

Слободан Н. Вукосавић

**ДИГИТАЛНО УПРАВЉАЊЕ
ЕЛЕКТРИЧНИМ ПОГОНИМА**

<< импресум >>

Рецезенти

Проф. др Милић Стојић

Проф. др Владан Вучковић

Корице

Проф. др Расико Ђурић

ДИГИТАЛНО УПРАВЉАЊЕ ЕЛЕКТРИЧНИМ ПОГОНИМА

Структура и подешавање параметара регулатора брзине и позиције.

Проблеми у управљању кретањем еластично сјезгнутих структура.

Нумерички алгоритми за ублажавање ефекта квантизације.

Умањење броја погонских давача и алгоритми за реконструкцију сигнала.

Сигнали и правци развоја DSP-базираних електричних погона.

DIGITAL CONTROL OF ELECTRICAL DRIVES

Digital speed and position control, controller structure and parameter setting.

Nonlinear position control. Control of mechanical structures with flexible coupling.

Mechanical resonance and torsional oscillations, anti-resonant filters.

Finite resolution problems in servo drives, quantization noise.

Numerical methods for the resolution enhancement and the noise reduction.

Shaft-sensorless AC drives. Single-transducer based 3-phase current reconstruction. State of the art and current trends in DSP controlled AC drives.

ИЗВОД ИЗ РЕЦЕНЗИЈЕ

Књига *Дигитално управљање електричним погонима* има карактер монографије аутора др Слободана Вукосавића, професора Електротехничког факултета у Београду. Дело је посвећено актуелној проблематици структурне синтезе, аналитичког пројектовања, физичке реализације, рачунарске симулације, експерименталног тестирања и различитих аспеката примене брзински и позиционо управљаних сервопогона са различитим врстама мотора у улози извршних органа.

Уводна поглавља књиге посвећена су оцени стања и процени перспективе развоја дигитално управљаних електричних погона: њиховим предностима, економском значају и историјату. У документацији овог прегледа, процене стања и својих предвиђања даљег развоја, аутор наводи новије податке из индустрије Сједињених Америчких Држава и индустријски развијених европских земаља, који показују интензиван развој дигитално управљаних електричних погона, који ће, по суду аутора, у блиској будућности бити доминантни. Остала поглавља понаособ представљају целине које садрже решавање проблема пројектовања и примене погона у процесној индустрији, електричној вучи, уређајима широке потрошње, роботици и флексибилној аутоматизацији. Садржај уводних поглавља одговара предавањима која аутор одржава на универзитетима у нашој земљи и иностранству, док су преостала поглавља заправо проширене верзије научних радова које је аутор публиковао у реномираним међународним часописима и реферисао по позиву на научним скуповима.

Професионална делатност у подручју развоја и примене ових погона захтева дубље познавање конструкције, карактеристика и режима рада различитих типова електричних мотора, теорије и технике дигиталних система управљања, енергетских претварача, сензора и сигналних конвертора, микрорачунаског хардвера и придружених софтверских алата. Све поменуте аспекте аутор излаже зналачки са богатим инжењерским искуством и ванредним разумевањем савремених решења у теорији дигиталних система управљања, почев од структурне синтезе, пројектовања линеарних, функционалних, логичких и оптимизирајућих нелинеарних закона управљања, придружених функција естимације стања објекта управљања, обраде мерних сигнала, оптимизације и елемената вештачке интелигенције, које се извршавају у реалном времену. При томе аутор излаже и своје оригиналне резултате развоја и, кад је год неопходно, теоријска решења тумачи физичким процесима у систему, што представља својеврсну одлику рукописа. Употребној вредности књиге посебно доприносе приказани резултати мерења и испитивања на лабораторијским моделима и реалним погонским системима које је аутор са својим сарадницима реализовао у *Лабораторији за микрпроцесорско управљање енергетским претварачима и погонима* на Електротехничком факултету у Београду.

По оцени рецензената, књига *Дигитално управљање електричним погонима* представља значајно научно дело првенствено намењено истраживачима који развијају електромоторне погоне у којима се регулише брзина вратила, угаона позиција или покретачки моменат. С обзиром на ширину и различитост области примене ових погона и професионалан инжењерски стил писања, књига је корисна и инспиративна за читаоце који у својој инжењерској пракси пројектују, примењују и одржавају електричне погоне. Мада писано у виду монографије, дело ће корисно послужити и студентима редовних и постдипломских студија као штиво за полагање испита из предмета *Микропроцесорско управљање електричним погонима* и *Микропроцесорско управљање енергетским прејварачима*, које аутор предаје на Електротехничком факултету у Београду и сродним факултетима у Србији и Републици Српској.

Preface

This is a book about digital control of electrical drives, including drive design and application aspects. This book is an outcome of lectures in “Digital control of power converters and electrical drives”, held by the author, and his professional activity in the field of servo drives over the past 15 years. Introductory chapters are focused on design, implementation and tuning of digital speed and position controllers using digital controlled servo drives as the torque amplifiers. Concluding chapters cover advanced applications of the servo drives in general automation, identify the performance limits and point out the state of the art, while making no claim to a complete coverage. Prerequisites expected from the reader include common notions on power electronics, electrical machines and control engineering as taught in most undergraduate courses.

Microprocessor-based speed and position controllers are the basic constituents of motion control systems driven by electric motors. A more general notation of motion control includes the use of hardware and software resources for the purpose of driving working parts, machine tools, manipulators and autonomous vehicles along predefined trajectories in multidimensional space. Traditional consumers for motion control products and solutions are the general automation, robotic and autonomous systems, CIM (Computer Integrated Manufacturing) and flexible automation.

Most frequently encountered torque actuators are asynchronous (induction) servo motors and synchronous motors with permanent magnet excitation. Variable frequency supply and the digital control enable AC drives to achieve a high bandwidth of the torque, speed and the position control loops. The fast response of AC servo drives qualifies them for the roles of torque-amplifiers or servo-amplifiers. Acting as a torque amplifier, an AC servo drive provides the moving torque, in proportion to the torque reference calculated within the motion controller, so as to achieve the desired motion along the chosen path and eliminate position or speed errors.

Analysis and design of motion control systems requires a sound grasp of control theory, sensors and measurements, mechanics and mechanical engineering, electric machines, analog electronic circuits, power electronics, digital electronics and microprocessors, digital signal processing and the real time programming. In the context of motion control, said disciplines are jointly referred to as *Mechatronics*. The main subjects discussed in this book are:

- Design and parameter setting of the digital speed and position controller,
- Nonlinear enhancement of the position controller in systems with torque and speed limits,
- Motion control of mechanical systems consisting of several parts with elastic coupling,
- Reduction of the servo loop noise originating from quantization and limited wordlength effects with the aid of real-time numerical algorithms,
- Design of shaft-sensorless and current-sensorless drives based on the state reconstruction mechanisms deriving the flux and torque feedback from the DC-link current and the PWM pattern, and
- Existing problems, the state of the art and development trends in the area of microprocessor controlled electrical drives.

Problems of AC motor current control, switching algorithms for the 3-phase inverter control, solutions for fast and accurate torque and flux control and the issues on sensorless AC drives are discussed in Part II of *Digital control of electrical drives*.

Introductory chapters in Part I outline the technical, economic and environmental importance of digital controlled drives, together with a brief overview of past developments. The principal drive applications are classified according to their rated power, the desired performance and the type of motor. The most critical problems are pointed out, along with the theoretical and technological grounds for their solution. Individual chapters deal with the servo system modeling, design of the motion controller structure and the parameter setting, the impact of the speed and torque limits on the response of a real system, the synthesis of nonlinear control laws designed to preserve the system performance in the presence of large disturbances and system limits, the motion control of the systems consisting of distributed centers of mass having finite stiffness of their coupling elements, the dual drive control problems, the aspect of the state reconstruction and a reduction of the measurements required within the system and the issues of finite wordlength and the quantization noise.

The coverage of specific issues includes analytical considerations, design guidelines and implementation procedures. To familiarize the reader with the subject, particular motion control solutions are illustrated with experimental results taken on a test bed equipped with servo amplifiers and motors used by most car manufacturers. Theoretical and practical results presented in this book came from

author's engineering experience and from his involvement in establishing and teaching the courses on "Digital control of electrical drives" and "Digital control of power conversion" and setting up the corresponding Laboratory at the Electrical Engineering Department, University of Belgrade. Although the closing chapters discuss some perhaps distant goals and yet unresolved motion control problems, the remaining chapters are made sufficiently self-contained to be accessible to non-experts. The book is primarily intended for undergraduate and graduate students taking the courses related to Motion control, Mechatronics and the Applied control, as well as the engineers involved in design of motion control hardware and software for products in the areas of general automation, robotics, autonomous systems, CIM and flexible automation.

In this book the microprocessor-controlled electrical drive is analyzed as an energy conversion system where electrical and electromechanical conversions take place at the same time. The author attempted to demonstrate both theoretically and experimentally that the use of advanced digital control solutions and the adoption of the integral design concept contributes to a more efficient conversion, reduces the electromagnetic and audible noises, decreases the number of sensors and cables, condenses the drive size and cuts down the required copper and iron, while at the same time increases the performance, enables fault tolerance and condition-based maintenance, and makes the drive environmentally friendly. In other words, energy and raw materials can be saved and new levels of performance can be reached by using 'more silicon' enriched with smart DSP-based control solutions.

Belgrade, 25.08.2003.

S.N.V.

Предговор

Овом књигом аутор чини покушај да читаоцу приближи проблематику пројектовања и коришћења микропроцесорски управљаних електричних погона. Анализира се микропроцесорско управљање брзином и позицијом помоћу електричног мотора који у функцији извршног органа остварује момент или силу потребну за управљање кретањем.

Дигитално управљање брзином и позицијом представља основу дигиталног управљања кретањем (МС – *Motion Control*). Шире схваћено, управљање кретањем подразумева коришћење система хардверских и програмских инструмената у циљу одржавања алата, предмета обраде, хватаљки индустријског робота или возила на жељеној трајекорији. Традиционалне области примене дигиталног управљања кретањем су роботика и аутономни системи, рачунарски интегрисана производња (СІМ – *Computer Integrated Manufacturing*) и флексибилна аутоматизација. У оквиру савремених система за управљање кретањем, актуатор момента или силе је најчешће електрични мотор. Микропроцесорски управљани електрични мотори који остварују брзе промене покретачког момента/силе и тако омогућују брз одзив у регулацији брзине и позиције познати су под именом сервопогони/сервопојачавачи. Електрични погон у оквиру система за управљање кретањем има улогу извршног органа који на вратилу мотора обезбеђује покретачки момент у складу са вредношћу коју задаје надређени алгоритам за управљање координисаним кретањем. Анализа и пројектовање система за управљање кретањем захтева познавање аутоматике, сензора и мерења, машинства и механике, електронике и енергетских претварача, дигиталних сигналних процесора и програмирања у реалном времену. Наведене дисциплине и области се у контексту управљања кретањем све чешће наводе под заједничким називом *мехатроника*.

Основне целине дате у књизи су:

- структура и подешавање параметара регулатора брзине и позиције,
- проблеми у управљању кретањем еластично спрегнутих структура,
- нумерички алгоритми за ублажавање ефеката квантизације,
- умањење броја погонских давача и алгоритми за оцену брзине и струје,
- стање и правци развоја дигитално управљаних електричних погона.

Проблеми дигиталног управљања струјом, покретачким моментом и флуksom електричних мотора, као и алгоритми управљања погонским конвертором, биће дати у другој књизи.

Значај дигитално управљаних електричних погона, њихова основна структура, историјат и техничко-економски параметри су дати у уводном делу. Најзначајније примене су приказане према снази, перформансама и врсти мотора. Потом је указано на актуелне проблеме као и на теоријске и технолошке предуслове за налажење решења. Проблеми моделовања брзинских и позиционих сервосистема, одређивања структуре и параметара регулатора, рада у режиму системских ограничења, синтезе нелинеарних закона управљања у циљу очувања квалитета одзива на велике поремећаје, проблеми механичке резонансе, алгоритми за реконструкцију стања код система са умањеним бројем сензора и алгоритамски приступи за смањење негативних ефеката квантизационог шума обрађени су у засебним поглављима која садрже детаљнија теоријска разматрања, поступке синтезе алгоритама и њихове примене, као и приказ практичних резултата и експеримената. Теоријски и практични резултати приказани у књизи проистичу из инжењерске праксе аутора, његове наставничке делатности у припреми и извођењу курса *Микропроцесорско управљање електричним погонима* и рада у оквиру истомине лабораторије при Електротехничком факултету у Београду. Књига може бити од користи полазницима поменутог курса као и слушаоцима предмета *Микропроцесорско управљање енергетским претварачима*.

Дигитално управљани електрични погон приказан је као систем у коме се једновремено одиграва електрично-електрична и електромеханичка конверзија. Аутор настоји да теоријски и практично покаже како се применом дигиталног управљања и концепта интегралног пројектовања може постићи ефикаснија конверзија, умањење електромагнетског, топлотног и звучног загађења као и умањење броја сензора које је потребно уградити у систем. Слободније речено, ова књига поручује да се енергија, гвожђе и бакар могу уштедети помоћу дигиталног управљања, дигиталних сигналних процесора и савремених полупроводника снаге.

САДРЖАЈ

страница

1. УВОД	1
1.1. Предности примене електричних мотора и дигиталног управљања	2
1.2. Економски значај	4
1.3. Историјат	5
1.4. Организација књиге	13
2. СТРУКТУРА ДИГИТАЛНО УПРАВЉАНИХ ПОГОНА И ЊИХОВА ПОДЕЛА ПРЕМА НАЗИВНОЈ СНАЗИ, ПЕРФОРМАНСАМА И ПОЉУ ПРИМЕНЕ	25
3. ПРОЈЕКТОВАЊЕ МИКРОПРОЦЕСОРСКОГ РЕГУЛАТОРА БРЗИНЕ У ОКВИРУ СИСТЕМА ЗА УПРАВЉАЊЕ КРЕТАЊЕМ	33
3.1. Значај, улога и очекиване карактеристике електричних сервопогона у системима за управљање кретањем	34
3.2. Одређивање структуре регулатора брзине	38
3.2.1. Улога диференцијалног дејства код брзинског и позиционог регулатора	40
3.2.2. Предност регулатора са пропорционалним деловањем у локалној грани	43
3.2.3. Оцена брзине обртања на основу мерене позиције вратила	45
3.2.4. Функција спрегнутог преноса	47
3.2.5. Нормализована појачања регулатора и полови функције спрегнутог преноса	49
3.3. Одређивање параметара брзинског регулатора	52
3.3.1. Формулисање критеријумске функције	54
3.3.2. Одређивање оптималних вредности параметара регулације	57
3.3.3. Испитивање динамичких карактеристика брзинског сервосистема помоћу рачунарских симулација	60
3.4. Рад брзинског сервомеханизма у режиму великих поремећаја	62
3.4.1. Инкрементална форма регулатора брзине	67
3.5. Експериментално испитивање карактеристика брзински регулисаног сервомеханизма	71

4. ПРОЈЕКТОВАЊЕ ПОЗИЦИОНОГ РЕГУЛАТОРА	75
4.1. Одређивање оптималних појачања позиционог PD регулатора	88
4.2. Испитивање својстава позиционог PD регулатора помоћу симулације на рачунару	91
4.3. Рад система са PD регулатором позиције у режиму великих поремећаја и деловања системских ограничења	92
4.4. Пројектовање нелинеарног закона управљања ради очувања квалитета одзива на велике поремећаје	94
4.5. Експериментална верификација карактеристика позиционог регулатора са пропорционалним и диференцијалним дејством	99
5. ПРОЈЕКТОВАЊЕ РЕГУЛАТОРА ПОЗИЦИЈЕ СА НУЛТОМ ГРЕШКОМ У СТАЦИОНАРНОМ СТАЊУ И НУЛТОМ ГРЕШКОМ ПРАЋЕЊА ТРАЈЕКТОРИЈЕ СА КОНСТАНТНИМ НАГИБОМ	107
5.1. Рад дигиталног регулатора позиције проширеног интегралним дејством у режиму малих поремећаја	109
5.2. Одређивање оптималних појачања дигиталног регулатора позиције са интегралним дејством у директној грани	112
5.3. Испитивање карактеристика пројектованог сервосистема помоћу рачунарских симулација	115
5.4. Карактеристике позиционог сервосистема у режиму праћења референтне трајекторије	117
5.4.1 Разлике у одзиву система са пропорционалним дејством у директној и повратној грани	120
5.5. Одзив система са пројектованим регулатором на велике улазне поремећаје	123
5.6. Генерисање референтне трајекторије	126
5.7. Пројектовање и примена нелинеарног закона управљања ради постизања робусности и очувања квалитета одзива у режиму великих поремећаја	132
5.7.1 Максимална дозвољена брзина кретања сервосистема са линеарним PID регулатором и ограниченим покретачким моментум	134
5.7.2 Увођење нелинеарних елемената у структуру регулатора ради очувања квалитета одзива на велике поремећаје	135
5.8. Испитивање одзива на велике поремећаје помоћу рачунарске симулације	138

5.9. Експериментална верификација пројектованог регулатора позиције	140
6. ПРИГУШЕЊЕ ТОРЗИОНИХ ОСЦИЛАЦИЈА И МЕХАНИЧКЕ РЕЗОНАНСЕ У СЕРВОСИСТЕМИМА ВИСОКИХ ПЕРФОРМАНСИ	147
6.1. Еластичност преносника и елемената механичке конструкције савремених производних аутомата	147
6.2. Резултати досадашњих истраживања у области управљања кретањем еластично спрегнутих структура	149
6.3. Сервосистеми са еластичним преносником	151
6.3.1. Анализа брзински регулисаног сервомеханизма са еластичном спрегом и давачем причвршћеним на вратило мотора	153
6.3.2. Анализа брзински регулисаног сервомеханизма са еластичном спрегом и давачем који мери брзину и позицију оптерећења	158
6.4. Упоредна анализа серијског антирезонантног компензатора са <i>notch</i> филтром и компензатора са FIR филтром	158
6.4.1. Микропроцесорска реализација и испитивање карактеристика антирезонантног серијског компензатора са <i>notch</i> филтром	162
6.4.2. Реализација и испитивање карактеристика антирезонантног серијског компензатора са FIR филтром	164
6.5. Експериментална верификација антирезонантног компензатора	168
7. ДИГИТАЛНО УПРАВЉАНИ ПОГОНИ СПРЕГНУТИ ЕЛЕКТРИЧНОМ ОСОВИНОМ	175
7.1. Одређивање структуре за управљање системом са електричном осовином	178
7.2. Рад система са електричном осовином у стационарном стању	180
7.3. Одређивање параметара регулације	183
7.4. Испитивање карактеристика система са електричном осовином симулацијом динамичког одзива на рачунару	186
7.5. Електронска симулација крутости и вискозног трења	188
8. УПРАВЉАЊЕ ПОКРЕТАЧКИМ МОМЕНТОМ МОТОРА БЕЗ ДАВАЧА НА ВРАТИЛУ (<i>shaft-sensorless</i>)	191

XIV

8.1. Значај и улога електричних погона без давача на вратилу	192
8.2. Умањење броја давача струје захваљујући могућности реконструкције фазних струја из струје међукола	193
8.3. Поступак одређивања активне и реактивне снаге обрадом сигнала струје у међуколу погонског претварача	195
8.4. Одређивање тренутних вредности активне и реактивне снаге	201
8.5. Одређивање компоненти вектора статорске струје на основу тренутних вредности активне и реактивне снаге	206
8.6. Одређивање просторне оријентације роторског флуksа	207
8.7. Подешавање параметара регулатора флуksа и покретачког момента	213
8.8. Експериментална верификација карактеристика погона са давачем струје у међуколу и без давача на вратилу	216
8.9. Практичан значај и могућност примене електричних погона са асинхроним мотором без давача на вратилу	221
9. УМАЊЕЊЕ ПАРАЗИТНИХ КОМПОНЕНТИ У СПЕКТРУ НАПОНА КОЈИ ДАЈЕ ПОГОНСКИ КОНВЕРТОР	223
9.1. Утицај ограничене резолуције трофазног дигиталног модулятора на статорски напон сервомотора за наизменичну струју	224
9.2. Одступања линијског напона и векторска грешка излазног напона	228
9.3. Редукција напонске грешке поступком векторског заокруживања	232
9.4. Анализа ефеката предложеног алгорита на векторску грешку и грешку линијског напона	239
9.5. Експериментална верификација	241
10. ТРЕНДОВИ У РАЗВОЈУ МИКРОПРОЦЕСОРСКИ УПРАВЉАНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОГОНА	249
10.1. Развој електричних сервомотора	250
10.2. Проблем параметарске осетљивости индиректног векторског управљања и алгоритми за оцену параметара роторског кола у току рада погона	254
10.3. Проблеми примене синхроних сервомотора са перманентном побудом ..	258
10.4. Проблеми управљања магнетопобудном силом статора у електричним погонима са моторима наизменичне струје	262
10.5. Електрични погони велике снаге и високих перформанси	270
10.6. Проблеми комуникације у области управљања кретањем	275

10.7. Карактеристике расположивих дигиталних погонских контролера	286
10.8. Перспективе развоја микропроцесорског управљања електричним погонима	299
10.9. Примена фреквенцијски регулисаних погона у уређајима широке потрошње	302
10.9.1. Електрични погони са повратном спрегом по струји међукола	303
10.9.2. Погони са трофазним асинхроним мотором без давача на вратилу намењени уређајима широке потрошње	305
10.9.3. Погони са синхроним моторима без давача на вратилу	308
10.9.4. Фреквенцијски регулисани погони намењени употреби у кућним апаратима	310
10.10. Проблеми нестабилног рада и подржаних осцилација фреквенцијски регулисаних погона при раду у области ниских брзина	310
10.11. Топологије конвертора у погонима опште намене	312
10.12. Утицај напретка у технологији полупроводничких прекидача снаге на развој микропроцесорски управљаних електричних погона	319
10.13. Бука коју стварају електрични погони	325
10.14. Савремени мотори за наизменичну струју пројектовани за примену у фреквенцијски регулисаним погонима опште намене	327
10.15. Трендови у развоју прекидачких релуктантних мотора	331
10.16. Децентрализација система за управљање кретањем и примена линеарних мотора	335
11. НЕРЕШЕНИ ПРОБЛЕМИ И ПРАВЦИ ДАЉЕГ РАЗВОЈА	343
ЛИТЕРАТУРА	349
ДОДАТАК А	373
ДОДАТАК Б	380