsne modulacije, obezbeđena računarskim softverom, data je u (Wu, 2001). Ovo rezultira kvazi-kontinualnim upravljanjem proklizavanja točka ABS-a. U (Wu, 2003), prethodni pristup je analiziran do detalja i upoređen je s tradicionalnim UKR-om. Koncept UKR-a je, takođe, implementiran u upravljanju kočionim sistemom hibridnog električnog vozila (Yu, 2009), gde je permanentni sinhroni motor, montiran na vratilu točka preko zupčanika, upotrebljen kao generator koji daje negativni moment na zadnjim točkovima i pretvara kinetičku energiju u električnu. U (Mirzaeinejad, 2010), novi nelinearni zakon upravljanja s integralnom povratnom spregom upoređen je s UKR-om. Za poboljšanje ukupne stabilnosti sistema, tradicionalni UKR je, takođe, upotrebljen u upravljanju proklizavanjem točka (Zheng, 2006), dok je linearni kvadratni regulator upotrebljen za upravljanje skretanjem vozila. Tradicionalni UKR, primenjen u upravljanju kočionim sistemom, opisan je u (Park, 2006). U (Utkin, 2004) diskutovano je upravljanje ABS-om upotrebom optimizacionog UKR-a. U (Mitić, 2012; Antić, 2010) dat je prikaz različitih algoritama upravljanja i njihova primena u upravljanju ABS-om.

## **4.2 Princip rada regulatora na osnovu $\mu$ - $\lambda$ krive**

U prethodno opisanim radovima, a i u većini ostalih radova koji se bave problemom upravljanja ABS-om, koristi se isti prilaz rešavanju problema upravljanja. U ovom odeljku,

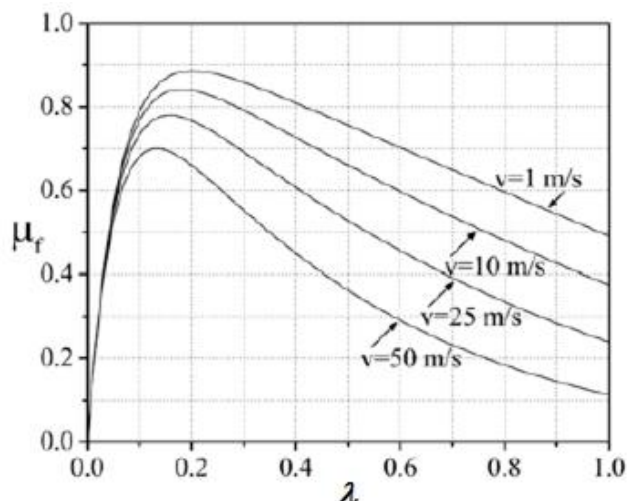
detaljno je opisan način upravljanja ABS-om i nadalje projektovana upravljanja biće zasnovana na ovom principu.

Klasičan oblik tzv.  $\mu$ - $\lambda$  krive (kriva koja daje zavisnost koeficijenta prijanja vozila  $\mu$  na površinu po kojoj se kreće u odnosu na proklizavanje točka  $\lambda$ ) za brzinu od 10m/s i za različite uslove na putu prikazana je na slici 4.1. Koeficijent prijanjanja raste kako raste i vrednost proklizavanja sve do neke maksimalne vrednosti, a nakon toga linearno opada. Ukoliko dođe do blokiranja točkova ( $\lambda=1$ ), vrednost koeficijenta prijanjanja postaje mala i točak počinje da klizi, pa je upravljanje vozilom izgubljeno, što predstavlja neželjenu situaciju.



Slika 4.1 Prikaz  $\mu$ - $\lambda$  krive za različite uslove na putu.

Kako bi se povećala upravljivost i lateralna stabilnost vozila, a smanjila dužina zaustavnog puta usled kočenja, vrednost proklizavanja mora da se održi u opsegu koji obezbeđuje visoku vrednost koeficijenta prijanjanja vozila. Kako je dinamika proklizavanja veoma brza i kako bilo koja vrednost nakon dostignutog maksimuma izaziva nestabilnost u otvorenoj sprezi, vrednost proklizavanja se održava u okviru određenog opsega koji se naziva i željeni opseg (eng. *sweet-spot*), prikazan osenčenom oblašću na slici 4.1. Maksimalna vrednost koeficijenta prijanjanja varira za različite brzine vozila (videti sliku 4.2).



Slika 4.2 Prikaz  $\mu$ - $\lambda$  krive za suvi asfalt pri različitim brzinama vozila.

Uzimajući u obzir ovu činjenicu, algoritmi upravljanja se projektuju tako da daju maksimalnu efikasnost kočenja pri velikim brzinama, jer se pretpostavlja da je upravo to trenutak kada ABS deluje, dok je za zaustavljanje vozila pri manjim brzinama dovoljan i standardni kočioni sistem u vozilu. Takođe, obično je nemoguće s velikom sigurnošću utvrditi uslove na putu uz pomoć merenja na samom putu, tako da se za optimalni opseg proklizavanja uzima vrednost između 0,2 i 0,25. Ovaj opseg nudi dobar kompromis u vidu zadovoljenja maksimuma koeficijenta prijanjanja za sve uslove na putu i brzine vozila, eliminišući na taj način zahtev o poznavanju površine po kojoj se vozilo kreće.

### 4.3 Različiti tipovi UKR-a i njihova primena na ABS

U ovom odeljku je, najpre, data kratka matematička osnova različitih tipova algoritama upravljanja zasnovanih na kliznom režimu. Takođe, izvedene su relacije uspostavljanja i egzistencije kliznog režima. Algoritmi se projektuju tako da održe maksimalnu vrednost koeficijenta prijanjanja točka u svakom trenutku, kao što je to opisano u prethodnom odeljku. Svaki od algoritama je verifikovan, kako kroz digitalne simulacije na računaru, tako i kroz eksperimentalna ispitivanja na laboratorijskoj maketi ABS-a.

Svaka od prikazanih slika sa rezultatima dobijenih nakon izvršenih simulacija i eksperimenata sastoji se, redom, od tri grafika, koji prikazuju odzive brzina točka i vozila, proklizavanje točka i upravljački kočioni moment. Referentna vrednost proklizavanja je izabrana da bude jednaka konstanti  $\lambda_r = 0,2$ . Svi neophodni parametri ABS modela dati su u tabeli 2.1.

U vremenski-kontinualnom domenu, svi algoritmi upravljanja su projektovani na osnovu jednačina dinamike proklizavanja točka, opisane sa (2.16), i sadrže dve komponente: tzv. ekvivalentno upravljanje  $M_1^{eq}$  (Draženović, 1969) i komponentu doseganja  $M_1^r(\sigma)$ , koja treba da obezbedi da sistem dođe na kliznu hiperpovršinu i nastavi kretanje po njoj:

$$M_1 = M_1^{eq} + M_1^r(\sigma). \quad (4.1)$$

$\sigma$  predstavlja prekidačku funkciju. Pošto je model ABS-a opisan jednačinom prvog reda, prekidačka funkcija se bira kao:

$$\sigma = \lambda - \lambda_r, \quad (4.2)$$

gde  $\lambda_r$  predstavlja referentnu vrednost proklizavanja točka. Sada, kao glavni zadatak projektovanog upravljanja može da se smatra obezbeđivanje  $\sigma = 0$ , a samim tim je  $\lambda = \lambda_r$ . Kada je sistem u kliznom režimu, komponenta ekvivalentnog upravljanja u (4.1) nalazi se iz uslova da je  $\dot{\sigma} = 0$  tj.:

$$\dot{\sigma} = 0 \Rightarrow \dot{\lambda} = 0 \Leftrightarrow f(\lambda, x_2) + g(\lambda, x_2)M_1^{eq} = 0, \quad (4.3)$$

uz pretpostavku da je  $\lambda_r = \text{const}$ . Deo kočionog momenta, koji odgovara ekvivalentnom upravljanju je:

$$M_1^{eq} = -g(\lambda, x_2)^{-1} f(\lambda, x_2), \quad (4.4)$$

izračunava se korišćenjem nominalnih vrednosti parametara sistema. Ukoliko pretpostavimo da su  $\hat{f}(\lambda, x_2)$  i  $\hat{g}(\lambda, x_2)$  nominalne vrednosti funkcija  $f(\lambda, x_2)$  i  $g(\lambda, x_2)$ , respektivno, onda se ekvivalentno upravljanje kočionog momenta u realnim uslovima može da izračuna kao:

$$\hat{M}_1^{eq} = -\hat{g}(\lambda, x_2)^{-1} \hat{f}(\lambda, x_2), \quad (4.5)$$

i, posledično, (4.1) sada postaje:

$$M_1 = \hat{M}_1^{eq} + M_1^r(\sigma). \quad (4.6)$$

U cilju jednostavnijeg zapisivanja jednačina mogu da se usvoje sledeće skraćenice:  $f(\lambda, x_2) = f$ ,  $\hat{f}(\lambda, x_2) = \hat{f}$ ,  $g(\lambda, x_2) = g$  i  $\hat{g}(\lambda, x_2) = \hat{g}$ . Takođe, potrebno je da se uvedu i pretpostavke  $|\hat{f}| < \hat{F}$ ,  $|f - \hat{f}| < \varepsilon_f$ ,  $g/\hat{g} > 0$  i  $|1 - g/\hat{g}| < \varepsilon_g < 1$ , gde su  $\hat{F}$ ,  $\varepsilon_f$  i  $\varepsilon_g$  pozitivne i realne konstante.

### 4.3.1 Tradicionalni UKR

Kod tradicionalnog UKR-a (Kayacan, 2009; Antić, 2010; Mitić, 2012), komponenta dosezanja izabrana je kao:

$$M_1^r(\sigma) = -\hat{g}^{-1}M_c \operatorname{sgn}(\sigma), \quad (4.7)$$

pa kočioni moment postaje:

$$M_1 = \hat{M}_1^{eq} - \hat{g}^{-1}M_c \operatorname{sgn}(\sigma). \quad (4.8)$$

Parametar  $M_c$  je izabran tako da zadovoljava uslove uspostavljanja i egzistencije kliznog režima:

$$\sigma \dot{\sigma} < -\eta|\sigma|, \quad \eta > 0, \quad (4.9)$$

Obezbeđujući, na taj način, konačno vreme dosezanja:

$$t_r < \frac{|\sigma(0)|}{\eta}. \quad (4.10)$$

Pošto je  $\dot{\sigma} = \dot{\lambda}$ , zamenom (4.8) u (2.16), uzimajući u obzir (4.5) i (4.9), dobija se:

$$\frac{g}{\hat{g}} \left( \frac{\hat{g}}{g} (f - \hat{f}) \sigma + \frac{\hat{g}}{g} \hat{f} \left( 1 - \frac{g}{\hat{g}} \right) \sigma - M_c |\sigma| \right) < \eta |\sigma|. \quad (4.11)$$

Klizni režim u sistemu, definisanom sa (2.16), sa upravljanjem (4.8) nastupiće ukoliko se parametar  $M_c$  izabere tako da je ispunjena sledeća nejednakost:

$$M_c > \max \left( \left| \frac{\hat{g}}{g} \left( (f - \hat{f}) + \hat{f} \left( 1 - \frac{g}{\hat{g}} \right) + \eta \right) \right| \right). \quad (4.12)$$



Pošto je:

$$1 - \varepsilon_g < g/\hat{g} < 1 + \varepsilon_g \Rightarrow 1/(1 + \varepsilon_g) < \hat{g}/g < 1/(1 - \varepsilon_g), \quad (4.13)$$

(4.12) može da se ponovo napiše kao:

$$M_c > \frac{\varepsilon_f + \hat{F}\varepsilon_g + \eta}{1 - \varepsilon_g}. \quad (4.14)$$

Komponenta doseganja UKR-a je diskontinualni signal s visokom frekvencijom prekidanja u okolini klizne hiperpovršine. Na taj način, trajektorija sistema je primorana da se kreće uvek ka kliznoj hiperpovršini i da klizi po njoj. Ova pojava je u literaturi poznata kao efekat četeringa i predstavlja neželjenu pojavu, pošto može da pobudi nemodeliranu dinamiku sistema. Najjednostavniji način da se eliminiše problem četeringa je da se *sgn* funkcija zameni nekom kontinualnom funkcijom, kao npr.:

$$h(\sigma) = \frac{\sigma}{|\sigma| + \rho}, \quad (4.15)$$

gde je  $\rho \geq 0$ . Sada se kočioni moment može ponovo da definiše kao:

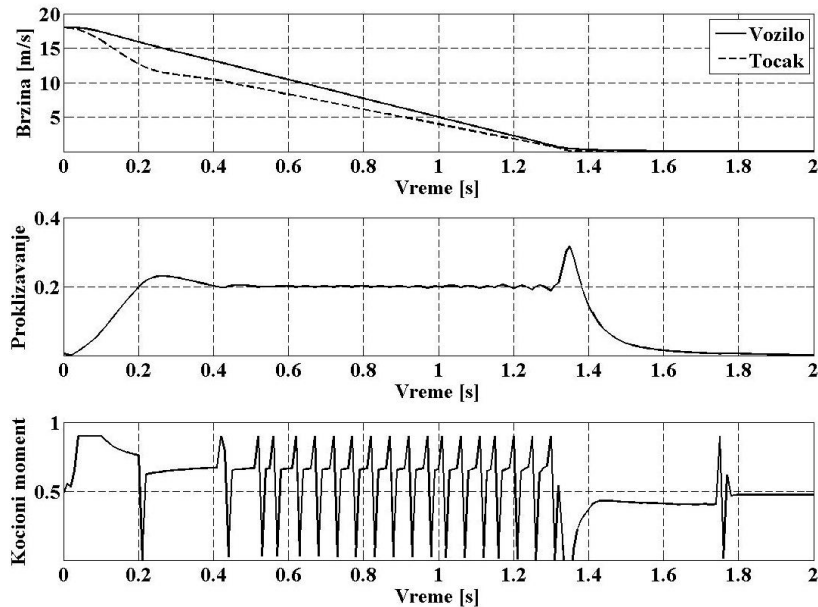
$$M_1 = \hat{M}_1^{eq} - \hat{g}^{-1} M_c h(\sigma). \quad (4.16)$$

#### 4.3.1.1 Simulacioni rezultati

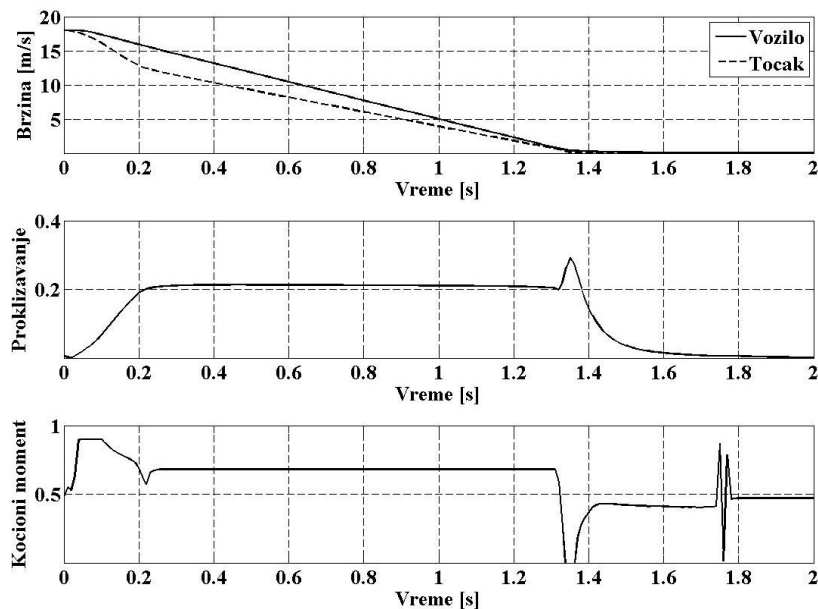
Na slici 4.3, prikazani su odzivi sistema za vrednost parametra  $M_c = 1$ , dok slika 4.4 predstavlja rezultate simulacije kada je *sgn* funkcija zamenjena sa (4.15). Četering nije toliko značajan na slici 4.3 pošto je pojačanje relativno malo, ali implementacija kontinualne funkcije (4.15) daje bolje rezultate u tom smislu, ali po cenu gubitka tačnosti u stacionarnom stanju. Kako bismo učinili da simulacioni rezultati budu što približniji eksperimentalnim, izvršena je simulacija i za  $M_c = 10$ . Dobijeni rezultati su prikazani na slici 4.5, sa koje se primećuje da proklizavanje točka pokazuje oscilatorno ponašanje.

U cilju ispitivanja robustnosti predloženog algoritma upravljanja, kao i približivanja rada laboratorijske makete realnim uslovima, izvršena je još jedna dodatna simulacija. Naime, poznato je da nakon izvesnog vremena guma na vozilu gubi svojstva, pa dolazi do izobličenja gume, a samim tim i do povećanja/smanjenja poluprečnika samog točka.

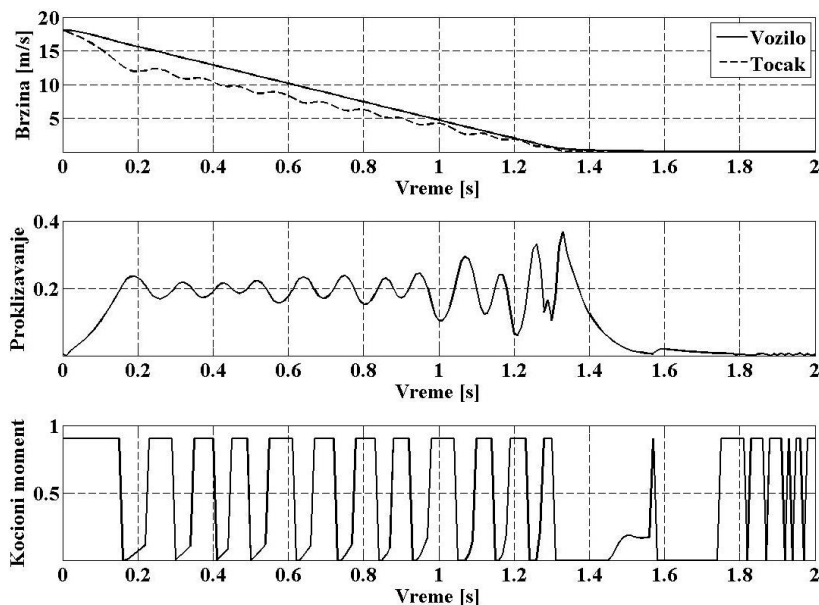
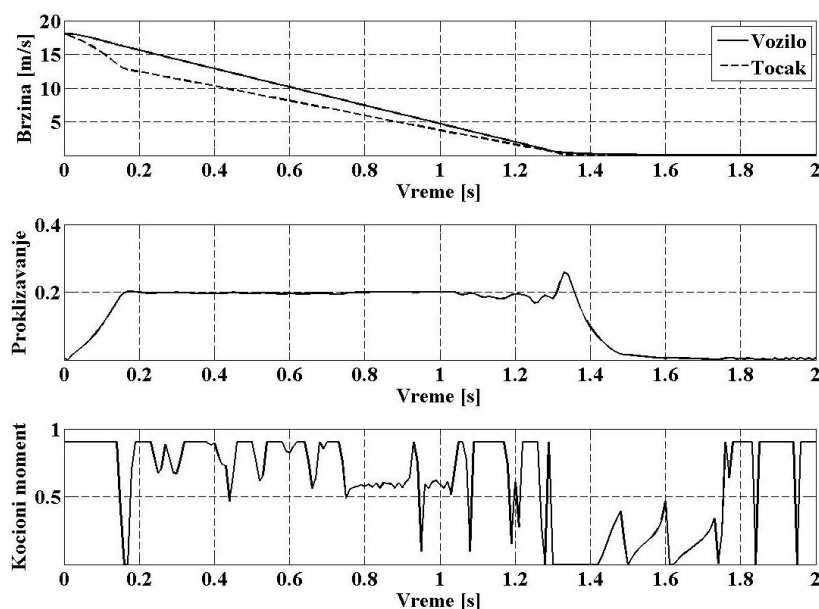
Uzimajući ovo u obzir, u simulaciji je uneta promena od 10% u dimenziji poluprečnika gornjeg točka, koji odgovara točku vozila, pri istim vrednostima parametara zakona upravljanja. Dobijeni simulacioni rezultati prikazani su na slici 4.6 i oni pokazuju da je primena UKR-a uspela da ove poremećaje u velikoj meri eliminiše, pa su i dobijene performanse na zavidnom nivou.



Slika 4.3 Simulacioni rezultati dobijeni primenom tradicionalnog UKR-a za  $M_c=1$ .

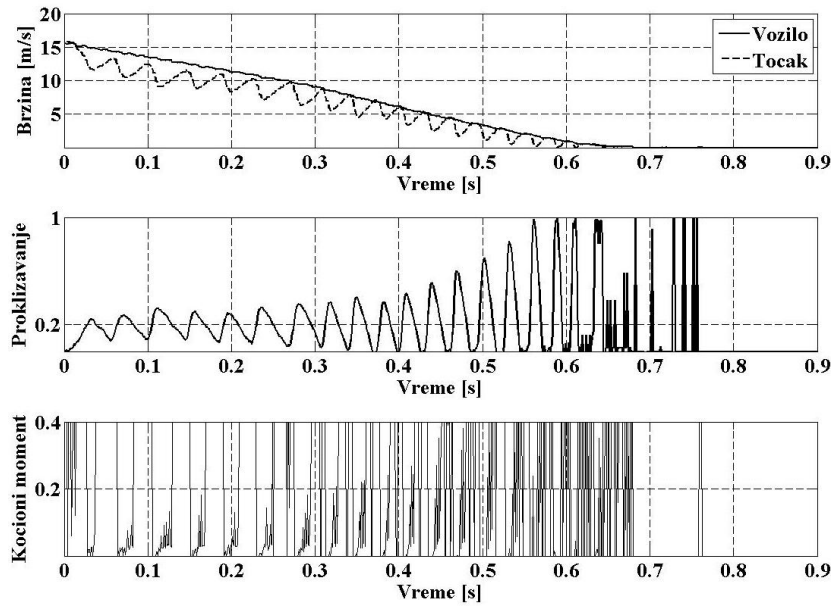


Slika 4.4 Simulacioni rezultati dobijeni primenom tradicionalnog UKR-a s eliminacijom četeringa za  $M_c=1$ .

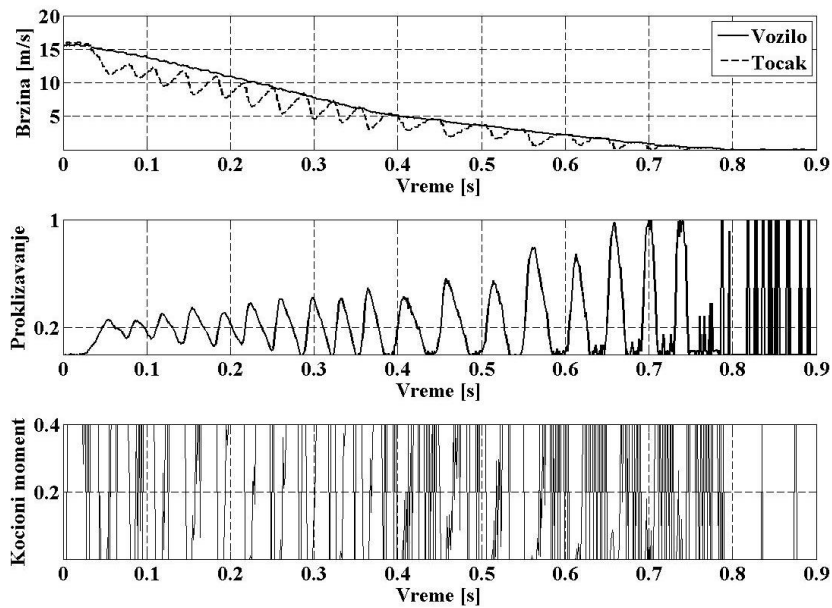

 Slika 4.5 Simulacioni rezultati dobijeni primenom tradicionalnog UKR-a za  $M_c=10$ .

 Slika 4.6 Simulacioni rezultati dobijeni primenom tradicionalnog UKR-a s eliminacijom četeringa za  $M_c=10$ .

#### 4.3.1.2 Eksperimentalni rezultati

Eksperimentalni rezultati primene tradicionalnog UKR-a, opisanog sa (4.8), na ABS prikazani su na slici 4.7, a sa upravljanjem (4.16) na slici 4.8, za  $M_c=10$ . Nemodelirana i nelinearna dinamika se, sada, više primećuje, nego što je to bio slučaj kod rezultata digitalne simulacije. Upotreba (4.15) više nema uticaja na eliminisanje četeringa, posebno što se zna da sa  $h(\sigma)$  umesto  $sgn$  funkcije sistem gubi svoje robustne karakteristike.



Slika 4.7 Eksperimentalni rezultati dobijeni primenom tradicionalnog UKR-a za  $M_c=10$ .



Slika 4.8 Eksperimentalni rezultati dobijeni primenom tradicionalnog UKR-a s eliminacijom četeringa za  $M_c=10$ .

### 4.3.2 Integralni UKR

Korišćenjem prethodnog upravljanja postignuti su zadovoljavajući rezultati, ali tačnost sistema nije bila prihvatljiva. Da bi se ovaj problem prevazišao, uvodi se integralna prekidačka funkcija oblika:

$$\sigma = (\lambda - \lambda_r) + c_1 \int_0^t (\lambda - \lambda_r) dt, \quad (4.17)$$

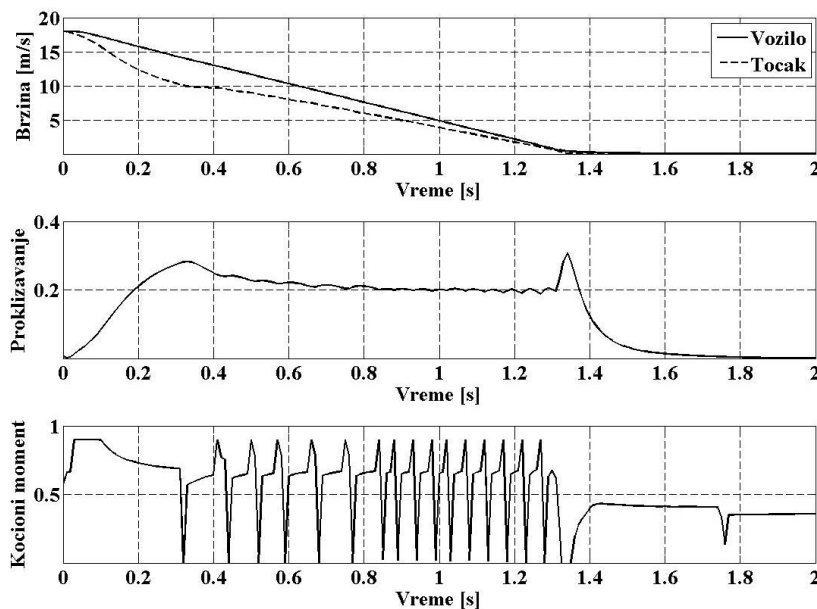
u zakon upravljanja (4.8) formirajući, na taj način, tzv. UKR s integralnom prekidačkom funkcijom ili, skraćeno, integralni UKR. Ovaj algoritam upravljanja, pored poboljšanja tačnosti, takođe ima uticaj i na smanjenje efekta četeringa (Harifi, 2008). Kao u prethodnom algoritmu upravljanja, kočioni moment ekvivalentnog upravljanja se određuje kao:

$$\hat{M}_1^{eq} = -\hat{g}^{-1}(\hat{f} + c_1(\lambda - \lambda_r)). \quad (4.18)$$

Integralni UKR ima istu formu kao i (4.8), a vrednost parametra  $M_c$  je odabrana u skladu sa (4.14) kako bi se obezbedio klizni režim u sistemu. Kada u sistemu postoji klizni režim, sistem postaje robustan na neodređenosti parametara i spoljašnje poremećaje. Ova robustnost se gubi kada je diskontinualna funkcija  $\text{sgn}(\sigma)$  zamenjena kontinualnom oblika (4.15) u upravljačkom signalu.

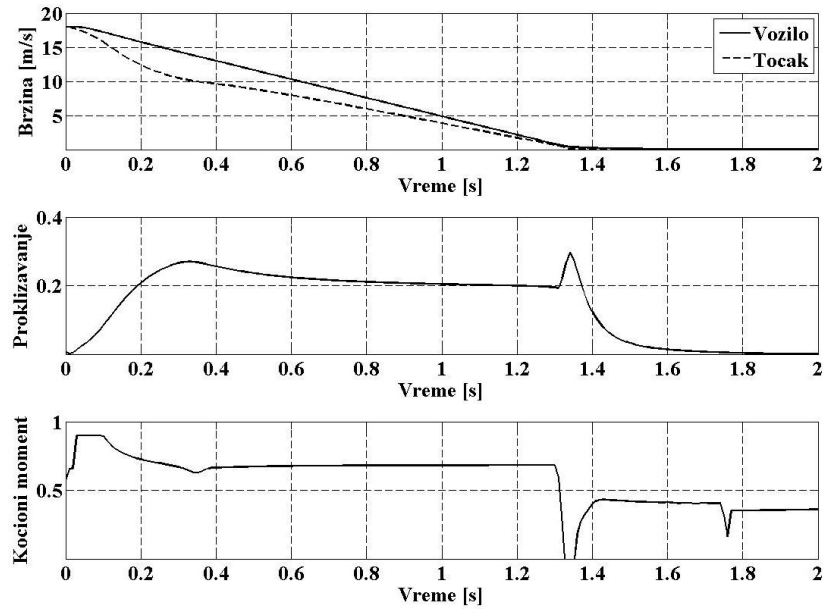
#### 4.3.2.1 Simulacioni rezultati

Uvođenje integralne prekidačke funkcije neznatno unapređuje tačnost u stacionarnom stanju, iako je sada prelazni period sporiji, što se i očekivalo. Usvojena je vrednost  $c_1 = 5$  u (4.18). Karakteristični odzivi ABS-a za  $M_c = 1$  i  $M_c = 10$  prikazani su na slikama 4.9 i 4.11, respektivno.

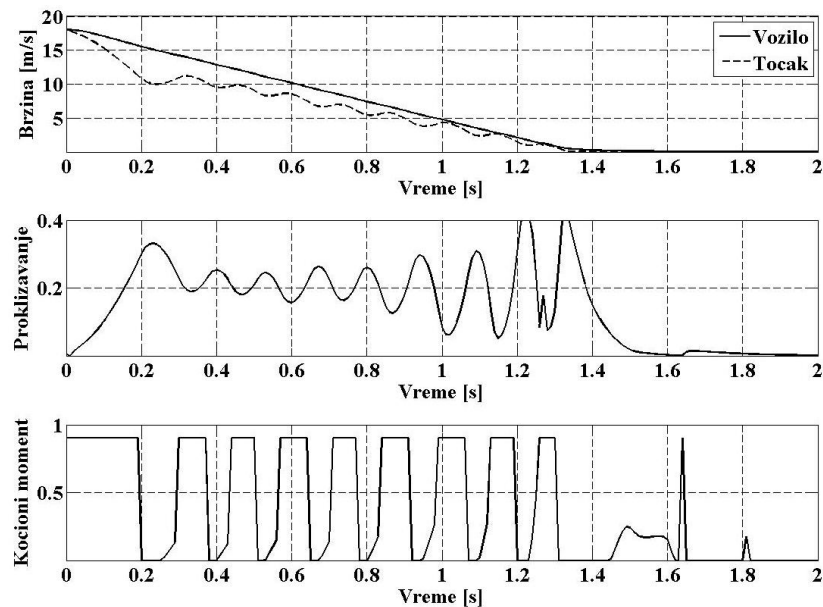


Slika 4.9 Simulacioni rezultati dobijeni primenom integralnog UKR-a za  $M_c=1$ .

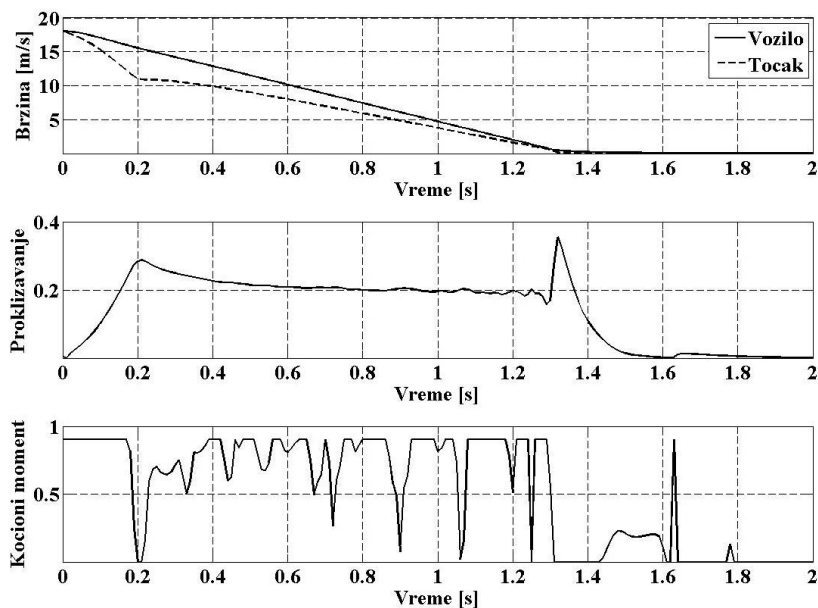
Odgovarajući odzivi ABS-a sa (4.15) umesto sgn funkcije prikazani su na slikama 4.10 i 4.12, respektivno. Može da se uoči da integralni UKR ne unapređuje u velikoj meri karakteristike ABS-a, kao što se očekivalo.



Slika 4.10 Simulacioni rezultati dobijeni primenom integralnog UKR-a s eliminacijom četeringa, za  $M_c=1$ .



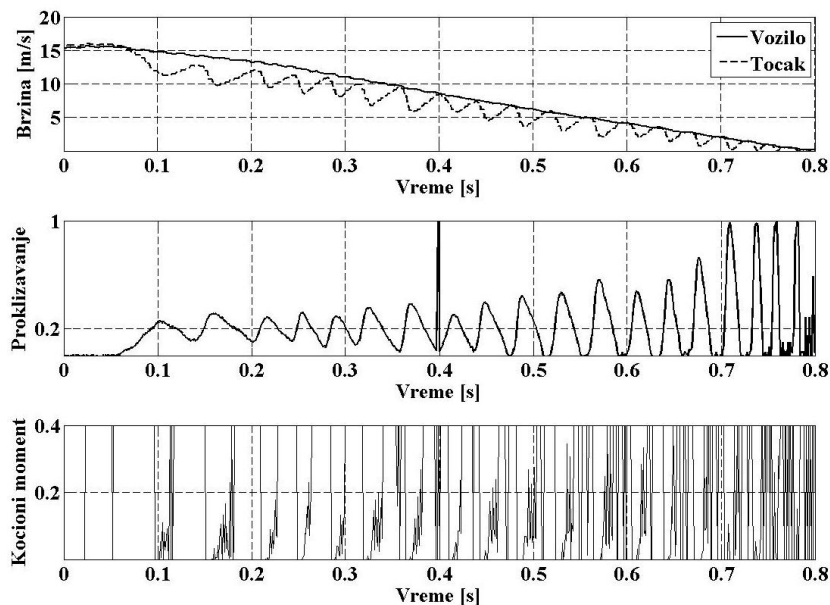
Slika 4.11 Simulacioni rezultati dobijeni primenom integralnog UKR-a za  $M_c=10$ .



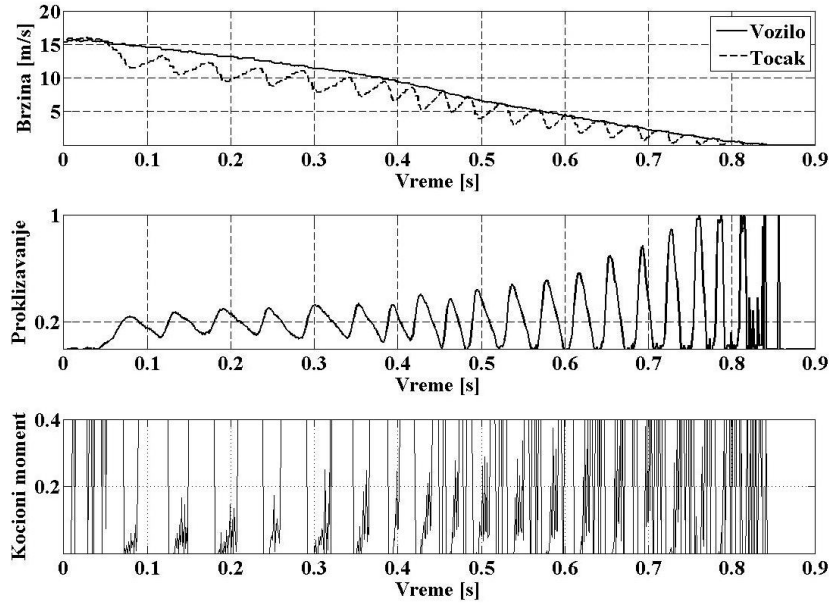
Slika 4.12 Simulacioni rezultati dobijeni primenom integralnog UKR-a s eliminacijom četeringa, za  $M_c=10$ .

#### 4.3.2.2 Eksperimentalni rezultati

Eksperimentalni rezultati, dobijeni primenom predloženog integralnog UKR-a, dati su na slikama 4.13 i 4.14, za  $M_c = 10$ . Upotreba (4.15) nema značajan uticaj na ublažavanje četeringa. Imajući sve ovo u vidu, prilikom projektovanja novih zakona upravljanja više se neće upotrebljavati (4.15), kao ni integralna prekidačka funkcija (4.18).



Slika 4.13 Eksperimentalni rezultati dobijeni primenom integralnog UKR-a za  $M_c=10$ .



Slika 4.14 Eksperimentalni rezultati dobijeni primenom integralnog UKR-a s eliminacijom četeringa za  $M_c=10$ .

### 4.3.3 UKR s proporcionalno plus konstantnim zakonom doseganja

U slučaju UKR-a s proporcionalno plus konstantnim zakonom doseganja (Gao, 1993), prekidačka funkcija je, takođe, definisana sa (4.2) i njena dinamika određena je sledećom jednačinom:

$$\dot{\sigma} = \dot{\lambda} = -M_p \sigma - M_c \operatorname{sgn}(\sigma); M_p, M_c > 0, \quad (4.19)$$

Zamenom (4.19) u (2.16), upravljački koćioni moment postaje (4.6), gde je  $\hat{M}_1^{eq}$  određen sa (4.5), a komponenta doseganja UKR-a je:

$$M_1^r(\sigma) = -\hat{g}^{-1}(M_p \sigma + M_c \operatorname{sgn}(\sigma)). \quad (4.20)$$

Parametri  $M_p$  i  $M_c$  su odabrani u skladu sa uslovima uspostavljanja i egzistencije kliznog režima:

$$\sigma \dot{\sigma} < -\delta \sigma^2 - \eta |\sigma|; \delta, \eta > 0. \quad (4.21)$$

U ovom slučaju, vreme doseganja određeno je sa:

$$t_r < \frac{\ln\left(\left(\delta|\sigma(0)| + \eta\right)/\eta\right)}{\delta}. \quad (4.22)$$



Implementacija jednačine (4.6), zajedno sa (4.5) i (4.20), u (2.16), daje uslove uspostavljanja i egzistencije kliznog režima u obliku:

$$\sigma \dot{\sigma} = \frac{g}{\hat{g}} \left( \frac{\hat{g}}{g} (f - \hat{f}) \sigma + \frac{\hat{g}}{g} \hat{f} \left( 1 - \frac{g}{\hat{g}} \right) \sigma - M_p \sigma^2 - M_c |\sigma| \right) < -\delta \sigma^2 - \eta |\sigma|, \quad (4.23)$$

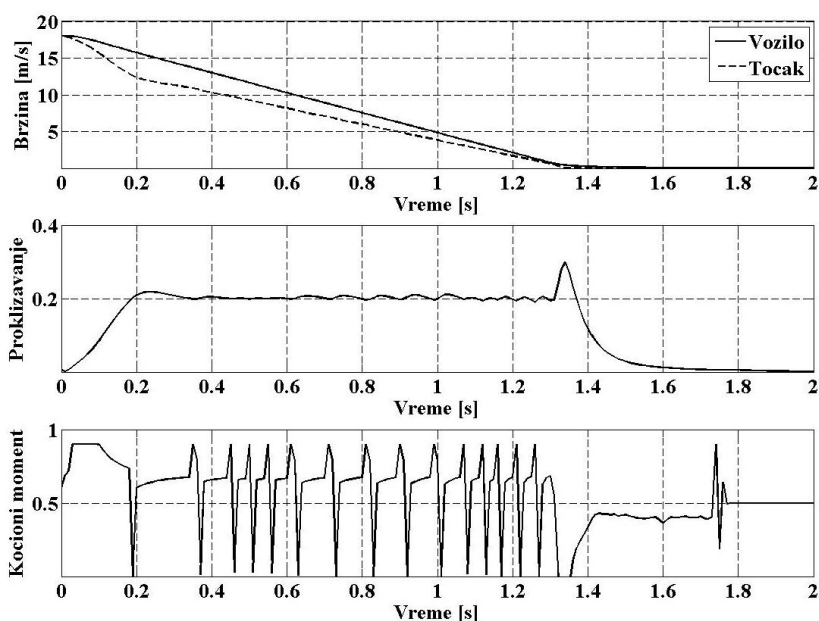
koji su ispunjeni ukoliko je  $M_c$  odabran u skladu sa (4.14), dok  $M_p$  zadovoljava nejednakost:

$$M_p > \frac{\delta}{1 - \varepsilon_g}. \quad (4.24)$$

Proporcionalna komponenta zakona doseganja  $M_p$  omogućava da faza doseganja bude brža u odnosu na tradicionalni UKR i, izbor manjih vrednosti konstante komponente  $M_c$ . Na taj način, četering kod ABS-a se u velikoj meri umanjuje (Mitić, 2011).

#### 4.3.3.1 Simulacioni rezultati

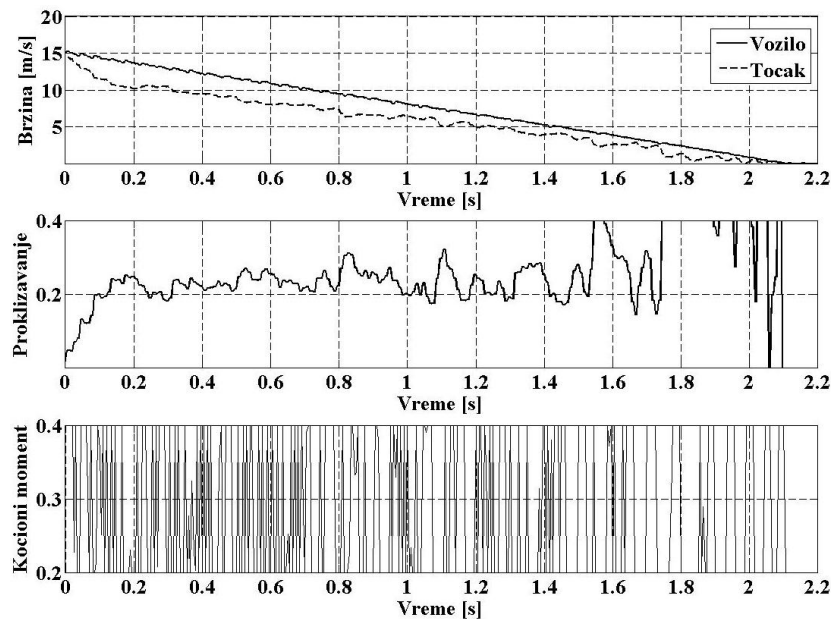
Slika 4.15 prikazuje simulacione rezultate nakon primene UKR-a s proporcionalno plus konstantnim zakonom doseganja za vrednosti parametara  $M_p = 2$  i  $M_c = 1$ . Četering nije toliko izražen, s obzirom da je konstantna komponenta zakona doseganja upravljanja izabrana da bude najmanja moguća. S druge strane, proporcionalni deo, koji obezbeđuje brže uspostavljanje kliznog režima, omogućuje ovakav izbor parametra  $M_c$ .



Slika 4.15 Simulacioni rezultati dobijeni primenom UKR-a s proporcionalno plus konstantnim zakonom doseganja za  $M_p=2$  i  $M_c=1$ .

### 4.3.3.2 Eksperimentalni rezultati

Na slici 4.16 dati su eksperimentalni rezultati predloženog upravljanja. Kako bi se izborili sa nemodeliranom dinamikom, za vrednosti  $M_p$  i  $M_c$  usvojene su vrednosti 10 i 4, respektivno. Može da se primeti da su eksperimentalni rezultati slični simulacionim, i pored prisustva šuma i činjenice da je upravljanje ograničeno na manji opseg nego što je to slučaj kod digitalnih simulacija. Ovaj algoritam poboljšava tačnost sistema u poređenju s prethodno primenjenim metodama upravljanja.



Slika 4.16 Eksperimentalni rezultati dobijeni primenom UKR-a s proporcionalno plus konstantnim zakonom dosezanja za  $M_p=10$  i  $M_c=4$ .

Pristup zasnovan na UKR-u s proporcionalno plus konstantnim zakonom dosezanja daje do sada najbolje eksperimentalne rezultate u upravljanju ABS-om. Glavni razlog za dobre odzive sistema leži u činjenici da je klizni režim postignut korišćenjem relativno malih vrednosti parametara zakona upravljanja.

### 4.3.4 UKR s eksponencijalnim zakonom dosezanja

U cilju eliminacije četeringa, UKR s eksponencijalnim zakonom dosezanja je predložen u (Fallaha, 2011). Konstantna komponenta zakona dosezanja je zamenjena eksponencijalnom funkcijom pa je dinamika prekidačke funkcije definisana sledećim jednačinama:

$$\dot{\sigma} = \frac{M_c}{N(\sigma)} \operatorname{sgn}(\sigma), \quad M_c > 0, \quad (4.25)$$

$$N(\sigma) = \gamma + (1 - \gamma)e^{-\beta|\sigma|^r}, \quad (4.26)$$

gde je:  $\gamma$  strogo pozitivna konstanta manja od jedinice,  $r$  je strogo pozitivni ceo broj i  $\beta$  je strogo pozitivni broj. Ovo uzrokuje da je  $N(\sigma)$  isključivo pozitivna funkcija zavisna od  $\sigma$  i važi da je  $\gamma < N(\sigma) < 1$ . Ukoliko se izabere da je  $\gamma = 1$  jednačina (4.25) se može da transformiše u već poznat zakon dosezanja:

$$\dot{\sigma} = -M_c \operatorname{sgn}(\sigma), \quad M_c > 0, \quad (4.27)$$

tj. u tradicionalni UKR (4.8).

Upravljački kočioni moment je, takođe, definisan sa (4.6), gde je  $\hat{M}_1^{eq}$  dat pomoću (4.5), a komponenta dosezanja UKR-a se dobija iz (2.16) i (4.25) kao:

$$M_1^r(\sigma) = -\hat{g}^{-1} \frac{M_c}{N(\sigma)} \operatorname{sgn}(\sigma). \quad (4.28)$$

Uslovi uspostavljanja i egzistencije kliznog režima mogu da se napišu sada u sledećoj formi:

$$\sigma \dot{\sigma} < -\frac{\eta}{N(\sigma)} |\sigma|, \quad \eta > 0, \quad (4.29)$$

određujući, na taj način, vreme dosezanja kao:

$$t_r = \frac{1}{\eta} \left( \gamma |\sigma(0)| + (1 - \gamma) \int_0^{|\sigma(0)|} e^{-\beta|\sigma|^r} d\sigma \right). \quad (4.30)$$

Vreme uspostavljanja kliznog režima kod UKR-a s eksponencijalnim zakonom dosezanja manje je nego isto vreme kod tradicionalnog UKR-a, određenog sa (4.10). Projektovanje regulatora za sistem s neodređenim parametrima je, takođe, razmatrano u (Fallaha, 2011), ali za  $g = \hat{g} = 1$ . U ovom slučaju razmatra se slučaj kada su obe funkcije  $f$  i  $g$  neodređene, kao što je to već urađeno kod tradicionalnog UKR-a i UKR-a s proporcionalno plus konstantnim zakonom dosezanja. Na osnovu (2.16), (4.5), (4.6) i (4.28), uslov (4.29) može da se ponovo napiše kao:

$$\sigma \dot{\sigma} = \frac{g}{\hat{g}} \left( \frac{\hat{g}}{g} (f - \hat{f}) \sigma + \frac{\hat{g}}{g} \hat{f} \left( 1 - \frac{g}{\hat{g}} \right) \sigma - \frac{M_c}{N(\sigma)} |\sigma| \right) < -\frac{\eta}{N(\sigma)} |\sigma|. \quad (4.31)$$

Nejednakost (4.31) je ispunjena ukoliko važi:

$$\frac{M_c - \frac{\hat{g}}{g} \eta}{N(\sigma)} > \frac{\hat{g}}{g} \left( (f - \hat{f}) + \hat{f} \left( 1 - \frac{g}{\hat{g}} \right) \right), \quad (4.32)$$

tj.:

$$M_c > \max \left( \left| \frac{\hat{g}}{g} \left( N(\sigma) \left( (f - \hat{f}) + \hat{f} \left( 1 - \frac{g}{\hat{g}} \right) \right) + \eta \right) \right| \right), \quad (4.33)$$

što rezultira uslovom:

$$M_c > \frac{\gamma (\varepsilon_f + \hat{F} \varepsilon_g) + (1 - \gamma) e^{-\beta |\sigma|^\gamma} (\varepsilon_f + \hat{F} \varepsilon_g) + \eta}{1 - \varepsilon_g}, \quad (4.44)$$

uzimajući u obzir (4.13), (4.26) i početnu pretpostavku da su parametri sistema neodređeni. Ukoliko je nejednakost (4.44) zadovoljena, onda je uslov postizanja kliznog režima ispunjen u oblasti određenoj sa:

$$|\sigma| > W, \quad (4.45)$$

gde je:

$$W = \sqrt[r]{\frac{\ln \left( \frac{(1 - \gamma) (\varepsilon_f + \hat{F} \varepsilon_g)}{M_c (1 - \varepsilon_g) - \gamma (\varepsilon_f + \hat{F} \varepsilon_g) - \eta} \right)}{\beta}}, \quad (4.46)$$

širina graničnog sloja direktno zavisna od parametra  $\beta$ , koja postoji ako i samo ako je:

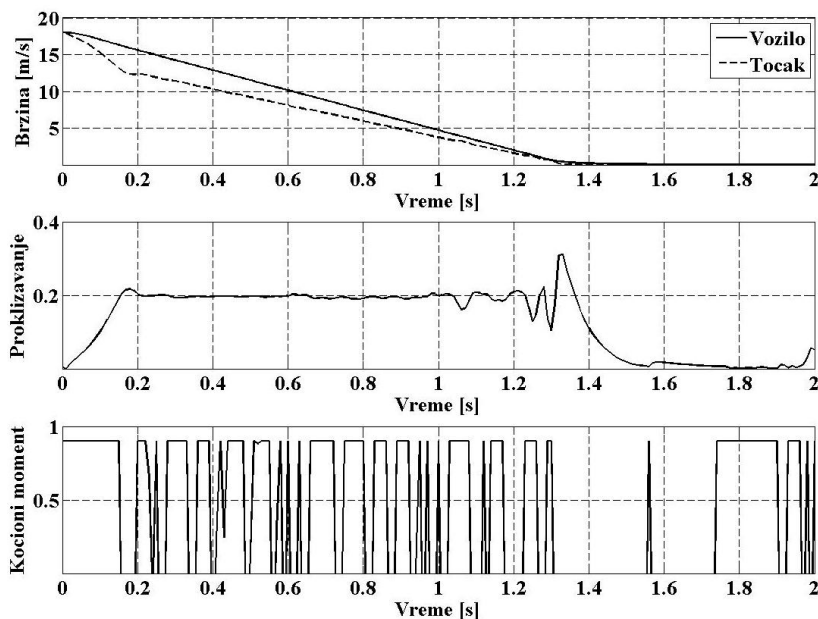
$$M_c > \frac{\gamma (\varepsilon_f + \hat{F} \varepsilon_g) + \eta}{1 - \varepsilon_g}. \quad (4.47)$$

UKR zasnovan na eksponencijalnom zakonu dosezanja omogućuje manje vreme dosezanja s manjim vrednostima parametra  $M_c$  u poređenju s tradicionalnim UKR-om.

#### 4.3.4.1 Simulacioni rezultati

Parametri kontrolera, korišćeni tokom simulacije, su  $M_c = 10$ ,  $\gamma = 0,1$ ,  $r = 1$ , i  $\beta = 500$ . Simulacioni rezultati, prikazani na slici 4.17, sličniji su odzivima ABS-a s

tradicionalnim UKR-om (s integralnom prekidačkom funkcijom ili bez nje) nego odzivima dobijenim primenom UKR-a s proporcionalno plus konstantnim zakonom dosezanja.



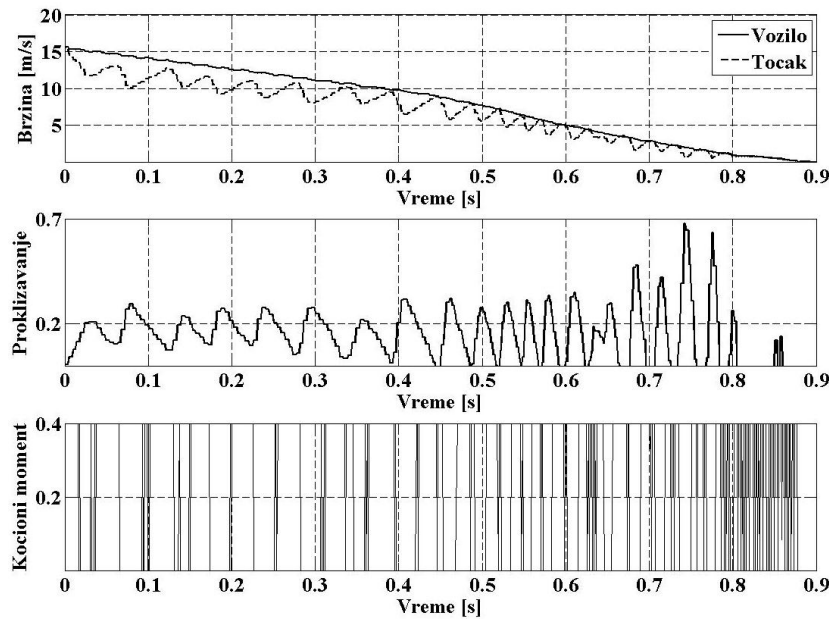
Slika 4.17 Simulacioni rezultati dobijeni primenom UKR-a s eksponencijalnim zakonom dosezanja za  $M_c=10$ ,  $\gamma=0,1$ ,  $r=1$  i  $\beta=500$ .

#### 4.3.4.2 Eksperimentalni rezultati

Pomenuta sličnost može da se uoči i na slici 4.18 gde su prikazani eksperimentalni rezultati primene UKR-a s eksponencijalnim zakonom dosezanja. Ova sličnost se objašnjava dodatnim ograničenjima u upravljačkom signalu na koje se nailazi u primeni algoritma upravljanja na realni ABS. Naime, u simulaciji je upravljački signal kočionog momenta ograničen na interval  $[0; 1]$ . Ovaj opseg je isuviše širok da bi se implementirao pri upravljanju laboratorijskom maketom ABS-a u realnom vremenu.

Usled nesavršenog prenosa momenta DC motora na hidraulični kočioni mehanizam, realizovan uz pomoć čelične sajle, implementacija maksimalnih vrednosti upravljačkog signala kočionog momenta (tokom zasićenja) proizvodi veoma visoke oscilacije u odzivima ABS-a, onemogućujući, na taj način, regulaciju proklizavanja točka. Ovo je prouzrokovano sporim povratnim odzivom hidrauličnog sistema kada upravljački signal opada. U cilju približavanja odziva ABS-a prihvatljivim vrednostima, maksimalni upravljački signal kočionog momenta ograničen je na 40% njegove nominalne vrednosti, tj. upravljački signal je podešen da bude u intervalu  $[0; 0,4]$  kod upravljanja eksperimentalnom maketom ABS-a. Pošto tradicionalni UKR i UKR zasnovan na eksponencijalnom zakonu dosezanja zahtevaju veće vrednosti relejnog dela, kako bi se garantovao nastanak kliznog režima, razumljivo je

zašto su njihovi rezultati lošiji u poređenju sa odzivima dobijenim primenom UKR-a s proporcionalno plus konstantnim zakonom doseganja.



Slika 4.18 Eksperimentalni rezultati dobijeni primenom UKR-a s eksponencijalnim zakonom doseganja za  $M_c=10$ ,  $\gamma=0,1$ ,  $r=1$  i  $\beta=500$ .

## 4.4 Sinteza UKR-a zasnovanog na ortogonalnom modelu ABS-a

### 4.4.1 Motivacija

Većina tehnika upravljanja zasnovanih na UKR-u, koje se mogu se naći u literaturi, projektovane su uglavnom na bazi modela pod pretpostavkom da su sve promenljive merljive, ili na bazi modela ulaz-izlaz za linearni sistem. U (Camacho, 2003) opisan je robustni regulator zasnovan na unutrašnjem modelu procesa i konceptu kliznog režima. UKR zasnovan na modelu s primenom u oblasti robotike prikazan je u (Kapadia, 2010). Sličan pristup, ali za HDA-fabriku (fabrika za proizvodnju benzenu), objašnjen je u (Herrmann, 2003). Jedan primer upravljanja na bazi modela opisan je u (Qiao, 2003), gde je predloženi regulator UKR-a, zasnovan na Takagi-Sugeno fazi modelu.

S druge strane, u nekim problemima upravljanja dozvoljen je pristup samo ulazima i izlazima nelinearnog objekta upravljanja. U ovim slučajevima, kao veoma atraktivan prilaz u upravljanju nelinearnim sistemima može da se uzme višestruki, zasnovan na modelu, upravljački okvir. On je, kao takav, pogodan za primenu ne samo u nelinearnim sistemima, već i kod nepoznatih sistema. Koncept višestrukih modela sa prebacivanjem dobija sve veću pažnju poslednjih godina, pošto on pojednostavljuje kako proces modeliranja, tako i

projektovanje samog regulatora (Narendra, 1995). Ukoliko je sistem, koji treba da se modelira komplikovan, ne postoji garancija da će dobijena globalna reprezentacija na adekvatan način da aproksimira sistem duž celog prostora. Na taj način, zavisnost od reprezentacije može da se smanji korišćenjem lokalnih aproksimacija, gde će domen sistema biti podeljen na lokalne regione, a poseban model koristiće se za svaki od tih regiona (Johansen, 1993). U (Cho, 2007), višestruko upravljanje na bazi kvazi-kliznog režima u vremenski-diskretnom domenu predloženo je za uopštenu klasu nelinearnih digitalnih sistema, gde je samoorganizujuća mapa upotrebljena s ciljem da podeli prostor stanja u lokalne regione tj. podregione.

Model određenog radnog opsega nekog sistema može da se opiše i kao funkcija prenosa  $n$ -tog reda dobijena uz pomoć ortogonalnih filtara. Nove metode za dobijanje ortogonalnih funkcija i njihova moguća primena u polju inženjerstva bile su predmet intenzivnog istraživanja prethodnih godina. U (Nikolić, 2010; Antić, 2012) predstavljena je nova metoda za projektovanje ortogonalnih racionalnih funkcija korišćenjem specifičnih transformacija u kompleksnom domenu i data je neophodna teorijska osnova. Takođe, prezentovana je nova metoda za dobijanje modela vremenski-kontinualnih dinamičkih sistema na bazi ovih ortogonalnih funkcija (Milojković, 2010). Praktična realizacija izvedenih ortogonalnih filtara je veoma jednostavna, usled faktorisanje forme ortogonalnih funkcija, i oni su veoma brzi, robustni i precizni. Takođe, pogodni su za primene gradijentnih metoda u problemima optimizacije i adaptacije zbog njihove osobine da ubrzaju postojeće (klasične) algoritme upravljanja.

U ovoj disertaciji koriste se razvijeni Minc-Ležandrovi skoro ortogonalni filtri, kako bi se poboljšala postojeća tehnika upravljanja zasnovana na UKR-u, preko određivanja lokalnih linearizovanih ortogonalnih modela objekta kojim se upravlja. Opštepoznata je činjenica da je efikasnost metode upravljanja u bliskoj vezi s tačnošću modela. S druge strane, ortogonalni modeli, opisani odgovarajućom funkcijom prenosa, se ne mogu direktno da koriste u algoritmu upravljanja. Naglašeno je da usled diferencijabilnih osobina objekta, ortogonalni modeli najpre moraju da budu transformisani u modifikovanu kontrolabilnu kanoničnu formu, a tek nakon toga da se koriste kao model objekta prilikom projektovanja UKR-a.

#### **4.4.2 Sinteza UKR-a za linearne sisteme s konačnim stabilnim nulama**

Razmotrimo objekat upravljanja  $n$ -tog reda sa  $m$  konačnih stabilnih nula opisan pomoću sledeće funkcije prenosa:

$$W(s) = \frac{P(s)}{Q(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_0}{s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0}, \quad (4.48)$$

gde je  $\deg P(s) = m$ ,  $\deg Q(s) = n$ , i  $m < n$ .

Problem implementacije kliznih režima za takve objekte bio je predmet diskusije u nekoliko radova (Iskrenović, 1998; Iskrenović, 2004; Iskrenović, 2008). Ukazano je na činjenicu da usled diferencijabilnih osobina objekta, klizni režim ne može da bude implementiran prekidačkim upravljanjem, koji je karakterističan za sisteme promenljive strukture. Da bi prevazišli taj problem, prekidački upravljački signal se propušta kroz kaskadu nisko-propusnih filtara prvog reda (Emelyanov, 1970) Drugi pristup je da se početni sistem, čiji je model dat u kontrolabilnoj kanoničnoj formi:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + bu, \quad x \in R^n, \quad u \in R^m, \\ y &= hx, \end{aligned} \quad (4.49)$$

podeli u dva podprostora (Utkin, 1992). Prvi podprostor  $m$ -tog reda je autonoman s stabilnim sopstvenim vrednostima, dok drugi zavisi od upravljačkog signala i on je  $(n-m)$ -tog reda. Na taj način, UKR može da se razvije u ovom podprostoru obezbeđujući, na taj način, stabilnost nad celim sistemom. U daljem tekstu, biće data kratka teorijska osnova ove metode (Utkin, 1992).

Razmotrimo sistem (4.49) i pretpostavimo da su neke od koordinata

$$y_1 = h_0 x, \quad h_0 = (h_{01}, h_{02}, \dots, h_{0n}), \quad (4.50)$$

upravljane promenljive, da je par  $(A, b)$  potpuno kontrolabilan, i da je par  $(h_0, A)$  potpuno opservabilan. Da bi (4.49) redukovali na modifikovanu kontrolabilno kanoničnu formu, polazimo od željene reprezentacije modela opisanog sa:

$$\begin{aligned} y_1^{(i)} &= h_0 A^i x, \quad i = (0, 1, \dots, l-1), \\ y_1^{(l)} &= h_0 A^l x + h_0 A^{l-1} b u. \end{aligned} \quad (4.51)$$

Uvedimo, sada, sledeću notaciju:

$$\begin{aligned} \dot{y}_i &= y_{i+1}, \quad i = (1, 2, \dots, l-1), \\ \dot{y}_l &= h_0 A^l x + h_0 A^{l-1} b u. \end{aligned} \quad (4.52)$$

Sistem, koji se sastoji od prvih  $l$  jednačina u (4.51), rešiv je u pogledu  $l$  komponenti vektora  $x$ . Numerišimo  $x$  tako da ovih  $l$  komponenti čine vektor:



$$(x^l)^T = (x_{n-l+1}, \dots, x_n). \quad (4.53)$$

Tada je

$$x^l = Rx^{n-l} + R_y y^l, \quad (4.54)$$

gde su  $x^{n-l} = (x_1, \dots, x_{n-l})$ ,  $y^l = (y_1, \dots, y_l)^T$  i matrice konstanti  $R$  i  $R_y$  definisani kao rezultat rešavanja sistema od  $l$  jednačina od (4.51) u odnosu na  $x^l$ . Zamenom jednačine sistema (4.52) za poslednjih  $l$  jednačina u (4.49) i linearnih funkcija (4.54) za  $x^l$  u svim jednačinama, konačno se dobijaju jednačine, koje opisuju ponašanje sistema u prostoru stanja  $x^{n-l}, y^l$ :

$$\begin{aligned} \dot{x}^{n-l} &= A_{n-l} x^{n-l} + D y^l + b^{n-l} u, \\ \dot{y}_i &= y_{i+1}, \quad i = 1, \dots, l-1, \\ \dot{y}_l &= r^{n-l} x^{n-l} + d^l y^l + h_0 A^{l-1} b u, \end{aligned} \quad (4.55)$$

gde su:  $A_{n-l}, D, b^{n-l}, r^{n-l}$  i  $d^l$  matrice konstanti, vektor i nizovi odgovarajućih veličina. Poslednja jednačina obezbeđuje formu pogodnu za projektovanje regulatora zasnovanom na UKR-u.

Najčešće upotrebljavana struktura UKR-a data je u sledećem obliku:

$$u(t) = u_{fed}(t) + u_{dis}(t), \quad (4.56)$$

gde je:  $u_{fed}(t)$  stabilni zakon upravljanja s povratnom spregom, najčešće nominalno ekvivalentno upravljanje, i  $u_{dis}(t)$  je diskontinualna ili prekidačka komponenta.

Imajući u vidu činjenicu da je klizni režim sada indukovan u  $l$ -dimenzionalnom podprostoru, prekidačka funkcija je:

$$s = c y^l = 0, \quad (4.57)$$

gde je  $c = (c_1, \dots, c_{l-1}, 1)$ . Sada se ekvivalentno upravljanje može da dobije iz jednačine:

$$\dot{s} = \sum_{i=1}^{l-1} c_i y_{i+1} + r^{n-l} x^{n-l} + d^l y^l + h_0 A^{l-1} b u = 0, \quad (4.58)$$

kao:

$$u_{eq}(t) = u_{fed}(t) = -\left(h_0 A^{l-1} b\right)^{-1} \left( \sum_{i=1}^{l-1} c_i y_{i+1} + r^{n-l} x^{n-l} + d^l y^l \right), \quad (4.59)$$

Diskontinualni deo u zakonu upravljanja (4.56) obično zavisi od objekta kojim se upravlja. U slučaju kontrolera tipa regulatora, on može da se odabere kao struktura tipa releja:

$$u_{dis}(t) = -\rho \operatorname{sgn}(s), \quad (4.60)$$

gde je  $\rho$  parametar izabran tako da ispuni uslove uspostavljanja i egzistencije kliznog režima.

U cilju poboljšanja postojećeg UKR-a, mogu da se koriste ortogonalni modeli koji se dobijaju primenom ortogonalnih filtara. Na taj način, može da se linearizuje bilo koji sistem u njegovim radnim oblastima, s velikim stepenom tačnosti, što je od velikog značaja za projektovanje upravljanja. U sledećem koraku bi se za svaku od tih radnih oblasti projektovao odgovarajući regulator zasnovan na UKR-u.

#### 4.4.3 Primena na ABS

Primena ortogonalnih funkcija u upravljanju ABS-om je zasnovana na linearizaciji sistema u radnim oblastima. Ovi uprošćeni modeli ne sadrže punu kompleksnost realnog sistema, ali opisuju dinamiku sistema u specifičnim uslovima u dovoljnoj meri. Kao što je to već opisano u odeljku 2.5, u (Precup, 2011) pokazano je da ABS može da se predstavi uz pomoć funkcije prenosa (ulaz - primenjeni kočioni moment, izlaz - proklizavanje):

$$W(s) = \frac{b_1 s + b_0}{s^2 + a_1 s + a_0}, \quad (4.61)$$

gde koeficijenti  $b_1$  i  $b_0$  zavise od parametra  $\delta$  skoro ortogonalnih polinoma.

Ideja se ogleda u tome da se snime odzivi sistema (vrednosti proklizavanja  $\lambda$ ) u različitim radnim oblastima, za različite vrednosti primenjenog upravljanja (kočioni moment) selektovanih iz opsega mogućih vrednosti (Precup, 2011). Na osnovu ovih odziva može da se izvrši linearizacija ABS-a u datim oblastima primenom ortogonalnih filtra. Dobijeni rezultati nakon procesa modeliranja su prikazani u tabeli 4.1. Kao što može da se vidi iz tabele 4.1, ceo radni opseg kočionog momenta podeljen je na 20 podoblasti sa korakom 0,01 (kolona - Opseg kočionog momenta). U cilju modeliranja, kao ulaz koristi se srednja vrednost svakog opsega (kolona - Primenjena vrednost). Vrednosti parametara za  $k=1$  i  $\delta=1,002837$  date su u tabeli 4.2. Takođe, može da se primeti da parametar  $c_0$  u tabeli 4.2 ima vrednosti koje su bliske nuli, tako da u ovom slučaju može da se zanemari.

Sada, za svaki od linearizovanih modela treba da se projektuje odgovarajući kontroler na bazi kliznog režima. Prebacivanje upravljanja između kontrolera zavisi od ulaznog signala (kočioni moment) i može da se izvrši korišćenjem programskog koda ili pomoću već postojećih alata u programskom paketu Matlab.

Tabela 4.1 Parametri linearizovanih modela sistema za različite opsege radne oblasti.

R. br. modela	Opseg	Primenjena vrednost	$b_1$	$b_0$	$a_1$	$a_0$
1	0,20-0,21	0,205	0,487	38,546	64,631	935,329
2	0,21-0,22	0,215	0,138	73,974	92,113	1409,402
3	0,22-0,23	0,225	0,704	17,922	31,129	242,056
4	0,23-0,24	0,235	0,859	21,865	40,301	180,211
5	0,24-0,25	0,245	0,997	11,773	19,013	77,423
6	0,25-0,26	0,255	0,612	32,414	52,532	192,221
7	0,26-0,27	0,265	0,387	44,781	38,631	247,572
8	0,27-0,28	0,275	0,293	63,215	44,615	288,311
9	0,28-0,29	0,285	0,385	51,552	37,399	177,881
10	0,29-0,30	0,295	0,611	89,925	68,212	268,331
11	0,30-0,31	0,305	0,544	93,616	66,518	273,144
12	0,31-0,32	0,315	0,277	48,355	27,111	132,473
13	0,32-0,33	0,325	0,305	52,719	28,841	142,818
14	0,33-0,34	0,335	0,382	59,616	30,217	153,151
15	0,34-0,35	0,345	0,518	74,126	37,652	187,116
16	0,35-0,36	0,355	0,596	84,853	44,282	198,173
17	0,36-0,37	0,365	0,635	95,751	52,113	210,220
18	0,37-0,38	0,375	0,655	103,884	53,249	219,69
19	0,38-0,39	0,385	0,518	99,414	52,122	195,301
20	0,39-0,40	0,395	0,855	35,227	18,744	66,366

Tabela 4.2 Vrednosti parametara filtara.

R. br. modela	$p_1$	$p_2$	$c_0$	$c_1$	$c_2$
1	42,754	21,877	0,000003	1,115	-0,628
2	72,736	19,377	0,000001	0,911	-0,772
3	16,009	15,121	0,000021	0,937	-0,233
4	35,177	5,123	0,000017	1,291	-0,432
5	13,106	5,907	0,000015	1,306	-0,309
6	3,957	48,573	0,000007	0,657	-0,045
7	30,519	8,112	0,0000025	1,463	-1,076
8	36,775	7,841	0,0000122	1,655	-1,362
9	31,806	5,593	0,000035	1,703	-1,318
10	64,021	4,191	0,000016	1,888	-1,279
11	62,121	4,397	0,000025	1,912	-1,368
12	20,716	6,395	0,000011	1,991	-1,714
13	22,491	6,350	0,000014	2,062	-1,757
14	23,775	6,442	0,000017	2,269	-1,887
15	31,761	5,891	0,000012	2,401	-1,883
16	39,231	5,051	0,000011	2,439	-1,843
17	47,706	4,406	0,000011	2,417	-1,782
18	48,742	4,507	0,000015	2,546	-1,891
19	48,058	4,064	0,000012	2,380	-1,862
20	14,005	4,738	0,000018	2,514	-1,659

Kao što je ranije rečeno, u cilju projektovanja kontrolera, funkcija prenosa (4.16) mora da se, najpre, prevede u modifikovanu kontrolabilnu kanoničnu formu (4.55). Nakon primene opisane procedure, dobija se model ABS-a u prostoru stanja:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= d_{11}x_1 + d_{12}x_2 + ku, \\
 \dot{x}_2 &= d_{21}x_1 + d_{22}x_2, \\
 y &= x_1,
 \end{aligned}
 \tag{4.62}$$

gde su:

$$\begin{aligned}
 d_{11} &= \frac{b_0 - a_1 b_1}{b_1}, d_{12} = -b_1, k = b_1, \\
 d_{21} &= \frac{a_0 + \frac{b_0}{b_1} d_{11}}{b_1}, d_{22} = -\frac{b_0}{b_1}.
 \end{aligned}
 \tag{4.63}$$

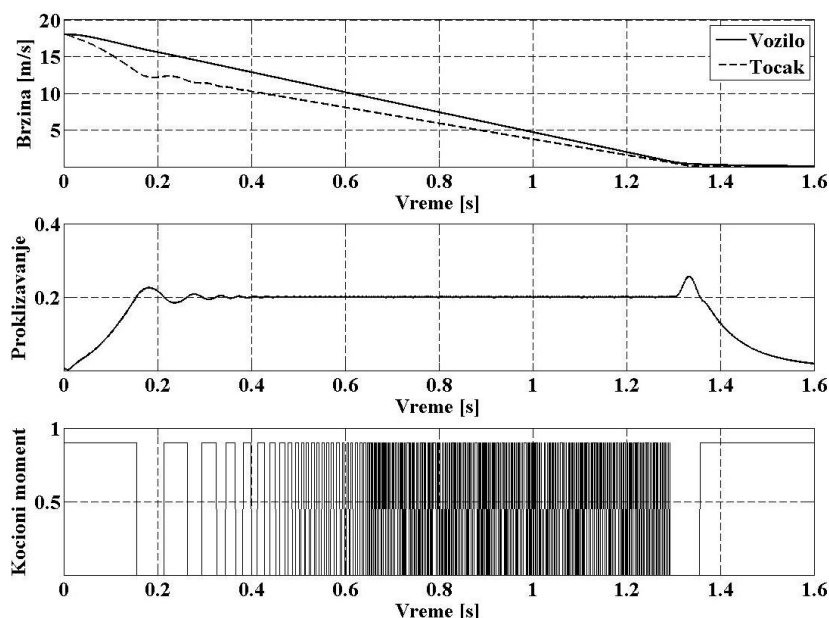
Za datu formu sistema (4.62) i upotrebom (4.56), zakon upravljanja se može da opiše kao:

$$u = -\frac{d_{11} x_1}{k} + \alpha \operatorname{sgn}(x_1^{\operatorname{ref}} - x_1),
 \tag{21}$$

gde:  $x_1$  predstavlja trenutnu vrednost proklizavanja  $\lambda$ , sa  $\lambda_{\operatorname{ref}} = 0,2$  (Zanten, 1990). Parametar  $\alpha$  je odabran u skladu sa uslovima uspostavljanja i egzistencije kliznog režima.

#### 4.4.3.1 Simulacioni rezultati

Simulacioni rezultati primene UKR-a zasnovanih na ortogonalnim modelima ABS-a prikazani su na slici 4.19. Može da se primeti da su simulacioni rezultati do sada najbolji, pošto odziv proklizavanja, nakon početnog preskoka, pokazuje veoma dobre karakteristike u stacionarnom stanju odsustvu šumova, spoljašnjih poremećaja i ograničenja upravljačkog signala, kao što je to slučaj kod eksperimentalnog okruženja ABS-a.

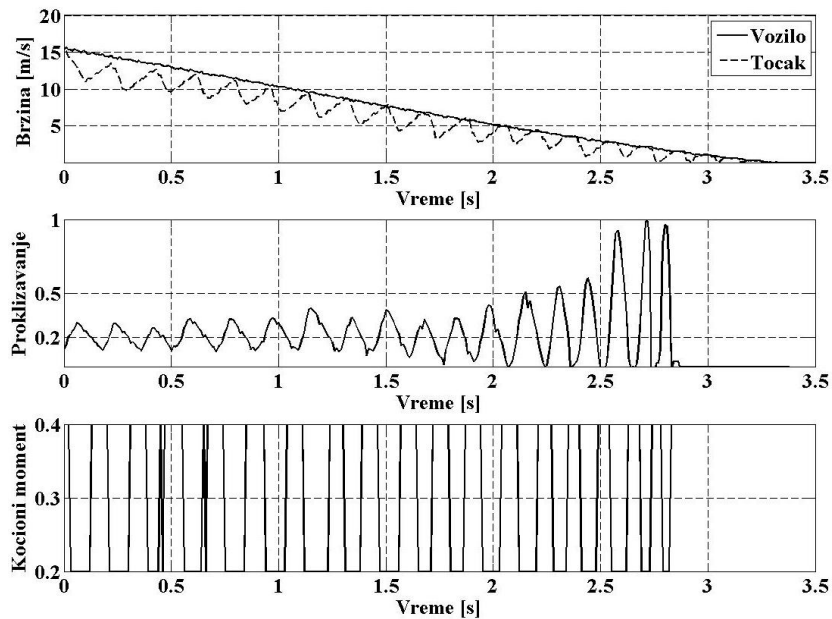


Slika 4.19 Simulacioni rezultati dobijeni primenom ortogonalnog UKR-a.

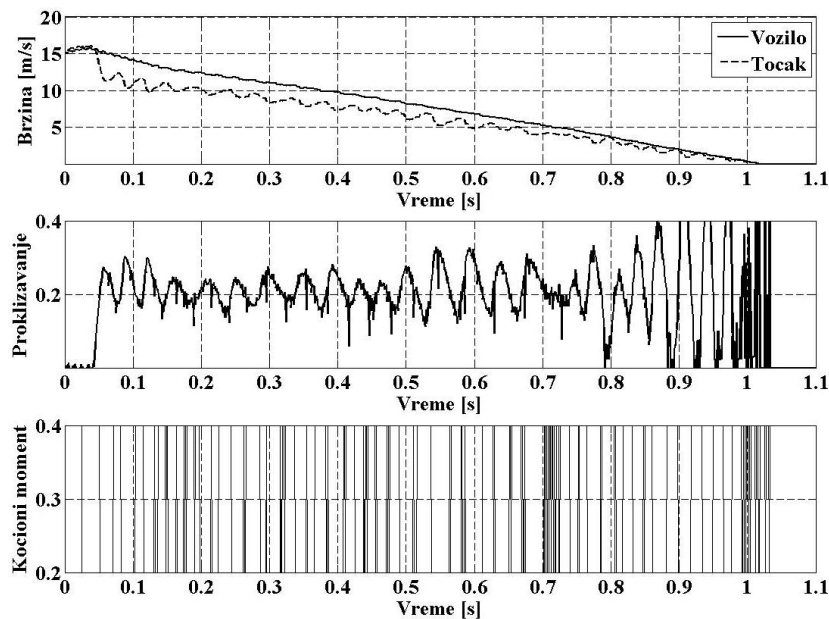
#### 4.4.3.2 Eksperimentalni rezultati

U cilju poredjenja, izvršen je još jedan eksperiment s relejnim kontrolerom, dat kao demo primer sa opremom laboratorijske makete poljske firme *Inteco*, i dobijeni rezultati

upoređeni su s rezultatima dobijenim upotrebom predložene metode UKR-a zasnovane na korišćenju ortogonalnog modela. Eksperimentalni rezultati su prikazani na slici 4.20 i slici 4.21.



Slika 4.20 Eksperimentalni rezultati dobijeni primenom relejnog upravljanja.



Slika 4.21 Eksperimentalni rezultati dobijeni primenom ortogonalnog UKR-a.

U tabeli 4.3, koristimo tri parametra relevantna za evaluaciju kvaliteta oba kontrolera. Prvi parametar je  $T_z$  i on predstavlja vreme zaustavljanja vozila, tj. trajanje od početka procesa kočenja do kompletnog zaustavljanja vozila.

Drugi parametar je srednje kvadratna greška, koja se određuje pomoću jednačine  $E = \int_0^{T_z} (\lambda - \lambda_{ref})^2 dt$ . Treći parametar je  $N$  - ukupan broj promena u nivoima upravljanja tokom procesa kočenja, što može da utiče na opremu ABS-a tokom rada (habanje komponenti, smanjenje radnog veka itd...). Očigledno je da je za svaki od algoritama poželjno da ova tri parametara budu najmanja moguća.

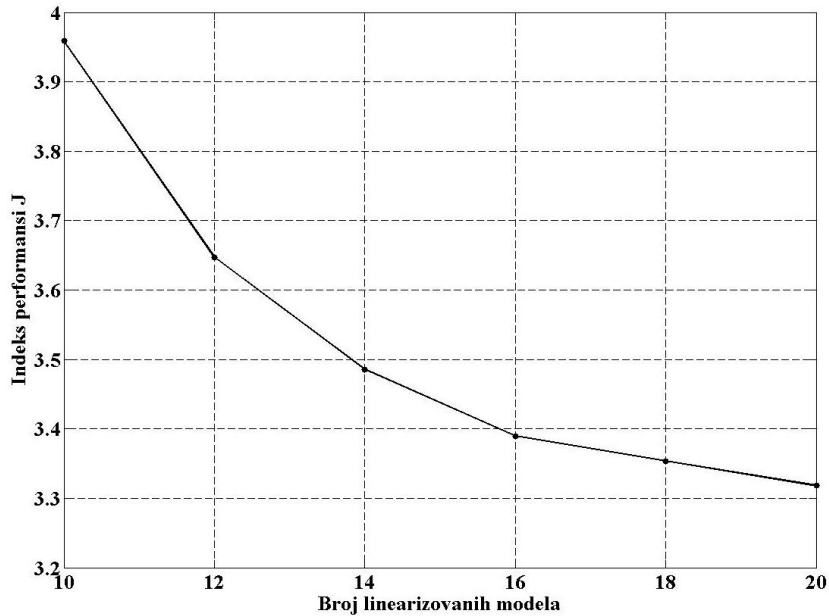
Tabela 4.3 Komparativna analiza različitih metoda upravljanja.

Metoda upravljanja	$T_z$	$E$	$N$	$J$
Relejno upravljanje	3,32	14,6764	44	4,9370
UKR zasnovan na ortogonalnom modelu	0,95	8,3871	135	3,3181

Može da se zaključi da su korišćenjem ortogonalnih modela ABS-a zajedno s UKR-om, performanse sistema u velikoj meri poboljšane. Ovo se može bolje da vidi ukoliko se uvede sveobuhvatni indeks performansi ( $J$  u tabeli 4.3), koji kombinuje sva tri, prethodno opisana, relevantna parametara za ocenu kvaliteta upravljanja. Ovaj indeks može da se odredi primenom jednostavne formule  $J=2k_1T_z+k_2E+k_3N$  gde koeficijenti  $k_1$ ,  $k_2$ , i  $k_3$  mogu da se podese tako da naglase važnost svakog od tri parametara u sveobuhvatnom indeksu performansi. Vrednosti u koloni  $J$  u tabeli 4.3 su dobijeni za vrednosti parametara  $k_1=0,4684$ ,  $k_2=0,0867$  i  $k_3=0,0126$ .

Ove vrednosti koeficijenata obezbeđuju normalizaciju parametara naglašavajući značaj zaustavnog vremena vozila (najvažniji parametar za bezbednost) dupliranjem njegove nominalne vrednosti. Kao što može da se vidi, uvedeni indeks favorizuje predloženu metodu upravljanja u odnosu na već postojeću.

Na kraju, može da se postavi pitanje da li se sa povećanjem broja podopsega dobijaju još bolje performanse sistema. Odgovor na ovo pitanje prikazan je na slici 4.22 gde je upravo prikazana ova zavisnost. Kao što može da se uoči, porast broja modela izaziva smanjenje sveobuhvatnog indeksa performansi  $J$ , tj. softiciranije deljenje radne oblasti implicira bolje podudaranje linearizovanih modela i realnog modela. Međutim, moramo uvek imati u vidu da postizanje boljih performansi utiče na složenost kontrolera i troškove njegove izrade, tako da predloženi algoritam upravljanja treba da se koristi samo za one složene procese gde je složenost kontrolera opravdana i motivisana, npr., ljudskom bezbednošću, kao što je to u našem slučaju.



Slika 4.22 Zavisnost indeksa performansi i kompleksnosti kontrolera.

U ovom poglavlju doktorske disertacije dat je osvrt kako na opisivanje postojećih, tako i na projektovanje novih algoritama upravljanja s kliznim režimom. Pokazano je da je pretpostavka da UKR-i mogu da se uspešno upotrebe za upravljanje ABS-om bila ispravna, i da se najbolje performanse sistema postižu primenom UKR-a s proporcionalno plus konstantnim zakonom dosezanja. U sledećem poglavlju prikazano je dodatno poboljšanje performansi ABS-a primenom digitalnih UKR-a.



## 5 ABS s UKR-om u vremenski-diskretnom domenu

Algoritmi upravljanja se, danas, uglavnom implementiraju na mikrokontrolerima i digitalnim procesorima signala, tako da je upravljački signal uzorkovan u fiksnim vremenskim trenucima. Na taj način, neke od osobina vremenski-kontinualnih algoritama upravljanja se gube, pa je u ovom poglavlju stavljen akcenat na primenu digitalnih algoritama UKR-a. Najpre je dat prikaz kratke istorije DUKR-a, kao i dosadašnji rezultati njihove primene na polju upravljanja ABS-om a, nakon toga, prikazane su teorijske osnove tri različita algoritma DUKKR-a, koji su projektovani na osnovu modela ulaz-izlaz. Pri tome, relejna komponenta algoritma upravljanja filtrirana je kroz digitalni integrator radi ublažavanja četeringa. Uvođenjem estimirane vrednosti signala greške modeliranja u zakon upravljanja postignuta je veća tačnost ABS-a u stacionarnom stanju. Kao još jedan od načina upravljanja ABS-om, predložena je kombinacija DUKKR-a i UVM-a, pri čemu su zadržane dobre osobine obe metode. Tom prilikom korišćen je već dobijeni model ABS-a na osnovu ortogonalnih filtara. Svaki od algoritama upravljanja verifikovan je rezultatima dobijenim digitalnom simulacijom i eksperimentima na laboratorijskoj maketi ABS-a.

### 5.1 Dosadašnji rezultati

DUKR se po prvi put pojavljuje u literaturi sredinom 80-ih u (Milosavljević, 1985). Nakon toga, publikovan je veliki broj radova iz ove oblasti (Sarpturk, 1987; Ramirez 1991; Spurgeon, 1992; Aly, 1990; Bartolini, 1995; Bartoszewicz, 1996; Bartoszewicz, 1998; Gao, 1995; Golo, 2000; Hui, 1999). Kao što je opisano u odeljku 3.2.3, procedura projektovanja DUKR-a, slično projektovanju u vremenski-kontinualnom domenu, može da se podeli u dva koraka. Prvi podrazumeva izbor klizne hiperpovršini s stabilnom dinamikom, dok se u drugom koraku projektuje zakon upravljanja koji dovodi stanje sistema do klizne hiperpovršini i obezbeđuje kretanje sistema u njenoj okolini.

Suštinska razlika između upravljanja u vremenski-diskretnom i vremenski-kontinualnom domenu je oblast u kojoj treba da se nalaze polovi (unutar jediničnog kruga umesto u levoj poluravni). Međutim, procedura za postizanje pomenutog cilja je slična. Usled ograničenja (upravljački signal je konstantan između dve periode odabiranja), ispostavilo se da klizni režim više ne može da bude postignut. Umesto toga, realizacija DUKR-a rezultira kvazi-kliznim režimom kretanja sistema i generiše četering u  $O(T)$  blizini klizne

hiperpovršini ( $T$  je perioda diskretizacije). Ovakvo upravljanje se naziva i DUKKR, a u (Milosavljević, 2004) dat je pregled stanja u ovoj oblasti.

Postoje dva načina projektovanja DUKKR-a za upravljanje nelinearnim objektima. Jedan prilaz se zasniva na diskretnoj reprezentaciji linearizovanog modela objekta upravljanja (Corradini, 1995), koristeći pritom kombinaciju upravljanja (uopštene) minimalne varijanse i DUKKR-a (Furuta, 1993; Mitić, 2004; Mitić, 2006). Drugo rešenje koristi diskretne modele ulaz-izlaz prilikom projektovanja DUKKR-a (Munoz, 2000). Taj pristup primenjen je u upravljanju ABS-om u (Tan, 1990).

Kao što je već poznato, teorija kliznih režima je našla široku primenu u upravljanju procesima u industriji. Što se konkretno tiče ABS-a, ne postoje neka značajna istraživanja u pogledu primene algoritama diskretne prirode u upravljanju ABS-om, pa će u nastavku biti spomenuta samo neka od njih. U (Akbarzadeh, 2002) diskretni fazi kontroler s kliznim režimom predložen je za upravljanje ABS-om. Zapravo, kontroler je projektovan na bazi kombinacije SUPS-a, adaptivnog-fazi upravljanja i linearnog upravljanja. Dva fazi aproksimatora su upotrebljena prilikom estimacije nelinearnih funkcija objekta upravljanja. UKR obezbeđuje da sistem ostane u validnom regionu aproksimacije obezbeđujući, na taj način, globalnu i uniformnu stabilnost u smislu Ljapunova. Simulacioni rezultati su potvrdili dobre performanse praćenja reference bez obzira na poremećaje i neodređenosti samog puta po kojem se vozilo kreće. Sličan pristup je primenjen i u (Emami, 2003), s tim što se koristi nelinearni model automobila s dva točka 13-tog reda. Model, takođe, uključuje interakciju podsistema prednjih i zadnjih točkova.

## 5.2 Različiti tipovi DUKKR-a i njihova primena na ABS

U ovom odeljku biće data matematička osnova nekoliko DUKKR-a, koji će se primeniti na ABS. Prilikom projektovanja zakona upravljanja korišće se odgovarajući vremenski-diskretni model ABS-a razvijen u odeljku 2.4. Svi predloženi algoritmi pripadaju grupi kliznih režima projektovanih na osnovu modela ulaz-izlaz i verifikovani su kroz simulacije i eksperimente na laboratorijskoj maketi. Svaka od slika prilikom izvršenih simulacija i eksperimenata sastoji se od tri grafika koji prikazuju odzive brzina točka i vozila, proklizavanje točka i upravljački kočioni moment, respektivno. Referentna vrednost proklizavanja je uzeta da bude konstanta i iznosi  $\lambda_k^{ref} = 0,2$ . Svi neophodni parametri ABS modela dati su u tabeli 2.1.

Uzmimo u razmatranje nelinearni vremenski-diskretni objekat upravljanja s jednim ulazom i jednim izlazom u obliku:

$$y_{k+1} = f(y_k, \dots, y_{k-n}) + g(y_k, \dots, y_{k-n})u_k, \quad (5.1)$$

gde su:  $y_k$  izlaz objekta upravljanja,  $u_k$  upravljački ulaz,  $n$  pozitivni ceo broj koji određuje red objekta upravljanja.  $f(y_k, \dots, y_{k-n})$  i  $g(y_k, \dots, y_{k-n})$  su glatke nelinearne funkcije izlaza objekta upravljanja i njegovih vrednosti u prethodnim trenucima uzorkovanja. Model objekta upravljanja je linearan u odnosu na upravljački ulaz  $u_k$ .

U cilju pojednostavljenja zapisivanja, nadalje upotrebljavaće se skraćenice  $f_k = f(y_k, \dots, y_{k-n})$  i  $g_k = g(y_k, \dots, y_{k-n})$ . Takođe, izvršiće se pretpostavka da je  $g_k$  strogo pozitivna i ograničena funkcija. Usled neodređenosti i varijacija parametara objekta upravljanja, može da se definiše sledeći nominalni model objekta upravljanja:

$$y_{k+1} = \hat{f}(y_k, \dots, y_{k-n}) + \hat{g}(y_k, \dots, y_{k-n})u_k, \quad (5.2)$$

koji će se upotrebljavati prilikom projektovanja upravljanja, pri čemu su  $\hat{f}_k = \hat{f}(y_k, \dots, y_{k-n})$  i  $\hat{g}_k = \hat{g}(y_k, \dots, y_{k-n})$  nominalne funkcije od  $f_k$  i  $g_k$ , respektivno. U tom slučaju, javlja se greška modeliranja određena sa:

$$\varepsilon_{k+1} = y_{k+1} - \hat{y}_{k+1} = f_k - \hat{f}_k + (g_k - \hat{g}_k)u_k, \quad (5.3)$$

koja je ograničena sa gornje strane, tj.:

$$\max |\varepsilon_k| < E, \quad \forall k. \quad (5.4)$$

Pretpostavimo sada da je referentni ulazni signal unapred poznat kao izlaz referentnog sistema definisanog sledećom relacijom:

$$r_{k+1} = a_0 r_k + \dots + a_n r_{k-n} + b_0 \rho_k + \dots + b_m \rho_{k-m}, \quad (5.5)$$

gde su:  $a_0, \dots, a_n$  i  $b_0, \dots, b_m$  koeficijenti stabilnih polinoma  $A(z^{-1}) = a_0 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}$  i  $B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m}$ , respektivno,  $z^{-1}$  jedinično kašnjenje i  $\rho_k$  ulaz referentnog sistema. Greška praćenja može da se definiše na sledeći način:

$$e_k = y_k - r_k. \quad (5.6)$$

S druge strane, uzimajući u obzir (5.3), model (5.1) se može ponovo da napiše u sledećoj formi:

$$y_{k+1} = f_k + g_k u_k - (\hat{f}_k + \hat{g}_k u_k) + \hat{f}_k + \hat{g}_k u_k = \varepsilon_{k+1} + \hat{f}_k + \hat{g}_k u_k. \quad (5.7)$$

Glavni cilj projektovanja upravljanja je da se pronađe DUKKR, koji će obezbediti nultu vrednost prekidačke funkcije opisane sa:

$$s_k = c_0 e_k + c_1 e_{k-1} + \dots + c_n e_{k-n}, \quad (5.8)$$

gde su:  $c_0, \dots, c_n$  koeficijenti polinoma  $C(z^{-1}) = c_0 + c_1 z^{-1} + \dots + c_n z^{-n}$  čiji su koreni unutar jediničnog kruga u  $z$ -domenu. Kada u sistemu postoji kvazi-klizni režim, tj. kada je  $s_k = 0$ , greška praćenja  $e_k$  težiće asimptotski ka nuli. U nastavku biće opisana tri različita zakona upravljanja projektovana na osnovu modela ulaz-izlaz.

### 5.2.1 Jedan pristup projektovanju DUKKR-a zasnovanog na modelu ulaz-izlaz

Uzimajući u obzir prethodne relacije, pretpostavimo da prekidačka funkcija, u zatvorenoj sprezi, pokazuje dinamičko ponašanje opisano sledećom jednačinom (Munoz, 2000):

$$s_{k+1} = c_0 e_{k+1} - \zeta \operatorname{sgn}(s_k), \quad (5.9)$$

pri čemu je  $\zeta > 0$ .

Polazeći od (5.1), (5.6), (5.8) i (5.9), može da se izvede sledeći zakon upravljanja (Munoz, 2000):

$$u_k = -\frac{1}{c_0 \hat{g}_k} \left( c_0 (\hat{f}_k - r_{k+1}) + c_1 e_{k-1} + \dots + c_n e_{k-n} + \zeta \operatorname{sgn}(s_k) \right). \quad (5.10)$$

**Teorema 5.1:** Zakon upravljanja (5.10) obezbeđuje kvazi-klizni režim kretanja sistema (5.1)

ukoliko je zadovoljeno da je  $\frac{\hat{g}_k}{g_k} > \frac{1}{2}$  i važi (5.4), a parametar  $\zeta$  je izabrana na u skladu sa:

$$\zeta = c_0 \eta E, \quad (5.11)$$

gde je  $\eta$  pozitivan realan broj veći od 1, tj.  $\eta > 1$ .

**Dokaz:** U cilju uspostavljanja i egzistencije kliznog režima moraju da budu ispunjene sledeće nejednakosti:

$$s_k (s_{k+1} - s_k) < 0, \quad (5.12)$$

$$\operatorname{sgn}(s_{k+1}) = -\operatorname{sgn}(s_k) \Rightarrow \begin{cases} \operatorname{sgn}(s_{k+2}) = \operatorname{sgn}(s_k), \\ |s_{k+1}| < \xi, \xi > 0. \end{cases} \quad (5.13)$$

Leva strana jednačine (5.12) može da se napiše i kao:

$$s_k (s_{k+1} - s_k) = s_k (c_0 e_{k+1} - \varsigma \operatorname{sgn}(s_k) - s_k) = c_0 e_{k+1} s_k - \varsigma |s_k| - s_k^2. \quad (5.14)$$

Ukoliko važi (5.11), onda je:

$$\begin{aligned} s_k (s_{k+1} - s_k) &< c_0 e_{k+1} s_k - c_0 E |s_k| \leq \\ &\leq |c_0 e_{k+1} s_k| - c_0 E |s_k| = |c_0 e_{k+1}| |s_k| - c_0 E |s_k| < \\ &< c_0 E |s_k| - c_0 E |s_k| < 0, \end{aligned} \quad (5.15)$$

čime je uslov (5.12) ispunjen. Dalje, uzimajući u obzir (5.9) i prvi deo uslova (5.13) važi da je:

$$s_{k+2} = c_0 e_{k+2} + \varsigma \operatorname{sgn}(s_k). \quad (5.16)$$

Da bi uslov (5.13) bio ispunjen, u prethodnoj jednačini parametar  $\varsigma$  mora da zadovoljava sledeću nejednakost:

$$\varsigma > c_0 e_{k+2}. \quad (5.17)$$

Napomenimo da ovaj uslov uvek važi, pošto je parametar  $\varsigma$  izabran u skladu sa (5.11). Na ovaj način, pokazano je da je prvi deo uslova (5.13) ispunjen.

U cilju određivanja sveukupne stabilnosti, analizira se dinamika prekidačke funkcije u zatvorenoj sprezi. Zamenom (5.1), (5.6) i (5.10) u (5.8), dobija se:

$$\begin{aligned} s_{k+1} - \left(1 - \frac{g_k}{\hat{g}_k}\right) s_{k-1} &= c_0 \left( f_k - \frac{g_k}{\hat{g}_k} \hat{f}_k \right) + \\ &+ \left(1 - \frac{g_k}{\hat{g}_k}\right) (a_1 r_k + \dots + a_n r_{k-n+1}) + c_0 \left( \frac{g_k}{\hat{g}_k} - 1 \right) r_{k+1} - \varsigma \frac{g_k}{\hat{g}_k} \operatorname{sgn}(s_k). \end{aligned} \quad (5.18)$$

Iz poslednje jednačine zaključujemo da su jedina dva rekurzivna člana opisana sa:

$$\left(1 - \frac{g_k}{\hat{g}_k}\right) s_{k-1}, \quad (5.19)$$

i

$$\varsigma \frac{g_k}{\hat{g}_k} \operatorname{sgn}(s_k). \quad (5.20)$$

Jednačina (5.20) je zapravo ograničena funkcija od  $s_k$ , što znači da (5.20) ne može da dovede do nestabilne dinamike prekidačke funkcije. Takođe, lako je da se dokaže da je autonomni sistem definisan sa  $s_{k+1} = \left(1 - \frac{g_k}{\hat{g}_k}\right) s_{k-1}$  asimptotski stabilan ukoliko je  $\left|1 - \frac{g_k}{\hat{g}_k}\right| < 1$ . Ovim je dokazano i da je ispunjen drugi deo uslova (5.13) čime se dokaz završava. ■

### Primena na ABS

Kao što je već rečeno, usled neodređenosti parametara, prilikom projektovanja upravljanja koristi se nominalni model objekta upravljanja. U našem slučaju to je nominalni model vremenski-diskretnog modela ABS-a (2.23), razvijenog u odeljku 2.4:

$$\hat{\lambda}_{k+1} = \hat{f}_k^d + \hat{g}_k^d M_{1k}, \quad (5.21)$$

gde  $\hat{f}_k^d$  i  $\hat{g}_k^d$  označavaju nominalne vrednosti funkcija  $f_k^d$  i  $g_k^d$ , respektivno. Greška modeliranja u slučaju ABS-a definisana je sa:

$$\varepsilon_{k+1} = \lambda_{k+1} - \hat{\lambda}_{k+1} = f_k^d - \hat{f}_k^d + (g_k^d - \hat{g}_k^d) M_{1k}, \quad (5.22)$$

i pritom je zadovoljen uslov (5.4). Uzimajući u obzir (5.7) i (5.21), model ABS-a (2.23) može da se ponovo napiše kao:

$$\lambda_{k+1} = \varepsilon_{k+1} + \hat{f}_k^d + \hat{g}_k^d M_{1k}. \quad (5.23)$$

Kako je model ABS-a prvog reda, signal greške  $e_k$  predstavlja ujedno i prekidačku funkciju  $s_k$ , tj.:

$$s_k = e_k = \lambda_k - \lambda_k^{ref}. \quad (5.24)$$

Na osnovu (5.10) biramo modifikovani zakon upravljanja u obliku:

$$M_{1k} = -\frac{1}{\hat{g}_k^d} \left( \hat{f}_k^d - \lambda_{k+1}^{ref} - s_k + \zeta \operatorname{sgn}(s_k) \right), \quad (5.25)$$

gde su:  $\lambda_{k+1}^{ref} = \lambda_k^{ref} = \text{const.}$  i  $\zeta = \text{const.}$ , tako da je dinamika prekidačke funkcije opisana sa:

$$s_{k+1} = s_k - \zeta \operatorname{sgn}(s_k) + c_0 \varepsilon_{k+1}, \quad (5.26)$$

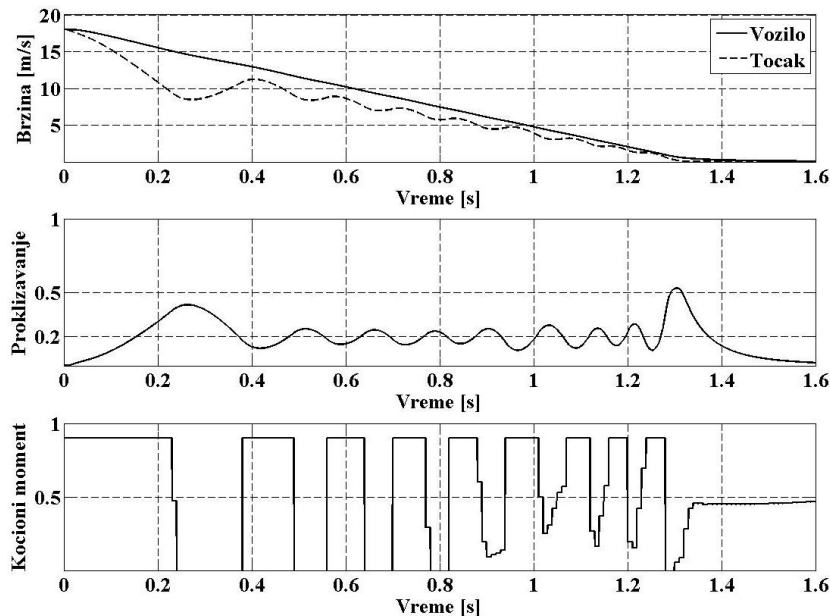
i čija je stabilnost, a samim tim i kretanje u kliznom režimu, ispunjena ukoliko je:

$$\zeta > \max |c_0 \varepsilon_{k+1}|. \quad (5.27)$$

Tačnost sistema u stacionarnom stanju je sada određena vrednošću  $\max |c_0 \varepsilon_{k+1}|$ , a stabilnost sistema se lako može izvesti na osnovu teoreme 5.1. U nastavku biće dati simulacioni i eksperimentalni rezultati primene predloženog DUKKR-a opisanog zakonom upravljanja (5.25).

### 5.2.1.1 Simulacioni rezultati

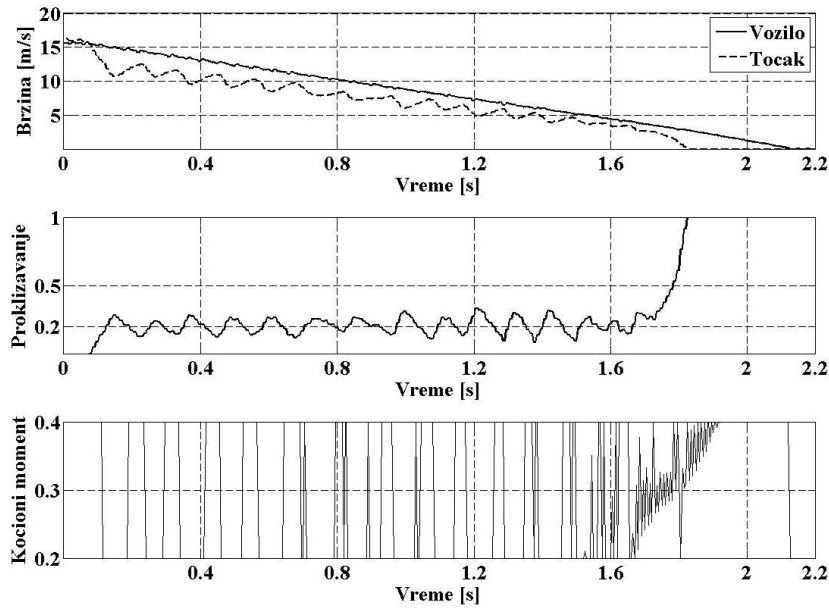
Simulacioni rezultati dobijeni primenom upravljanja određenog sa (5.25) prikazani su na slici 5.1. Vreme simulacije je 2,5s, a vrednost parametra regulatora je  $\zeta = 0,1$ . Kao što može da se vidi sa slike, dobijeni simulacioni rezultati su slični rezultatima dobijeni primenom tradicionalnog UKR-a u vremenski-kontinualnom domenu za  $M_c=10$ , prikazanim na slici 4.5. Prednost DUKKR-a u ovom slučaju ogleda se u tome što je sada potrebna višestruko manja vrednost parametara zakona upravljanja.



Slika 5.1 Simulacioni rezultati primene zakona upravljanja (5.25).

### 5.2.1.2 Eksperimentalni rezultati

Na slici 5.2 prikazani su eksperimentalni rezultati primene DUKKR-a opisanog sa (5.25). Perioda diskretizacije je  $T=0,005s$ . Parametar algoritma upravljanja  $\zeta$  je jednak 0,1. Kao što može da se vidi sa slike 5.2, predloženi zakon upravljanja proizvodi vidljive oscilacije oko referentne vrednosti proklizavanja i širi opseg kretanja u kliznom režimu. Imajući ovo u vidu, u sledećem odeljku pokušaće se da se unapređenjem zakona upravljanja smanje dobijene oscilacije i, na taj način, poboljšaju performanse sistema.



Slika 5.2 Eksperimentalni rezultati primene zakona upravljanja (5.25).

### 5.2.2 DUKKR zasnovan na modelu ulaz-izlaz s digitalnim integratorom

Uzimajući u obzir dobijene rezultate primene prethodnog algoritma digitalnog upravljanja, u ovom odeljku se predlaže zakon upravljanja, čiji je opšti oblik definisan sa (Mitić, 2006):

$$u_k = -\frac{1}{c_0 \hat{g}_k} \left( c_0 (\hat{f}_k - r_{k+1}) + c_1 e_{k-1} + \dots + c_n e_{k-n} + \frac{\alpha T}{1-z^{-1}} \text{sgn}(s_k) \right), \quad (5.28)$$

gde je  $\alpha$  pozitivna realna konstantna. Relejna komponenta algoritma upravljanja filtrirana je kroz digitalni integrator, što dovodi do smanjenja četeringa u velikoj meri. Zamenom (5.28) u (5.7), jednačina koja opisuje dinamiku prekidačke funkcije postaje:



$$s_{k+1} = c_0 \varepsilon_{k+1} - \frac{\alpha T}{1 - z^{-1}} \operatorname{sgn}(s_k), \quad (5.29)$$

odnosno:

$$s_{k+1} = s_k - \alpha T \operatorname{sgn}(s_k) + c_0 (\varepsilon_{k+1} - \varepsilon_k). \quad (5.30)$$

Kako bi se obezbedila stabilna dinamika prekidačke funkcije, vrednost parametra  $\alpha$  treba da bude odabrana u skladu sa sledećom teoremom 5.2.

**Teorema 5.2:** *Ako je parametar  $\alpha$  izabran tako da zadovoljava nejednakost:*

$$\alpha T > \Delta E > \max |c_0 (\varepsilon_{k+1} - \varepsilon_k)|, \quad (5.31)$$

tada, za svako početno stanje, postoji pozitivan prirodan broj  $K_0 = K_0(S_0)$  takav da za  $k \geq K_0$  trajektorija sistema opisana sa (5.30), (5.31) ulazi u oblast  $S(T)$  koja je definisana sa:

$$S(T) = \{s_k : |s_k| < \alpha T + \Delta E\}. \quad (5.32)$$

i ostaje u njoj za svako  $k = K_0 + p$ , gde je  $p$  proizvoljan pozitivan prirodan broj.

**Dokaz:** Prvo ćemo da dokažemo da trajektorija sistema dolazi za konačno vreme u oblast  $S(T)$ , da bi, nakon toga, pokazali da kretanje sistema ostaje u toj oblasti. Niz  $(s_k)$ , definisan jednačinom (5.30), je pozitivan niz. Dokaz je sličan kada je  $(s_k)$  negativan niz. Tada je relacija:

$$s_{k+1} - s_k = -\alpha T + c_0 (\varepsilon_{k+1} - 2\varepsilon_k + \varepsilon_{k-1}) < -\alpha T + \Delta E < 0, \quad (5.33)$$

validna ukoliko je (5.31) zadovoljeno, tj.  $s_{k+1} < s_k$  i:

$$0 < \frac{s_{k+1}}{s_k} = q_k < 1. \quad (5.34)$$

Imajući u vidu da su  $\prod_{i=0}^{k-1} q_i < 1$  i  $q_k < 1$  zaključujemo da postoji broj  $\delta$  koji zadovoljava

sledeću nejednakost:

$$|s_{k+1} - s_k| = \left| s_0 \left( \prod_{i=0}^{k-1} q_i \right) (q_k - 1) \right| < \delta, \quad (5.35)$$

pa na osnovu Košijeve toreme o konvergenciji nizova zaključujemo da je niz  $(s_k)$  konvergentan. Domen konvergencije niza  $(s_k)$  je:

$$\bar{S}(T) = \{s_k : |s_k| > \alpha T + \Delta E\}. \quad (5.36)$$

Naime  $0 < s_{k+1}/s_k < 1$  implicira  $0 < (\alpha T \operatorname{sgn}(s_k) - c_o(\varepsilon_{k+1} - 2\varepsilon_k + \varepsilon_{k-1}))/s_k < 1$ , što direktno daje (5.36) kako za pozitivni tako i za negativni niz  $(s_k)$ .

Pokažimo da trajektorija sistema za konačno vreme dolazi u oblast  $S(T)$ . Niz  $(s_k)$  konvergira u domen  $\bar{S}(T)$ , tako da je ograničen, tj.  $\lim_{k \rightarrow \infty} s_k = s_\infty$ . Pretpostavimo da je  $s_0 > \alpha T + \Delta E$  zadovoljeno. Na osnovu (5.30) važi da je:

$$s_k = s_0 - \sum_{i=0}^{k-1} (\alpha T - c_o(\varepsilon_{i+1} - 2\varepsilon_i + \varepsilon_{i-1})). \quad (5.37)$$

Pretpostavimo da  $(s_k)$  nikada ne dolazi u oblast  $S(T)$ . Kada  $k \rightarrow \infty$ , direktno iz (5.37) može da se dobije sledeća nejednakost:

$$\sum_{i=0}^{\infty} (\alpha T - c_o(\varepsilon_{i+1} - 2\varepsilon_i + \varepsilon_{i-1})) < s_0 - \alpha T - \Delta E, \quad (5.38)$$

što implicira da je niz  $\sum_{i=0}^{\infty} (\alpha T - c_o(\varepsilon_{i+1} - 2\varepsilon_i + \varepsilon_{i-1}))$  konvergentan, a njegov opšti član  $\alpha T - c_o(\varepsilon_{i+1} - 2\varepsilon_i + \varepsilon_{i-1})$  teži nuli kada  $i \rightarrow \infty$ , tj.:

$$\alpha T = \lim_{i \rightarrow \infty} (c_o(\varepsilon_{i+1} - 2\varepsilon_i + \varepsilon_{i-1})), \quad (5.39)$$

što je suprotno uslovu (5.31) teoreme 5.2. Dakle, pretpostavka da  $(s_k)$  nikada ne ulazi u oblast  $S(T)$  nije tačna. Dokaz je sličan za  $s_0 < -\alpha T - \Delta E$ . Štaviše,  $(s_k)$  ulazi u oblast  $S(T)$  za  $k = K_0$ , određenog sa:

$$K_0 = \operatorname{int}((|s_0| - \alpha T - \Delta E)/(\alpha T - \Delta E)) + 1. \quad (5.40)$$

Pokažimo sada da za  $\forall k > K_0$  trajektorija sistema ostaje u oblasti  $S(T)$ . Neka je  $s_{K_0} \in S^+(T) = \{s_k : 0 < s_k < \alpha T + \Delta E\}$ . Tada, na osnovu (5.30), imamo da je:

$$\begin{aligned} -\alpha T - \Delta E &\stackrel{(5.31)}{<} s_{K_0} - \alpha T + c_o(\varepsilon_{K_0+1} - 2\varepsilon_{K_0} + \varepsilon_{K_0-1}) = \\ &= s_{K_0+1} \stackrel{(5.31)}{<} 2\Delta E \stackrel{(5.31)}{<} \alpha T + \Delta E, \end{aligned} \quad (5.41)$$

i  $(s_k)$  ne napušta oblast  $S(T)$ . Ovo je, takođe, tačno i kada je  $s_{K_0} \in S^-(T) = \{s_k : -\alpha T - \Delta E < s_k < 0\}$ , pošto je:

$$\begin{aligned} -\alpha T - \Delta E &\stackrel{(5.31)}{<} -2\Delta E \stackrel{(5.31)}{<} s_{K_0+1} = \\ &= s_{K_0} + \alpha T + c_o(\varepsilon_{K_0+1} - 2\varepsilon_{K_0} + \varepsilon_{K_0-1}) \stackrel{(5.31)}{<} \alpha T + \Delta E. \end{aligned} \quad (5.42)$$

Slučaj kada je  $s_{K_0+1} < 0$  i  $s_{K_0+1} \notin S(T)$  za  $s_0, s_{K_0} > \alpha T + \Delta E$  nije moguć jer važi da je:

$$\begin{aligned} s_{K_0+1} &= s_{K_0} - \alpha T + c_o(\varepsilon_{K_0+1} - 2\varepsilon_{K_0} + \varepsilon_{K_0-1}) > \\ &> \Delta E + c_o(\varepsilon_{K_0+1} - 2\varepsilon_{K_0} + \varepsilon_{K_0-1}) > 0. \end{aligned} \quad (5.43)$$

Takođe, ni slučaj kada je  $s_{K_0+1} > 0$  i  $s_{K_0+1} \notin S(T)$  za  $s_0, s_{K_0} < -\alpha T - \Delta E$  nije moguć, pošto je:

$$\begin{aligned} s_{K_0+1} &= s_{K_0} + \alpha T + c_o(\varepsilon_{K_0+1} - 2\varepsilon_{K_0} + \varepsilon_{K_0-1}) < \\ &< -\Delta E + c_o(\varepsilon_{K_0+1} - 2\varepsilon_{K_0} + \varepsilon_{K_0-1}) < 0. \end{aligned} \quad (5.44)$$

Dakle, dokazali smo da  $s_{K_0+1} \in S(T)$ , pa korišćenjem metode matematičke indukcije generalizujemo tvrđenje, odnosno pokazujemo da važi:

$$s_{K_0+m} \in S(T), \quad (5.45)$$

za svako  $m$ , koje je proizvoljan pozitivan prirodan broj. ■

Stabilnost celokupnog sistema je obezbeđena ako i samo ako su uslovi teoreme 5.3 ispunjeni.

**Teorema 5.3:** Sistem opisan sa (5.7), (5.8) i (5.28) je stabilan akko je:

- 1) nejednakost (5.31) zadovoljena za svako  $k$ , tj., postoji kvazi-klizni režim u sistemu, i
- 2) polinom  $C(z^{-1})$  ima korene unutar jediničnog kruga u  $z$ -domenu.

**Dokaz:** Ukoliko je parametar  $\alpha$  izabran tako da zadovolji nejednakost (5.31), onda, na osnovu teoreme 5.3, kvazi-klizni režim postoji u oblasti  $S(T)$ . Sada, može da se primeti iz (5.8) da će  $y_k$  da konvergira ka ulaznom signalu  $r_k$  ako i samo ako je polinom  $C(z^{-1})$  stabilan. ■

Tačnost sistema u stacionarnom stanju je određena razlikom  $c_0(\varepsilon_{k+1} - \varepsilon_k)$  i ona je veća u odnosu na tačnost koja je dobijena primenom prethodnog algoritma upravljanja.

### Primena na ABS

Predloženi zakon upravljanja (5.28) u slučaju ABS-a ima sledeći oblik:

$$M_{1k} = -\frac{1}{\hat{g}_k^d} \left( \hat{f}_k^d - \lambda_{k+1}^{ref} + \frac{\alpha T}{1 - z^{-1}} \text{sgn}(s_k) \right), \quad (5.46)$$

što na osnovu (5.30) dovodi do dinamike prekidačke funkcije opisane sa:

$$s_{k+1} = s_k - \alpha T \text{sgn}(s_k) + c_0(\varepsilon_{k+1} - \varepsilon_k). \quad (5.47)$$

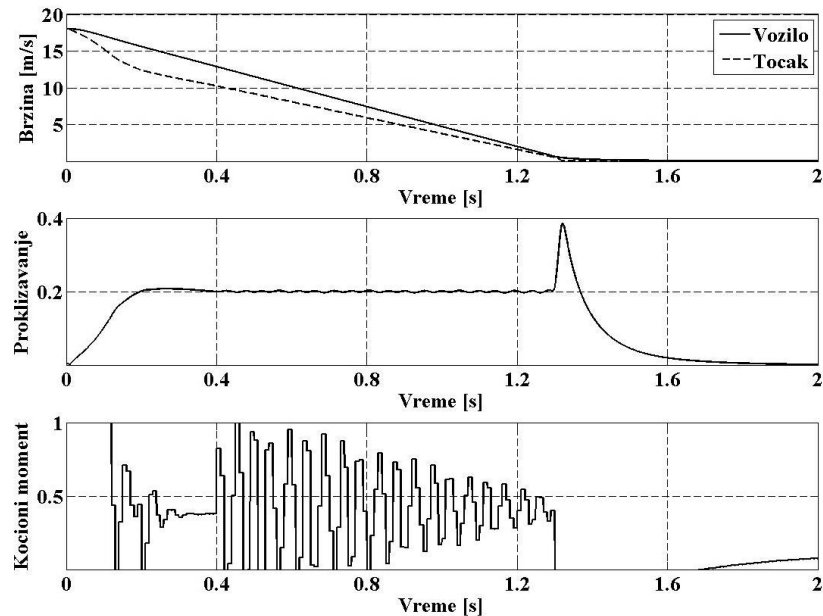
Kvazi-klizni režim postoji ukoliko je:

$$\alpha T > \max |c_0(\varepsilon_{k+1} - \varepsilon_k)|, \quad (5.48)$$

a tačnost u stacionarnom stanju određena je sa  $\max |c_0(\varepsilon_{k+1} - \varepsilon_k)|$ . Ovaj algoritam bi trebalo da omogući bolju tačnost nego što je to bio slučaj s upravljanjem (5.25). Teoreme 5.2 i 5.3 mogu da se upotrebe prilikom dokazivanja stabilnosti sistema sa upravljanjem (5.46) u kliznom režimu.

### 5.2.2.1 Simulacioni rezultati

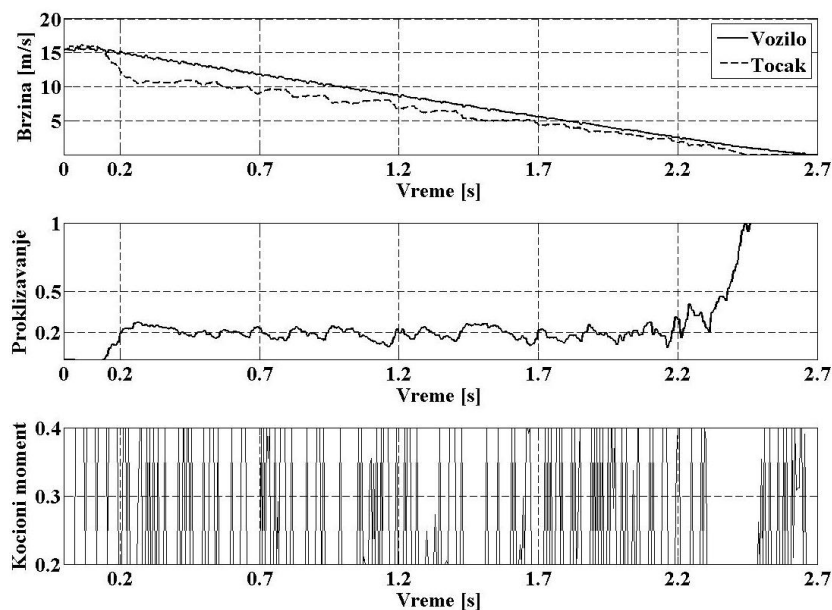
Simulacioni rezultati primene DUKKR-a, opisanog sa (5.46), u upravljanju ABS-om prikazani su na slici 5.3. Kao što može da se primeti, u poređenju sa primenom prethodnog algoritma upravljanja oscilacije su ovom prilikom bitno smanjene. Takođe, održavanje referentne vrednosti je uspešnije i vreme zaustavljanja vozila je neznatno smanjeno.



Slika 5.3. Simulacioni rezultati primene zakona upravljanja (5.46).

### 5.2.2.2 Eksperimentalni rezultati

Implementacija upravljanja (5.46) na realni ABS u laboratorijskim uslovima daje eksperimentalne rezultate koji su prikazani na slici 5.4.



Slika 5.4 Eksperimentalni rezultati primene zakona upravljanja (5.46).

Osim smanjivanja četeringa, usled filtriranja relejne komponente zakona upravljanja kroz digitalni integrator, predloženo digitalno upravljanje obezbeđuje kvazi-klizni režim uz manje vrednosti parametara upravljanja. Naime, parametar  $\alpha$  je izabran da ima vrednost 1. Nažalost, iako tačnost sistema u stacionarnom stanju treba da teoretski bude unutar granice  $\alpha T = 5 \times 10^{-3}$ , usled šuma i nemodelirane dinamike taj opseg je širi. Međutim, signal greške je manji nego što je to bio slučaj sa prethodnim upravljanjem opisanim sa (5.25).

### 5.2.3 DUKKR zasnovan na modelu ulaz-izlaz s digitalnim integratorom i estimatorom greške modeliranja

Kako bi se povećala tačnost sistema u stacionarnom stanju, predlaže se zakon upravljanja definisan sa:

$$u_k = -\frac{1}{c_0 \hat{g}_k} \left( c_0 (\hat{f}_k - r_{k+1}) + c_1 e_k + \dots + c_n e_{k-n+1} + \frac{\alpha T}{1-z^{-1}} \operatorname{sgn}(s_k) + c_0 \varepsilon_k \right), \quad (5.49)$$

gde su:  $\alpha$  pozitivni realni konstantni parametar,  $T$  perioda diskretizacije (kao deo diskretnog integratora) (Mitić, 2013).  $\varepsilon_k$  je izlaz estimatora greške modeliranja zakašnjen za jedan korak i može da se definiše kao:

$$\varepsilon_k = y_k - \hat{f}_{k-1} - \hat{g}_{k-1} u_{k-1}. \quad (5.50)$$

I ovde je, kao što je to bio slučaj kod prethodnog algoritma, četering u velikoj meri smanjen usled uvođenja digitalnog integratora, koji funkcioniše kao nisko-propusni filter relejne komponente zakona upravljanja.

Sada se zamenom (5.49) u (5.7) dobija jednačina koja opisuje dinamiku prekidačke funkcije u obliku:

$$s_{k+1} = s_k - \alpha T \operatorname{sgn}(s_k) + c_0 (\varepsilon_{k+1} - 2\varepsilon_k + \varepsilon_{k-1}). \quad (5.51)$$

Na sličan način, da bi se obezbedila stabilna dinamika prekidačke funkcije, vrednost parametra  $\alpha$  treba da bude odabrana u skladu sa teoremom 5.2, s tim što se uslov (5.31) menja sa:

$$\alpha T > \Delta E > \max |c_0 (\varepsilon_{k+1} - 2\varepsilon_k + \varepsilon_{k-1})|, \quad (5.52)$$

gde je  $\Delta E$  pozitivan realan broj. Stabilnost celokupnog sistema utvrđuje se na isti način kao što je to pretpostavljeno teoremom 5.3.

Sada tačnost u stacionarnom stanju direktno zavisi od  $c_0(\varepsilon_{k+1} - 2\varepsilon_k + \varepsilon_{k-1})$ , kao  $e_\infty = s_\infty / C(1)$  uzimajući u obzir (5.8), i  $\alpha T$  se bira tako da bude malo veće od  $\Delta E$ , tj.,  $\max |c_0(\varepsilon_{k+1} - 2\varepsilon_k + \varepsilon_{k-1})|$ . Imajući u vidu da je nelinearni model objekta upravljanja po svojoj prirodi u originalu kontinualan pre diskretizacije, smatra se da su izlaz objekta  $y$ , njegov nominalni model  $\hat{y}$ , kao i  $\varepsilon = y - \hat{y}$  takođe kontinualni. Pretpostavimo da je  $\varepsilon$  dva puta diferencijabilno na intervalu  $(kT - T, kT + T)$ . Tada, moguće je da se pokaže da  $c_0(\varepsilon_{k+1} - 2\varepsilon_k + \varepsilon_{k-1})$  ima  $O(T^2)$  tačnost, pomoću Lagranžeove teoreme na sledeći način:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{k+1} - 2\varepsilon_k + \varepsilon_{k-1} &= T \dot{\varepsilon}(t) \Big|_{t=kT+\zeta_k} - T \dot{\varepsilon}(t) \Big|_{t=kT-T+\zeta_{k-1}} = \\ &= T(T + \zeta_k - \zeta_{k-1}) \ddot{\varepsilon}(t) \Big|_{t=kT+\zeta_{k-1,k}}, \end{aligned} \quad (5.53)$$

gde su:  $\zeta_{k-1}, \zeta_k \in (0, T)$ ,  $\zeta_{k-1,k} \in (0, T)$  i  $|\zeta_k - \zeta_{k-1}| < T$ . Prema tome, ukoliko  $|\ddot{\varepsilon}(t)| < E'' = \text{const.}$ , tada je:

$$\varepsilon_{k+1} - 2\varepsilon_k + \varepsilon_{k-1} < E'' T^2 = O(T^2), \quad (5.54)$$

i tačnosti  $s_k$  i  $e_k$  su određeni sa  $O(T^2)$  i  $O(T^2)/C(1)$ , respektivno. Očigledno je da se ovime postiže veća tačnost nego što je to bio slučaj sa prethodna dva algoritma.

### Primena na ABS

Kako bi se obezbedila nulta vrednost prekidačke funkcije, tj. signal greške, predloženi zakon upravljanja, određen sa (5.49), modifikovan za slučaj ABS-a postaje:

$$M_{1k} = -\frac{1}{\hat{g}_k^d} \left( \hat{f}_k^d - \lambda_{k+1}^{ref} + \frac{\alpha T}{1 - z^{-1}} \text{sgn}(s_k) + \varepsilon_k \right), \quad (5.55)$$

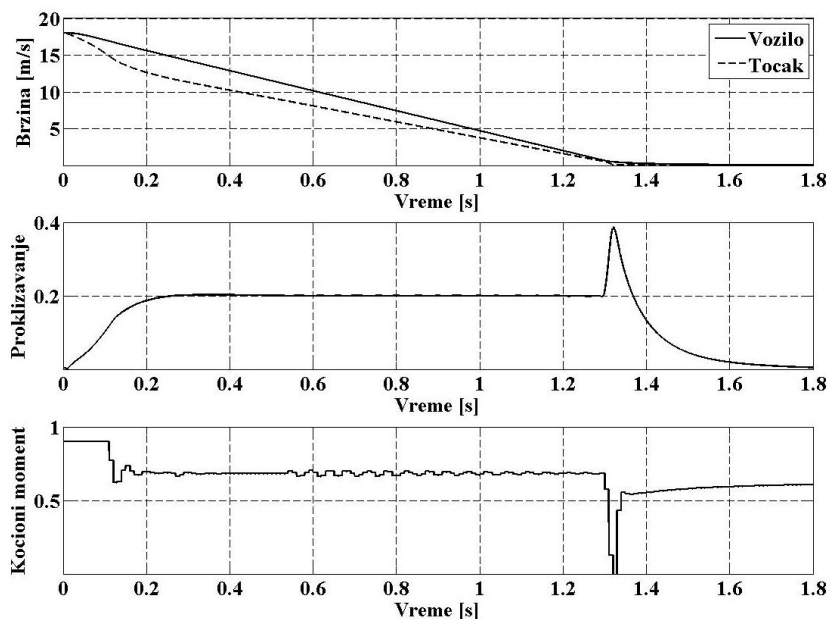
gde je  $\lambda_{k+1}^{ref} = \lambda_k^{ref} = \text{const.}$ , jer se projektuje upravljanje tipa regulatora.  $\varepsilon_k$  je na osnovu (5.50) sada ponovo napisana kao:

$$\varepsilon_k = \lambda_k - \hat{f}_{k-1}^d - \hat{g}_{k-1}^d M_{1k-1}. \quad (5.56)$$

Dinamika prekidačke funkcije opisana je sa (5.51), gde je parametar upravljanja  $\alpha$  izabran u skladu sa (5.52).

### 5.2.3.1 Simulacioni rezultati

Na slici 5.5 prikazani su rezultati digitalne simulacije nakon primene zakona upravljanja određenog sa (5.55) na ABS. Vrednost parametra regulatora je  $\alpha = 0,1$ , a perioda diskretizacije je  $T=0,01s$ . U poređenju s prethodna dva algoritma, praćenje referentne vrednosti je još bolje, što se i očekivalo nakon uvođenja estimatora greške modeliranja u zakon upravljanja.

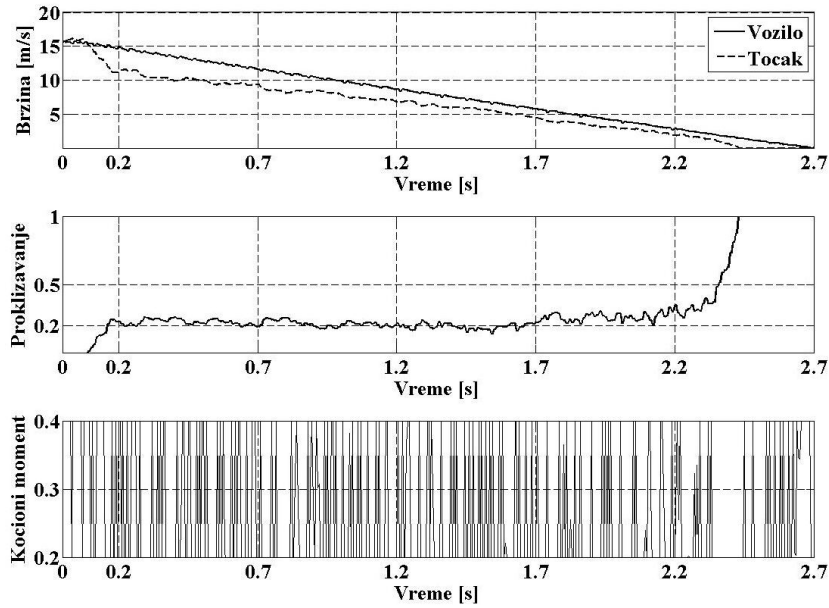


Slika 5.5 Simulacioni rezultati primene zakona upravljanja (5.55).

### 5.2.3.2 Eksperimentalni rezultati

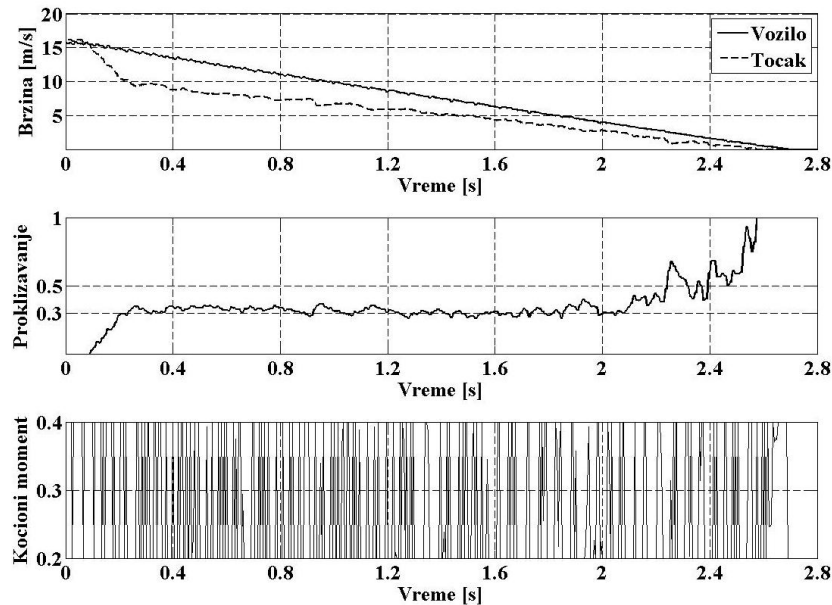
Do sada, najbolji rezultati u diskretnom domenu dobijeni su primenom upravljanja opisanog sa (5.55) i prikazani na slici 5.6. Parametar  $\alpha$  je izabran da bude 10 puta manji nego što je bio kod prethodnog zakona upravljanja (5.46), tj.  $\alpha = 0,1$ , pa je  $\alpha T = 5 \times 10^{-4}$ . Dodatno, četering je znatno smanjen zahvaljujući filtriranju relejne komponente kroz digitalni integrator. Uvođenje estimatora greške u zakon upravljanja ima isti efekat kao i implementacija dodatnog integratora, što dovodi do veće tačnosti sistema u stacionarnom stanju, nego što je to bio slučaj kod primene prethodna dva algoritma.





Slika 5.6 Eksperimentalni rezultati primene zakona upravljanja (5.55).

Radi ispitivanja robustnosti predloženog algoritma izvršen je još jedan dodatni eksperiment, kod koga je promenjena referentna vrednost ulaznog signala (proklizavanje) na  $\lambda_{k+1}^{ref} = 0,3$ , pri istim vrednostima parametara zakona upravljanja. Eksperimentalni rezultati dobijeni ovom prilikom prikazani su na slici 5.7. Kao što može da se vidi sa slike, primena kliznih režima je uspeła da ove poremećaje u velikoj meri eliminiše, pa su i dobijene performanse na zavidnom nivou.



Slika 5.7 Eksperimentalni rezultati primene zakona upravljanja (5.55) za  $\lambda_{k+1}^{ref} = 0,3$ .

## 5.3 Sinteza DUKKR-a zasnovanog na ortogonalnom modelu ABS-a i korišćenju UMV-a

### 5.3.1 Motivacija

Imajući u vidu da se primena modela ABS-a, dobijenog uz pomoć ortogonalnih filtara, pokazala kao veoma efikasna prilikom projektovanja UKR-a u vremenski-kontinualnom domenu (poglavlje 4.4), u ovom odeljku primenjen je sličan koncept. Posebna pažnja biće posvećena primeni DUKKR-a zasnovanom na UMV-u u upravljanju ABS-om.

UMV predstavlja zamenu za ekvivalentno upravljanje kod upravljanja s kvazi-kliznim režimom (Mitić, 2006.), čije je projektovanje zasnovano na modelu u prostoru stanja, dok funkcija  $s_k$ , čiju je minimalnu varijansu, odnosno nultu vrednost u determinističkom slučaju, nastojalo da ostvari UMV, preuzima ulogu prekidačke funkcije kod ovog tipa DUKKR-a.

Kombincija ova dva tipa upravljanja ima za cilj da se svaka od ovih komponenti poboljša dobrim osobinama one druge. Naime, UMV omogućilo je da se DUKKR realizuje samo na osnovu merenja izlaza, kao i da se pojednostavi primena UKR-a na neminimalno fazne objekte upravljanja kada se koristi upravljanja uopštene minimalne varijanse. Takođe, UMV je kod ovog tipa DUKKR-a preuzelo ulogu ekvivalentnog upravljanja. S druge strane, DUKKR je uveden s ciljem poboljšanja robustnosti UMV-a pri delovanju spoljašnjeg poremećaja i parametarskih perturbacija.

Digitalno upravljanje promenljive strukture s tačnošću  $O(T^2)$  zasnovano na korišćenju UMV dobija se kada se u UMV uvede komponenta UKR-a u formi relejnog zakona upravljanja prethodno filtrirana kroz digitalni integrator (Mitić, 2001; Mitić, 2006). Prisustvo digitalnog integratora u znatnoj meri oslabljuje neželjeni efekat četeringa, obezbeđujući relativno gladak upravljački signal. Robustnost i povećanje tačnosti sistema u slučaju delovanja spoljašnjih poremećaja i parametarskih perturbacija su zahtevi koje treba da obezbedi komponenta DUKKR-a. S obzirom da se ove dve tehnike upravljanja uzajamno dopunjuju, ovaj koncept upravljanja se naziva i UMV s kvazi-kliznim režimom (Mitić, 2006).

### 5.3.2 DUKKR zasnovan na UMV-u

Razmotrimo linearni vremenski-kontinualni objekat upravljanja s jednim ulazom i jednim izlazom u sledećem obliku:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{b}u(t) + \mathbf{d}f(t), \\ y(t) &= \mathbf{c}\mathbf{x}(t),\end{aligned}\tag{5.57}$$

gde su:  $\mathbf{x}(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ \dots \ x_n(t)]^T \in R^n$  vektor koordinata stanja,  $u(t) \in R$  ulaz objekta upravljanja,  $f(t) \in R$  spoljašnji poremećaj,  $y(t) \in R$  izlaz objekta upravljanja,  $n$  je njegov red, a matrica  $\mathbf{A}$  i vektori,  $\mathbf{b}$ ,  $\mathbf{c}$  i  $\mathbf{d}$  su sledećih dimenzija:  $\mathbf{A} = [a_{ij}]_{n \times n}$ ,  $\mathbf{b} = [b_i]_{n \times 1}$ ,  $\mathbf{c} = [c_j]_{1 \times n}$ ,  $\mathbf{d} = [d_i]_{n \times 1}$ .

Vremenski-diskretnan model objekta upravljanja u prostoru stanja, nakon primene idealnog odabirača i kola zadržke nultog reda, može da se predstavi u sledećem obliku:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}_{k+1} &= \boldsymbol{\phi}\mathbf{x}_k + \boldsymbol{\gamma}u_k + \mathbf{h}_k, \\ y_k &= \mathbf{c}\mathbf{x}_k,\end{aligned}\tag{5.58}$$

pri čemu su:

$$\boldsymbol{\phi} = e^{\mathbf{A}T}, \quad \boldsymbol{\gamma} = \int_0^T e^{\mathbf{A}\tau} \mathbf{b} d\tau, \quad \mathbf{h}_k = \int_0^T e^{\mathbf{A}\tau} \mathbf{d}f((k+1)T - \tau) d\tau,\tag{5.59}$$

$\mathbf{x}_k = [x_{1k} \ x_{2k} \ \dots \ x_{nk}]^T$ . U daljem tekstu usvojeno je sledeće označavanje  $\bullet_k = \bullet(kT)$ . Pretpostavlja se da je spoljašnji poremećaj  $f(t)$  ograničena funkcija vremena, odnosno da postoji konstanta  $F < \infty$  takva da uvek važi  $|f(t)| < F$ . Na osnovu (5.58), model objekta upravljanja u  $z$ -domenu dobija se u sledećoj formi:

$$y_k = \frac{z^{-1}\mathbf{B}(z^{-1})}{A(z^{-1})}u_k + \frac{z^{-1}\mathbf{D}(z^{-1})}{A(z^{-1})}\mathbf{h}_k,\tag{5.60}$$

gde su:

$$A(z^{-1}) = z^{-n} \det(z\mathbf{I} - \boldsymbol{\phi}),\tag{5.61}$$

$$B(z^{-1}) = z^{-n+1} \mathbf{c} [\text{adj}(z\mathbf{I} - \boldsymbol{\phi}) \boldsymbol{\gamma}],\tag{5.62}$$

$$\mathbf{D}(z^{-1}) = z^{-n+1} \mathbf{c} [\text{adj}(z\mathbf{I} - \boldsymbol{\phi})],\tag{5.63}$$

$z^{-1}$  jedinično kašnjenje, tj.  $z = e^{pT}$ , pri čemu je  $p$  kompleksna promenljiva.

Glavni cilj projektovanog zakona upravljanja je da se pronade takvo upravljanje koje će da obezbedi minimalnu varijansu promenljive:

$$s_{k+1} = C(z^{-1})(y_{k+1} - r_{k+1}), \quad (5.64)$$

odnosno da se ostvari  $s_{k+1} = 0$ . Pri tome, polinom  $C(z^{-1})$  je stabilan polinom, tj. ima sve korene unutar jediničnog kruga u  $z$ -ravni i  $r_k$  je referentni ulazni signal u  $k$ -tom trenutku.

U stacionarnom stanju, kada  $k \rightarrow \infty$ , odnosno  $z \rightarrow 1$ , izlaz objekta upravljanja definisan je sa:

$$y_\infty = r_\infty + \frac{s_\infty}{C(1)}, \quad (5.65)$$

pa će tačnost izlaza sistema da zavisi od tačnosti promenljive  $s_{k+1}$ , tako da što je  $s_{k+1}$  manje biće manja i greška praćenja.

Pod pretpostavkom da je referentni signal  $r_k$  unapred poznat, kao i njegove vrednosti u narednim trenucima vremena ( $r_{k+1}, r_{k+2}, \dots$ ) digitalno upravljanje s kvazi-kliznim režimom zasnovano na UMV-u može da se predstavi u sledećem obliku (Mitić, 2006):

$$u_k = -\frac{1}{E(z^{-1})B(z^{-1})} \left( F(z^{-1})y_k - C(z^{-1})r_{k+1} + \frac{\alpha T}{1-z^{-1}} \operatorname{sgn}(s_k) \right), \quad (5.66)$$

pri čemu su  $E(z^{-1})$  i  $F(z^{-1})$  rešenja Diofantove jednačine:

$$E(z^{-1})A(z^{-1}) + z^{-1}F(z^{-1}) = C(z^{-1}), \quad (5.67)$$

a  $C(z^{-1})$  je polinom čiji su svi koreni stabilni. Može da se primeti da je i ovde, kao što je to bio slučaj i kod prethodna dva algoritma upravljanja, relejna komponenta zakona upravljanja filtrirana kroz diskretni integrator. Smenom predloženog upravljanja u model sistema (5.60) i imajući u vidu izraze (5.64) i (5.67), posle sređivanja dobijamo:

$$s_{k+1} = C(z^{-1})(y_{k+1} - r_{k+1}) = -\frac{\alpha T}{1-z^{-1}} \operatorname{sgn}(s_k) + E(z^{-1})\mathbf{D}(z^{-1})\mathbf{h}_k, \quad (5.68)$$

odnosno:

$$s_{k+1} = s_k - \alpha T \operatorname{sgn}(s_k) + E(z^{-1})\mathbf{D}(z^{-1})(\mathbf{h}_k - \mathbf{h}_{k-1}), \quad (5.69)$$

pri čemu je  $\alpha$  parametar regulatora čijim izborom obezbeđujemo kvazi-klizni režim u  $\Delta$ -okolini prekidačke površine  $s_{k+1} = 0$  i može da se odredi u skladu sa sledećom teoremom:

**Teorema 5.4.** Posmatrajmo diskretni sistem opisan sa (5.60) i (5.66), pri čemu je prekidačka funkcija data sa (5.64), a njena dinamika određena sa (5.69). Ako je parametar  $\alpha$  izabran tako da zadovoljava sledeću nejednakost:

$$\alpha T > \max \left| E(z^{-1}) \mathbf{D}(z^{-1})(\mathbf{h}_k - \mathbf{h}_{k-1}) \right|, \quad (5.70)$$

tada postoji prirodan broj  $K_0 = K_0(s_0)$  koji će da obezbedi da trajektorija sistema dosegne u kvazi-kliznu hiperpovršinu  $S$  određenu sa:

$$S = \left\{ s_k : |s_k| < \alpha T + \max \left| E(z^{-1}) \mathbf{D}(z^{-1})(\mathbf{h}_k - \mathbf{h}_{k-1}) \right| \right\}, \quad (5.71)$$

i ostane na njoj za svako  $k > K_0$ .

Dokaz teoreme može se naći u (Mitić, 2006).

### 5.3.3 Primena na ABS

Polazeći od ortogonalnog modela ABS-a opisanog sa (4.61):

$$W(s) = \frac{d_1 s + d_0}{s^2 + e_1 s + e_0}, \quad (5.72)$$

može da se dobije model ABS-a u formi (5.57), pri čemu je:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -e_0 & -e_1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{c} = [d_0 \quad d_1] \quad \text{i} \quad \mathbf{d} = [0]. \quad (5.73)$$

Na osnovu relacija (5.59) može se naći model ABS-a u diskretnom obliku (5.58), pri čemu su:

$$\phi = \begin{bmatrix} -0.7e^{-64T} + 1.1e^{-4.2T} & -0.01e^{-64T} + 0.02e^{-4.2T} \\ -268.331(-0.01e^{-64T} + 0.02e^{-4.2T}) & 1.07e^{-64T} - 0.07e^{-4.2T} \end{bmatrix}, \quad (5.74)$$

$$\gamma = \begin{bmatrix} 0.003 + 0.0003e^{-64T} - 0.004e^{-4.2T} \\ 3.46 \times 10^{-18} - 0.02e^{-64T} + 0.02e^{-4.2T} \end{bmatrix}.$$

Cilj projektovanja DUKKR-a zasnovanog na UMV-u je da se pronade upravljanje  $u_k$  takvo da forsira prekidačku funkciju:

$$s_k = C(z^{-1})(\lambda_k - \lambda_k^{ref}), \quad (5.75)$$

da postigne svoju minimalnu vrednost (nula u idealnom slučaju), tj. da se održi kretanje trajektorije sistema u oblasti klizne hiperpovršine  $s_k = 0$ , određene na osnovu kvazi-klizne oblasti  $S$ .

Uzimajući ovo u obzir, na osnovu (5.66), upravljanje dobija sledeći oblik:

$$M_{1k} = -\frac{1}{E(z^{-1})B(z^{-1})} \left( F(z^{-1})\lambda_k - C(z^{-1})\lambda_{k+1}^{ref} + \frac{\alpha T}{1-z^{-1}} \operatorname{sgn}(s_k) \right). \quad (5.76)$$

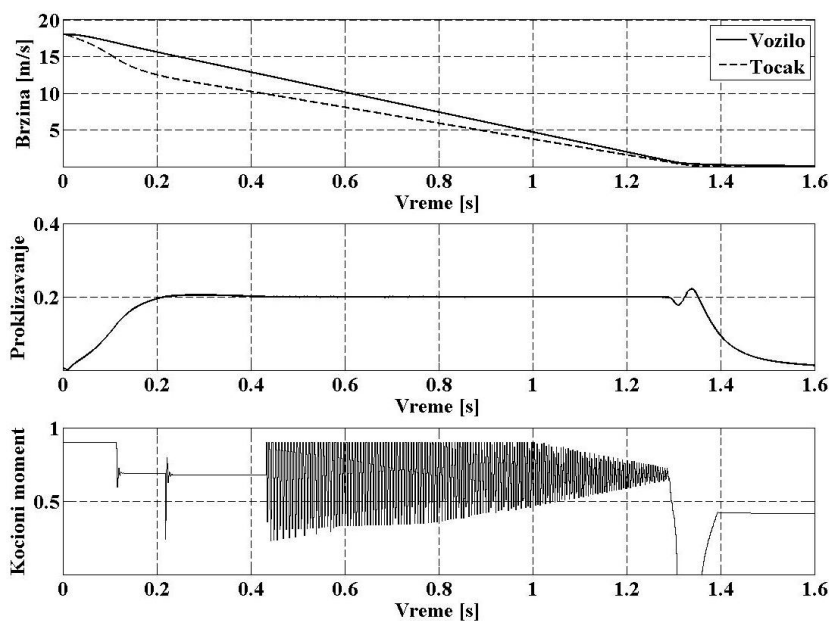
Da bi se predloženo upravljanje moglo primeniti, potrebno je da se od dobijenog modela (5.74), na osnovu jednačina (5.61)-(5.63), prilagodi modelu (5.60), pri čemu su vrednosti koeficijenata polinoma  $A(z^{-1}) = a_0 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2}$ ,  $B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1}$ ,  $C(z^{-1}) = c_0 + c_1z^{-1} + c_2z^{-2}$  sledeće:  $a_0 = 1, a_1 = -1.4861, a_2 = 0.5055, b_0 = 0.008, b_1 = -0.0015, c_0 = 1, c_1 = -1.0670, c_2 = 0.2846$ . Polinomi  $E(z^{-1})$  i  $F(z^{-1})$  su rešenja Diofantove jednačine i u slučaju ABS-a određene su sledećim izrazima:

$$E(z^{-1}) = e_0 = \frac{c_0}{a_0}, \quad (5.77)$$

$$F(z^{-1}) = f_0 + f_1z^{-1}, \quad f_0 = c_1 - e_0a_1, \quad f_1 = c_2 - e_0a_2. \quad (5.78)$$

### 5.3.3.1 Simulacioni rezultati

Simulacioni rezultati primene zakona upravljanja opisanog sa (5.76) prikazani su na slici 5.8.

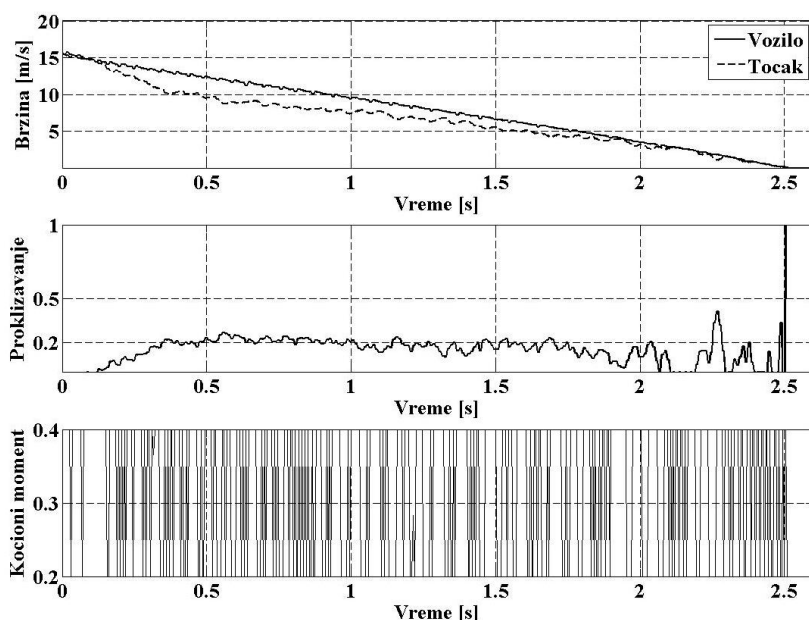


Slika 5.8 Simulacioni rezultati primene zakona upravljanja (5.76).

Vrednosti parametara simulacije su: vreme simulacije 2,5s, a perioda diskretizacije  $T=10\text{ms}$ . Parametar regulatora  $\alpha$  ima vrednost 1. Kao što se i očekivalo, dobijeni rezultati su veoma slični simulacionim rezultatima dobijenim primenom upravljanja opisanog sa (5.55).

### 5.3.3.2 Eksperimentalni rezultati

Primenom upravljanja (5.76) na realnoj laboratorijskoj maketi ABS-a dobijeni su eksperimentalni rezultati prikazani na slici 5.9. Ovom prilikom su upotrebljene iste vrednosti parametara kao što je to bio slučaj kod simulacije. Može da se primeti, da i pored postojanja šuma, neodređenosti modela, promene parametara tokom rada i dodatnog ograničenja upravljačkog signala na opseg  $[0.2; 0.4]$  (kako bi se izbeglo zasićenje), dobijeni esperimentalni rezultati potvrđuju efikasnost predloženog DUKKR-a zasnovanog na UMV-u.



Slika 5.9 Eksperimentalni rezultati primene zakona upravljanja (5.76).

U ovom poglavlju je dat osvrt na nekoliko različitih UKR-a projektovanih u vremenski-diskretnom domenu. Dobijeni rezultati primene DUKKR-a u upravljanju ABS-om pokazali su zavidna poboljšanja u pogledu smanjenja četeringa, boljem praćenju referentne vrednosti ulaznog signala i povećanju tačnosti u stacionarnom stanju. Pokazano je da se najbolje performanse postižu primenom DUKKR-a na osnovu modela ulaz-izlaz s digitalnim integratorom i estimatorom greške modeliranja.

U narednom poglavlju pokušaće se da se kombinacijom nekoliko savremenih tehnika upravljanja projektuje novo upravljanje koje će iskoristiti sve dobre osobine pojedinačnih metoda, i da se, na taj način, reši svaki od do sada uočenih problema prilikom upravljanja ABS-om.

## **6 Hibridne metode upravljanja ABS-om**

U teoriji upravljanja sistemima, poznat je koncept projektovanja tzv. hibridnih upravljanja, koji u svom zakonu upravljanja imaju komponente nekoliko različitih metoda upravljanja. Na ovaj način, njihovom kombinacijom uspeva se da se nedostatak jedne metode nadomesti prednostima druge, što posledično dovodi do još boljih performansi sistema. Najpre se pokušalo s projektovanjem fazi-kliznog regulatora, pri čemu su parametri kliznog režima s proporcionalno plus konstantnim zakonom dosezanja podešeni uz pomoć fazi pravila koji zavise od udaljenosti fazne trajektorije sistema od klizne hiperpovršine i brzine prilaza vektora stanja kliznoj hiperpovršini. Nakon toga, u fazi-klizni regulator uveden je genetički algoritam, koji prilikom definisanja prekidačke funkcije daje optimalno rešenje za njene parametre. Na kraju, projektovan je kontroler kao kombinacija neuronskih mreža i DUKKR-a, pri čemu su neuronske mreže upotrebljene za modeliranje objekta upravljanja i predikciju greške modeliranja. Simulacijama i eksperimentima potvrđene su teorijske pretpostavke i dokazano je unapređenje performansi sistema u vidu boljeg praćenja zadate referentne vrednosti proklizavanja, kraćeg vremena zaustavljanja vozila, veće tačnosti i manjeg vremena potrebnog za izvršavanje algoritma.

### **6.1 Upravljanje zasnovano na primeni fazi-kliznih režima**

Kao što je pokazano u trećem poglavlju, regulatori s idealnim kliznim režimom treba da imaju diskontinualnu prekidačku funkciju koju karakterišu beskonačno brze promene i visoki nivoi signala upravljanja. U praksi, usled različitih nesavršenosti, regulatori s kliznim režimom izazivaju oscilacije oko ravnotežnog stanja (četering), zbog čega je oblast njihove primene sužena na upravljanje objektima koji mogu da podnesu ovakav tip upravljačkog signala. U cilju ublažavanja četeringa, najčešće se uvodi granični sloj i kontinualna aproksimacija diskontinualnog upravljanja. Na taj način se, za dovoljno veliku širinu graničnog sloja, četering može da se suzbije, ali po cenu opadanja tačnosti praćenja zadate trajektorije. Da bi se postigao zadovoljavajući kompromis između intenziteta četeringa i tačnosti praćenja u prisustvu različitih smetnji i neodređenosti, predložene su različite strategije kompenzacije, od kojih ijedna nije dala u potpunosti zadovoljavajuće rezultate.

Poslednjih godina značajnu pažnju privlače hibridna upravljanja na osnovu teorije sistema upravljanja promenljive strukture s kliznim režimom i teorije fazi upravljanja, tzv.



upravljanje s fazi-kliznim režimom, kod kojih se u većini slučajeva teorija sistema promenljive strukture primenjuje na analizu i projektovanje fazi logičkih regulatora (Palm, 1996; O'Dell, 1997). S druge strane, koriste se dobre osobine fazi regulatora (blaga promena upravljanja, nepostojanje potrebe za potpunim poznavanjem upravljanog objekta) u cilju poboljšanja osobina kliznih režima.

Fazi upravljanje je uvedeno početkom sedamdesetih godina prošlog veka kao pokušaj da se upravlja sistemima koje je teško modelirati zbog izrazitih nelinearnosti i složenosti. Početna istraživanja profesora Mamdanija<sup>16</sup> (Mamdani, 1974) i njegovih saradnika vezana za fazi upravljanje bila su motivisana uvodnim radovima Zadeha<sup>17</sup> (Zadeh, 1965) u kojima su ponuđeni lingvistički pristup i analiza sistema zasnovana na teoriji fazi skupova. Tokom proteklih godina, fazi upravljanje je postalo jedno od najaktivnijih i najplodonosnijih područja istraživanja u primeni teorije fazi sistema. Fazi upravljanje se pokazalo korisnim kod upravljanja objektima, koje je teško analizirati klasičnim kvantitativnim tehnikama. Iskustvo je pokazalo da se u situacijama kada su nepoznati parametri sistema ili potpun model sistema, kao i kada se informacije prikazuju kvalitativno, neprecizno ili nesigurno, postižu bolji rezultati pomoću fazi regulatora.

Klasična logika se zasniva na jasnim i precizno utvrđenim pravilima i bazirana je na teoriji skupova koji imaju jasno određene granice (*crisp* - jasan, bistar), pri čemu neki element može ili da pripada nekom skupu ili ne. U fazi logici nije precizno definisana pripadnost jednog elementa određenom skupu (*fuzzy* - maglovit, nejasan), već element ima određeni stepen pripadnosti skupu čija skalirana mera može da uzima vrednosti od 0 do 1. Fazi logika, na kojoj je zasnovano fazi upravljanje, u osnovi je bliža ljudskom načinu razmišljanja i jeziku kojim se ljudi sporazumevaju od klasičnih logičkih sistema. Pomoću nje se obezbeđuje efikasan alat za prikazivanje približnih, netačnih informacija koje se javljaju u realnim okvirima.

Suštinu fazi regulatora čini skup lingvističkih upravljačkih pravila koja su povezana fazi implikacijom i kompozicijom. Tako fazi regulator može da se posmatra kao način da se lingvistička strategija upravljanja zasnovana na znanju eksperata transformiše u strategiju automatskog upravljanja. To je "inteligentni" način upravljanja, koji u određenoj meri oponaša ljudsko razmišljanje i iz tog razloga ima osobine ekspertnog upravljanja. Fazi upravljanje obezbeđuje formalnu metodologiju za predstavljanje, manipulaciju i

---

<sup>16</sup> Mahmood Mamdani, indijski naučnik

<sup>17</sup> Lotfali Askar Zadeh, azerbejdžanski naučnik

implementaciju ljudskog heurističkog predznanja o tome kako kontrolisati jedan određeni sistem. Cilj fazi pristupa je da, umesto jezikom matematike, pokuša da što bolje reši problem upravljanja sistemom, omogući implementaciju inženjerskog iskustva o procesu u sam algoritam regulatora.

Fazi sistemi vrše nelinearno preslikavanje ulaznog prostora  $X$  u izlazni prostor  $Y$ , što je ekvivalentno funkciji  $y(t) = f(x(t))$ , gde funkcija  $f$  nije definisana kao analitička funkcija, već kao preslikavanje tačke u tačku, dok se između tačaka vrši interpolacija. Veza između tačaka se ostvaruje *ako-onda* ("if-then") pravilima koja povezuju određene (referentne) tačke ulaznog i izlaznog prostora. Ovo je unutrašnji logički deo sistema zapamćen u tzv. lingvističkoj memoriji. Referentne tačke se definišu pomoću fazi skupova. Interpolacija funkcije između referentnih tačaka zavisi od oblika funkcija pripadnosti referentnih fazi skupova, određenog metoda implikacije, načina izračunavanja kao i defazifikacionog metoda. Tako je funkcija  $f$  definisana algoritmom izračunavanja i skupom parametara koji su izraženi lingvistički, a proces zaključivanja oponaša način na koji ljudi zaključuju. Značajniji razvoj fazi logike nastupio je osamdesetih i devedesetih godina prošlog veka (Zimmernann, 1985; Kosko, 1992), kada su nastale mnoge praktične primene fazi upravljanja u avionskoj industriji, automatizaciji saobraćaja, automobilskoj industriji, elektroenergetici, upravljanju procesima, robotici itd.

### 6.1.1 Dosadašnji rezultati

U poglavljima 4 i 5, dat je pregled radova koji se bave problemom upravljanja ABS-om s kliznim režimom u vremenski-kontinualnom i diskretnom domenu. Takođe, postoji veći broj radova koji se bave istom problematikom, ali je kao metoda upravljanja upotrebljeno fazi upravljanje. Njegova prednost u odnosu na ostale metode upravljanja ogleda se u mogućnosti primene kod upravljanja sistemima čiji matematički model nije u potpunosti opisan, kao što je to slučaj kod ABS-a gde su izvršena određena zanemarivanja prilikom modeliranja.

Jedan od načina projektovanja algoritama upravljanja je da se upotrebe linearizovani modeli ABS-a u okolini radnih tačaka. Takav pristup prilikom projektovanja fazi upravljanja primenjen je u (Precup, 2011). Samopodešavajući PID kontroler, zajedno sa kombinacijom fazi i genetičkog algoritma, dat je u upravljanju ABS-om u (Sharkawy, 2010). Fazi kontroler Takagi-Sugenovog tipa, koji je upotrebljen za upravljanje proklizavanjem kod ABS-a, predložen je u (Precup, 2004). U (Stan, 2007) daje se kritična analiza pet različitih rešenja na osnovu fazi upravljanja, primenjenih u ABS-u. Ovde, Takagi-Sugeno fazi kontroler

kombinuje posebno projektovane PI i PID kontrolere za različite opsege radnih tačaka. Još jedna primena fazi upravljanja u ABS-u data je u (Modi, 2012; Subbulakshmi, 2014).

Značajan rad uložen je u istraživanju kombinacija ove dve topologije (Palm, 1996), tako da se prevaziđu ograničenja kliznog režima, a da se pritom garantuje uniformna globalna stabilnost i neosetljivost na spoljašnje poremećaje (Antić, 1998). U (Oudghiri, 2007) projektovan je robustni fazi-klizni kontroler koji je upotrebljen za upravljanje vozilom na osnovu konstantnog podešavanja kočionog momenta. Simulacije za različite uslove na putu potvrdile su efikasnost predložene metode. U (Lin, 2003(a)) predstavljen je samopodešavajući fazi-klizni regulator, koji se sastoji od fazi kontrolera i robustnog kontrolera. Fazi kontroler je upotrebljen da oponaša idealni kontroler, a robustni kontroler je projektovan tako da kompenzuje aproksimacionu grešku između signala idealnog kontrolera i fazi kontrolera. Algoritam za podešavanje kontrolera je određen tako da obezbedi stabilnost sistema u smislu Ljapunova. U (Park, 2001) ABS kontroler se sastoji od fazi kontrolera i observera brzine vozila na osnovu kliznog režima. U ovom slučaju observer na osnovu merenja brzine točka estimira brzinu vozila koja se dalje upotrebljava za izračunavanje vrednosti proklizavanja.

### 6.1.2 Projektovanje UKR-a s dodatnim fazi blokom

U ovom odeljku, izvršiće se unapređenje metode upravljanja predstavljene u (Mitić, 2012) upotrebom kombinacije gore pomenutih metoda upravljanja. Fazi blok u fazi-kliznom regulatoru (FKR) biće iskorišćen za određivanje vrednosti ključnih parametara koji se koriste prilikom definisanja prekidačke funkcije kliznog režima. Njena dinamika je određena tzv. metodom zakona dosezanja, ili, preciznije, proporcionalno plus konstantnim zakonom dosezanja i bila je predmet razmatranja u odeljku 4.3.3. Kao što je već rečeno, zakon UKR-a s proporcionalno plus konstantnim zakonom dosezanja, u slučaju ABS-a, određen je sledećom relacijom:

$$M_1 = -g_n(\lambda, x_2)^{-1} (f_n(\lambda, x_2) + M_p \sigma + M_c \operatorname{sgn}(\sigma)). \quad (6.1)$$

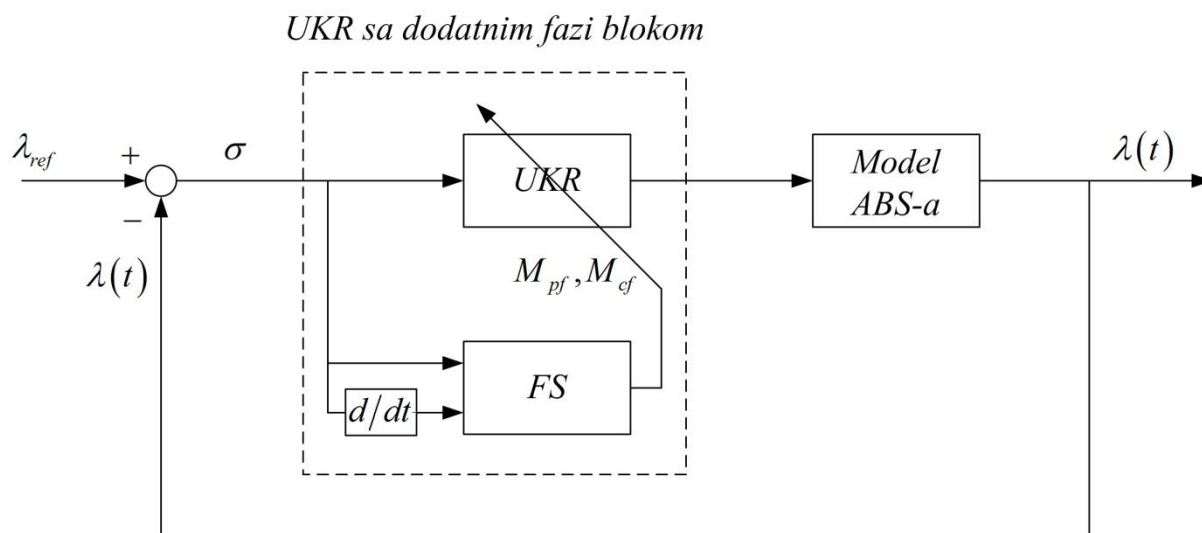
Uzimajući u obzir prethodnu jednačinu, fazi blokovi biće upotrebljeni za procenu promenljivih parametara zakona upravljanja ( $M_{pf}$ ,  $M_{cf}$ ), koji će da zavisi od rastojanja vektora stanja od klizne hiperpovršine i brzine prilaza vektora stanja kliznoj hiperpovršini (Mitić, 2012). Vrednosti parametara FKR-a mogu da se izaberu tako da se dobije najbolje ponašanje sistema u zavisnosti od određenog kriterijuma.

Pretpostavimo da postoji  $m$  pravila u bazi fazi pravila i svako od njih ima sledeću formu:

$$\text{Pravilo } i: \text{ if } p \text{ is } P_i \text{ then } u \text{ is } U_i, \quad (6.2)$$

gde je  $p$  ulazna promenljiva fazi sistema,  $u$  izlazna promenljiva fazi sistema,  $P_i$  su funkcije pripadnosti trougaonog tipa i  $U_i$  je singleton upravljačka akcija za  $i=1,2,\dots,m$ .

Pošto se posmatra rastojanje od klizne hiperpovršine, znak prekidačke funkcije (pozitivan ili negativan) nije od značaja prilikom projektovanja zakona upravljanja. Imajući to u vidu, definišaćemo fazi pravila na osnovu apsolutnih vrednosti od  $\sigma$ . Kako bi se izbegla redundantnost, oba fazi bloka imaju samo jedan ulaz i jedan izlaz. Prvi, upotrebljen za određivanje parametra  $M_{cf}$ , kao ulaz koristi prekidačku funkciju  $\sigma$ , dok drugi koristi prvi izvod od  $\sigma$ . Osnovna ideja projektovanja upravljanja je da velika vrednost parametara zakona upravljanja treba da se primeni kada je vektor stanja udaljeniji od klizne hiperpovršine, tako da dovede do bržeg približavanja sistema kliznoj hiperpovršini. S druge strane, kada je trajektorija sistema već blizu klizne hiperpovršine, upravljački signal treba da ima manju vrednost. Na taj način, sistem postaje brži u smislu neosetljivosti na poremećaje i četering je značajno ublažen.



Slika 6.1 Strukturna blok šema UKR-a s dodatnim fazi blokom.

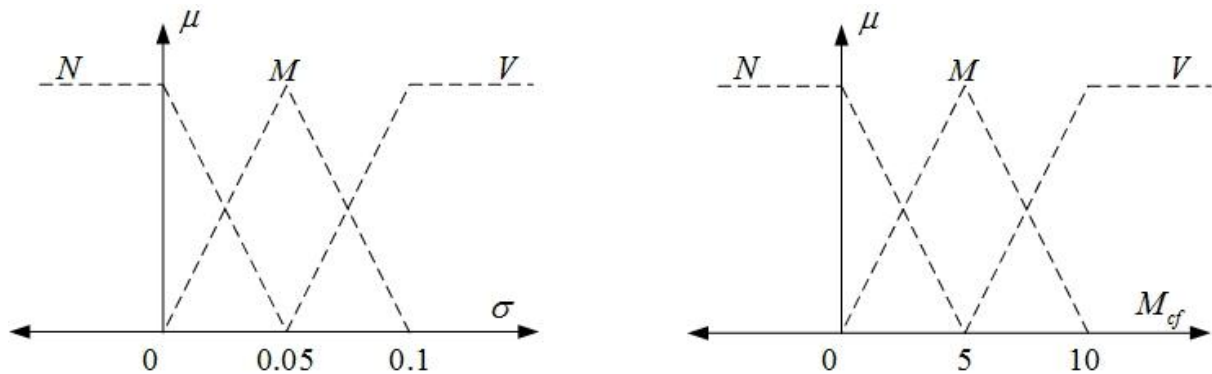
Jedan potpuni skup fazi pravila  $M_c$  - fazi bloka može da ima sledeću sadržinu:

$$\begin{aligned} \text{if } \sigma = N \text{ then } M_{cf} &= N, \\ \text{if } \sigma = M \text{ then } M_{cf} &= M, \\ \text{if } \sigma = V \text{ then } M_{cf} &= V, \end{aligned} \quad (6.3)$$

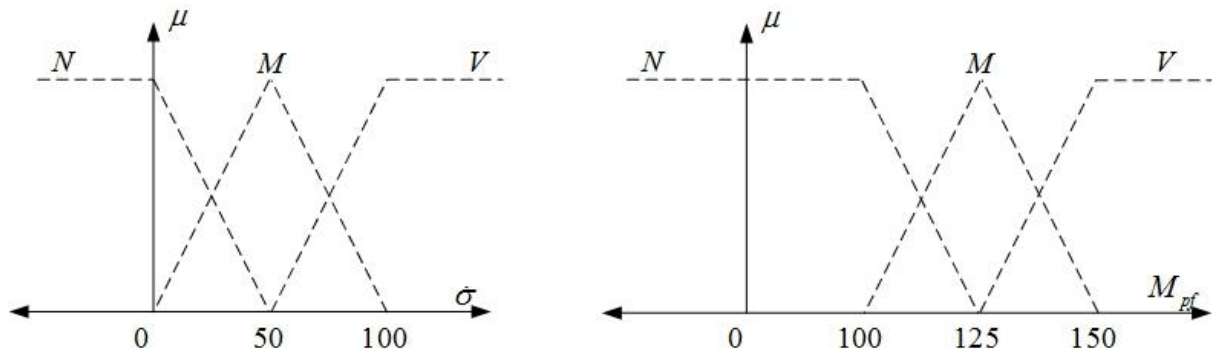
gde se koriste sledeće oznake:  $N$  - nulto pojačanje,  $M$  - malo pojačanje, a  $V$  - veliko pojačanje. Na sličan način može da se definiše potpuni skup fazi pravila  $M_p$ -fazi bloka kao:

$$\begin{aligned} \text{if } \dot{\sigma} = N \text{ then } M_{pf} = V, \\ \text{if } \dot{\sigma} = M \text{ then } M_{pf} = M, \\ \text{if } \dot{\sigma} = V \text{ then } M_{pf} = N. \end{aligned} \quad (6.4)$$

Normalizovani fazi skupovi promenljivih  $\sigma, \dot{\sigma}, M_{cf}, M_{pf} = \{N, M, V\}$  prikazani su na slikama 6.2 i 6.3.



Slika 6.2 Funkcije pripadnosti  $M_c$ -fazi bloka.



Slika 6.3 Funkcije pripadnosti  $M_p$ -fazi bloka.

Nelinearno mapiranje, od ulaza do izlaza fazi blokova, vrši se na osnovu iskustva i sistemom pokušaja i promašaja. Funkcije pripadnosti su trougaone sa sledećim centrima:

- $M_c$ -fazi blok:  $\{0; 0,05; 0,1\}$  za ulaz  $\sigma$  i  $\{0; 5; 10\}$  za izlaz  $M_{cf}$ ,
- $M_p$ -fazi blok:  $\{0; 50; 100\}$  za ulaz  $\dot{\sigma}$  i  $\{100; 125; 150\}$  za izlaz  $M_{pf}$ .

Uzimajući u obzir problem upravljanja, kao metod defazifikacije upotrebljena je metoda centra gravitacije (Lee, 1990):

$$u = \frac{\sum_{i=1}^m \omega_i \times U_i}{\sum_{i=1}^m \omega_i}, \quad (6.5)$$

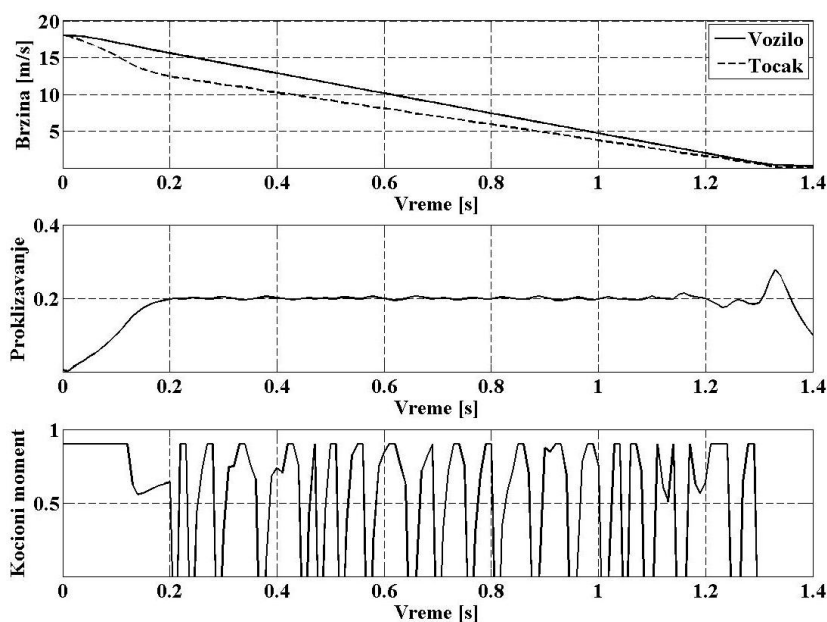
gde je  $\omega_i$  aktivaciona (eng. *firing*) težina  $i$ -tog pravila.

Zakon upravljanja formiran na takav način može da se ponovo napiše kao:

$$M_1 = -g_n(\lambda, x_2)^{-1} (f_n(\lambda, x_2) + M_{pf}\sigma + M_{cf} \operatorname{sgn}(\sigma)). \quad (6.6)$$

### 6.1.2.1 Simulacioni rezultati

Primena UKR-a s dodatnim fazi blokom, opisana sa (6.6), u upravljanju ABS-om daje simulacione rezultate prikazane na slici 6.4. Vreme trajanja simulacije je 2,5s. Upravljački signal je ograničen na opseg [0; 0,9]. Kao što može da se vidi sa slike, performanse praćenja zadate referentne vrednosti proklizavanja od  $\lambda_r = 0,2$  su veoma dobre, a vreme zaustavljanja vozila je približno oko 1,4 s.

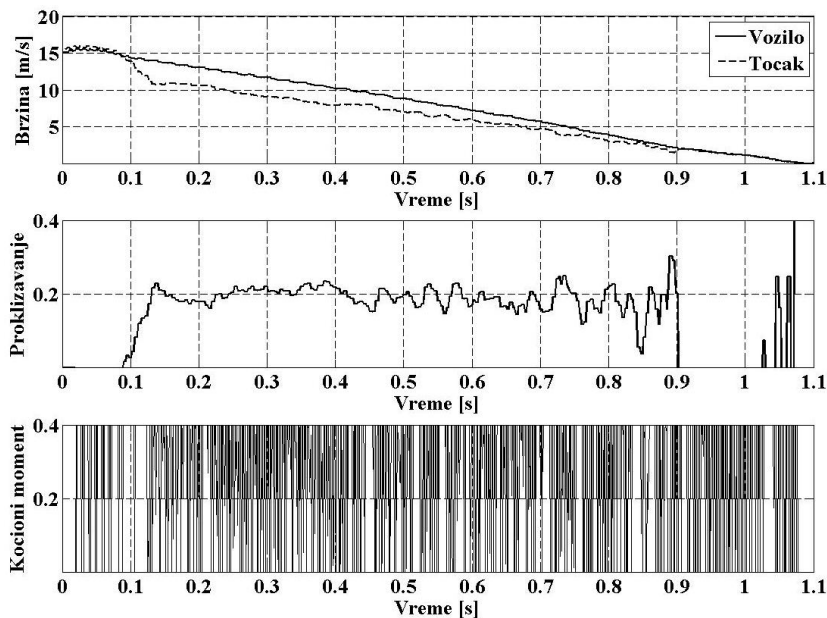


Slika 6.4 Simulacioni rezultati primene zakona upravljanja (6.6).

### 6.1.2.2 Eksperimentalni rezultati

Eksperimentalni rezultati primene predloženog hibridnog upravljanja na ABS prikazani su na slici 6.5. Ovde je, za razliku od simulacije, upravljački signal dodatno smanjen na opseg [0,2; 0,4], a razlozi za ovo smanjenje su detaljno opisani u odeljku 4.3.4.2. Vreme uzorkovanja je podešeno na 5ms. Kao što može da se vidi sa slike, dobijeni rezultati su bolji u poređenju sa

eksperimentalnim rezultatima primene UKR-a s proporcionalno plus konstantnim zakonom doseganja (opisan u odeljku 4.3.4.2) u smislu: smanjenja efekta četeringa usled činjenice da je dinamika približavanja blago usporena kako je trajektorija sistema bliža kliznoj pravoj; boljeg praćenja referentne vrednosti usled promenljivih vrednosti parametara upravljanja.



Slika 6.5 Eksperimentalni rezultati primene zakona upravljanja (6.6).

## 6.2 Upravljanje zasnovano na primeni fazi-kliznih režima i genetičkih algoritama

Kao što je već pokazano kroz mnogobrojna istraživanja, kombinacija savremenih metoda upravljanja i genetičkih algoritama pokazala se kao veoma uspešna prilikom upravljanja složenih sistema. Ova potreba se, najpre, ogleda u činjenici da mnogi parametri zakona upravljanja zahtevaju podešavanja parametara, koji se najčešće biraju metodom pokušaja i greške. Pogrešan izbor parametara može da dovede do loših performansi pa je logičan zaključak da je potrebno da se uvede neka od optimizacionih tehnika u cilju unapređenja samog algoritma.

Genetički algoritmi predstavljaju tehniku optimizacije i pretraživanja koja pripada grupi evolutivnih algoritama i bazira se na biološkim zakonima evolucije, genetike i prirodne selekcije. Principe ove tehnike utemeljio je Holand (Holland, 1975), a razvio i praktično primenio njegov učenik Goldberg (Goldberg, 1989). Detaljnije informacije o genetičkim algoritmima mogu se naći u literaturi (Back, 1996; Mitchel, 1996).

Genetički algoritam radi sa populacijom tačaka, označenim kao jedinke. Jedinke predstavljaju kodirano potencijalno rešenje optimizacionog problema. Genetički algoritam započinje slučajnim izborom populacije koja se potom procesira iz jedne u drugu generaciju. Optimalnost jedinke u skladu sa konkretnim optimizacionim zadatkom se opisuje posebnom funkcijom optimalnosti. U skladu sa Darwinovim principom prirodne selekcije, najsposobnije jedinke dobijaju veću šansu da budu selektovane i proizvedu potomke za sledeću generaciju. To znači da se u svakoj generaciji boljim jedinkama omogućuje da proizvedu potomke koji će zameniti inferiorne jedinke. Genetički operatori ukrštanja (rekombinacija) i mutacije se primenjuju na roditelje u cilju stvaranja novih kandidata za rešenja optimizacionog problema. Ukrštanjem se razmenjuje genetički materijal dve jedinke. Tako se stvaraju nove dve i efikasno se ispituje zadati prostor pretraživanja. Mutacija nasumice menja genetički sadržaj jedinke čime se izbegava zadržavanje u lokalnom optimumu i omogućava obogaćivanje genetičkog potencijala populacije. Kao rezultat evolutivnog ciklusa selekcije, ukrštanja i mutacije, dobijaju se sve bolja rešenja zadanog problema unutar populacije. Primena genetičkih operacija nad jedinkama traje sve dok se ne nađe dovoljno dobro rešenje optimizacionog problema ili dok se ne dostigne zadati maksimalni broj generacija.

Osnovne prednosti genetičkih algoritama u odnosu na druge, tradicionalne metode optimizacije su:

- rade sa populacijom mogućih rešenja (jedinke) umesto sa samo jednim, pa pretraživanje može da se obavlja paralelno,
- omogućavaju robustnu pretragu i nalaženje optimalnih ili skoro optimalnih rešenja u okviru velikih, kompleksnih kao i slabo poznatih prostora pretraživanja,
- mogu da se primene i na nelinearne optimizacione probleme definisane i u vremenski- kontinualnom i u diskretnom prostoru pretraživanja,
- ispituju različite oblasti prostora pretraživanja i mnoga moguća rešenja istovremeno, pa imaju veću verovatnoću konvergencije ka optimalnom rešenju i izbegavanju lokalnih minimuma,
- ne zahtevaju nikakvo predznanje o strukturi problema koji se rešavaju (izuzev definisane funkcije optimalnosti) niti bilo kakve diferencijale promenljivih.

Genetički algoritmi su se tokom godina pokazali kao univerzalna optimizaciona tehnika primenljiva na široku klasu problema: optimizacija parametara u sistemima automatskog upravljanja (Teng, 2003; Danković, 2007), identifikacija sistema (Kristinsson, 1992), optimizacija fazi logičkih regulatora, pretraživanje, rešavanje problema iz kombinatorike, robotike, digitalne obrade signala, automatskog računarskog programiranja... Ipak, treba



imati u vidu da genetički algoritmi nisu uvek najpogodnija tehnika optimizacije za svaki tip optimizacionog problema.

### 6.2.1 Dosadašnji rezultati

Kao što je već napomenuto, genetički algoritmi su našli široku primenu prilikom optimizacije parametara u upravljanju zasnovanom na nekoj od naprednih tehnika kao što su klizni režimi, fazi logika, itd. U (Dereje, 2011) genetički algoritam je upotrebljen prilikom definisanja integralne prekidačke funkcije u kliznom režimu. Dobijeni rezultati su upoređeni s rezultatima dobijenim primenom klasičnog PID upravljanja, čime je pokazana superiornost predložene metode u upravljanju manipulatorom. Sličan pristup je primenjen u (Köse, 2013). U (Ng, 1995) genetički algoritam je upotrebljen prilikom definisanja pravila fazi-kliznog regulatora, čime je prevaziđen odabir pravila na osnovu iskustava projektanta i metoda pokušaja i greške. Primena genetičkog algoritma u optimizaciji parametara kliznog režima našla je primenu i u automobilskoj industriji (Ozer, 2014). Klizni režim s vremenski promenljivom kliznom hiperpovršinom predložen je u (Tokat, 2009) pri čemu su genetički algoritmi primenjeni, takođe, prilikom optimizacije parametara predloženog zakona upravljanja. Primena genetičkih algoritama može da se vidi i prilikom definisanja fazi pravila u (Lee, 2002). Shodno ovome, u nastavku biće opisano upravljanje koje objedinjuje klizni režim, fazi logiku i genetički algoritam, stvarajući, na taj način, hibridno upravljanje u kojem su prisutni svi dobri elementi pojedinačnih teorija upravljanja, a otklonjeni loši.

### 6.2.2 Projektovanje FKR-a s genetičkim algoritmom

U cilju projektovanja zakona upravljanja, polazi se od modela ABS-a u sledećem obliku:

$$\dot{\lambda} = f(\lambda, x_2) + g(\lambda, x_2)M_1, \quad (6.7)$$

pri čemu su funkcije  $f(\lambda, x_2)$  i  $g(\lambda, x_2)$  opisane jednačinama (2.17) i (2.18) i važi da je  $x_2 \neq 0$ . Ukoliko pretpostavimo da su  $f_n(\lambda, x_2)$  i  $g_n(\lambda, x_2)$  nominalne vrednosti funkcija  $f(\lambda, x_2)$  i  $g(\lambda, x_2)$ , može da se definiše nominalni model ABS-a kao:

$$\dot{\lambda} = f_n(\lambda, x_2) + g_n(\lambda, x_2)M_1. \quad (6.8)$$

Ukoliko u sistemu postoje neodređenosti dolazi do razlike između nominalnog i stvarnog modela, pa se jednačina (6.8) može da se ponovo napiše u sledećem obliku:

$$\begin{aligned}\dot{\lambda} &= [f_n(\lambda, x_2) + \Delta f(\lambda, x_2)] + [g_n(\lambda, x_2) + \Delta g(\lambda, x_2)] M_1 = \\ &= f_n(\lambda, x_2) + g_n(\lambda, x_2) + w,\end{aligned}\quad (6.9)$$

gde je:  $w = \Delta f(\lambda, x_2) + \Delta g(\lambda, x_2) M_1$ ;  $\Delta f(\lambda, x_2)$  i  $\Delta g(\lambda, x_2)$  su neodređenosti u sistemu,  $w \leq W$ ,  $W$  je pozitivna konstanta.

Glavni upravljački cilj je da se obezbedi zakon upravljanja tako da proklizavanje  $\lambda(t)$  prati zadatu trajektoriju  $\lambda_d(t)$ . U tom slučaju, greška praćenja  $\lambda_e(t)$  može da se definiše kao:

$$\lambda_e(t) = \lambda_d(t) - \lambda(t). \quad (6.10)$$

Pošto je model ABS-a zapravo sistem prvog reda, greška praćenja ujedno predstavlja i prekidačku funkciju  $s(t)$  a njena dinamika je bliže opisana sledećom jednačinom:

$$\dot{s}(t) = -M_p s + M_c \operatorname{sgn}(s(t)); \quad M_p, M_c \geq 0. \quad (6.11)$$

Na osnovu (6.8), (6.10) i (6.11) može da se odredi zakon upravljanja u sledećem obliku:

$$M_1 = g_n^{-1}(\lambda, x_2) \left[ -f_n(\lambda, x_2) + \dot{\lambda}_d - M_p \lambda_e - M_c \operatorname{sgn}(\lambda_e) \right]. \quad (6.12)$$

Prilikom projektovanja UKR-a neophodno je poznavanje modela sistema i mogućnost određivanja inverzne dinamike sistema, što nije uvek lak zadatak, a nekada je čak i nemoguć. Takođe, iz poslednje jednačine može da se primeti da u zakonu upravljanja postoje parametri  $M_p$  i  $M_c$  koji nisu precizno određeni već se oni određuju na osnovu sistema pokušaja i promašaja. Da bi prevazišli navedene probleme algoritam upravljanja biće unapređen dodavanjem genetičkog algoritma kao univerzalne optimizacione tehnike i fazi regulatora pogodnog prilikom primene kod sistema sa modelima koji nisu precizno definisani. Ukoliko pretpostavimo da su parametri sistema (6.7) dobro poznati, onda bi idealni kontroler mogao da se definiše kao

$$M_1^* = g_s^{-1}(\lambda, x_2) \left[ -f_s(\lambda, x_2) + \dot{\lambda}_d - M_p^* \lambda_e - M_c^* \operatorname{sgn}(\lambda_e) \right]. \quad (6.13)$$

Sada primenom zakona upravljanja (6.13) i genetičkih algoritama mogu da se definišu optimalne vrednosti parametara  $M_p^*$  i  $M_c^*$ . Genetički algoritam koji je iskorišćen u eksperimentu ima sledeće parametre: početnu populaciju od 200 jedinki, broj generacija 150,

stohastičku uniformnu selekciju, reprodukciju uz 12 elitnih jedinki i Gausovu mutaciju sa sakupljanjem. Hromozom ima strukturu koja se sastoji od 2 parametra ( $M_p^*$  i  $M_c^*$ ), kodirana realnim brojevima:  $a$  i  $b$ . Cilj eksperimenta je da se postigne što manja srednje kvadratna greška  $J(M_p^*, M_c^*) = \frac{1}{T} \int_0^T (\lambda - \lambda_{ref})^2 dt$ . Ukupno vreme trajanja eksperimenta je 10s. S obzirom da je za brzinu konvergencije genetičkog algoritma ka optimalnim rešenjima vrlo bitan procesor računara, treba istaći da je u eksperimentima korišćen računar s procesorom *Intel (R) Xeon (R), CPU E5-1660 3.30GHz* sa *8GB RAM* memorije. Za ovako podešeni genetički algoritam dobijene su sledeće optimalne vrednosti za tražene parametre:  $M_p^* = 1,86$  i  $M_c^* = 0,94$ , pri čemu je postignuta tačnost reda od  $10^{-7}$  ( $J=0,0000001521$ ).

Međutim, u realnom slučaju nije moguće da se precizno odrede svi parametri sistema pa idealni kontroler ne može da se precizno implementira. Da bi se ovo prevazišlo, došlo se na ideju da se uz pomoć fazi kontrolera aproksimira ponašanje idealnog kontrolera, a da se razlika između ta dva kontrolera nadoknadi dodavanjem robustnog kontrolera. Uzimajući u obzir (6.2), pri čemu se kao ulaz koristi prekidačka funkcija opisana sa (6.11), jednačina (6.5) može da se ponovo napiše kao:

$$u = \mathbf{U}^T \xi, \quad (6.14)$$

pri čemu je  $\mathbf{U} = [U_1, U_2, \dots, U_m]^T$  vektor parametara i  $\xi = [\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m]^T$  je regresivni vektor sa  $\xi_i$  definisan na sledeći način:

$$\xi_i = \frac{\omega_i}{\sum_{i=1}^m \omega_i}. \quad (6.15)$$

Na osnovu univerzalne teoreme aproksimacije (Wang, 1994) postoji optimalni fazi kontroler u formi (6.14) takav da je:

$$M_1^*(t) = u^*(s, \mathbf{U}^*) + \varepsilon = \mathbf{U}^{*T} \xi + \varepsilon, \quad (6.16)$$

gde je  $\varepsilon$  greška aproksimacije i smatra se da je ograničena tj. važi da je  $\varepsilon \leq E$ . Sada koristimo ovaj fazi kontroler kako bi aproksimirali idealni kontroler opisan sa (6.11) u obliku:

$$\hat{u}(s, \hat{\mathbf{U}}) = \hat{\mathbf{U}}^T \xi + \varepsilon, \quad (6.17)$$

pri čemu je ukupno upravljanje određeno sa:

$$u_{uk}(t) = \hat{u}(s, \hat{U}) + u_{rk}(s), \quad (6.18)$$

gde je  $u_{rk}(s)$  robustni kontroler koji služi da nadomesti razliku između idealnog i fazi kontrolera. U radu (Lin, 2003(a)) pokazano je da je sistem opisan jednačinama (6.16)-(6.18) stabilan u smislu Ljapunova i da se izborom parametara:

$$\dot{\hat{U}} = \eta_1 s(t) \xi, \quad (6.19)$$

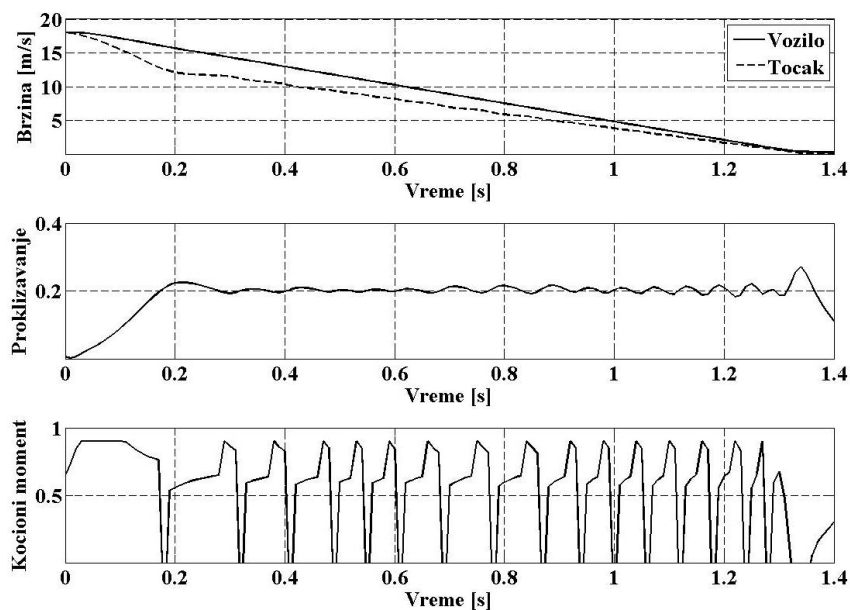
$$u_{rk} = \hat{E} \operatorname{sgn}(s(t)), \quad (6.20)$$

$$\dot{\hat{E}} = \eta_2 |s(t)|, \quad (6.21)$$

može postići upravljački cilj (6.10).

### 6.2.2.1 Simulacioni rezultati

Simulacioni rezultati primene upravljanja (6.18) prikazani su na slici 6.6.

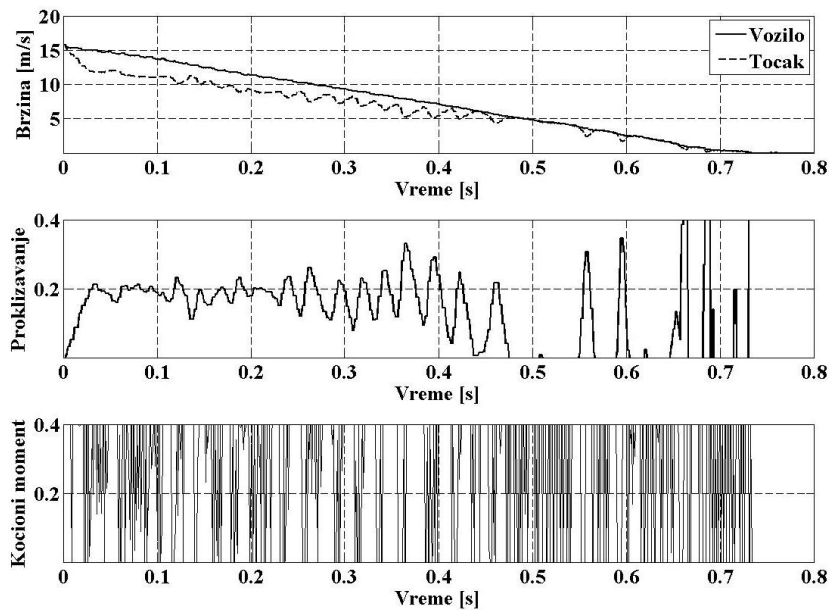


Slika 6.6 Simulacioni rezultati primene zakona upravljanja (6.18).

Može da se primeti da je održavanje referentne vrednosti proklizavanja od 0,2 veoma dobro, čime se obezbeđuje maksimalna vrednost koeficijenta prijanjanja vozila na površinu po kojoj se kreće. Mada, mogu da se uoče i blage oscilacije oko ravnotežnog stanja, što može da se opravda nešto većim vremenom izvršavanja predloženog algoritma. Četering je u velikoj meri ublažen, što čini predloženo upravljanje veoma pogodnim i za fizičku realizaciju.

### 6.2.2.2 Eksperimentalni rezultati

Primena upravljanja (6.18) na model ABS-a u realnom vremenu daje eksperimentalne rezultate prikazane na slici 6.7. Konstatcija da je četering značajno ublažen se u realnom vremenu pokazala kao ispravna, a oscilacije oko ravnotežnog položaja u zadnjem delu karakteristike mogu da se opravdaju bliskim vrednostima brzina vozila i točka, tj. točak je već u značajnoj meri ukočio. Takođe, može se uočiti značajno kraće vreme zaustavljanja vozila (oko 0.8s) u poređenju sa prethodno dobijenim rezultatima (oko 1.8s-2.2s).



Slika 6.7 Eksperimentalni rezultati primene zakona upravljanja (6.18).

## 6.3 Upravljanje zasnovano na primeni kliznih režima i neuronskih mreža

Među hibridnim kontrolerima, značajno mesto pripada složenom upravljanju koje se zasniva na sinergističkoj kombinaciji neuronskih mreža i UKR-a. Neuronska mreža, s jedne strane, ima sposobnost da aproksimira svaku zadatu funkciju i da prepozna i predvidi složene šablone (Yia, 2007), dok UKR, s druge strane, predstavlja koristan i moćan alat za suočavanje sa neizvesnostima, nelinearnostima i ograničenim spoljašnjim poremećajima, koji se javljaju kod sistema (Hu, 2011).

Veštačke neuronske mreže u suštini predstavljaju sistem sastavljen od određenog broja jednostavnih, međusobno povezanih elemenata za obradu, koji obrađuju informacije na osnovu odziva na spoljašnje ulaze (Caudill, 1989).

Obično su neuronske mreže organizovane u slojeve, sastavljene od više međusobno povezanih "čvorova", koji sadrže aktivacione funkcije. Obrasci podataka se na mrežu dovode preko ulaznog sloja, koji komunicira sa jednim ili više skrivenih slojeva, gde se zapravo vrši obrada preko sistema težinskih veza. Nakon toga, skriveni slojevi generišu izlaz preko izlaznog sloja.

Većina neuronskih mreža sadrži neki oblik pravila učenja, koji modifikuje težine veza na osnovu ulaznih obrazaca. Iako postoji veliki skup različitih pravila učenja kod neuronskih mreža, jedna od najčešće korišćenih je tzv. delta pravilo u okviru backpropagation<sup>18</sup> neuronskih mreža. Funkcionisanje ove mreže može da se jednostavnim rečima opiše na sledeći način: kada se na ulaz mreže dovede određeni obrazac, mreža napravi slučajnu pretpostavku šta bi to moglo da bude; nakon toga ona vidi koliko je njen odgovor udaljen od stvarnog i na osnovu toga vrši prepodešavanje svojih težinskih koeficijenata. Takođe, u svakom čvoru skrivenog sloja se nalazi sigmoidalna aktivaciona funkcija koja polarizuje aktivnost mreže i pomaže u njenoj stabilizaciji.

Neuronske mreže odlično rešavaju probleme klasifikacije i predviđanja, odnosno sve probleme kod kojih postoji odnos između prediktivnih (ulaznih) i zavisnih (izlaznih) promenljiva, bez obzira na visoku složenost te veze (nelinearnost). Danas se neuronske mreže primenjuju u mnogim segmentima života poput medicine, bankarstva, mašinstva, geologije, fizike itd., najčešće za probleme raspoznavanja uzoraka, obrade slike, obrade govora, optimizacije, nelinearnog upravljanja, obrade nepreciznih i nekompletnih podataka, modeliranja i simulacije i sl.

### **6.3.1 Dosadašnji rezultati**

U (Hao, 2007) predložena je upravljačka šema na osnovu kliznog režima za klasu nelinearnih sistema s neodređenostima, koja se bazira na kombinaciji fazi-neuronske mreže i jednostavne neuronske mreže. Jednostavna neuronska mreža se definiše na osnovu prekidačke površine integralnog kliznog režima i njen izlaz predstavlja korektivno upravljanje, a fazi-neuronska mreža se koristi za oponašanje ekvivalentnog upravljanja. U ovoj strukturi, ne moraju se unapred poznavati granice neodređenosti i spoljašnjih poremećaja, a stabilnost sistema se analizira na osnovu funkcije Ljapunova. Sličan pristup, ali ovog puta za robotske manipulatore primenjen je u (Purwar, 2004). Još jedna kombinacija kliznog režima i neuronskih mreža data je u (Yildiz, 2007). Neuronska mreža je u ovom

---

<sup>18</sup> eng. backpropagation - propagiranje greške unazad

slučaju upotrebljena za minimizaciju kriterijumske funkcije koja je izabrana tako da zavisi od rastojanja trajektorije sistema od klizne hiperpovršine. Ovaj pristup je primenjen kako na sisteme sa više ulaza i izlaza<sup>19</sup> (MIMO), tako i na sisteme s jednim ulazom i jednim izlazom<sup>20</sup> (SISO). U (Lin, 2001) predložena je rekurentna fazi-neuronska mreža (RFNM) s kliznim režimom za upravljanje servo-mehanizmom. Ovde je RFNM observer iskorišćen za podešavanje granica nelinearnosti u realnom vremenu. Takođe, predložen je analitički metod zasnovan na diskretnoj Ljapunovoj funkciji u cilju obezbeđivanja konvergencije greške praćenja.

U (Poursamad, 2009), hibridni kontroler je projektovan na osnovu feedback linearizacije, u kombinaciji s dve feedforward neuronske mreže, i primenjen je na upravljanje ABS-om. Mreže su iskorišćene za opisivanje nelinearnosti sistema. Adaptivni zakon je izveden na osnovu strukture kontrolera, tako da se podešavanje težina vrši primenom gradijentne metode i algoritma propagacije greške unazad. Na kraju, stabilnost celokupnog sistema je dokazana u smislu Ljapunova, a primena predloženog upravljanja dala je dobre rezultate i pored neodređenosti parametara i različitih uslova na putu.

U (Topalov, 2009(b)) opisan je adaptivni neuro-fazi pristup upravljanja za nelinearne dinamičke sisteme koji imaju nepoznatu dinamiku, grešku modeliranja i različite vrste neodređenosti, i primenjen je prilikom projektovanja kontrolera za regulisanje proklizavanja točka. Predložena struktura upravljanja sastoji se od konvencionalnog kontrolera i neuro-fazi feedback kontrolera. Poslednji je primenjen u cilju obezbeđivanja globalne asimptotske stabilnosti i kao inverzni referentni model odziva objekta upravljanja. Njegov izlaz je upotrebljen kao signal greške za online algoritam učenja koji je primenjen za podešavanje parametara neuro-fazi kontrolera. U (Lin, 2003(b)) predloženo je hibridno upravljanje s rekurentnom neuronskom mrežom (RNM) za ABS. Ovaj hibridni upravljački sistem sastoji se od idealnog i kompenzacionog kontrolera. Idealni kontroler, koji se sastoji od RNM observera, je zapravo glavni kontroler, a kompenzacioni vrši kompenzaciju razlike između realne i estimirane vrednosti neodređenosti u sistemu.

U (Yuanwei, 2009) opisana je dinamika jedne četvrtine vozila i predložen je robustni zakon upravljanja na osnovu kliznog režima koji se bazira na neuronskoj mreži s funkcijama radijalnog bazisa<sup>21</sup> (RBF). Ovakav pristup primenjen je za upravljanje proklizavanjem kod

---

<sup>19</sup> eng. Multi Input Multi Output

<sup>20</sup> eng. Single Input Single Output

<sup>21</sup> eng. Radial Basis Function

vozila. Kao dodatak, uvedena je i pomerajuća klizna hiperpovršina koja se pomera do željene klizne hiperpovršine tako da se obezbedi brže praćenje reference. Na taj način, skraćuje se faza dosezanja kod kliznih režima i garantuje se robustnost sistema tokom celog procesa upravljanja.

### 6.3.2 Projektovanje UKR-a sa estimatorom greške modeliranja dobijenim uz pomoć neuronske mreže

Zbog prisustva neodređenosti u sistemu postoji greška u stacionarnom stanju koja može da bude smanjena ukoliko se estimator greške modeliranja implementira kao dodatna komponenta zakona upravljanja (Zeinali, 2010). S druge strane, već je pokazano da primena veštačke neuronske mreže u upravljačkoj logici značajno povećava robustnost i stabilnost pojedinih sistema (Munoz, 2000; Song, 2008). Imajući to u vidu, u ovom odeljku, procena greške modeliranja u narednom vremenskom trenutku uzorkovanja izvršiće se primenom poboljšane neuronske mreže (ubacivanjem ortogonalnih funkcija u određenom sloju) i rezultujući signal biće dodat u predloženi DUKKR. Pored toga, da bi se realizovalo predloženo upravljanje biće potrebna još jedna neuronska mreža koja će se koristiti za modeliranje objekta upravljanja.

Uzmimo u razmatranje nelinearni diskretni sistem oblika (5.1). Ukoliko pretpostavimo da postoji model u sledećem obliku:

$$\tilde{y}_{k+1} = \tilde{f}_k + \tilde{g}_k u_k, \quad (6.22)$$

gde  $\tilde{f}_k = \tilde{f}(y_k, \dots, y_{k-n})$  i  $\tilde{g}_k = \tilde{g}(y_k, \dots, y_{k-n})$  označavaju odgovarajuće estimirane vrednosti funkcija  $f_k$  i  $g_k$ . Nadalje je postupak projektovanja upravljanja potpuno isti kao u odeljku 5.2, s tim što se sada umesto nominalnih koriste estimirane vrednosti funkcija. U odeljku 5.2.2 pokazano je da tačnost sistema u stacionarnom stanju zavisi od izraza  $c_0(\varepsilon_{k+1} - \varepsilon_k)$ . Ukoliko su u sistemu prisutne velike neodređenosti, takođe će greška modeliranja, a samim tim i greška praćenja biti veća u stacionarnom stanju. U tom slučaju neophodno je da se poveća vrednost parametra  $\alpha$  da bi se uspostavio kvazi-klizni režim što neminovno dovodi do povećanja četeringa. Da bi se izbegao dalji porast parametra  $\alpha$ , najbolje rešenje je da se smanji uticaj neodređenosti u sistemu uvođenjem estimirane vrednosti greške modeliranja u zakon upravljanja. U cilju povećanja tačnosti u stacionarnom stanju, biće predloženo upravljanje neuronskom mrežom s kvazi-kliznim režimom (NUKKR) u sledećem obliku:



$$\begin{aligned}
 u_k = & -\frac{1}{c_0 \tilde{g}_k} \left( c_0 (\tilde{f}_k - r_{k+1}) + c_1 e_{k-1} + \dots \right. \\
 & \left. \dots + c_n e_{k-n} + (\alpha T / (1 - z^{-1})) \operatorname{sgn}(s_k) + c_0 \eta_{k+1} \right), \quad (6.23)
 \end{aligned}$$

gde  $\eta_{k+1}$  predstavlja aproksimacionu vrednost greške modeliranja  $\varepsilon_{k+1}$  u narednom trenutku.

Zamenom (6.23) u (5.1), dinamika prekidačke funkcije može da bude opisana sa:

$$s_{k+1} = s_k - \alpha T \operatorname{sgn}(s_k) + c_0 (\varepsilon_{k+1} - \eta_{k+1} - (\varepsilon_k - \eta_k)). \quad (6.24)$$

Kako bi se obezbedio kvazi-klizni režim i stabilnost u sistemu, opisanim sa (5.1) i (6.23), polinom  $C(z^{-1})$  treba da bude Džurijev i, slično teoremi 5.2, parametar  $\alpha$  mora da zadovolji sledeću nejednakost:

$$\alpha T > \Delta E^\eta > \max \left| c_0 (\varepsilon_{k+1} - \eta_{k+1} - (\varepsilon_k - \eta_k)) \right|, \quad (6.25)$$

tj., kvazi-klizni režim je uspostavljen u sledećem domenu:

$$S^\eta(T) = \{s_k : |s_k| < \alpha T + \Delta E^\eta\}. \quad (6.26)$$

Vrednost parametra  $\eta_{k+1}$  je estimirana funkcijom  $E_{k+1}$ , koja se podešava na osnovu online algoritma, tako da:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} E_{k+1} = \varepsilon_{k+1}, \quad (6.27)$$

i, prema tome,  $\Delta E^\eta \rightarrow 0$  kada  $k \rightarrow \infty$ . Ukoliko pretpostavimo da će se razlika između greške modeliranja  $\varepsilon_{k+1}$  i njene estimirane vrednosti  $\eta_{k+1}$  smanjivati tokom vremena, može se doći do zaključka da maksimalna vrednost za  $\Delta E^\eta$  biće kada je  $k=0$ . Uzimajući ovo u obzir, početna vrednost predloženog upravljanja biće nulta vrednost za  $\eta_{k+1}$ , pa maksimalna vrednost za  $\alpha T$  biće  $\Delta E$ . Na ovaj način, na osnovu (6.26) i (6.27), može da se zaključi da kvazi-klizni režim postoji u oblasti:

$$S(T) = \{s_k : |s_k| < \alpha T\}, \quad \alpha T = \Delta E. \quad (6.28)$$

Poslednja nejednakost znači da će, na kraju, kretanje u kvazi-kliznom režimu da se odvija u oblasti najmanje širine. Samim tim, ovo kretanje je sada preneto na najmanju moguću grešku praćenja u skladu sa definicijom prekidačke funkcije. U cilju sprovođenja predloženog zakona upravljanja (6.23), biće potrebno da se koriste dva tipa neuronskih mreža: jedan za modeliranje objekta upravljanja; a drugi za predikciju greške modeliranja.

Obe predložene strukture neuronske mreže koristiće skoro ortogonalne funkcije koje su već bile predmet razmatranja u odeljku 2.5. Ovi polinomi mogu da se koriste prilikom projektovanja tradicionalnih neuronskih mreža kao zamena za postojeće funkcije u okviru određenog sloja. Pored toga, upotreba faktora  $\delta$  kao spoljašnjeg stimulansa ili hormonalnog efekta, performanse neuronskih mreža mogu da se u značajnoj meri poboljšaju.

### Skoro ortogonalni endokrini sistem sa adaptivnim neuro-fazi zaključivanjem

Za modeliranje sistema biće upotrebljena nova struktura sačinjena od sistema sa adaptivnim neuro-fazi zaključivanjem<sup>22</sup> (ANFIS) i skoro ortogonalnih funkcija. Ubacivanjem endokrinog faktora u ovu strukturu dobijen je skoro ortogonalni endokrini ANFIS (SOEANFIS) prikazan na slici 6.8. Naime, za modeliranje nelinearnog sistema (5.1) biće nam potrebne dve neuronske mreže iste strukture, jedna za modeliranje funkcije  $f_k$  i jedna za modeliranje funkcije  $g_k$ . Klasični ANFIS je neuronska mreža koja oponaša Sugeno fazi model gde je skup fazi pravila generisan na osnovu datog skupa ulaza i izlaza sistema. Obično, Sugeno fazi pravila imaju sledeću formu:

$$\begin{aligned} & \text{IF } x_1 \text{ is } A_{1j} \text{ AND } x_2 \text{ is } A_{2j} \dots \text{ AND } x_i \text{ is } A_{ij} \dots \\ & \dots \text{ AND } x_n \text{ is } A_{nj} \text{ THEN } y_j = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \end{aligned} \quad (6.29)$$

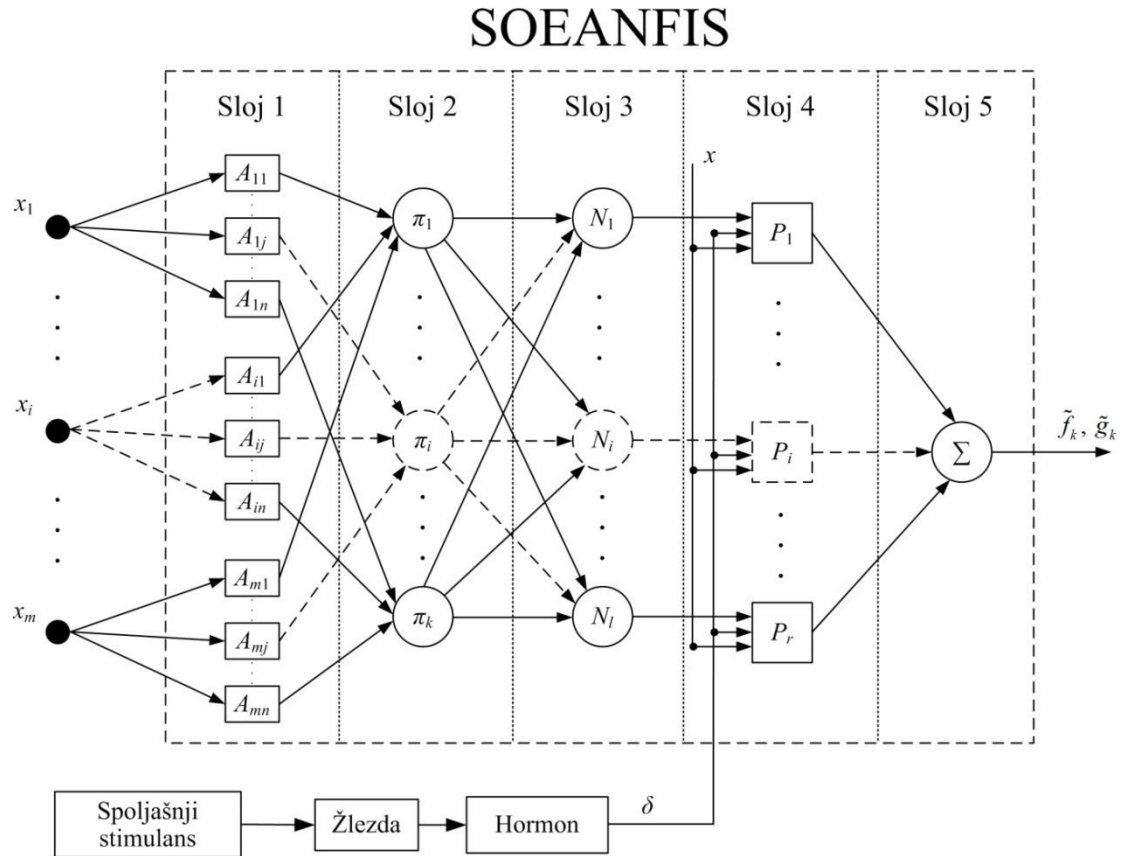
gde su  $x_1, x_2, \dots, x_n$  ulazne promenljive,  $A_{ij}$  predstavljaju fazi skupove, i  $y_j$  je konstantna ili linearna funkcija ulaznih promenljivih. ANFIS je obično feedforward neuronska mreža koja se sastoji od pet slojeva (Jang, 1997). Spoljašnji ulazni signali se najpre propuštaju kroz fazifikacioni sloj, i u ovom odeljku, koristiće se jednostavne zvonaste aktivacione funkcije za neurone u ovom sloju. Svaki neuron u drugom sloju odgovara pojedinačnim fazi pravilima Sugenovog tipa i ima za cilj da izračuna jačinu ispaljivanja pravila na osnovu ulaza iz odgovarajućeg neurona. Normalizovane vrednosti jačina ispaljivanja datog pravila se izračunavaju uz pomoć neurona u trećem sloju, na osnovu izlaza svih neurona u prethodnom sloju.

Sledeći sloj predstavlja defazifikacioni sloj gde svaki neuron izračunava vrednost određenog pravila u vidu konstante ili linearne kombinacije ulaza sistema. Osnovna ideja je da se singleton funkcije u neuronima ovog sloja zamene skoro ortogonalnim funkcijama

---

<sup>22</sup> eng. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System

opisanim sa (2.30) i (2.31), pošto bi ortogonalna svojstva ovih funkcija trebalo da obezbede bolju aproksimaciju sa kraćim vremenom obuke (samo jedan parametar treba da bude podešen umesto njih nekoliko).



Slika 6.8 Struktura neuronske mreže upotrebljene za modeliranje objekta upravljanja.

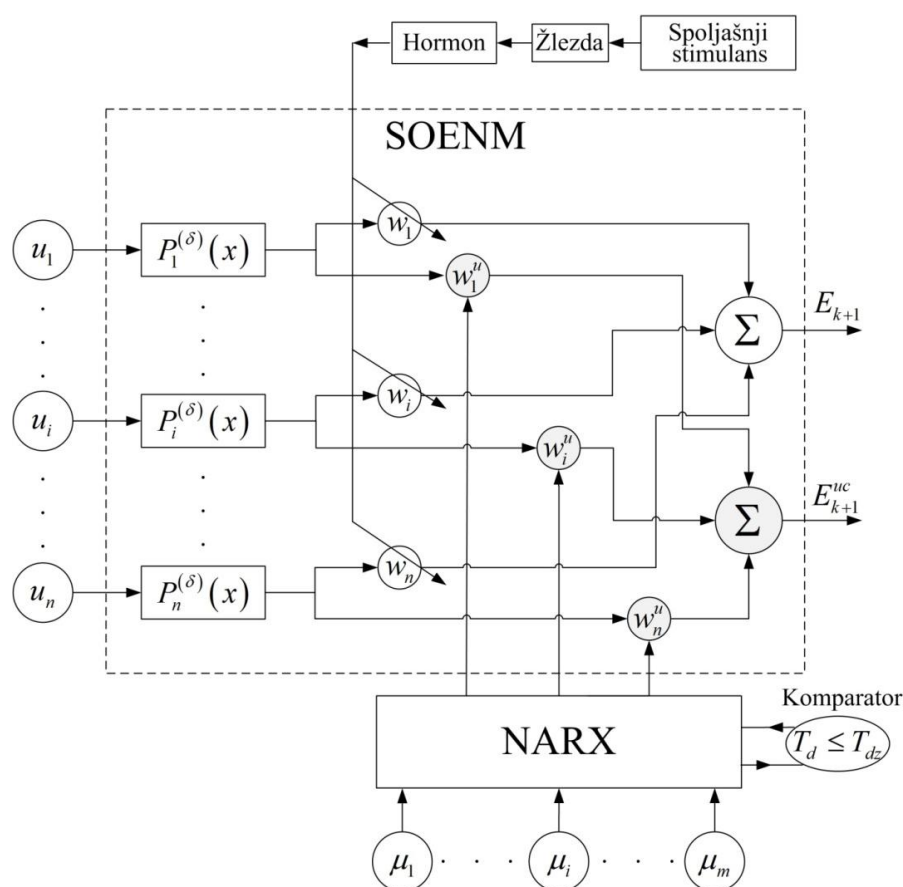
Druga promena u regularnoj ANFIS strukturi je uvođenje adaptivnog faktora u neurone četvrtog sloja. Kao što je već pomenuto, postoji nekoliko radova objavljenih u poslednjih nekoliko godina koji se bave uvođenjem endokrine komponente u neuronske mreže. Ideja je da se imitira prirodni proces u kome je ponašanje neurona regulisano lučenjem hormona iz žlezda endokrinog sistema. Nasuprot ovim radovima (Timmis, 2009; Sauze, 2013; Chen, 2014), gde se hormoni obično koriste za modifikaciju težina neurona u veštačkim neuronskim mrežama na osnovu spoljašnjih uslova, ovde je ideja da se ovaj stimulans uvede direktno u neurone četvrtog sloja, preko parametra  $\delta$  u (2.30), kao reakciju na promenu nominalnih vrednosti komponenti dinamičkog sistema pod dejstvom izmenjenih uslova rada.

Peti i završni sloj ima samo jedan neuron koji izračunava zbir izlaza svih defazifikacionih neurona kako bi proizveli ukupni izlaz is ANFIS-a. Zapravo, cela struktura neuronske mreže imitira funkcionalnost Sugeno fazi modela s jednom važnom prednošću-

ANFIS ima sposobnost da sama sebi podesi parametre i funkcije pripadnosti tokom trenažnog procesa.

### Učitelj-učenik struktura neuronske mreže

Uvedena je poboljšana struktura neuronske mreže, nazvana učitelj-učenik neuronska mreža (UUNM), koja se sastoji od jednoslojne skoro ortogonalne endokrine neuronske mreže (SOENM) i nelinearne autoregresivne neuronske mreže sa spoljašnjim ulazom<sup>23</sup> (NARX) (videti sliku 6.9).



Slika 6.9 Struktura neuronske mreže upotreblljene za predikciju greške modeliranja.

Pošto su elementi SOENM-a ortogonalni u vremenu, glavna prednost korišćenja ove neuronske mreže je odsustvo traženja lokalnog minimuma, pružajući, na taj način, konvergenciju procesa obuke (ograničenje prisutno u konvencionalnim neuronskim mrežama). Ova mreža će u predloženoj strukturi igrati ulogu učenika. Imajući u vidu dobre sposobnosti predviđanja NARX-a, ova mreža predstavljaće online učitelja i biće aktivirana

<sup>23</sup> eng. Nonlinear AutoRegressive neural network with eXternal input

sve dok se jednoslojni SOENM ne obuči dovoljno, odnosno dok se njegove težine pravilno ne podeše. Pored toga, ovde se uvodi podsticaj životne sredine koji će se koristiti za podešavanje težina SOENM-a.

Prilikom definisanja funkcije neurona u odgovarajućem sloju SOENM-a biće upotrebljen skoro ortogonalni bazis opisan sa (2.30). Izlaz ove mreže je određen sledećom jednačinom:

$$E_{k+1} = \sum_{i=1}^n w_i f_i^{(\delta)}(u_i), \quad (6.30)$$

gde je  $u_i$  ulaz u mrežu,  $f_i^{(\delta)}$  je skoro ortogonalna funkcija, i  $w_i$  je odgovarajuća težina neuronske mreže. Funkcija  $f_i^{(\delta)}(u_i)$  odgovara  $i$ -toj funkciji  $i$ -tog neurona u prvom sloju, tj.  $f_i^{(\delta)}(u_i) = P_{i-1}^{(\delta)}(x)$  pri čemu je  $P_{i-1}^{(\delta)}(x)$  definisan sa (2.30).

Na sličan način, definišimo izlaz  $E_{k+1}^{uc}$  kao:

$$E_{k+1}^{uc} = \sum_{i=1}^n w_i^u f_i^{(\delta)}(\mu_i), \quad (6.31)$$

gde je  $\mu_i$  ulaz, a  $w_i^u$  izlaz NARX-a.

NARX (učitelj) za date ulaze  $\mu_1 - \mu_m$  generiše određene izlaze koji predstavljaju i težine koeficijenata  $w_1^u - w_n^u$  predložene strukture (slika 6.9). Istovremeno, jednoslojni SOENM (učenik) podešava svoje parametre na osnovu datih skoro ortogonalnih funkcija (2.30) i podsticaja životne sredine, što je u ovom slučaju parametar  $T_d$ . Ovaj parametar se izračunava kao  $T_d = E_{k+1}^{uc} - E_{k+1}$  i on predstavlja ukupnu vrednost razlike između ova dva izlaza. Osnovni cilj je smanjenje vrednosti ovog parametra (idealno, na vrednost nula). Ova vrednost se, takođe, koristi kao ulaz za učiteljsku mrežu i u svakom koraku ona se direktno poredi sa zadatom maksimalnom razlikom  $T_{dz}$ . Ako je ispunjen uslov  $T_d \leq T_{dz}$ , onda je učenik adekvatno obučen. Upotrebom UUNM strukture iskorišćene su dobre osobine predikcije učiteljske mreže, a nakon završetka procesa obuke, predviđanje se obavlja samo uz pomoć SOENM-a, koji će taj zadatak da izvrši znatno brže zbog svoje jednostavne strukture.

## Primena na ABS

Kako bi se obezbedila nulta vrednost prekidačke funkcije, a samim tim i signala greške, predloženo upravljanje opisano sa (6.23) je blago promenjeno za slučaj ABS-a i sada ima oblik:

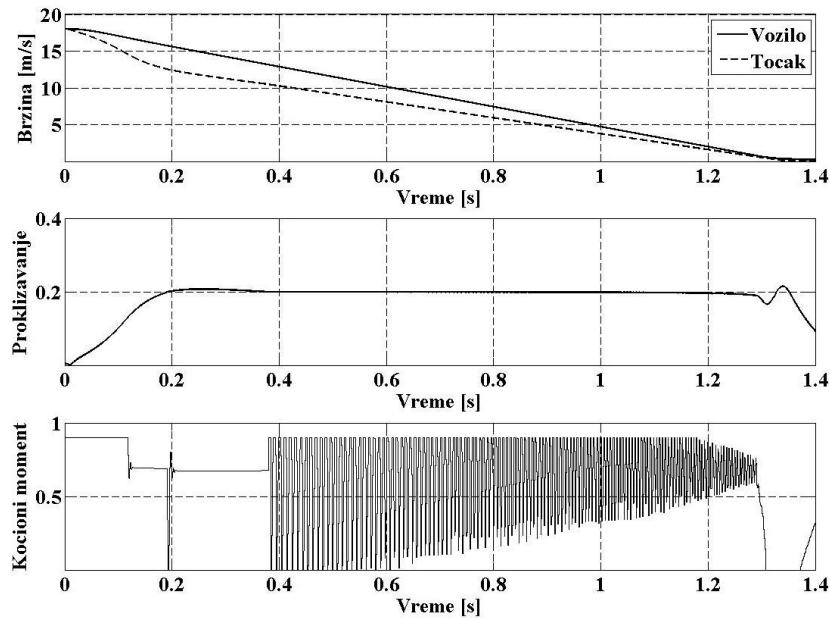
$$M_{1k} = -\frac{1}{\tilde{g}_k^d} \left( \tilde{f}_k^d - \lambda_{k+1}^{ref} + \frac{\alpha T}{1-z^{-1}} \text{sgn}(s_k) + \eta_{k+1} \right), \quad (6.32)$$

gde je  $\lambda_{k+1}^{ref} = \lambda_k^{ref} = \text{const}$ . Prekidačka funkcija je u ovom slučaju opisana sa (6.24) i parametar kontrolera  $\alpha$  je izabran u skladu sa (6.25).

Za dobijanje aproksimacionih funkcija  $\tilde{f}_k$  i  $\tilde{g}_k$ , upotrebljene su dve SOEANFIS mreže sa po sedam ulaza i jednim izlazom. Ulazi ovih mreža su: greške modeliranja  $\varepsilon_k$ ,  $\varepsilon_{k-1}$ , ugaone brzine gornjeg točka  $x_{1k}$ ,  $x_{1k-1}$ , ugaone brzine donjeg točka  $x_{2k}$ ,  $x_{2k-1}$ , i kočioni moment  $M_{1k-1}$ . Upotrebljene SOEANFIS mreže imaju tri generalizovane zvonaste funkcije pripadnosti za svaki od sedam ulaza, a parametar  $\delta$  je iskorišćen kao hormonalni efekat. Kočioni moment  $M_{1k}$  je izabran da bude spoljašnji stimulans. Za predikciju greške modeliranja upotrebljena je UUNM struktura. SOENM ima iste ulaze kao i prethodna mreža. Parametar  $T_d$  je upotrebljen kao spoljašnji stimulans, a parametri  $\delta$  i  $T_{dz}$  izabrani su da budu 1,0325 i 0,001, respektivno. NARX je sačinjen od jednog skrivenog sloja sa 12 neurona unutar njega. Optimalan broj neurona je utvrđen empirijski. Ova mreža ima četiri ulaza:  $x_{1k-1}$ ,  $x_{2k-1}$ ,  $\varepsilon_{k-1}$  i  $T_d$ , i sedam izlaznih vektora (težine UUNM strukture). Treba napomenuti i da su svi vektori izvučeni iz realnih podataka ABS-a.

### 6.3.2.1 Simulacioni rezultati

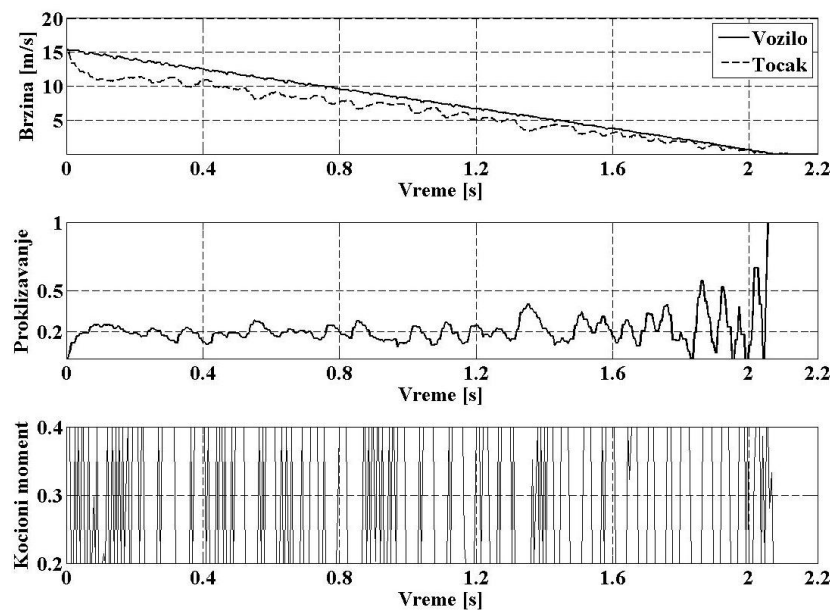
Simulacioni rezultati primene predloženog upravljanja (6.32) prikazani su na slici 6.10. Kao što može da se vidi sa slike, praćenje referentne vrednosti od 0,2 je veoma dobro, a i sam efekat četeringa je znatno smanjen. Dobijeni rezultati su slični primeni DUKKR-a s estimatorom poremećaja jer je priroda predloženog upravljanja slična. S druge strane, očekuje se da eksperimentalni rezultati pokažu značajniju prednost predloženog upravljanja usled boljeg modeliranja realnog sistema i predikcije greške.



Slika 6.10 Simulacioni rezultati primene zakona upravljanja (6.32).

### 6.3.2.2 Eksperimentalni rezultati

Na slici 6.11 dat je prikaz eksperimentalnih rezultata dobijenih primenom NUKKR-a opisanog jednačinom (6.32). Usled predikcije greške modeliranja u realnom vremenu i boljeg modeliranja ABS-a u realnim uslovima, sa slike može da se primeti da je efekat četeringa u znatnoj meri smanjen u odnosu na upravljanje (5.55), a pritom se referentna vrednost prati u određenim granicama i pored prisustva spoljašnjih poremećaja, nemodelirane dinamike i šuma.



Slika 6.11 Eksperimentalni rezultati primene zakona upravljanja (6.32).

Da bi se opravdala integracija SOENM-a i NARX-a, izvršeni su eksperimenti s različitim kombinacijama ovih mreža. Na osnovu rezultata prikazanih u tabeli 6.1, može se zaključiti da UUNM struktura daje najmanju grešku obučene mreže i istovremeno je vreme izvršavanja obučene mreže znatno manje kada je NARX deaktiviran. Kao što može da se vidi iz rezultata individualne primene NARX-a i SOENM-a, ove mreže imaju manja vremena izvršavanja, ali njihove greške su mnogo veće nego u slučaju sa UUNM. Štaviše, broj iteracija i greške u procesu učenja takođe favorizuje UUNM strukturu.

Tabela 6.1 Poređenje različitih struktura neuronskih mreža.

		UUNM sa/bez deaktivacije	NARX	SOENM
Proces učenja	Greška (MSE)	0,00156/0,00144	0,000743	0,00320
	Vreme izvršavanja [s]	12,913/25,745	16,452	2,432
	Broj iteracija	52/46	152	126
Istrenirana mreža	Greška (MSE)	0,000430/0,000986	0,00215	0,00856
	Vreme izvršavanja [s]	1,420/6,221	2,945	0,92
	Broj iteracija	6/7	9	7

Imajući u vidu da je preciznost veoma značajna u našem slučaju, ANFIS je pravi izbor, zato što je strukturalno projektovan za modeliranje dinamičkih sistema i veću preciznost. Uporedni rezultati za dva tipa ANFIS-a u obliku srednje kvadratne greške (SKG) i potrebnog vremena izvršenja dati su u tabeli 6.2. Upoređujući ova dva tipa, možemo da vidimo napredak u preciznosti kada se radi o SOEANFIS-u, koji je rezultat prirodnog svojstva ortogonalne baze da aproksimira signal na optimalan način, za razliku od slučajno distribuiranih singleton funkcija. S druge strane, manje vreme izvršavanja je uslovljeno treniranjem i podešavanjem samo jednog parametra u četvrtom sloju mreže.

Tabela 6.2 Komparativna analiza tradicionalne i unapređene ANFIS mreže.

Tip	ANFIS	SOEANFIS
SKG prilikom treninga	5,2132	4,7651
SKG prilikom validacije	9,2564	5,2891
Vreme izvršavanja [s]	20,1853	15,9354



# Zaključak

Predmet proučavanja ove doktorske disertacije bila je mogućnost projektovanja i primene različitih algoritama u upravljanju sistemom protiv blokiranja točkova (ABS), u cilju poboljšanja performansi sistema, a samim tim i povećanju bezbednosti putnika u saobraćaju prilikom naglog kočenja. Uzevši u obzir da je model koji opisuje dinamiku ABS-a strogo nelinearan, usled varijacije vrednosti parametara tokom normalne eksploatacije, nelinearnih karakteristika samog procesa kočenja i spoljašnjih poremećaja koji deluju na sistem, kao logičan odgovor na zahteve upravljanja ovim sistemom nameće se neka od robustnih tehnika upravljanja. Kao što je već dobro poznato, klizni režimi su se pokazali kao veoma efikasna metoda prilikom upravljanja nelinearnim sistemima sa neodređenostima i poremećajima upravo zbog njihove robustnosti i invarijantnosti na promene parametara.

Shodno tome, prva tri poglavlja za cilj imaju upoznavanje sa ABS-om kao aktivnim sistemom bezbednosti u vozilu i osnovnim pojmovima izabrane metode upravljanja. U prvom poglavlju, dat je istorijski razvoj ABS-a i predstavljene su osnovne komponente standardnog kočionog sistema. Nakon toga, opisane su komponente ABS-a i prikazan je njegov osnovni princip rada. Na kraju ovog poglavlja, opisana je laboratorijska maketa ABS-a, koja je upotrebljena prilikom ispitivanja efikasnosti primene svih metoda upravljanja obrađenih u disertaciji. Drugo poglavlje posvećeno je opisivanju dinamike ABS-a i razvijanju nekoliko modela primenom različitih metoda modeliranja. Najpre je od matematičkog modela izveden novi oblik modela ABS-a u funkciji od proklizavanja točka, a nakon toga je dobijen i vremenski-diskretni model ABS-a primenom procesa diskretizacije. Dodatno, izvedeni su bond graf i ortogonalni modeli ABS-a. Prednost bond graf modela ogleda se u lakšoj modifikaciji već razvijenog modela, dok se ortogonalni model pokazao kao veoma pogodan prilikom projektovanja nekih algoritama upravljanja. Uzimajući u obzir činjenicu da su svi algoritmi projektovani na osnovu kliznih režima ili klizni režimi čine bar deo upravljačke logike, u trećem poglavlju dat je kratak pregled teorije upravljanja promenljive strukture s posebnim osvrtom na klizne režime.

Četvrto poglavlje ispituje mogućnost primene nekoliko algoritama upravljanja s kliznim režimom (UKR) u vremenski-kontinualnom domenu. Najpre je data matematička osnova opisanih algoritama a, nakon toga, izvršeno je ispitivanje efikasnosti predloženih algoritama kroz digitalne simulacije i eksperimente na realnom ABS-u. Kao poseban oblik upravljanja treba istaći novoprojektovano upravljanje koje se zasniva na kombinaciji kliznih

režima i ortogonalnih filtara. Ovde su, korišćenjem ortogonalnih filtara, za različite radne tačke, generisani različiti modeli u vidu funkcije prenosa drugog reda s konačnom stabilnom nulom za koje je kasnije projektovano upravljanje. Pokazano je da se najbolje performanse sistema, u vidu boljeg praćenja referentne vrednosti i smanjenog efekta četeringa, dobijaju prilikom primene UKR-a s proporcionalno plus konstantnim zakonom dosezanja.

Predmet istraživanja petog poglavlja je projektovanje i primena digitalnih upravljanja s kvazi-kliznim režimom (DUKKR) na osnovu modela ABS-a u vremenski-diskretnom domenu. Najpre su prikazana tri algoritma upravljanja koja se projektuju na osnovu modela ulaz-izlaz. Problem četeringa je ovde ublažen ubacivanjem digitalnog integratora ispred relejne komponente zakona upravljanja. Pitanje tačnosti u stacionarnom stanju je rešeno uvođenjem estimirane vrednosti greške modeliranja u zakon upravljanja. Kao još jedan od načina upravljanja, predložena je kombinacija DUKKR-a i upravljanja minimalne varijanse, zadržavajući pritom dobre osobine obe metode. Prilikom projektovanja ovog algoritma upravljanja iskorišćen je već dobijeni model ABS-a na bazi ortogonalnih filtara. Za svaki od projektovanih algoritama, zakon upravljanja prilagođen je formi pogodnoj za primenu prilikom upravljanja ABS-om, a nakon toga svaki od algoritama je verifikovan kroz digitalne simulacije i eksperimente na laboratorijskoj maketi. Dobijeni rezultati su pokazali da se najbolje performanse postižu primenom DUKKR-a koji u svom zakonu upravljanja sadrži digitalni integrator i estimator greške modeliranja.

Prethodna razmatranja dovela su do zaključka da će kombinacija nekoliko savremenih tehnika upravljanja dovesti do još boljih performansi prilikom upravljanja ABS-om. Ova konstatacija proizilazi iz činjenice da svaka od postojećih metoda poseduje dobre osobine prilikom njihove pojedinačne primene kod određenih tipova problema upravljanja. Tako na primer, fazi teorija je veoma pogodna prilikom rada sa sistemima čiji model nije u dovoljnoj meri opisan. Imajući ovo u vidu, u narednom koraku projektovan je fazi-klizni regulator kod koga je fazi teorija iskorišćena prilikom definisanja slobodnih parametara UKR-a s proporcionalno plus konstantnim zakonom dosezanja. Fazi pravila definisana su na osnovu udaljenosti fazne trajektorije sistema od klizne hiperpovršine i brzine prilaza vektora stanja kliznoj hiperpovršini. Nakon toga, u fazi-klizni regulator uveden je genetički algoritam koji prilikom definisanja prekidačke funkcije nalazi optimalno rešenje za njene parametre. Na kraju ovog poglavlja pokazano je da neuronske mreže mogu da se uspešno implementiraju prilikom modeliranja i upravljanja nelinearnih sistema. Naime, pokazano je da sistem sa adaptivnim neuro-fazi zaključivanjem, uz ubacivanje ortogonalnih funkcija u pretposlednjem sloju svoje strukture, može da verno predstavi objekat upravljanja. U ovom slučaju, nameće

se jedna velika prednost, a to je da model može da se adaptira na promenu parametara usled prisustva spoljašnjeg stimulansa u vidu lučenja hormona iz žlezda endokrinog sistema. Još jedna primena neuronske mreže prikazana je kroz modifikovani zakon UKR-a u vidu dodavanja novog elementa, koji estimira vrednost greške modeliranja u narednom trenutku. Ova struktura je jedna potpuno nova struktura koja se sastoji od ortogonalne endokrine neuronske mreže i nelinearne autoregresivne neuronske mreže sa spoljašnjim ulazom. Pokazano je da su glavne prednosti ove strukture malo vreme izvršavanja i mala greška obučene mreže.

U disertaciji je obrađen problem sistema tipa regulator, gde se vrednost proklizavanja održava konstantnim tako da se obezbedi maksimalna vrednost koeficijenta prijanjanja. Međutim, u poslednje vreme veoma je prisutan prilaz kod kojeg se za vrednost proklizavanja ne uzima konstanta, već se ona menja za različite površine po kojoj se vozilo kreće. Shodno ovome, dalja istraživanja u ovoj oblasti mogu da se sprovedu u dva pravca. Kod prvog, problematika se ogleda u tome da se sada više ne radi o sistemu tipa regulatora već o problemu tipa praćenja, pa se otvara mogućnost za primenu novih i modifikaciju postojećih algoritama upravljanja, koji će da odgovore ovom izazovu. S druge strane, usled nedostupnosti odgovarajućih senzora na tržištu, koji bi detektovali površinu po kojoj se vozilo kreće, nameće se drugi pravac istraživanja, u kome bi neophodna detekcija bila izvršena primenom neke nove teorije.

## **Doprinosi doktorske disertacije**

Doktorska disertacije sadrži sledeće doprinose:

- formiranje modela sistema protiv blokiranja točkova (ABS) u vremenski-kontinualnom domenu;
- formiranje modela ABS-a u odnosu na proklizavanje točka;
- formiranje modela ABS-a u vremenski-diskretnom domenu;
- formiranje modela ABS-a primenom bond graf tehnike;
- formiranje modela ABS-a primenom ortogonalnih filtara;
- projektovanje novih i modifikacija postojećih algoritama zasnovanih na kliznom režimu u vremenski-kontinualnom domenu, i njihova primena u upravljanju ABS-om;
- projektovanje novih i modifikacija postojećih algoritama zasnovanih na kliznom režimu u vremenski-diskretnom domenu, i njihova primena u upravljanju ABS-om;
- projektovanje upravljanja zasnovanog na primeni kliznih režima i ortogonalnih modela;
- projektovanje digitalnih upravljanja s kliznim režimom (DUKR) zasnovanih na nelinearnom diskretnom modelu ulaz-izlaz;
- projektovanje DUKR-a zasnovanog na upravljanju minimalne varijanse i korišćenju linearizovanog ortogonalnog modela u vidu funkcije prenosa;
- projektovanje fazi-kliznog regulatora i primena u upravljanju ABS-om;
- projektovanje hibridnog upravljanja korišćenjem fazi logike, kliznih režima i genetičkih algoritama;
- primena sistema sa adaptivnim neuro-fazi zaključivanjem u modeliranju dinamičkih sistema;
- primena nelinearne autoregresivne neuronske mreže sa spoljašnjim ulazom u predikciji greške modeliranja;
- projektovanje hibridnog upravljanja korišćenjem kliznih režima i neuronske mreže;
- verifikacija svih algoritama upravljanja rezultatima simulacije na računaru i niza laboratorijskih eksperimenata;
- komparativna analiza dobijenih rezultata s rezultatima primene poznatih algoritama i metoda upravljanja.

# Literatura

- Akbarzadeh, M.-R., K.-J. Emami, N. Pariz, "Adaptive Discrete-Time Fuzzy Sliding Mode Control for Anti-Lock Braking Systems", *Annual Meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society Proceedings, NAFIPS-FLINT 2002*, pp. 554-559, 2002.
- Aly, G. M., W. G. All, "Digital Design of Variable Structure Control Systems", *International Journal of Systems Science*, vol. 21, no. 8, pp. 1709-1720, 1990.
- Antić, D., S. Dimitrijević, "Non-Minimum Phase Plant Control Using Fuzzy Sliding Mode", *Electronic Letters*, vol. 34, no. 11, pp. 1156-1158, 1998.
- Antić, D., V. Nikolić, D. Mitić, M. Milojković, S. Perić, "Sliding Mode Control of Anti-lock Braking System: An Overview", *Facta Universitatis, Series: Automatic Control and Robotics*, vol. 9, no. 1, pp. 41-58. 2010.
- Antić, D., B. Danković, S. Nikolić, M. Milojković, Z. Jovanović, "Approximation Based on Orthogonal and Almost Orthogonal Functions", *Journal of the Franklin Institute*, vol. 349, no. 1, pp. 323-336, 2012.
- Back, T., "Evolutionary Algorithms in Theory and Practice", *Oxford University Press*, 1996.
- Z. Michalewicz, "Genetic Algorithms + Data Structure = Evolution Programs", *Springer-Verlag*, Berlin, 1996.
- Bakker, E. T., H. B. Pacejka, L. Linder, "A New Tire Model with an Application in Vehicle Dynamic Studies", *SAE Technical Paper 870421*, 1982.
- Bartolini, G., A. Ferrara, V. Utkin, "Adaptive Sliding Mode Control in Discrete-Time Systems", *Automatica*, vol. 32, no. 5, pp. 796-773, 1995.
- Bartoszewicz, A., "Remarks on Discrete-Time Variable Structure Control Systems", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 43, no. 1, pp. 235-238, 1996.
- Bartoszewicz, A., "Discrete-Time Quasi-Sliding-Mode Control Strategies", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 45, no. 4, pp. 633-637, 1998.
- Basin, M., P. R. Ramirez, A. Ferrara, D. C. Alvarez, "Sliding Mode Optimal Control for Linear Systems", *Journal of the Franklin Institute*, vol. 349, no. 4, pp. 1350-1363, 2012.
- Borutzky, W., "Bond Graphs-A Methodology for Modelling Multidisciplinary Dynamic Systems", *SCS Publishing House*, Erlangen, San Diego, 2004.
- Bos, A. M., "Modeling Multibody Systems in Terms of Multibond Graphs, with Application to a Motorcycle", *PhD thesis*, Twente University, 1986.

- Broenink, J. F., "Introduction to Physical Systems Modeling with Bond Graphs", *SiE whitebook on Simulation Methodologies*, 2001.
- Burckhard, M., "Fahrwerktechnik: Radschlupf-Regelsysteme", *Vogel-Verlag*, Wurtzburg, 1993.
- Camacho, O., C. Smith, W. Moreno, "Development of an Internal Model Sliding Mode Controller", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 42, no. 3, pp. 568-573, 2003.
- Caudill, M., "Neural Networks Primer: Part I", *AI Expert*, vol. 2, no. 12, pp. 46-52, 1987.
- Chen, D., J. Wang, F. Zou, W. Yuan, W. Hou, "Time Series Prediction With Improved Neuro-Endocrine Model", *Neural Computing and Application*, vol. 24, no. 6, pp. 1465-1475, 2014.
- Cho, J., J. C. Principe, D. Erdogmus, M. A. Motter, "Quasi-Sliding Mode Control Strategy Based on Multiple-Linear Models", *Neurocomputing*, vol. 70, no. 4-6, pp. 960-974, 2007.
- Cho, W., "A Bond Graph Approach to the Modeling of General Multibody Dynamics Systems", *KEME International Journal*, vol. 12, no. 5, pp. 888-898, 1998.
- Chun, K., M. Sunwoo, "Wheel Slip Control with Moving Sliding Surface for Traction Control System", *International Journal of Automotive Technology*, vol. 5, no. 2, pp. 123-133, 2004.
- Corradini, M. L., G. Orlando, "Discrete Variable Structure Control for Nonlinear Systems", *3rd European Control Conference*, Rome, Italy, pp. 1465-1470, 1995.
- Danković, B., D. Antić, Z. Jovanović, M. Milojković, "Genetic Algorithms Applied in Parameter Optimization of Cascade Connected Systems", *XLII International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies, ICEST 2007*, Ohrid, Macedonia, pp. 557-560, 2007.
- Danković, B., D. Antić, Z. Jovanović, S. Nikolić, M. Milojković, "Systems Modelling Based on Legendre polynomials", *5th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics, SACI 2009*, Timisoara, Romania, pp. 241-246, 2009 (a).
- Danković, B., S. Nikolić, M. Milojković, Z. Jovanović, "A Class of Almost Orthogonal Filters", *Journal of Circuits, Systems, and Computers*, vol. 18, no. 5, pp. 923-931, 2009 (b).
- Dauphin-Tanguy, G., A. Rahmani, C. Sueur, "Bond Graph Aided Design of Controlled Systems", *Simulation Practice and Theory*, vol. 7, no. 5-6, pp. 493-513, 1999.

- DeCarlo, R. A., S. H. Zak, G. P. Matthews, "Variable Structure Control of Nonlinear Multivariable Systems: A Tutorial", *IEEE Proceedings*, vol. 76, no. 3, pp. 212-232, 1988.
- Demić, M., "Kibernetiski Sistem: Čovek-Vozilo-Okruženje", *Centar za Naučna Istraživanja SANU i Univerziteta u Kragujevcu*, 2008.
- Dereje, S., M. K. Pattanshetti, A. Jain, R. Mitra, "Genetic Algorithm Based Integral Sliding Surface Design and Its Application to Stewart Platform Manipulator Control", *International Journal of Systems Applications, Engineering & Development*, vol. 5, no. 4, pp. 518-528, 2011.
- Drakunov, S., U. Ozguner, P. Dix, B. Ashrafi, "ABS Control Using Optimum Search via Sliding Modes", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 79-85, 1995.
- Draženović, B., "The Invariance Conditions in Variable Structure Systems", *Automatica*, vol. 5, no. 3, pp. 287-295, 1969.
- El Hadri, A., J. C. Cadiou, N. K. M'sirdi, "Adaptive Sliding Mode Control of Vehicle Traction", *15th Triennial World Congress*, Barcelona, Spain, 2002.
- Emami, K. J., M.-R. Akbarzadeh, "Adaptive Discrete-Time Fuzzy Sliding Mode Control for Anti-Lock Braking Systems", *Annual Meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society Proceedings. NAFIPS-FLINT 2003*, pp. 335-340, 2003.
- Emelyanov, S. V., "On Peculiarities of Variable Structure Control Systems with Discontinuous Switching Functions", *Doklady ANSSR*, vol. 153, pp. 776-778, 1963.
- Emelyanov, S. V., V. I. Utkin, V. A. Taran, N. E. Kostyleva, A. M. Shubladze, V. B. Ezerov, Dybrovsky, E. N., "Variable Structure Control Systems Theory", *Nauka*, Moscow, 1970, (in Russian).
- Fallaha, C. J., M. Saad, K. H., Youssef, K. Al-Haddad, "Sliding-Mode Robot Control with Exponential Reaching Law", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 2, pp. 600-609, 2011.
- Filippini, G., N. Nigro, S. Junco, "Vehicle Dynamics Simulation Using Bond Graphs", *International Conference on Integrated Modelling and Analysis in Applied Control and Automation, IMAACA 2007*, Buenos Aires, Argentina, 2007.
- Flight International, "Non-Skid Braking", *Flight*, pp. 587-588, 1953.
- Flightglobal, "Browse Flight's Archive of Historic Aviation", Internet dokument dostupan na web adresi: <http://www.flightglobal.com>, 2014.

- Fu, T., "Modeling and Performance Analysis of ABS Systems with Nonlinear Control", *Concordia University Montreal*, 2000.
- Furuta, K., "Sliding Mode Control of a Discrete System", *Systems & Control Letters*, vol. 14, no. 2, pp. 145-152, 1990.
- Furuta, K., "VSS Type Self-Tuning Control", *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 40, no. 1, pp. 37-44, 1993.
- Gao, W., J. C. Hung, "Variable Structure Control of Nonlinear systems: A New Approach", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 40, no. 1, pp. 45-55, 1993.
- Gao, W., Y. Wang, A. Homaifa, "Discrete-Time Variable Structure Control Systems", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 42, no. 2, pp. 117-122, 1995.
- Gawthrop, P. J., "Bond Graphs: A Representation for Mechatronic Systems", *Mechatronics*, vol. 1, no. 2, pp. 127-156, 1991.
- Gawthrop, P. J., "Physical Model-Based Control: A Bond Graph Approach", *Journal of the Franklin Institute*, vol. 332, no. 3, pp. 285–305, 1995.
- Goldberg, D. E., "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning", *Addison-Wesley, Reading*, 1989.
- Golo, G., Č. Milosavljević, "Robust Discrete-Time Chattering Free Sliding Mode Control", *Systems & Control Letters*, vol. 41, no.1, pp. 19-28, 2000.
- Granda, J. J. "The Role of Bond Graph Modeling and Simulation in Mechatronics Systems: An Integrated Software Tool: CAMP-G, MATLAB–SIMULINK", *Mechatronics*, vol. 12, no. 9-10, pp. 1271-1295, 2002.
- Hamzah, N., M. Y. Sam, A. A. Basari, "Enchancement of Driving Safety Feature via Sliding Mode Control Approach", *Fourth International Conference on Computational Intelligence, Robotics and Autonomuous Systems*, Palmerston North, New Zeland, pp. 116-120, 2007.
- Hao, Y., J. Zhang, Z. Chen, "Adaptive Global Integral Neuro-Sliding Mode Control for a Class of Nonlinear System", *Advances in Neural Networks–ISNN 2007*, Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2007.
- Harifi, A., A. Aghagolzadeh, G. Alizadeh, M. Sadeghi, "Designing a Sliding Mode Controller for Slip Control of Antilock Brake Systems", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 16, no. 16, pp. 731-741, 2008.
- Herrmann, G., S. K. Spurgeon, C. Edwards, "A Model-Based Sliding Mode Control Methodology Applied to the HDA-Plant", *Journal of Process Control*, vol. 13, no. 2, pp. 129-138, 2003.



- Holland, J. H., "Adaptation in Natural and Artificial Systems", *University of Michigan Press, Ann Arbor*, 1975.
- Hrovat, D., J. Asgari, M. Fodor, "Automotive Mechatronic Systems", in: *Mechatronic Systems Techniques and Applications, Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam*, 2000.
- Hu, J., Z. Wang, H. Gao, L. K. Stergioulas, "Robust Sliding Mode Control for Discrete Stochastic Systems With Mixed Time Delays, Randomly Occurring Uncertainties, and Randomly Occurring Nonlinearities", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 7, pp. 3008-3015, 2011.
- Hui, S., S. H. Zak, "On Discrete-Time Variable Structure Sliding Mode Control", *Systems & Control Letters*, vol. 38, no. 4-5, pp. 283-288, 1999.
- Hung, J. Y., W. Gao, J. C. Hung, "Variable Structure Control: A Survey", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 40, no. 1, pp. 2-21, 1993.
- Infantini, M. B., E. A. Perondi, "Anti-lock Braking System Model", *18th International Congress of Mechanical Engineering, COBEM 2005, Ouro Preto, Brasil*, 2005.
- Inteco, "The Laboratory Anti-lock Braking System Controlled from PC", *User's Manual*, 2008.
- Internet dokument, "Mercedes-Benz and the Invention of the Anti-lock Braking System: ABS, Ready for Production in 1978", dostupan na web adresi: <http://media.daimler.com/>, Stuttgart, 2008.
- Internet dokument, Bosh, "ABS – A Success Story", dostupan na web adresi: <http://www.bosch.com/assets/en/company/innovation/theme03.htm>, 2014 (a).
- Internet dokument, dostupan na web adresi: <http://aermech.com/anti-lock-braking-system-abs-working>, 2014 (b).
- Internet dokument, dostupan na web adresi: [http://en.wikipedia.org/wiki/Anti-lock\\_braking\\_system](http://en.wikipedia.org/wiki/Anti-lock_braking_system), 2014 (c).
- Internet dokument, dostupan na web adresi: [http://en.wikipedia.org/wiki/Euler\\_method](http://en.wikipedia.org/wiki/Euler_method), 2014 (d).
- Internet dokument, dostupan na web adresi: <http://www.autocarpro.in/news-national/bosch-gen-abs-unit-chakan-146>, 2014 (e).
- Internet dokument, dostupan na web adresi: <http://www.mathworks.com/help/simulink/examples/modeling-an-anti-lock-braking-system.html>, 2015.

- Iskrenović, O., "Discrete Time Variable Structure Controller Synthesis for Objects with Finite Zeros", *Facta Universitatis, Series: Mechanics, Automatic Control and Robotics*, vol. 2, no. 8, pp. 757-772, 1998.
- Iskrenović, O., "Discrete Time Variable Structure Controller Synthesis for Third Order Objects with Finite Zero Using Delta Transform", *Journal of Electrical Engineering*, vol. 55, no. 3-4, pp. 71-76, 2004.
- Iskrenović, O., "Discrete Time Variable Structure Controller for Aircraft Elevator Control", *Journal of Electrical Engineering*, vol. 59, no. 2, pp. 92-96, 2008.
- Jang, J.-S. R., C.-T. Sun, E. Mizutani, "Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence", *Prentice Hall*, 1997.
- Johansen, T. A., B. A. Foss, "Constructing NARMAX Models Using ARMAX Models", *International Journal of Control*, vol. 58, no. 5, pp. 1125-1153, 1993.
- Kapadia, A. D., I. D. Walker, D. M. Dawson, E. Tatlicioglu, "A Model-Based Sliding Mode Controller for Extensible Continuum Robots", *9th WSEAS International Conference on Signal Processing, Robotics and Automation, ISPRA'10*, Cambridge, UK, pp. 113-120, 2010.
- Karnopp, D. C., D. L. Margolis, R. C. Rosenberg, "System Dynamics, Modeling and Simulation of Mechatronic Systems", *John Wiley & Sons*, New York, 2000.
- Kayacan, E., Y. Oniz, O. Kaynak, A. Topalov, "Adaptive Control of Antilock Braking System Using Grey Multilayer Feedforward Neural Networks", *Seventh International Conference on Machine Learning and Applications*, San Diego, California, pp. 356-361, 2008.
- Kayacan, E., Y. Oniz, O. Kaynak, "A Grey System Modeling Approach for Sliding-Mode Control of Antilock Braking Systems", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, pp. 3244-3252, 2009.
- Kazemi, R., B. Hamed, B. Javadi, "A New Sliding Mode Controller for Four-Wheel Anti-Lock Braking System (ABS)", *SAE Technical Paper 2000-01-1639*, 2000.
- Köse, E. K., Abacı, H. Kizmaz, S. Aksoy, M. A. Yalçın, "Sliding Mode Control Based on Genetic Algorithm for WSCC Systems Include of SVC", *Elektronika ir Elektrotehnika*, vol. 19, no. 4, pp. 19-24, 2013.
- Kosko, B., "Neural Networks and Fuzzy Systems: A Dynamical Systems Approach to Machine Intelligence", *Prentice Hall*, Englewood Cliffs, NJ, 1992.
- Kristinsson, K., "System Identification and Control Using Genetic Algorithms", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 22, no. 5, pp. 1033-1046, 1992.

- Kwan, C.-M., "Sliding Mode Control of Linear Systems with Mismatched Uncertainties", *Automatica*, vol. 31, no. 2, pp. 303-307, 1995.
- Lawes, J., "Car Brakes: A Guide to Upgrading, Repair and Maintenance", *Crowood*, New York, 2014.
- Lee, C. C., "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller, Part I, II", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 20, no. 2, pp. 404-435, 1990.
- Lee, Y., S. H. Zak, "Designing a Genetic Neural Fuzzy Antilock-Brake-System Controller", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 2, pp. 198-211, 2002.
- Lin, C.-M., C.-F. Hsu, "Self-Learning Fuzzy Sliding-Mode Control for Antilock Braking Systems", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 11, no. 2, pp. 273-278, 2003(a).
- Lin, C.-M., C.-F. Hsu, "Neural-Network Hybrid Control for Antilock Braking Systems", *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 14, no. 2, pp. 351-359, 2003 (b).
- Lin, F.-J., K.-K. Shyu, R.-J. Wai, "Recurrent-Fuzzy-Neural-Network Sliding-Mode Controlled Motor-Toggle Servomechanism", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 6, no. 4, pp. 453-466, 2001.
- Louca, L. S., J. L. Stein, D. G. Rideout, "Generating Proper Integrated Dynamic Models for Vehicle Mobility Using a Bond Graph Formulation", *International Conference on Bond Graph Modeling, ICBGM'01*, Phoenix, , vol. 33, no. 1, pp. 339-345, 2001.
- Lu, X. Y., S. K. Spurgeon, "Robust Sliding Mode Control of Uncertain Nonlinear Systems", *Systems & Control Letters*, vol. 32, no. 2, pp. 75-90, 1997.
- Mahmoud, S. M., L. C. Alaoui, V. Van Assche, P. Bussy, "Sliding Mode Control of Nonlinear SISO Systems with Both Matched and Unmatched Disturbances", *International Journal of Sciences and Techniques of Automatic Control & Computer Engineering*, vol. 2, no. 1, pp. 350-367, 2008.
- Mamdani, E. H., "Applications of Fuzzy Control for Control of Simple Dynamic Plant", *IEEE Proceedings*, vol. 1, no. 12, pp. 1585-1588, 1974.
- Margolis, D., T. Shim, "A Bond Graph Model Incorporating Sensors, Actuators, and Vehicle Dynamics for Developing Controllers for Vehicle Safety", *Journal of the Franklin Institute*, vol. 338, no. 1, pp. 21-34, 2001.
- Mauer, G. F., "A Fuzzy Logic Controller for an ABS Braking System", *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 3, no. 4, pp. 381-388, 1995.

- Milojković, M., S. Nikolić, B. Danković, D. Antić, Z. Jovanović, "Modelling of Dynamical Systems Based on Almost Orthogonal Polynomials", *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, vol. 16, no. 2, pp. 133-144, 2010.
- Milojković, M., D. Antić, S. Nikolić, Z. Jovanović, S. Perić, "On a New Class of Quasi-Orthogonal Filters", *International Journal of Electronics*, vol. 100, no. 10, pp. 1361-1372, 2013.
- Milosavljević, Č., "General Conditions for the Existence of a Quasi-sliding Mode on the Switching Hyperplane in Discrete Variable Structure Systems", *Automatic Remote Control*, vol. 46, no. 3, pp. 307-314, 1985.
- Milosavljević, Č., "Osnovi Automatike, II deo", *Elektronski fakultet u Nišu*, 2002.
- Milosavljević, Č., "Discrete-Time VSS", In: Variable Structure Systems: from Principles to Implementation, *The Institution of Electrical Engineers*, London, United Kingdom, vol. 66, pp. 99-129, 2004.
- Mirzaeinejad, H., M. Mirzaei, "A Novel Method for Non-Linear Control of Wheel Slip in Anti-Lock Braking Systems", *Control Engineering Practice*, vol. 18, no. 8, pp. 918-926, 2010.
- Mitchel, M., "An Introduction to Genetic Algorithms", *MIT Press*, Cambridge, 1996.
- Mitić, D., B. Veselić, "Discrete-Time Variable Structure Control with  $O(T^2)$  Accuracy", *VII International SAUM Conference*, Vrnjačka Banja, Jugoslavija, pp. 47-51, 2001.
- Mitić, D., Č. Milosavljević, "Sliding Mode Based Minimum Variance and Generalized Minimum Variance Controls with  $O(T^2)$  and  $O(T^3)$  Accuracy", *Electrical Engineering*, vol. 86, no.4, pp. 229-237, 2004.
- Mitić, D., "Digital Variable Structure Systems Based on Input-Output Model", PhD thesis, *University of Niš, Faculty of Electronic Engineering, Republic of Serbia*, 2006. (in Serbian)
- Mitić, D., D. Antić, S. Perić, M. Milojković, S. Nikolić, "Sliding Mode Control of Anti-Lock Braking System Based on Reaching Law Method", *XLVI International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies, ICEST 2011*, Serbia, Niš, vol. 2, pp. 387-390, 2011.
- Mitić, D., D. Antić, S. Perić, M. Milojković, S. Nikolić, "Fuzzy Sliding Mode Control for Anti-Lock Braking Systems", *7th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics, SACI 2012*, Timisoara, Romania, pp. 217-222, 2012.

- Mitić, D., S. Perić, D. Antić, Z. Jovanović, M. Milojković, S. Nikolić, "Digital Sliding Mode Control of Anti-Lock Braking System", *Advances in Electrical and Computer Engineering*, vol. 13, no. 1, pp. 33-40, 2013.
- Modi, D., Z. Padia, K. Patel, "Fuzzy Logic Antilock Brake System", *International Journal of Scientific and Engineering Research*, vol. 3, no. 7, pp. 1-8, 2012.
- Mukherjee, A., R. Karmakar, A. K. Samantaray, "Bond Graph in Modeling, Simulation and Fault Identification", *CRC Press*, New York, 2006.
- Munoz, D., D. Sbarbaro, "An Adaptive Sliding-Mode Controller for Discrete Nonlinear Systems", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 47, no. 3, pp. 574-581, 2000.
- Narendra, K. S., J. Balakrishnan, M. K. Ciliz, "Adaptation and Learning Using Multiple Models, Switching, and Tuning", *IEEE Control Systems*, vol. 15, no. 3, pp. 37-51, 1995.
- Ng, K. C., Y. Li, D. J. Murray-Smith, K. C. Sharman, "Genetic Algorithms Applied to Fuzzy Sliding Mode Controller Design", *First International Conference on Genetic Algorithms in Engineering Systems: Innovations and Applications*, pp. 220-225, 1995.
- Ngwompo, R. F., P. J. Gawthrop, "Bond Graph-Based Simulation of Nonlinear Inverse Systems using Physical Performance Specifications", *Journal of the Franklin Institute*, vol. 336, no. 8, pp. 1225-1247, 1999.
- Nikolić, S., D. Antić, B. Danković, M. Milojković, Z. Jovanović, S. Perić, "Orthogonal Functions Applied in Antenna Positioning", *Advances in Electrical and Computer Engineering*, vol. 10, no. 4, pp. 35-42, 2010.
- Nikolić, S., "Primena Generalizovanih Klasičnih Filtara u Inteligentnim Sistemima Upravljanja", *Doktorska disertacija*, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet u Nišu, 2014.
- Nikolić, S., D. Antić, M. Milojković, M. Milovanović, S. Perić, D. Mitić, "Application of Neural Networks with Orthogonal Activation Functions in Control of Dynamical Systems", *International Journal of Electronics*, **prihvaćen za publikovanje**.
- O'Dell, B., "Fuzzy Sliding Mode Control: A Critical Review", *School of Mechanical & Aerospace Engineering Oklahoma*, 1997.
- Omerhodžić, A., "Modeliranje Sistema Aktivne Sigurnosti Motornih Vozila", *Internet dokument*, 2013.

- Oniz, Y., E. Kayacan, O. Kaynak, "Simulated and Experimental Study of Antilock Braking System Using Grey Sliding Mode Control", *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Montreal, Canada, pp. 90-95, 2007.
- Oniz, Y., E. Kayacan, O. Kaynak, "A Dynamic Method to Forecast the Wheel Slip for Antilock Braking System and its Experimental Evaluation", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 39, no. 2, pp. 551-560, 2009.
- Oudghiri, M., M. Chadli, A. El Hajjaji, "Robust Fuzzy Sliding Mode Control for Antilock Braking System", *International Journal on Sciences and Techniques of Automatic Control*, vol. 1, no. 1, pp. 13-27, 2007.
- Ozdalyan, B., M. V. Blundell, "Anti-Lock Braking System Simulation and Modelling in ADAMS", *International Conference on Simulation*, pp. 140-144, 1998.
- Ozer, H. O., A. Sayin, N. Korkmaz, N. Yagiz, "Genetic Algorithm Integrated Sliding Mode Control of a Vehicle", *11th World Congress on Computational Mechanics, WCCM XI*, 2014.
- Pacejka, H. B., "Modelling Complex Vehicle Systems Using Bond Graphs", *Journal of the Franklin Institute*, vol. 319, no. 1/2, pp. 67-81, 1985.
- Palm, R., D. Driankov, H. Hellendoorn, "Model Based Fuzzy Control", *Springer-Verlag*, Berlin, 1996.
- Park, E. J., D. Stoikov, L. Falcao, A. Suleman, "A Performance Evaluation of an Automotive Magnetorheological Brake Design with a Sliding Mode Controller", *Mechatronics*, vol. 16, no. 7, pp. 405-416, 2006.
- Park, J. H., D. H. Kim, Y. J. Kim, "Anti-Lock Brake System Control for Buses Based on Fuzzy Logic and a Sliding-Mode Observer", *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 15, no. 10, pp. 1398-1407, 2001.
- Pathak, P. M., R. P. Kumar, A. Mukherjee, A. Dasgupta, "A Scheme for Robust Trajectory Control of Space Robots", *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 16, no. 9, pp. 1337-1349, 2008.
- Perić, S., D. Antić, V. Nikolić, D. Mitić, M. Milojković, S. Nikolić, "A New Approach to the Sliding Mode Control Design: Anti-lock Braking System as a Case Study", *Journal of Electrical Engineering*, vol. 65, no. 1, pp. 37-43, 2014.
- Perruquetti, W., J. P. Barbot, "Sliding Mode Control in Engineering", *CRC Press*, New York, 2002.
- Poursamad, A., "Adaptive Feedback Linearization Control of Antilock Braking Systems Using Neural Networks", *Mechatronics*, vol. 19, no. 5, pp. 767-773, 2009.

- Precup, R.-E., S. Preitl, M. Bălaș, V. Bălaș, "Fuzzy Controllers for Tire Slip Control in Anti-Lock Braking Systems", *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, Budapest, Hungary, vol. 3, pp. 1317-1322, 2004.
- Precup, R.-E., S. V. Spătaru, M.-B. Rădac, E. M. Petriu, S. Preitl, C.-A. Dragoș, "Model-Based Fuzzy Control Solutions for a Laboratory Antilock Braking System", *Third International Conference on Human System Interaction, HSI 2010*, Rzeszow, Poland, pp. 133-138, 2010.
- Precup, R.-E., S. Preitl, B. M. Rădac, E. M. Petriu, C. A. Dragoș, J. K. Tar, "Experiment-Based Teaching in Advanced Control Engineering", *IEEE Transactions on Education*, vol. 54, no. 3, pp. 345-355, 2011.
- Purwar, S., I. N. Kar, A. N. Jha, "Neuro Sliding Mode Control of Robotic Manipulators", *IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, vol. 1, pp. 595-600, 2004.
- Qiao, F., Q. M. Zhu, A. Winfield, C. Melhuish, "Design of Takagi-Sugeno Fuzzy Model Based Sliding Mode Controllers for Nonlinear Systems", *2nd Postgraduate Research Student Conference of CEMS*, UWE, Bristol, UK, 2003.
- Rădac, M.-B., R.-E. Precup, S. Preitl, J. K. Tar, E. M. Petriu, "Linear and Fuzzy Control Solutions for a Laboratory Anti-Lock Braking System", *6th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics, SISY 2008*, Subotica, Serbia, September 26-27, 2008.
- Ramirez, H. S., "Non-Linear Discrete Variable Structure Systems in Quasi-Sliding Mode", *International Journal of Control*, vol. 54, no. 5, pp. 1171-1187, 1991.
- Ramirez, H. S., "On the Sliding Mode Control of Nonlinear Systems", *Systems & Control Letters*, vol. 19, pp. 303-312, 1992.
- Šabanović, A., "Variable Structure Systems: From Principles to Implementation", *The Institution of Electrical Engineers*, London, 2004.
- Samantaray, A. K., B. Ould-Bouamama, "Model-Based Process Supervision", *Springer Verlag*, London, 2008.
- Sarpturk, S. Z., Y. Istefanopulos, O. Kaynak, "On the Stability of Discrete-Time Sliding Mode Control Systems", *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 32, no. 10, pp.930-932, 1987.
- Sauze, C., M. Neal, "Artificial Endocrine Controller for Power Management in Robotic Systems", *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, vol. 24, no. 12, pp. 1973-1985, 2013.

- Sharkawy, A. B., "Genetic Fuzzy Self-Tuning PID Controllers for Antilock Braking Systems", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 23, no. 7, pp. 1041-1052, 2010.
- Slotine, J. J., S. S. Sastry, "Tracking Control of Nonlinear Systems using Sliding Surfaces with Application to Robot Manipulator", *International Journal of Control*, vol. 38, no. 2, pp.465-492, 1983.
- Slotine, J. J., "Sliding Controller Design for Nonlinear Systems", *International Journal of Control*, vol. 40, no. 2, pp. 421-434, 1984.
- Song, J., "Performance Evaluation of a Hybrid Electric Brake System with a Sliding Mode Controller", *Mechatronics*, vol. 15, pp. 339-358, 2005.
- Song, Q., J. Spall, Y. Soh, J. Ni, "Robust Neural Network Tracking Controller Using Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation", *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 19, no. 5, pp. 817-835, 2008.
- Spurgeon, S. K., "Hyperplane Design Techniques for Discrete-Time Variable Structure Control Systems", *International Journal on Control*, vol. 55, no. 2, pp. 445-456, 1992.
- Stan, M., R.-E. Precup, A. S. Paul, "Analysis of Fuzzy Control Solutions for Anti-Lock Braking Systems", *Journal of Control Engineering and Applied Informatics*, vol. 9, no. 2, pp. 11-22, 2007.
- Su, W. C., S. V. Drakunov, U. Ozguner, "Sliding Mode Control in Discrete-Time Linear Systems", *12th IFAC Triennial World Congress*, vol. 2, pp. 267-270, 1993.
- Subbulakshmi, K., "Antilock-Braking System Using Fuzzy Logic", *Middle-East Journal of Scientific Research*, vol. 20, no. 10, pp. 1306-1310, 2014.
- Tan, H. S., M. Tomizuka, "Discrete-Time Controller Design for Robust Vehicle Traction", *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 10, no. 3, pp. 107-113, 1990.
- Teng, T. K., J. S. Shieh, C. S. Chen, "Genetic Algorithms Applied in Online Autotuning PID Parameters of a Liquid-Level Control System", *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, vol. 5, no. 25, pp.433-450, 2003.
- Tigelaar, J. A. A., "Design and Vehicle Implementation of an Adaptive ABS", Master thesis, *Faculty of Mechanical, Maritime and Materials Engineering, Delft University of Technology*, 2011.
- Timmis, J., M. Neal, J. Thorniley, "An Adaptive Neuro-Endocrine System for Robotic Systems, *IEEE Workshop on Robotic Intelligence in Informationally Structured Space*, 2009.



- Tokat, S., L. Ulusoy, "Genetic Algorithms Applied to Initial Condition Adaptation of a Sliding Mode Controller with a Time-varying Sliding Surface", *International Symposium on INnovations in Intelligent SysTems and Applications, INISTA 2009*, pp. 5-11, 2009.
- Topalov, A., E. Kayacan, Y. Oniz, O. Kaynak, "Neuro-Fuzzy Control of Antilock Braking System Using Variable-Structure Systems Based Learning Algorithm", *9th International Conference on Adaptive and Intelligent Systems, ICAIS'09*, Klagenfurt, Austria, pp. 166-171, 2009(a).
- Topalov, A., E. Kayacan, Y. Oniz, O. Kaynak, "Adaptive Neuro-Fuzzy Control with Sliding Mode Learning Algorithm: Application to Antilock Braking System", *7th Asian Control Conference*, Hong Kong, China, August 27-29, pp. 784-789, 2009(b).
- Unsal, C., P. Kachroo, "Sliding Mode Measurement Feedback Control for Antilock Braking Systems", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 7, no. 2, pp. 271-281, 1999.
- Utkin, V. I., "Variable Structure Systems with Sliding Modes", *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 22, no. 2, pp. 212-221, 1977.
- Utkin, V. I., "Sliding Modes and Their Applications in Variable Structure Systems", *MIR Publisher*, Moscow, USSR, 1978.
- Utkin, V. I., "Sliding Modes in Optimization and Control", *Springer-Verlag*, New York, 1992.
- Utkin, V. I., "Sliding Mode Control Design Principles and Application to Electric Drives", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 40, no. 1, pp. 23-36, 1993.
- Utkin, V. I., A. S. Zinober, "Sliding Mode Control in Discrete-Time and Difference Systems", *Variable Structure and Lyapunov Control*, vol. 193, pp. 87-107, 1994.
- Utkin, V. I., J. Guldner, J. Shi, "Sliding Mode Control in Electromechanical Systems", *CRC Press*, 1999.
- Utkin, V. I., H.-C. Chang, "Sliding Mode Control for Automobile Applications", in: Sabanovic, A., Fridman, L., Spurgeon, S. (eds.): *Variable Structure Systems: From Principles to Implementation*, *IEE Control Engineering Series*, vol. 66, pp. 319-332, *The Institution of Electrical Engineers*, London, United Kingdom, 2004.
- Wang, L. X., "Adaptive Fuzzy Systems and Control: Design and Stability Analysis", *Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall*, 1994.

- Wellstead, P. E., N. B. O. L. Pettit, "Analysis and Redesign of an Antilock Brake System Controller", *IEE Proceedings on Control Theory and Applications*, vol. 144, no. 5, pp. 413-426, 1997.
- Will, A. B., S. H. Zak, "Antilock Brake System Modelling and Fuzzy Control", *International Journal of Vehicle Design*, vol. 24, no. 1, pp. 1-18, 2000.
- Wu, M., M. Shih, "Using the Sliding-Mode PWM Method in an Anti-Lock Braking System", *Asian Journal of Control*, vol. 3, no. 3, pp. 255-261, 2001.
- Wu, M., M. Shih, "Simulated and Experimental Study of Hydraulic Anti-Lock Braking System Using Sliding-Mode PWM Control", *Mechatronics*, vol. 13, no. 4, pp. 331-351, 2003.
- Yia, J., Q. Wangb, D. Zhaoa, J. T. Wenc, "BP Neural Network Prediction-Based Variable-Period Sampling Approach for Networked Control Systems", *Applied Mathematics and Computation*, vol. 185, no. 2, pp. 976-988, 2007.
- Yildiz, Y., A. Sabanovic, K. Abidi, "Sliding-Mode Neuro-Controller for Uncertain Systems", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 3, pp. 1676-1685, 2007.
- Yu, X., G. Li, "Hybrid Electric Vehicle Brake System Control Metrics Design and Application", *Third International Symposium on Intelligent Information Systems and Applications*, NanChang, China, pp. 174-178, 2009.
- Yuanwei, J., M. Yan-e. G. M. Dimirovski, Z. Yan, Z. Siying, "Adaptive Global Sliding Mode Control Strategy for the Vehicle Antilock Braking Systems", *IEEE American Control Conference, ACC '09.*, 10-12 June 2009, St. Louis, MO, pp. 769 - 773, 2009.
- Zadeh, L. A., "Fuzzy Sets", *Information and Control*, no. 8, pp. 338-353, 1965.
- Zanten, A., R. Erhardt, A. Lutz, "Measurement and Simulation of Transients in Longitudinal and Lateral Tire Forces", *SAE paper 900210*, pp. 300-318, 1990.
- Zarrabi, M. R., M. H. Farahi, A. J. Koshkouei, S. Effati, K. Burnham, "Embedding-Based Sliding Mode Control for Linear Time Varying Systems", *Applied Mathematics*, vol. 2, no. 4, pp. 487-495, 2011.
- Zeinali, M., L. Notash, "Adaptive Sliding Mode Control with Uncertainty Estimator for Robot Manipulators", *Mechanism and Machine Theory*, vol. 45, no. 1, pp. 80-90, 2010.
- Zheng, S., H. Tang, Z. Han, Y. Zhang, "Controller Design for Vehicle Stability Enhancement", *Control Engineering Practice*, vol. 14, no. 12, pp. 1413-1421, 2006.
- Zimmermann, H. J., "Fuzzy Set Theory and Its Application", *Kluwer-Nijhoff Publishing*, Boston, 1985.

## Kratka biografija autora

Staniša Lj. Perić, rođen je 03.11.1985. godine u Kladovu gde je završio osnovnu i srednju školu. Diplomirao je na Elektronskom fakultetu, Univerziteta u Nišu, 2009. godine s prosečnom ocenom 9.66. Po diplomiranju zasniva radni odnos kao saradnik u nastavi na Elektronskom fakultetu u Nišu, a od 02. decembra 2011. godine radi kao asistent pri Katedri za automatiku istog fakulteta. Njegova dosadašnja nastavno-pedagoška aktivnost odvijala se u okviru angažovanja na računskim i laboratorijskim vežbama na preko deset predmeta u nadležnosti Katedre za automatiku. Do sada je publikovao više od šezdeset radova u zemlji i inostranstvu, od toga 14 u međunarodnim časopisima sa IMPACT faktorom, 6 radova u ostalim međunarodnim časopisima, 13 rada u nacionalnim časopisima, 19 radova u zbornicima međunarodnih konferencija i 10 radova u zbornicima nacionalnih konferencija. Takođe, koautor je dva tehnička rešenja. Učestvovao je i u realizaciji dva projekta finansirana od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, kao i četiri međunarodna projekta. Bio je tri puta član Organizacionog odbora međunarodne konferencije *International Conference on Systems, Automatic Control and Measurements - SAUM* u 2010, 2012 i 2014 godini. Od 2010. godine obavlja poslove tehničkog saradnika u časopisu *FACTA Universitatis, Series: Automatic Control and Robotics* Univerziteta u Nišu.

## Spisak referenci autora

### a) Radovi objavljeni u međunarodnim časopisima sa IMPACT faktorom

1. Saša Nikolić, Dragan Antić, Bratislav Danković, Marko Milojković, Zoran Jovanović, **Staniša Perić**, "Orthogonal Functions Applied in Antenna Positioning", *Advances in Electrical and Computer Engineering*, vol. 10, no. 4, pp. 35-42, 2010.  
<http://dx.doi.org/10.4316/AECE.2010.04006>
2. Dragan Antić, Saša Nikolić, Marko Milojković, Nikola Danković, Zoran Jovanović, **Staniša Perić**, "Sensitivity Analysis of Imperfect Systems Using Almost Orthogonal Filters", *Acta Polytechnica Hungarica*, vol. 8, no. 6, pp. 79-94, 2011.  
<http://www.uni-obuda.hu/journal/Issue32.htm>
3. Darko Mitić, **Staniša Perić**, Dragan Antić, Zoran Jovanović, Marko Milojković, Saša Nikolić, "Digital Sliding Mode Control of Anti-Lock Braking System", *Advances in Electrical and Computer Engineering*, vol. 13, no. 1, pp. 33-40, 2013.  
<http://dx.doi.org/10.4316/AECE.2013.01006>
4. **Staniša Perić**, Dragan Antić, Vlastimir Pavlović, Saša Nikolić, Marko Milojković, "Ultra-Selective Lowpass Linear-Phase FIR Filter Function", *Electronics Letters*, vol. 49, no. 9, pp. 595-597, 2013.  
<http://dx.doi.org/10.1049/el.2012.4475>
5. Dragana Trajković, Vlastimir Nikolić, Dragan Antić, Saša Nikolić, **Staniša Perić**, "Application of the Hybrid Bond Graphs and Orthogonal Rational Filters in Sag Voltage Effect Reduction", *Electronics and Electrical Engineering*, vol. 19, no. 6, pp. 25-30, 2013.  
<http://dx.doi.org/10.5755/j01.eee.19.6.1746>
6. Marko Milojković, Dragan Antić, Saša Nikolić, Zoran Jovanović, **Staniša Perić**, "On a New Class of Quasi-Orthogonal Filters", *International Journal of Electronics*, vol. 100, no. 10, pp. 1361-1372, 2013.  
<http://dx.doi.org/10.1080/00207217.2012.743087>
7. Vlastimir Pavlović, Dragan Antić, Saša Nikolić, **Staniša Perić**, "Low Complexity Lowpass Linear-Phase Multiplierless FIR Filter", *Electronics Letters*, vol. 49, no. 18, pp. 1133-1135, 2013.  
<http://dx.doi.org/10.1049/el.2013.1791>
8. Slobodan Aleksandrov, Zoran Jovanović, Dragan Antić, Saša Nikolić, **Staniša Perić**, Radica Aleksandrov, "Analysis of the Efficiency of Applied Virtual Simulation Models and Real Learning Systems in the Process of Education in Mechatronics", *Acta Polytechnica Hungarica*, vol. 10, no. 6, pp. 59-76, 2013.  
<http://www.dx.doi.org/10.12700/APH.10.06.2013.6.4>
9. **Staniša Perić**, Dragan Antić, Vlastimir Nikolić, Darko Mitić, Marko Milojković, Saša Nikolić, "A New Approach to the Sliding Mode Control Design: Anti-lock Braking System as a Case Study", *Journal of Electrical Engineering*, vol. 65, no. 1, pp. 37-43, 2014.  
<http://dx.doi.org/10.2478/jee-2014-0005>
10. Vlastimir Pavlović, Dragan Antić, **Staniša Perić**, Saša Nikolić, Marko Milojković, "Transitional Selective Linear Phase 1D FIR Filter Function Generated by Christoffel-Darboux Formula for Chebyshev Polynomials", *Electronics and Electrical Engineering*, vol. 20, no. 4, pp. 3-10, 2014.  
<http://dx.doi.org/10.5755/j01.eee.20.4.2783>

11. Marko Milojković, Dragan Antić, Miroslav Milovanović, Saša S. Nikolić, **Staniša Perić**, Muhanad Alkawlawe, "Modeling of Dynamic Systems Using Orthogonal Endocrine Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems", *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 137, no. 9, DS-15-1098, 2015.  
<http://dx.doi.org/10.1115/1.4030758>
12. Saša Nikolić, Dragan Antić, Marko Milojković, Miroslav Milovanović, **Staniša Perić**, Darko Mitić, "Application of Neural Networks with Orthogonal Activation Functions in Control of Dynamical Systems", *International Journal of Electronics*.  
<http://dx.doi.org/10.1080/00207217.2015.1036811>
13. Saša Nikolić, Dragan Antić, **Staniša Perić**, Nikola Danković, Marko Milojković, "Design of Generalised Orthogonal Filters: Application to the Modelling of Dynamical Systems", *International Journal of Electronics*.  
<http://dx.doi.org/10.1080/00207217.2015.1036367>
14. Miroslav Milovanović, Dragan Antić, Miodrag Spasić, Saša Nikolić, **Staniša Perić**, Marko Milojković, "Improvement of DC Motor Velocity Estimation Using Feedforward Neural Network", *Acta Polytechnica Hungarica*.  
<http://uni-obuda.hu/journal>

**b) Radovi objavljeni u međunarodnim časopisima bez IMPACT faktora**

1. Dragan Antić, Marko Milojković, Saša Nikolić, **Staniša Perić**, "Optimal Moving Sliding Mode Control with Application to Electrical Servo Drive", *Scientific Bulletin of UPT, Transactions on Automatic Control and Computer Science*, vol. 55(69), no. 4, pp. 217-222, 2010.  
<http://www.ac.upt.ro/journal/article.php?v=55%2869%29%20&%20vn=4%20&%20n=6>
2. Dragan Antić, Zoran Jovanović, **Staniša Perić**, Saša Nikolić, Marko Milojković, Miloš Milošević, "Anti-Swing Fuzzy Controller Applied in 3D Crane System", *ETASR-Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 2, no. 2, pp. 196-200, 2012.  
<http://etasr.com/index.php/ETASR/article/view/146>
3. Saša Nikolić, Dragan Antić, **Staniša Perić**, Zoran Jovanović, Marko Milojković, "Almost Orthogonal Functional Networks Applied in Approximation of Signals", *International Journal of Science and Advanced Technology IJSAT*, vol. 2, no. 2, pp. 108-112, 2012.  
<http://www.ijSAT.com/view.php?id=2012:February:Volume%202%20Issue%202>
4. Dragan Antić, Miroslav Milovanović, Saša Nikolić, Marko Milojković, **Staniša Perić**, "Simulation Model of Magnetic Levitation Based on NARX Neural Networks", *International Journal of Intelligent Systems and Applications IJISA*, vol. 5, no. 5, pp. 25-32, 2013.  
<http://dx.doi.org/10.5815/ijisa.2013.05.04>
5. Dragan Antić, Miroslav Milovanović, **Staniša Perić**, Saša Nikolić, Marko Milojković, "Input Data Preprocessing Method for Exchange Rate Forecasting via Neural Network", *Serbian Journal of Electrical Engineering*, vol. 11, no. 4, pp. 597-608, 2014.  
<http://dx.doi.org/10.2298/SJEE1404597A>
6. Miroslav Milovanović, Dragan Antić, Saša Nikolić, **Staniša Perić**, Marko Milojković, Darko Mitić, "Empirical Training Process Selection for Three Layer Feedforward Neural Network Learning Procedure", *International Journal of Artificial Intelligence and Knowledge Discovery*, vol. 5, no. 1, pp. 9-13, 2015.  
<http://www.rgjournals.com/index.php/ijai/article/view/645>

c) **Radovi objavljeni u nacionalnim časopisima**

1. Zoran Jovanović, Dragan Antić, **Staniša Perić**, Saša Nikolić, "Multistage Fuzzy Optimization of the Peak Power", *FACTA UNIVERSITATIS Series: Automatic Control and Robotics*, vol. 8, no. 1, pp. 99-110, 2009.  
<http://facta.junis.ni.ac.rs/acar/acar200901/acar2009-09.pdf>
2. Saša Nikolić, Marko Milojković, Dragan Antić, Bratislav Danković, Zoran Jovanović, **Staniša Perić**, "Skoro Ortogonalni i Kvazi-Ortogonalni Filtri", *TEHNIKA-Elektrotehnika*, vol. 59, no. 5, pp. 1-6, 2010.  
<http://scindeks.ceon.rs/article.aspx?artid=0013-58361005001N>
3. Dragan Antić, Vlastimir Nikolić, Darko Mitić, Marko Milojković, **Staniša Perić**, "Sliding Mode Control of Anti-lock Braking System: An Overview", *FACTA UNIVERSITATIS Series: Automatic Control and Robotics, Univerzitet u Nišu*, vol. 9, no. 1, pp. 41-58, 2010.  
<http://facta.junis.ni.ac.rs/acar/acar201001/acar2010-03.pdf>
4. Zoran Jovanović, Dragan Antić, Zoran Stajić, Miloš Milošević, Saša Nikolić, **Staniša Perić**, "Genetic Algorithms Applied in Parameters Determination of the 3D Crane Model", *FACTA UNIVERSITATIS Series: Automatic Control and Robotics, Univerzitet u Nišu*, vol. 10, no. 1, pp. 19-27, 2011.  
<http://facta.junis.ni.ac.rs/acar/acar201101/acar2011-02.pdf>
5. Dragan Antić, Marko Milojković, Darko Mitić, Saša Nikolić, **Staniša Perić**, "Sliding Mode Control Based on Orthogonal Models", *Scientific Publications of the State University of Novi Pazar, Series A: Applied Mathematics, Informatics and Mechanics*, vol. 4, no. 2, pp. 55-64, 2012.  
<http://www.np.ac.rs/index.php/sr/preuzimanjasve/vol4br2/1008-sliding-mode-control-based-on-orthogonal-models/download>
6. Darko Mitić, Dragan Antić, Marko Milojković, Saša Nikolić, **Staniša Perić**, "Input-Output Based Quasi-Sliding Mode Control of DC-DC Converter", *FACTA UNIVERSITATIS Series: Electronics and Energetics*, vol. 25, no. 1, pp. 69-80, 2012.  
<http://dx.doi.org/10.2298/FUEE1201069M>
7. **Staniša Perić**, Dragan Antić, Saša Nikolić, Darko Mitić, Marko Milojković, Miodrag Spasić, "Upravljanje Sistemom sa Više Rezervoara Primenom Linearnog Kvadratnog Regulatora", *TEHNIKA-Elektrotehnika*, vol. 61, no. 6, pp. 963-969, 2012.  
<http://scindeks.ceon.rs/article.aspx?artid=0040-21761206963P>
8. Dragan Antić, Miroslav Milovanović, Saša Nikolić, **Staniša Perić**, Marko Milojković, "Primena NARX Neuronske Mreže za Simulaciju Rada Sistema Magnetne Levitacije", *TEHNIKA*, vol. 62, no. 3, pp. 473-479, 2013.  
<http://scindeks.ceon.rs/article.aspx?query=RELAU%26and%2672387&page=0&sort=1&stype=0&backurl=%2fRelated.aspx%3fartaun%3d72387>
9. Dragana Trajković, Dragan Antić, Saša Nikolić, **Staniša Perić**, Miroslav Milovanović, "Fuzzy Logic-based control of Three-Dimensional Crane System", *FACTA UNIVERSITATIS Series: Automatic Control and Robotics*, vol. 12, no. 1, pp. 31-42, 2013.  
<http://casopisi.junis.ni.ac.rs/index.php/FUAutContRob/article/view/22>
10. Saša Nikolić, Dragan Antić, Nikola Danković, **Staniša Perić**, Marko Milojković, "A New Type of Discrete Euler-Lagrange Equation with Applications in Optimal Control", *FACTA UNIVERSITATIS Series: Automatic Control and Robotics*, vol. 12, no. 3, pp. 181-188, 2013.  
<http://casopisi.junis.ni.ac.rs/index.php/FUAutContRob/article/view/89>

11. Slobodan Aleksandrov, Zoran Jovanović, Saša S. Nikolić, **Staniša Perić**, "Modeliranje, Simulacija i Verifikacija Modela Industrijskog Robota", *TEHNIKA*, vol. 63, no. 1, pp. 96-103, 2014.  
<http://dx.doi.org/10.5937/tehnika1401096A>
12. Marko Milojković, Miroslav Milovanović, Darko Mitić, **Staniša Perić**, Miodrag Spasić, Saša Nikolić, "Laboratory CNC Machine for Education of Students in Control Systems Engineering", *FACTA UNIVERSITATIS Series: Automatic Control and Robotics*, vol. 13, no. 2, pp. 117-125, 2014.  
<http://casopisi.junis.ni.ac.rs/index.php/FUAutContRob/article/view/688>
13. **Staniša Perić**, Dragana Trajković, Dragan Antić, Vlastimir Nikolić, Saša Nikolić, Miroslav Milovanović, "Fuzzy-PI Control of Water Pumps Modelled by Hybrid Bond Graphs", *FACTA UNIVERSITATIS Series: Automatic Control and Robotics*, vol. 14, no. 1, pp. 29-42, 2015.  
<http://casopisi.junis.ni.ac.rs/index.php/FUAutContRob/article/view/1073>

**d) Radovi objavljeni na međunarodnim naučnim skupovima i štampani u celini u odgovarajućim zbornicima radova**

1. Dragan Antić, Marko Milojković, Saša Nikolić, **Staniša Perić**, "Optimal Fuzzy Sliding Mode Control with a Time-Varying Sliding Surface", in Proceedings of the *8th International Conference on Computational Cybernetics and 9th International Conference on Technical Informatics, ICCC-CONTI 2010*, Timisoara, Romania, May 27.-29., 2010, pp. 149-153.  
<http://dx.doi.org/10.1109/ICCCYB.2010.5491311>
2. Dragan Antić, Bratsilav Danković, Zoran Jovanović, **Staniša Perić**, "Legendre Orthogonal Functional Network Applied in Modeling of Dynamical Systems", in Proceedings of the *XLV International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies, ICEST 2010*, Ohrid, Macedonia, June 23.-26., 2010, vol. 1, pp. 449-452.  
[http://www.icestconf.org/images/stories/proceedings/icest\\_2010/ICEST\\_2010\\_VOLU\\_ME\\_01.pdf](http://www.icestconf.org/images/stories/proceedings/icest_2010/ICEST_2010_VOLU_ME_01.pdf)
3. Dragan Antić, Vlastimir Nikolić, Darko Mitić, Marko Milojković, **Staniša Perić**, "Sliding Mode Control of Anti-lock Braking Systems: An Overview", in Proceedings of the *X Trienal International SAUM Conference on Systems, Automatic Control and Measurements, SAUM 2010*, Niš, Serbia, November 10.-12., 2010, pp. 41-48.  
<http://saum.elfak.rs>
4. Stanko Stankov, **Staniša Perić**, "Configuration of the Buildings Control Systems", in Proceedings of the *41th International HVAC&R Congress*, Beograd, Serbia, December 01.-03., 2010, pp. 100-112.  
<http://documents.tips/documents/stanko-stankov-konfiguracija-sistema.html>
5. Dragan Antić, Marko Milojković, Saša Nikolić, Darko Mitić, **Staniša Perić**, "The Concept of Quasi Orthogonality Applied in Technical Systems", in Proceedings of the *XLVI International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies, ICEST 2011*, Niš, Serbia, June 29.-July 1., 2011, vol. 2, pp. 379-382.  
[http://icestconf.org/images/stories/proceedings/icest\\_2011/ICEST\\_2011\\_VOLUME\\_02.pdf](http://icestconf.org/images/stories/proceedings/icest_2011/ICEST_2011_VOLUME_02.pdf)
6. Darko Mitić, Dragan Antić, **Staniša Perić**, Marko Milojković, Saša Nikolić, "Sliding Mode Control of Anti-lock Braking System Based on Reaching Law Method", in Proceedings of the *XLVI International Scientific Conference on Information,*

*Communication and Energy Systems and Technologies, ICEST 2011*, Niš, Serbia, June 29.-July 1., 2011, vol. 2, pp. 387-390.

[http://icestconf.org/images/stories/proceedings/icest\\_2011/ICEST\\_2011\\_VOLUME\\_02.pdf](http://icestconf.org/images/stories/proceedings/icest_2011/ICEST_2011_VOLUME_02.pdf).

7. Dragan Antić, Darko Mitić, Zoran Jovanović, **Staniša Perić**, Marko Milojković, Saša Nikolić, "On Anti-Lock Braking System Sliding Mode Control Techniques", in Proceedings of the *Special International Conference on Complex Systems: Synergy of Control, Communications and Computing, COSY 2011*, Ohrid, Macedonia, 16.-20. September, 2011, pp. 379-390.  
<http://cosy.feit.ukim.edu.mk>
8. Darko Mitić, Dragan Antić, Marko Milojković, Saša Nikolić, **Staniša Perić**, "Quasi-Sliding Mode Control of DC-DC Converter", in Proceedings of the *10th International Conference on Applied Electromagnetics, PES 2011*, Niš, Serbia, September 25.-29., 2011, Session P2-3.  
<http://pes2011.elfak.ni.ac.rs/>
9. Darko Mitić, Dragan Antić, **Staniša Perić**, Marko Milojković, Saša Nikolić, "Fuzzy Sliding Mode Control for Anti-lock Braking Systems", in Proceedings of the *7th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics, SACI 2012*, Timisoara, Romania, May 24.-26., 2012, pp. 217-222.  
[http://www.uni-obuda.hu/users/szakala/SACI%202012/39\\_saci2012.pdf](http://www.uni-obuda.hu/users/szakala/SACI%202012/39_saci2012.pdf)
10. Vlastimir Nikolić, Dragan Antić, Žarko Čojbašić, Ivan Čirić, Saša Nikolić, **Staniša Perić**, "Evolutionary Computation in Hybrid Aeroturbine Fuzzy Control", in Proceedings of the *XI International SAUM Conference on Systems, Automatic Control and Measurements, SAUM 2012*, Niš, Serbia, November 14.-16., 2012, pp. 176-184.  
<http://saum.elfak.rs>
11. Velimir Stefanović, Saša Pavlović, Nenad Apostolović, **Staniša Perić**, Saša Nikolić, "Numerical and Experimental Determination of Thermal Efficiency of the P2CC Solar Collector for Medium Temperature Conversion of Solar Radiation to Heat", in Proceedings of the *XI International Conference on Systems, Automatic Control and Measurements, SAUM 2012*, Niš, Serbia, November 14.-16., 2012, pp. 201-204.  
<http://saum.elfak.rs>
12. Slobodan Aleksandrov, Zoran Jovanović, Dragan Antić, **Staniša Perić**, Saša Nikolić, Darko Mitić, "Web Access to the Real Mechatronics Laboratory", in Proceedings of the *XI International Conference on Systems, Automatic Control and Measurements, SAUM 2012*, Niš, Serbia, November 14.-16., 2012, pp. 431-434.  
<http://saum.elfak.rs>
13. Dragana Trajković, Vlastimir Nikolić, Saša Nikolić, **Staniša Perić**, Marko Milojković, "Modeling and Simulation of Pump Station using Bond Graphs", in Proceedings of the *XI International Conference on Systems, Automatic Control and Measurements, SAUM 2012*, Niš, Serbia, November 14.-16., 2012, pp. 455-458.  
<http://saum.elfak.rs>
14. Marko Milojković, Dragan Antić, Zoran Jovanović, Saša Nikolić, **Staniša Perić**, "Generalized Concept of Orthogonality Applied in Technical Systems", in Proceedings of the *20th Telecommunications Forum, TELFOR 2012*, Belgrade, Serbia, November 20.-22., 2012, pp. 1005-1011.  
<http://dx.doi.org/10.1109/TELFOR.2012.6419380>
15. Dragan Antić, Dragana Trajković, Saša Nikolić, **Staniša Perić**, Marko Milojković, "Bond Graph Modeling and Simulation of the 3D Crane System Using Dymola", in Proceedings of the *XLVIII International Scientific Conference on Information,*



*Communication and Energy Systems and Technologies, Icest 2013, Ohrid, Macedonia, June 26.-29., 2013, vol. 2, pp. 821-824.*

[http://www.icestconf.org/images/proceedings/icest\\_2013\\_02.pdf](http://www.icestconf.org/images/proceedings/icest_2013_02.pdf)

16. Dragan Antić, Nikola Danković, **Staniša Perić**, Saša Nikolić, Marko Milojković, "One Form of Discrete Euler-Lagrange Equation With Application in Optimal Control", in *Proceedings of the 11th International Conference on Applied Electromagnetics, PES 2013*, Niš, Serbia, September 01.-04., 2013, Session P1-15.  
<http://pes2013.elfak.ni.ac.rs/>
17. Miroslav Milovanović, Dragan Antić, **Staniša Perić**, Saša Nikolić, Marko Milojković, Nikola Danković, "Artificial Approach for Achieving Two Position Levitation Motion of Magnetic Levitation System", in *Proceedings of the XII International Conference on Systems, Automatic Control and Measurements, SAUM 2014*, Niš, Serbia, November 12.-14., 2014, pp. 168-171.  
<http://saum.elfak.rs/index.php/saum/2014>
18. Saša Nikolić, Dragana Trajković, Dragan Antić, Vlastimir. Nikolić, **Staniša Perić**, Miroslav Milovanović, "Fuzzy Control Applied on the Three Parallel Pumps Modelled by Bond Graphs", in *Proceedings of the XII International Conference on Systems, Automatic Control and Measurements, SAUM 2014*, Niš, Serbia, November 12.-14., 2014, pp. 171-175.  
<http://saum.elfak.rs/index.php/saum/2014>
19. Marko Milojković, Miroslav Milovanović, Darko Mitić, **Staniša Perić**, Miodrag Spasić, Saša Nikolić, "Improving Woodworking Industry Through Implementation of IPA Project ADRIA HUB", in *Proceedings of the XII International Conference on Systems, Automatic Control and Measurements, SAUM 2014*, Niš, Serbia, November 12.-14., 2014, pp. 380-382.  
<http://saum.elfak.rs/index.php/saum/2014>

**e) Radovi saopšteni na nacionalnim naučnim skupovima i štampani u celini u odgovarajućim zbornicima radova**

1. Stanko Stankov, Zoran Stajić, **Staniša Perić**, "Bežični Prenos Podataka u Sistemima za Upravljanje", *Zbornik Radova 31. Stručno-Naučnog Skupa sa Međunarodnim Učešćem, Vodovod i Kanalizacija '10*, Divčibare, Srbija, Oktobar 05.-08., 2010, pp. 121-128.  
<http://www.sits.rs/textview.php?file=strucni.html>
2. Stanko Stankov, Zoran Stajić, **Staniša Perić**, "Centralni Sistem za Nadzor i Upravljanje Vodovodnim Sistemom JKP >>NAISUS<< Niš", *Zbornik Radova 31. Stručno-Naučnog Skupa sa Međunarodnim Učešćem, Vodovod i Kanalizacija '10*, Divčibare, Srbija, Oktobar 05.-08., 2010, pp. 129-138.  
<http://www.sits.rs/textview.php?file=strucni.html>
3. Dragan Antić, Saša Nikolić, **Staniša Perić**, Marko Milojković, "Primena Genetičkih Algoritama u Pozicioniranju 3D Krana", *Zbornik Radova 55. Konferencije za Elektroniku, Telekomunikacije, Računarstvo, Automatiku i Nuklearnu Tehniku, ETRAN 2011*, Banja Vrućica (Teslić), Bosna i Hercegovina, Jun 6.-9., 2011, pp. AU5.4-1.4  
<http://etran.etf.bg.ac.rs/>
4. **Staniša Perić**, Darko Mitić, Dragan Antić, Marko Milojković, Dejan Mitić, "Digitalno Upravljanje Sistemom Protiv Blokiranja Kočnica sa Kvazi-Kliznim Režimom", *Zbornik Radova 55. Konferencije za Elektroniku, Telekomunikacije, Računarstvo, Automatiku i Nuklearnu Tehniku, ETRAN 2011*, Banja Vrućica (Teslić), Bosna i Hercegovina, Jun 6.-9., 2011, pp. AU5.5-1.4.

- <http://etran.etf.bg.ac.rs/>
5. Zoran Jovanović, Zoran Ičić, Marko Milojković, Saša Nikolić, **Staniša Perić**, Miodrag Spasić, "Sistem za Obaveštavanje na Raskrscnici sa Pružnim Prelazom", *Zbornik radova 56. Konferencije za Elektroniku, Telekomunikacije, Računarstvo, Automatiku i Nuklearnu Tehniku, ETRAN 2012*, Zlatibor, Srbija, Jun 11.-14., 2012, pp. AU5.2-1-4.  
<http://etran.etf.bg.ac.rs/>
  6. Dragan Antić, Miodrag Spasić, Darko Mitić, Marko Milojković, **Staniša Perić**, Saša Nikolić, "LABSE – Edukaciona Maketa Bazirana na Programabilno Logičkom Kontroleru", *Zbornik radova 56. Konferencije za Elektroniku, Telekomunikacije, Računarstvo, Automatiku i Nuklearnu Tehniku, ETRAN 2012*, Zlatibor, Srbija, Jun 11.-14., 2012, pp. AU5.6-1-4.  
<http://etran.etf.bg.ac.rs/>
  7. Miodrag Spasić, Dragan Antić, Darko Mitić, **Staniša Perić**, Saša Nikolić, "Primena Digitalnog Prediktivnog Upravljanja Zasnovanog na Modelu Procesu za Upravljanje Hidrauličkim Sistemom sa Tri Rezervoara", *Zbornik radova 57. Konferencije za Elektroniku, Telekomunikacije, Računarstvo, Automatiku i Nuklearnu Tehniku, ETRAN 2013*, Zlatibor, Srbija, Jun 03.-06., 2013, pp. AU4.4-1-5.  
<http://etran.etf.bg.ac.rs/>
  8. Zoran Jovanović, Dragan Antić, Zoran Ičić, Saša Nikolić, **Staniša Perić**, "Informacioni Sistem za Praćenje Autobusa - TERMINUS", *Zbornik radova 57. Konferencije za Elektroniku, Telekomunikacije, Računarstvo, Automatiku i Nuklearnu Tehniku, ETRAN 2013*, Zlatibor, Srbija, Jun 03.-06., 2013, pp. AU5.5-1-4.  
<http://etran.etf.bg.ac.rs/>
  9. Miodrag Spasić, Darko Mitić, **Staniša Perić**, Dragan Antić, Saša Nikolić, "Feedback Linearizacija i Upravljanje Kliznim Režimima Serijskim DC Motorom", *Zbornik radova 58. Konferencije za Elektroniku, Telekomunikacije, Računarstvo, Automatiku i Nuklearnu Tehniku, ETRAN 2014*, Vrnjačka Banja, Srbija, Jun 02.-05., 2014, pp. AU2.3.1-6.  
<http://etran.etf.bg.ac.rs/>
  10. Marko Milojković, Dragan Antić, Darko Mitić, Nebojša Jotović, **Staniša Perić**, "Doprinos Razvoju Društva Znanja u Srbiji Kroz Realizaciju IPA Projekta ADRIA HUB", *Zbornik radova 58. Konferencije za Elektroniku, Telekomunikacije, Računarstvo, Automatiku i Nuklearnu Tehniku, ETRAN 2014*, Vrnjačka Banja, Srbija, Jun 02.-05., 2014, pp. AU2.7.1-3.  
<http://etran.etf.bg.ac.rs/>

f) **Tehnička i razvojna rešenja**

1. Vlastimir Nikolić, Dragan Antić, Žarko Čojbašić, Zoran Jovanović, Ivan Ćirić, Saša Nikolić, **Staniša Perić**, Marko Milojković, "Hibridno upravljanje vetro turbinama nove generacije bazirano na fazi logici, genetskim algoritmima i ortogonalnim polinomima", Mašinski fakultet u Nišu, Odluka broj: 612-113-2-5/2013, 28.01.2013.  
[http://www.masfak.ni.ac.rs/uploads/articles/www2\\_hibridno\\_upravljanje.pdf](http://www.masfak.ni.ac.rs/uploads/articles/www2_hibridno_upravljanje.pdf)
2. Dragan Antić, Zoran Ičić, Zoran Jovanović, Vlastimir Nikolić, Žarko Čojbašić, Saša Nikolić, **Staniša Perić**, Miroslav Milovanović, Dejan Mitić, Ivan Ćirić, "Trofazni pretvarač napona", Elektronski fakultet u Nišu, Odluka broj: 07/10-025/13-001, 21.03.2013.  
<http://www.elfak.ni.ac.rs/rs/nauka/projekti/tehnicka-resenja/2189-trofazni-pretvara%D1%86-napona>

**g) Učešća na nacionalnim projektima**

1. "Istraživanje klimatskih promena i njihovog uticaja na životnu sredinu. Praćenje uticaja, adaptacija i ublažavanje", (III 43007), projekat finansiran od strane Ministarstva nauke i životne sredine republike Srbije, dr Dejan Rančić, Elektronski fakultet, Niš, 2011-2015. (Program integralnih i interdisciplinarnih istraživanja)
2. "Istraživanje i razvoj nove generacije vetrogeneratora visoke energetske efikasnosti", (TR 35005), projekat finansiran od strane Ministarstva nauke i životne sredine republike Srbije, dr Vojislav Miltenović, Mašinski fakultet, Niš, 2011-2015. (Program tehnološkog razvoja)

**h) Učešća na međunarodnim projektima**

1. "Reinforcing Flexibility of SMEs by dynamic business process management - ReFLEX", FP7 Project 262305, 2011-2013.
2. "Norwegian, Bosnian and Serbian cooperation platform for university and industry in ICT R&D - NORBAS", Norwegian Ministry of Foreign Affairs, 2011-2014.
3. "Bridge technical differences and social suspicions contributing to transform the Adriatic area in a stable hub for a sustainable technological development", ADRIA-HUB, IPA Cross Border Cooperation 2007-2013, ADRIATIC IPA, 2012-2015.
4. "MORE SYnergy between Higher and Secondary EDUcation in Informatics, Computing and Electrotechnics", (MORESYN-EDU), No. 2007CB16IPO006-2011-2-14, IPA Cross-border Programme Bulgaria-Serbia, 2013.
5. "Development and improvement of automotive and urban engineering studies in Serbia" - DIAUSS, Project number 516729-TEMPUS-1-2011-1-RS-TEMPUS-JPCR (2011-2494/ 001- 001), EU TEMPUS, 2011-2014.

**i) Nerecenzirane publikacije**

1. Dragan Antić, Darko Mitić, Marko Milojković, Saša Nikolić, **Staniša Perić**, "Sistemi automatskog upravljanja u vozilima", Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet, Niš, 2014. (U okviru TEMPUS projekta "Development and improvement of automotive and urban engineering studies in Serbia" - DIAUSS, Project number 516729-TEMPUS-1-2011-1-RS-TEMPUS-JPCR).
2. Marko Milojković, Dragan Antić, Saša Nikolić, **Staniša Perić**, "Modeliranje i simulacija dinamičkih sistema", Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet, Niš, 2014. (U okviru projekta Norwegian, Bosnian and Serbian cooperation platform for university and industry in ICT R&D – NORBAS), projekat koji se finansira od strane Norveškog ministarstva spoljnih poslova.
3. Dragan Antić, Darko Mitić, **Staniša Perić**, Miodrag Spasić, "Nelinearni sistemi automatskog upravljanja", Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet, Niš, 2014. (U okviru projekta Norwegian, Bosnian and Serbian cooperation platform for university and industry in ICT R&D – NORBAS), projekat koji se finansira od strane Norveškog ministarstva spoljnih poslova.

**j) Ostalo**

1. Modeliranje i simulacija dinamičkih sistema (4.11.2013.-23.11.2013.; S4182013), <http://www.zuov.rs/programi1/detaljiStrucniSkup.aspx?kod=S4182013>.
2. Upravljanje sistemima, (25.11.2013.-14.12.2013.; S4202013),

<http://www.zuov.rs/programi1/detaljiStrucniSkup.aspx?kod=S4202013>

3. Participation to the 2014 EECI International Graduate School on Control; Course: M12 - Model Predictive Control, organized by the European Embedded Institute (EECI) at Gif sur Yvette, Paris, France. 31.03.2014-04.04.2014. Instructor: Professor Jan Maciejowski.



---

**Prilog 1.**

Izjava 1.

## **IZJAVA O AUTORSTVU**

Izjavljujem da je doktorska disertacija, pod naslovom

**Savremene tehnike upravljanja sistemom protiv blokiranja točkova**

koja je odbranjena na Elektronskom fakultetu Univerziteta u Nišu:

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada;
- da ovu disertaciju, ni u celini, niti u delovima, nisam prijavljivao na drugim fakultetima, niti univerzitetima;
- da nisam povredio autorska prava, niti zloupotrebio intelektualnu svojinu drugih lica.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci, koji su u vezi sa autorstvom i dobijanjem akademskog zvanja doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada, i to u katalogu Biblioteke, Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Nišu, kao i u publikacijama Univerziteta u Nišu.

U Nišu, 25.09.2015.

Autor disertacije: Staniša Lj. Perić, dipl. inž.

Potpis autora disertacije:

---



---

**Prilog 1.**

Izjava 2.

## **IZJAVA O ISTOVETNOSTI ŠTAMPANOG I ELEKTRONSKOG OBLIKA DOKTORSKE DISERTACIJE**

Ime i prezime autora: **Staniša Lj. Perić**

Naslov rada: **Savremene tehnike upravljanja sistemom protiv blokiranja točkova**

Mentor: **prof. dr Dragan S. Antić**

Izjavljujem da je štampana verzija moje doktorske disertacije istovetna elektronskoj verziji, koju sam predao za unošenje u **Digitalni repozitorijum Univerziteta u Nišu.**

U Nišu, 25.09.2015.

Potpis autora disertacije:

---



---

## Prilog 1.

Izjava 3.

### IZJAVA O KORIŠĆENJU

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Nikola Tesla“ da, u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Nišu, unese moju doktorsku disertaciju, pod naslovom:

#### **Savremene tehnike upravljanja sistemom protiv blokiranja točkova**

Disertaciju sa svim prilogima predao sam u elektronskom obliku, pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju, unetu u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Nišu, mogu koristiti svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons), za koju sam se odlučio.

1. Autorstvo (CC BY)
2. Autorstvo – nekomercijalno (CC BY-NC)
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade (CC BY-NC-ND)
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima (CC BY-NC-SA)
5. Autorstvo – bez prerade (CC BY-ND)
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima (CC BY-SA)

U Nišu, 25.09.2015.

Autor disertacije: Staniša Lj. Perić, dipl. inž.

Potpis autora disertacije:

---