

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 сирегнутих 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

1. Увод

Електрични мотори утроше око две трећине произведене електричне енергије, претварајући је у механички рад потребан за производњу, обраду материјала, транспорт и друге послове који су у протеклим вековима захтевали људски рад, коришћење снаге животиња за рад и вучу, као и употребу машина које су сагоревале фосилна горива.

Потреба за увећањем брзине и прецизности обраде чини да је све већи број мотора који су електронски контролисани. Енергетска криза, потреба за увођењем алтернативних извора и уштедом електричне енергије, као и проблеми загађења животне средине, стварају простор за ширу употребу мотора чију брзину и флукс може подесити дигитални погонски контролер, увећавајући тако енергетску ефикасност.

Микропроцесорски управљан електрични погон има електрични мотор, полупроводнички претварач снаге и дигитални погонски контролер са одговарајућим програмом. Мотор обавља електромеханичку конверзију, док претварач кроз електрично-електричну конверзију прилагођава напоне и струје примарног извора (обично градске мреже) потребама мотора. Дигитални погонски контролер управља процесима електрично-електричне и електромеханичке конверзије. Излазне величине дигитално управљаног електричног погона (покретачки момент, брзина обртања вратила) треба да одговарају потребама производног, транспортног или другог процеса у који је мотор укључен.

Технолошки напредак на пољу енергетске електронике, електричних машина, сензора и дигиталних сигналних процесора у протеклој декади значајно је утицао на функционалност и форму електричних погона. Захваљујући дигиталном управљању, регулисани асинхрони и синхрони мотори су продрли и у оне индустријске, комерцијалне, војне и кућне примене где су раније коришћени пнеуматски, хидраулични актуатори или електрични мотори чија се брзина обртања не може подешавати. Веома велика брзина израчунавања дигиталних сигналних процесора (DSP – *Digital Signal Processor*) од преко 10^9 операција у секунди омогућила је да се у функције погонског контролера укључе оптимизациони алгоритми, алгоритми адаптације, естимације и реконструкције немерљивих координата стања, обраде резултата мерења, елементи вештачке интелигенције и аспекти генерисања дискретних мериторних одлука. Дигитализација је драматично увећала перформансе, док су последичне уштеде у активном материјалу, конструкцији мотора и енергији омогућиле коришћење електронски контролисаних мотора у погонима где то раније због њихове цене није било могуће.

Шире коришћење дигиталних електричних погона ограничено је настојањем корисника да се већ постојећи системи амортизују, као и потребом да се стручно и техничко особље у потребној мери оспособи за инсталацију, коришћење и одржавање дигитално управљаних система. У раним применама, поузданост електронски контролираних мотора била је мања од поузданости пређашњих система. Сви проблеми пројектовања, производње и експлоатације дигиталних електричних погона нису још увек решени, што резултује конзервативним ставом многих потенцијалних корисника. Стога у многим индустријама, транспортним системима и уређајима широке потрошње и даље преовлађују мотори који се напајају директно из мреже и немају погонски претварач. Брзина обртања, момент и флуks се код ових мотора не могу регулисати, па су перформансе система у коме се мотор користи лошије док је енергетска ефикасност мања.

Прелаз између два миленијума обележен је заштрављањем проблема енергије и загађења средине. Јасно је артикулисана потреба да се даљи индустријски развој умери и сведе на онај вид и обим који окружење у коме живимо може поднети. Међу најзначајније мере које то могу обезбедити спадају конверзија (кондиционирање) електричне енергије пре коришћења и употреба дигиталних електричних погона где год постоји потреба за претварањем електричне енергије у механички рад. Велики број техничких, економских и еколошких фактора указује на то да ће електромеханичка конверзија, дигитално управљање и енергетска електроника за ову сврху бити интензивно развијане.

Рад у области дигиталних електричних погона је мултидисциплинаран и захтева блиску сарадњу инжењера специјализованих у различитим областима. Стручњак који ради на програмирању дигиталног погонског контролера мора познавати принципе рада и прелазне процесе у електричним машинама, док су инжењери који пројектују полупроводнички претварач, аналогна и дигитална управљачка кола упућени на блиску сарадњу са пројектантима сервомотора као и са стручњацима за термичке и механичке проблеме погона. Аутор очекује да ће књига помоћи инжењерима који раде у области дигиталних електричних погона као и студентима који се за овакав рад школују.

1.1. Предности примене електричних мотора и дигиталног управљања

У индустријским погонима и погонима опште намене електрични мотори у двадесетом веку замењују гасне турбине, пнеуматске и хидрауличне извршне органе и моторе са унутрашњим сагоревањем (СУС), у мери одређеној развојем технологије. Електрични погони су расположиви у широком дијапазону снага, брзина обртања и погонских момената. Они се лако се прилагођавају различитим

условима експлоатације, међу којима је и рад у експлозивним срединама. Основне предности дигиталних електричних погона и електричних мотора су следеће:

- Електрични мотор као покретачки орган производне машине или индустријског манипулатора обезбеђује тачност позиционирања и динамички одзив какав се коришћењем другачијих актуатора не може постићи. Брзина обртања се може континуално мењати и тако прилагодити потребама радне машине.
- Дигитални електрични погон може у фазама заустављања (кочења) кинетичку енергију регенерисати у електричну, а ову под одређеним условима вратити примарном извору напајања (способност рекулације).
- Електронски контролисани мотор је за рад спреман одмах по укључењу, његово покретање није скопчано са ударима струје и момента, док је рад у стационарном стању миран и нема пулсација момента које су карактеристичне за неелектричне и монофазно напајане моторе.
- Промена смера обртања (реверзија) обавља се електронски и не захтева комутацију механичких прекидача нити прекид у напајању. Дигитални електрични погон код једноставнијих примена ради аутономно; задата вредност момента, брзине или референтна трајекторија позиционог сервопогона може бити генерисана унутар дигиталног погонског контролера. У сложенијим применама контроле кретања, брзи протоколи серијске комуникације омогућују да дигитални електрични погон ради као један од чворова у хијерархијски организованом систему са дистрибуираним управљачким задацима.
- Дигитални електрични погон може имати висок степен поузданости и дуг животни век. Одсуство механичких преклопника и дигитализовани надзор и дијагностика чине одржавање једноставним и економичним.
- Одсуство фосилних горива и продуката сагоревања, као и низак ниво буке и емитоване топлоте, чине електронски контролисане моторе еколошки прихватљивим.
- Облик електричних мотора може се прилагодити потребама радне машине и условима монтаже. Тако је могуће начинити линеарни мотор наместо ротационог или израдити мотор чији се статор налази унутар цилиндричног, шупљег ротора. Често се димензије и тежина погона умањују тако што се уместо електричног мотора за мале брзине и велике моменте угради и путем преносника спрегне мотор малог називног момента начињен за велике брзине обртања.
- Електрични мотори обухватају широк дијапазон снага, почевши од минијатурних мотора, чија је снага свега неколико миливата па до средњенапонских мотора чија снага достиже више мегавата.

- Широк је и дијапазон брзина обртања вратила, почевши од 0,001 rad/s, што се сусреће код позиционирања телескопа, па до 6000 rad/s, што је захтевана брзина обртања вретена код савремених центара за обраду метала. Поменути дијапазон се може постићи искључиво помоћу електричног мотора.
- Дигитални електрични погон има мале губитке снаге у празном ходу, висок степен корисног дејства и способност да краткотрајно развије момент више пута већи од онога који је дозвољен у трајном раду. Захваљујући дигиталном управљању и примени статичких прекидача, погон се може прилагодити различитим радним и амбијенталним условима.

1.2. Економски значај

Електрични погони у развијеним земљама утроше од 60% до 70% произведене електричне енергије [1,2]. Значај различитих врста и примена електричних погона за привреду једне земље као и трендови њиховог развоја и употребе могу се сагледати из тржишних показатеља. Релевантне анализе показују да новчана вредност електричних погона опште намене далеко превазилази вредност погона високих перформанси. Frost & Sullivan Market Intelligence извештава да је у Енглеској од укупног броја погона уграђених у другој половини деведесетих година прошлог века било 52,4% погона са моторима наизменичне струје, 33,7% са моторима једносмерне струје, док се остатак од 13,9% односи на хидрауличне и пнеуматске извршне органе. Исти извор предвиђа увећање броја погонских јединица са моторима наизменичне струје од 3,9% годишње. Према истој агенцији, овај раст се до сада и остварио, упркос неповољним привредним кретањима. У истој земљи, у погоне са машинама наизменичне струје, намењене водопривреди, издвајано је од 14 до 18 милиона фунти стерлинга годишње.

Подаци за Сједињене Америчке Државе показују да је у последњој деценији прошлог века више од 90% произведених мотора имало називну снагу испод једне коњске снаге (FHP – *Fractional HP Motors*). Од тога, произвођено је 550 милиона мотора опште намене годишње, укупне вредности 6,1 милијарди долара, док је за потребе сервопогона у аутомобилима и апликацијама индустријске аутоматизације просечна годишња производња FHP мотора са придруженим редукторима имала вредност од 1,06 милијарди долара. Већа расположивост симетричног трофазног система напона у европским земљама чини да асинхрони мотор налази већу примену него што је то случај у Сједињеним Америчким Државама. Мотори за снаге до 7,5 kW представљају 40% тржишта, 31% мотори снаге од 7,5 до 75 kW, док асинхрони мотори снаге преко 75 kW представљају 29% тржишта. Продор асинхроних мотора у област кућних апарата је релативно спор јер у овој области тржиште намеће изузетно ниске цене. Регулисани погони могу бити примењени у веш машинама и усисивачима (снаге од 0,5 до 1 kW) уколико јединична производна цена буде мања од 15 долара. Према проценама агенције

DOE (Department of Energy), технолошки предуслови за израду оваквих погона ће се стећи почетком двадесет првог века.

Раст производње електричних погона високих перформанси условљен је општим привредним развојем и инвестицијама у нова производна постројења. Успорен привредни раст је у периоду 2000 – 2002. негативно утицао на тржиште. У овом периоду, сервопојачавачи и мотори намењени индустријској аутоматизацији доживели су пад производње у износу од 20 до 30% (подаци произвођача Vickers Electric и MOOG Inc.). Развој дигиталних електричних погона одвија се углавном у високо развијеним земљама: 25% светске производње алатних машина оствари се у Јапану, 22% у Немачкој, а око 20% у Кини. Frost & Sullivan извештава да је у последњој деценији двадесетог века просечан раст производње сервопогона у Европи био око 5%. Студија агенције Motion Tech Trends предвиђа да ће продаја електричних мотора и сервопојачавача за примене у индустријској аутоматизацији у САД на почетку двадесет првог века достићи 4,5 милијарди долара, од чега се 52,8% односи на трофазне асинхроне моторе, 4,2% на корачне моторе, 22,6% на сервомоторе за једносмерну струју, и 20,4% на синхроне сервомоторе. Стални напредак у квалитету алатних материјала и алата намењених машинској обради метала и неметала омогућује увећање брзине резања. Потребан је континуирани рад на развоју електромоторних вретена за велике брзине, као и на развоју савремених решења улежиштења и хлађења мотора за главна и помоћна кретања. Потребе за дуготрајним истраживањем и инвестирањем чине развој сервопогона споријим у односу на развој погона опште намене и фаворизују производњу у високо развијеним земљама.

Употреба дигиталних електричних погона у алатним машинама и индустријским манипулаторима увећава продуктивност и квалитет производње, па је инвеститор у могућности да своје улагање релативно брзо поврати. Ситуација је неповољнија у масовним применама електричних мотора. Према DOE [3], у Сједињеним Државама се увођењем електронски контролисаних мотора у пумпе, компресоре, кућне апарате и расхладне системе годишње може уштедети 150 милијарди kWh, што омогућује повратак инвестиција у року од пет година и сматра се недовољним стимулансом за потенцијалног инвеститора. Настојања произвођача полупроводничких компоненти [4] да интегришу полупроводнике снаге са колима управљачке електронике могу допринети бржем продору дигиталних електричних погона у област пумпи, компресора, кућних апарата и других производа широке потрошње.

1.3. Историјат

Производни потенцијал људске заједнице одређен је расположивим механичким радом који се у процесе производње и транспорта може уложити. Квалитет живота и стандард становника једне земље може се оценити на основу утрошеног механичког рада – енергије по глави становника. Индустријска револуција

иницирана је стварањем могућности да се рад људи и животиња замени радом машина које су сагоревале фосилна горива. Прве примене електричних мотора забележене су у деветнаестом веку. Јакоби је 1838. начинио електрични мотор за једносмерну струју који је у Петрограду покретао чамац. У Паризу је на међународној изложби електрицитета приказано више примена електричних мотора за једносмерну струју, између осталих и први електрични трамвај напајан из контактне водене траке. Мање је познато да су и први комерцијални аутомобили имали електрични погон, све док их није потиснула појава бржих и робуснијих аутомобила са бензинским мотором.

Крајем деветнаестог века, електрични мотори обезбеђивали су око 5% укупно утрошеног механичког рада у индустријализованим земљама, али већ у првој половини двадесетог века овај удео расте на 70%. Предности електричних мотора, изложене у одељку 1.1, представљају основни разлог њиховог наглог развоја. Првобитни електрични погони користили су моторе за једносмерну струју. У овом периоду није постојала технологија потребна за градњу погонских претвараача снаге који би напојили примарног извора прилагодили потребама мотора. Подешавање напона мотора било је могуће уградњом променљивог серијски повезаног отпорника, што је било скопчано са знатним губицима снаге. Брзина обртања се у одређеним условима могла мењати и променом побудне струје код независно побуђених мотора. Теслин проналазак обртног поља, асинхроног мотора (1888.) и полифазног система чини прекретницу у развоју електричних погона. Асинхрони мотори потискују моторе за једносмерну струју у применама где се брзина обртања не мора мењати, али се све до 1960. године мотори за једносмерну струју користе када год радна машина захтева континуалну промену брзине.

Поред проблема умањене преоптеретљивости, потребе за честим заменама четкица и одржавањем колектора и нешто лошијим карактеристикама код већих брзина обртања, мотори за једносмерну струју нису се могли користити у погонима великих снага. Док се код мотора за наизменичну струју може постићи снага од више стотина мегавата у само једној јединици, мотори за једносмерну струју могу имати снагу до 10 MW, и то само у случају да њихова номинална брзина не превазилази 300 o/min. У противном, снага мотора за једносмерну струју ограничена је такозваним $P \cdot n$ производом и може се проценити као $P_{max} [MW] = 3000/n [o/min]$. Већ у првој половини двадесетог века овај недостатак постаје кочница развоја електричних погона па се јављају покушаји реализације електричних погона променљиве брзине са моторима за наизменичну струју.

Континуална промена брзине мотора за наизменичну струју захтевала је да се учестаност и амплитуда статорског напона континуално мењају, те се јавила потреба за електрично-електричним претвараачем снаге (тј. погонским претвараачем) који би напојили примарног извора прилагодио потребама мотора. Контролисани прекидачи који 1934. године стоје на располагању за градњу претвараача снаге су игнитрони, екситрони и тиратрони (живине усмераче са додатном електродом за иницирање електричног лука). Александерсон, инжењер

компаније General Electric [5], начинио је погонски претварач који је користио осамнаест тиратрона и напајао синхрони мотор снаге 375 kW напоном променљиве учестаности. Проблеми поузданости, одржавања, губитака снаге и габарита живиних усмерача учинили су да се овакви погони релативно ретко користе. Шира примена фреквенцијски регулисаних погона захтевала је развој снажних полупроводничких прекидача и брзих микроконтролера. Све до ових технолошких продора, машине за наизменичну струју, премда супериорних карактеристика, примену налазе углавном у погонима константне брзине [6].

Аутоматизација производних процеса у току шездесетих година двадесетог века доживљава нагли развој захваљујући увођењу нумеричке контроле (NC) и замени механичких сатних механизма и релеја склоповима дигиталне електронике. Распољивост првих микрорачунара (седамдесетих година двадесетог века) омогућује прелазак на флексибилније рачунарско управљање (CNC – компјутеризовано нумеричко управљање). Као извршни органи користе се хидраулички и пнеуматски уређаји (*fluid power*) док се у регулисаним електричним погонима употребљавају углавном мотори за једносмерну струју.

У току шездесетих година прошлог века појављују се и полупроводничке диоде за веће струје и напоне као и полупроводнички контролисани прекидачи (SCR – *Silicon Controlled Rectifier*), односно тиристори. Ова деценија може се узети за почетак ере енергетске електронике, јер је тада постала остварива практична градња и употреба компактних мрежом вођених исправљача, тиристорских чопера, циклоконвертора и инвертора. Створена је могућност градње погонских претварача снаге који трофазни систем напона индустријске учестаности конвертују у једносмерни напон подесиве амплитуде или трофазни систем напона континуално променљиве амплитуде и учестаности. Електрични погони са асинхроним мотором и другим моторима за наизменичну струју сада могу имати променљиву брзину обртања. Ова промена остварује се варијацијом учестаности напона на статорским намотајима (такозвана фреквенцијска регулација). Аутоматска регулација струје, брзине и момента је у управљачким колима најпре користила дискретне сигналне транзисторе, а доцније и операционе појачаваче.

Убрзани развој полупроводничке технологије резултује побољшањем карактеристика снажних прекидачких елемената, чиме трофазни инвертори променљиве учестаности и променљивог напона постају економични и поуздани. Данфос 1968. године производи легендарни VLT5, фреквенцијски регулатор тежак 54 kg, намењен регулисању брзине трофазних асинхроних мотора снаге до 4 kW (савремени еквивалент уређају VLT5 тежак је 3,5 kg [7]). Прве примене фреквенцијске регулације биле су у линијама за флаширање, а одмах потом у погонима компресора и пумпи где се захваљујући фреквенцијској регулацији елиминише механичко пригушење протока флуида и тако штеди енергија и увећава поузданост. Асинхрони мотори постају мотори променљиве брзине који постепено потискују машине једносмерне струје захваљујући већој поузданости, малој потреби за одржавањем и бољим карактеристикама.

Фреквенцијском регулацијом остварена је могућност варијације брзине обртања мотора за наизменичну струју. Теоријска знања потребна за успешно управљање оваквим погонима тада су била недовољна. Нису постојали ни адекватни дигитални погонски контролери, па динамичко понашање првих фреквенцијски регулисаних погона није било адекватно постављеним захтевима. Стога мотори за једносмерну струју у току седамдесетих година прошлог века и даље суверено владају свим погонским применама где је брзину обртања потребно мењати и при томе постићи задовољавајућу динамику.

Пионирски радови које публикују Ковач [8], Хасе [9] и Блашке [10] дају основе теорије регулације машина за наизменичну струју, доцније назване векторска регулација или трансвектор. Уз претпоставку да је позната оријентација обртног поља машине за наизменичну струју, аутори показују да се контролом релативног просторног помераја вектора статорске струје може постићи динамичко понашање које достиже и превазилази перформансе електричних погона са моторима за једносмерну струју. Теоријска разматрања било је веома тешко спровести у праксу. Алгоритми векторског управљања били су нумерички интензивни, а перформансе првих микропроцесора више него скромне.

Дигитална реализација закона управљања омогућена је седамдесетих година прошлог века појавом првих компактних осмобитних микроконтролера. Дигитална техника и дигитална реализација управљачког система код првих дигиталних електричних погона доприноси стабилности, флексибилности и побољшању перформанси. Микроконтролери и наменски начињени процесни контролери уграђују се у индустријске погоне али и уређаје широке потрошње који имају електрични мотор. Пример за то су кућни апарати, где поред функција управљања погоном, микропроцесори обављају и помоћне функције надзора, сигнализације и управљања процесима као што је прање рубља или посуђа.

У првим применама погонских микроконтролера теорија заостаје за праксом. Инжењери настоје да управљачке структуре конципирају на основу искустава стечених у пројектовању аналогних управљачких кола. Дигитални контролер тада кроз хардверске и програмске ресурсе емулира функције које су раније традиционално оствариване помоћу операционих појачавача и других аналогних електронских кола. Веома брзо долази до напретка у теорији дискретних система. Између осталог, развијени су алати за анализу и синтезу дигиталних система управљања. Развијају се и користе алгоритми управљања који у пуној мери користе предности дигиталне имплементације и који се коришћењем аналогне технике не би могли применити.

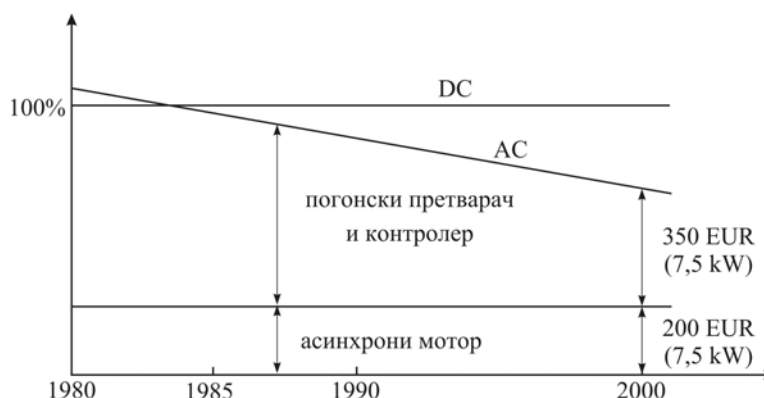
Осамдесете године двадесетог века обележене су побољшањем перформанси, умањењем цена и консеквентно масовном применом микроконтролера у задацима управљања електричним моторима и енергетским претварачима. Флексибилност у измени програма и параметара омогућила је да се јединствена хардверска платформа користи за већи број разнородних примена. Увећање броја међусобно једнаких, серијски произведених јединица довело је до повећања

економичности и поузданости, као и до једноставнијих поступака тестирања, инсталације, одржавања и замене. Изменом програма и параметара, један исти дигитални електрични погон може се користити за читав низ различитих примена, почевши од једноставног подешавања брзине обртања пумпе па до сложених функција позиционирања, генерисања и праћења трајекторија.

Паралелно се користе осмобитни и шеснаестобитни микроконтролери, при чему се код шеснаестобитних најчешће користе осмобитне спољашње сабирнице података како би се умањиле димензије управљачког модула и лакше отклонили нежељени утицај електромагнетског шума погонског претварача на рад дигиталног контролера. У оквиру електричних погона једносмерне струје често се користе осмобитне јединице које обављају функције фазног управљања мрежом вођеним тиристорским исправљачима, подешавања кружне струје код четвороквадрантних погона, као и функције брзинске и позиционе регулације сервомотора једносмерне струје. У оквиру фреквенцијских регулатора, шеснаестобитни микроконтролери користе се за реализацију трофазне ширинске модулације, компензације пада напона на статорском отпору (IR компензације) и компензације клизања. Сложене функције векторског управљања захтевале су развој брзих шеснаестобитних микроконтролера са придруженим периферијским уређајима потребним за управљање мотором за наизменичну струју [11,12]. Често се управљачке и комуникационе функције дигиталног електричног погона са векторским управљањем деле на два процесора. Један од процесора је специјализован за обављање управљачких функција (DSP) док је други конвенционалне архитектуре и обавља логичке и комуникационе задатке [13]. Процесори могу приступити заједничкој меморији (*Dual Port RAM*) и тако разменити податке о стању, параметре, команде и статус. Премда хардверски интензивнији, овакав дизајн олакшава израду, документацију и даљи развој управљачког и комуникационог софтвера у оквиру погона.

Технички проблеми који су у реализацији фреквенцијски регулисаних асинхроних мотора постојали током осамдесетих година прошлог века, данас су углавном решени, па је њихово шире коришћење сада одређено односом њихове цене и укупне цене електричног погона са мотором за једносмерну струју. У почетку је цена фреквенцијски регулисаног погона била већа, премда је сам мотор за наизменичну струју знатно јефтинији од еквивалентног мотора за једносмерну струју. Око 70% цене погона са асинхроним мотором у осамдесетим годинама односило се на конвертор снаге и електронске склопове погонског контролера (сл. 1.1), док је цена асинхроног мотора била мањи део цене погона (30%). Код погона са машинама једносмерне струје, однос је обрнут: у цени погона доминира мотор (70%) [14], чија се цена не може битно умањити и одређена је ценама бакра и гвожђа. Технолошки развој у области полупроводничких компоненти снаге и дигиталних контролера допринео је да фреквенцијски регулисани асинхрони мотор крајем осамдесетих година буде најекономичније решење за погоне опште намене. Као резултат [1], сваке године је око 15% постојећих погона са машинама за једносмерну струју замењено дигиталним електричним погонима са

асинхроним мотором, па су се крајем двадесетог века у погонима алатних машина, индустријских робота, преса, лифтова, ваљаоничких станова, компресора, пумпи, вентилатора, електричних возила, кранова и других примена променљиве брзине обртања употребљавали фреквенцијски регулисани асинхрони мотори. У развијеним земљама на крају миленијума више од половине произведене електричне енергије у механички рад конвертују управо асинхрони мотори.



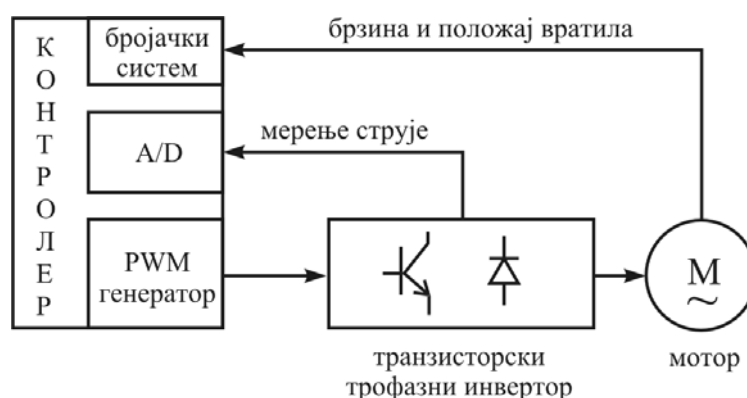
Слика 1.1. Поређење електричних погона са моторима за једносмерну струју и погона са асинхроним моторима у погледу набавне цене мотора и погонских претварача.

Дијаграм приказује тренд у промени цена у току последње две деценије двадесетог века. Ознаком AC на дијаграму је приказана укупна цена погона са асинхроним мотором, док је са DC означена цена погона са мотором једносмерне струје.

У току последње деценије двадесетог века дигитално управљани електрични мотори наизменичне струје замењују моторе за једносмерну струју и у погонима високих перформанси. Мотори једносмерне струје се више не користе у градњи нових производних машина и индустријских робота, већ раде у оквиру оних производних линија чији животног век није окончан док за њихову реконструкцију нема оправдања. Сервопогони већих снага углавном користе асинхронне моторе, док се за потребе позиционирања алата, предмета обраде или хватаљки индустријског робота користе трофазни синхронни мотори са перманентним магнетима угађеним на површину магнетског кола ротора. Сложене функције управљања електричним моторима и процесима успешно се обављају помоћу савремених уређаја енергетске електронике и компактних дигиталних контролера субмикрометарске геометрије, спремних за веома брза израчунавања. Опремљени свим потребним периферијским уређајима, компактни дигитални погонски контролери [15] у себи имају све периферијске уређаје потребне са мерење и управљање моторима наизменичне струје (сл. 1.2). Овакви дигитални погонски контролери способни су да, поред управљања мотором, обављају и друге функције

управљања кретањем и процесом. Организација управљачких система стога еволуира од централизоване ка децентрализованом. Традиционално централизовано управљање подразумевало је извршавање функција управљања кретањем и процесом у централном процесном рачунару (CNC), док су електрични погони коришћени као извршни органи са задатком да обезбеде покретачки моменат који одговара задатој вредности. Децентрализацијом се функције генерисања и праћења задате трајекторије, оцене параметара и дијагностике извршавају локално, у оквиру дигиталног електричног погона, док централни процесни рачунар обавља послове синхронизације, руководи брзом дигиталном комуникацијом између чворова дистрибуираног управљачког система и користи преостале ресурсе за планирање, оптимизацију и организацију производних секвенци.

Очекиване карактеристике дигиталног електричног погона крајем миленијума укључују пропусни опсег од 1 kHz у задавању момента и 200 Hz у праћењу задате трајекторије. Периода одабирања, у оквиру које је неопходно обавити израчунавање тригонометријских функција и начинити вишеструке трансформације координата стања достиже 50-100 μ s. Предуслов за остварење оваког циља је расположивост компактних дигиталних контролера који у јединственом интегрисаном колу [16,17] садрже језгро дигиталног сигналног процесора као и периферијске уређаје за A/D конверзију и генерисање PWM импулса. Расположивост брзих дигиталних погонских контролера отворила је могућност да се у пуној мери искористи увођење теорије просторних вектора у анализу електричних машина [8], као и концепти индиректног и директног векторског управљања [9,10]. Ове концепте било је веома тешко и непрактично имплементирати коришћењем операционих појачавача и аналогне технике. Стога су прве практичне примене [18] забележене након појаве шеснаестобитних погонских контролера [19], две деценије након публиковања првих теоријских радова о векторском управљању.



Слика 1.2. Основне функције мерења и управљања у оквиру дигитално управљаног електричног погона. Мерење струја, напона, брзине обртања, као и генерисање ширински модулисаних импулса за управљање полупроводничким прекидачима снаге, остварује се у оквиру дигиталног погонског контролера.

Према појава шеснаестобитних погонских контролера [15] означава почетак дигитализације електричних погона, динамичка својства првих векторски контролираних погона била су релативно скромна [18,19,20] и примерена карактеристикама до тада коришћених мотора једносмерне струје. Конвенционална, Фон Нојманова архитектура контролера била је недовољна за обављање неопходних функција, међу које спадају дигитална регулација струје, брзине и позиције, оцена параметара и стања која се не могу мерити, као и ниже функције управљања кретањем. Појава DSP-базираних погонских контролера [16] у пуној мери уводи моторе наизменичне струје у област управљања кретањем и омогућује достизање перформанси које се са моторима за једносмерну струју нису могле имати.

Шира примена дигиталних електричних погона отвара читав низ проблема управљања које је потребно решити. Осетљивост векторски управљаних мотора за наизменичну струју на варијације параметара у току рада [21,22] захтева развој и примену алгоритама за идентификацију параметара мотора и процеса [23] и то у фази инсталације и иницијалног подешавања [24], као и доцније, у току рада погона [25]. Потреба за применом оптимизационих метода и неопходност побољшања перформанси дигиталних регулатора струје [26] доводи до реализација заснованих на трансјутерима и сигналним процесорима [16,27]. Могућност обављања већег броја паралелних функција, конкурентно извршавање алгоритама и могућност обављања више од милијарду операција у секунди [17] обезбеђују извршавање локалних контура оптимизације и адаптације, значајно побољшање карактеристика погона и омогућују нове приступе управљању [28]. Примена концепта директног дигиталног управљања резултује развојем алгоритама за директно (DTC – *Direct Torque Control*) и инкрементално (IncTC) управљање моментом. Развој робусних алгоритама за оцену параметара и стања као и могућност дигиталне реконструкције фазних струја из струје једносмерног међукола погонског претвараача (*DC link*), омогућује да се умањи број неопходних сензора у погону.

У последњих десетак година велики број стручњака даје значајан допринос истраживању и развоју дигиталних електричних погона, који захваљујући томе, у време настанка ове књиге, постају препознатљиви производи са консолидованом технологијом. Дигитални електрични погони се данас производе у великим серијама. Поред техничких карактеристика све важнији фактор је и њихова цена.

У области индустријске аутоматизације и производних машина, ток еволуције аутоматских погона и машина условљен је непрекидним развојем поступака производње и обраде материјала. Поред увећања брзине и прецизности обраде, у погон је потребно уградити функције доношења одлука и елементе вештачке интелигенције, док се у погледу топологије тражи модуларност и децентрализација.

Потреба за уштедом енергије и неопходност прилагођења привреде и њеног раста могућностима животне средине фаворизује коришћење алтернативних извора енергије и увођење електронски контролираних мотора у масовним погонским применама, као што су апарати за домаћинство. Чињеница да су

електрични мотори највећи потрошачи електричне енергије стимулише развој алгоритама, поступака и направа за уштеду електричне енергије кроз смањење губитака и последично увећање енергетске ефикасности електричних погона. Ови трендови стварају потребу за дигиталним електричним погонима у областима где они до сада нису коришћени. Шира примена захтева умањење иницијалних трошкова и цене погона. Ово се може остварити умањењем броја сензора који се у погону користе, применом нових врста мотора и редуктованих топологија погонског претварача.

Прелаз између два миленијума обележен је све већим загађењем ваздуха у великим градовима. Значајан извор загађења су издувни гасови створени сагоревањем фосилних горива у аутомобилским моторима. Међу еколошки прихватљива возила убрајају се хибридни (HEV – *Hybrid Electric Vehicle*) и електрични аутомобили (ZEV – *Zero Emission Vehicle*). За покретање HEV и ZEV возила користе се вучни мотори за наизменичну струју који су дигитално управљани.

Примена дигиталних електричних погона у наредним годинама ће зависити од технолошких и алгоритамских побољшања и увећања њихове економичности и флексибилности. Заоштравање енергетске кризе и проблема загађења животне средине стимулисаће њихову масовну употребу. Овом књигом аутор настоји да студентима приближи проблематику пројектовања и коришћења дигиталних електричних погона, као и да стручњацима који се овом облашћу професионално баве помогне у разумевању проблема и сагледавању трендова.

1.4. Организација књиге

Структура дигиталног електричног погона изложена је у **другом** поглављу, где је извршена и подела по снази, перформансама и области примене.

Треће поглавље се бави питањима моделовања брзинских сервосистема, одређивања структуре и параметара дигиталног регулатора брзине, као и рада у режиму системских ограничења. У оквиру овог поглавља пажња је посвећена управљању кретањем, проблемима реконструкције брзине из одбирака позиције, праћења задате промене брзине и проблемима увећања тачности и брзине одзива. У фази аналитичког пројектовања, микропроцесорски управљани електрични погон сматра се извршним органом који на вратилу мотора обезбеђује покретачки момент у складу са вредношћу коју задаје алгоритам за управљање брзином обртања. Проблеми регулације покретачког момента анализирани су у другом делу књиге. У функцији извршног органа брзинске контуре, електрични погон обавља функције управљања кретањем алата или предмета обраде у производним процесима. Изложен је основни управљачки задатак који се пред електричне погоне поставља, и дате су типичне структуре за управљање брзином обртања. Дефинисана је критеријумска функција која квантификује квалитет, робусност и брзину одзива, и предложен метод за одређивање оптималних параметара регулације.

У **четвртм** и **петом** поглављу дата је анализа позиционих сервосистема, синтеза дигиталног регулатора позиције и дат метод за подешавање параметара. Приказане су фазе аналитичког пројектовања, симулације и верификације дигиталног регулатора позиције. Указано је на негативне ефекте које стварају пребачај у одскочном одзиву позиције и осцилације покретачког момента у фази смирења. Дефинисан је метод за подешавање параметара регулације који гарантује стриктно апериодичан одзив највеће могуће брзине у свим режимима рада. Разматран је проблем који ствара системско ограничење покретачког момента и брзине обртања у режиму великих поремећаја и показано је да последична нелинеарност може резултовати губитком квалитета одзива и нестабилношћу. Пројектован је нелинеарни алгоритам управљања који осигурава жељени квалитет одзива и у режиму великих поремећаја. Карактеристике реалног позиционог сервомеханизма читаоцу су предочене у виду већег броја експерименталних резултата и резултата симулације.

У **шестом** поглављу су дата теоријска разматрања потребна за разумевање проблема механичке резонансе и торзионих осцилација. Механички спрегнути елементи производних аутомата, индустријских робота, манупулатора и електричних возила представљају систем еластично спрегнутих центара масе. Деловањем силе или момента на један од елемената могу бити побуђене пригушене осцилације. Успостављањем повратне спреге по брзини или позицији појединих елемената и употребом сервомотора ради управљања кретањем, механичке осцилације могу постати подржане (*sustained*) или прећи у нестабилност. У оквиру поглавља се анализирају активне и пасивне антирезонантне мере. Поглавље садржи и кораке аналитичког пројектовања антирезонантног серијског компензатора у виду нарочито подешеног FIR-филтра (*Finite Impulse Response*). Компензатор је погодан за употребу у брзинским и позиционим сервомеханизмима који управљају кретањем механичких структура са еластично спрегнутим дистрибуираним масама. Ради илустрације, приложени су експериментални резултати и резултати симулација.

Седмо поглавље се бави пројектовањем и применом алгоритма за управљање кретањем познатог као електрична осовина. У случају да се два раздвојена дела машине покрећу независним сервомоторима, поменути начин управљања омогућује да се механичка спрега замени електронском емулацијом осовине или другог елемента за механичко спрезање. Алгоритам може бити примењен и у случају када постоји механичка спрега раздвојених делова машине али постоји потреба да се измени коефицијент крутости или коефицијент пригушења. У пракси се често сусреће потреба да се поједина кретања остваре помоћу више међусобно повезаних електричних мотора. Вратила ових мотора су најчешће круто или еластично спрегнута, али постоје и примене у којима се вратила у одсуству механичке спреге независно обрћу. Употреба више мотора може имати техничку или економску оправданост. Кретање веома дугих конвејера је равномерније а ризик проклизавања мањи уколико се примени и равномерно распореди већи број мотора мање снаге. Алгоритам електричне осовине генерише задату вредност момента за

сваки од мотора на начин који резултује понашањем система које би се имало када би вратила свих мотора била механички спрегнута. Сада је могуће елиминисати велики број спрежних елемената, чиме се остварује значајна уштеда и умањење тежине радне машине. Поглавље садржи фазе аналитичког пројектовања управљачке структуре, метод за подешавање параметара симулиране механичке спреге, као и резултате верификације добијене помоћу рачунара и у лабораторији.

У **осмом** поглављу анализирана је могућност управљања моментом и флуksom електричног погона који користи мањи број погонских сензора и код кога се поједина стања морају реконструисати на основу расположивих мерења и познавања модела погона. Елиминацијом давача на вратилу и смањењем броја давача струје умањује се цена погона, а повезивање чини једноставнијим и рад поузданијим. Избор електричног погона је веома често зависио од његове цене па су примену најчешће налазили електрични погони који се директно прикључују на мрежу индустријске учестаности, немају погонски претварач и раде са константном брзином обртања. На прелазу између два миленијума, критеријуми за избор се постепено мењају. Енергетска криза и проблем загађења артикулишу потребу за уштедом електричне енергије и њеном конверзијом пре употребе. Електрични погони у канцеларијским, резиденцијалним и другим масовним применама утроше знатан део произведене енергије, па се применом електронске регулације могу остварити значајне уштеде. Прихватљивост дигиталних електричних погона ће и даље зависити од њихове цене, па је неопходно чинити даље кораке у развоју алгоритама управљања и топологија погонских конвертора, и пројектовању економичних, ефикасних мотора. Један од начина за градњу економичних погона је умањење броја погонских сензора. Поред уштеде на сензорима, нестаје и потреба за периферијским уређајима који повезују сензор и погонски контролер. Једновремено се умањује број проводника и производња самог погона чини једноставнијом. Сензоре струје који се у погону користе могуће је свести на један, који би мерио струју у једносмерном међуколу погонског конвертора. У поглављу су изложена теоријска разматрања која потврђују постојање могућности да се три фазне струје мотора издвоје из сигнала струје међукола. Основне карактеристике регулисаног погона са повратном спрегом по струји међукола могу се сагледати из експерименталних резултата и експлоатационих искустава садржаних у оквиру поглавља. Значајне уштеде се могу постићи уклањањем давача брзине на вратилу мотора. Поред осталих предности, осна дужина мотора је краћа за дужину давача (сензора). Одсуство проблема механичког спрезања сензора и мотора поједностављује производњу мотора. Уместо мереног сигнала, повратна спрега по брзини се може успоставити захваљујући оцени брзине обртања. Податак о брзини обртања вратила садржан је у терминалним напонима и струјама. Алгоритам за оцену брзине обртања захтева познавање параметара мотора, имплицира интеграцију терминалних напона и има осетљивост на паразитне ефекте као што је мртво време (*dead-time*, *lockout-time*) полупроводничких прекидача и офсет. Параметарска осетљивост је нарочито изражена у режиму малих брзина обртања и малих учестаности напајања, па је рад дигиталног електричног погона који ради без

давача брзине (*sensorless drive*) у пракси расположив за брзине веће од 5-10% номиналне брзине обртања мотора. У оквиру осмог поглавља дата су теоријска разматрања и аспекти имплементације алгоритама за оцену брзине обртања асинхроног мотора, који су у пракси дали добре резултате.

У **деветом** поглављу су анализирани ефекти ограничене резолуције дигиталног модулятора на спектар напона и струја, и предложен нумерички поступак за обраду модулационих сигнала који резултује умањењем паразитних компоненти спектра. Дигитални модулар је периферијски уређај бројачког типа који генерише управљачке импулсе за контролу стања трофазног транзисторског инвертора. Трофазни напонски инвертор је део погонског претварача и користи се као извршни орган (актуатор) струјног регулатора, па су у поглављу најпре изложени прекидачки алгоритми за управљање инвертором. Инвертор је нелинеаран извршни орган чији фазни напони могу имати само два дискретна напонска нивоа. Управљачки захтеви подразумевају континуалну промену фазних напона, како би се обезбедило напајање мотора напоном простопериодичне промене. Техником ширинске модулације (*PWM – Pulse Width Modulation*) функција преноса инвертора се линеаризује па је могућа континуална промена амплитуде и учестаности основне компоненте напона. Дата су теоријска разматрања везана за *space-vector* модулацију и изложене специфичности њене имплементације. Потом је указано на проблеме паразитних компоненти у спектру ширински модулисаних напона. Ове компоненте се јављају услед коначне резолуције дигиталних ширинских модулятора као и због ограничења комутационе учестаности инвертора. Поглавље садржи поставке оригиналног решења за умањење паразитних спектралних компоненти напона, као и резултате мерења који илуструју могућа побољшања.

Трендови у развоју микропроцесорски управљаних електричних погона дати су у **десетом** поглављу. У одељку 10.1 изложени су проблеми примене и резултати развоја електричних сервопогона који се користе као актуатори у брзинским и позиционим сервосистемима. Најчешће сусретани начин управљања флуksom и моментом асинхроног сервомотора је индиректно векторско управљање, чија имплементација захтева познавање роторске временске константе самог мотора. Одељак 10.2 анализира проблем параметарске осетљивости векторски контролисаних асинхроних мотора. У оквиру одељка, пажња је посвећена ефектима промене роторског отпора које настају због варијације температуре активних делова мотора у току рада. Детаљније су приказана решења за оцену критичних параметара која у пракси дају добре резултате.

Трендови у развоју и примени синхроних сервомотора са перманентним магнетима на ротору приказани су у одељку 10.3. У ротору који има перманентне магнете, начињене од ретких земаља или ферита, нема значајнијих губитака снаге што у великој мери умањује проблем хлађења и олакшава конструкцију мотора. Мањи губици снаге и присуство перманентне побуде омогућују да се оствари већа специфична снага, тј. да се конструишу синхрони сервомотори са перманентном побудом мањих димензија и тежине од асинхроног мотора једнаке снаге.

Коначан број магнетских модула монтираних на површину ротора ствара магнетско поље са сложенопериодичном расподелом. У интеракцији са ефектима ожлебљења, дискретан карактер магнетских модула ствара нежељену валовитост покретачког момента. Учестаност пулсација момента може бити изван пропусног опсега регулатора брзине, те присуство повратне спреге не може отклонити ефекте пулсација момента на праћење жељене трајекторије брзине или трајекторије позиције. У оквиру поглавља назначени су правци развоја алгоритама за предикцију валовитости момента (*cogging*) синхроних сервомотора и *feed-forward* компензацију, уведену са циљем да се умањи грешка у праћењу референтне трајекторије.

У одељку 10.4 изложено је стање у развоју дигиталних регулатора струје. Размотрени су најпре недостаци првобитних струјних регулатора, имплементираних помоћу аналогних управљачких кола. Регулатор са хистерезисом у струјним компараторима (хистерезисни регулатор), као и линеарни PI регулатор струје, користили су се у првим дигиталним електричним погонима. Ови погони су користили прве осомбитне погонске контролере ограничених могућности. Регулација брзине и позиције вршено је помоћу дигиталног контролера, док је статорска струја регулисана аналогно, помоћу хистерезисних или линеарних PI регулатора. Регулација струје у стационарном координатном систему главни је узрок недостацима аналогних струјних регулатора. Обртна трансформација и прелазак у синхронно ротирајући координатни систем практично је остварива код дигиталне имплементације, којој је посвећено даље излагање. Дигитална регулација струје захтева да се подаци о статорским струјама прибаве у дигиталном облику, уз што мањи шум и кашњење. Размотрени су проблеми мерења и изолованог преноса, као и аналогни филтар пред одабирачем, конверзија у дигитални облик и даља обрада. Изложен је поступак подешавања параметара дигиталног регулатора струје који је имплементиран у синхронно ротирајућем координатном систему. Конвенционални PI регулатор струје има нежељену спрегу између d и q осе. Примена ИМС концепта (ИМС – *Internal Model Control*) може отклонити паразитну спрегу између оса, што је примером и показано. Дигитални регулатор струје смештен у dq координатни систем у спрези са директним или индиректним векторским контролером момента и флуksа је управљачка структура примењена у већини савремених дигиталних електричних погона. Ова структура је каскадна, чиме су одређени и њени недостаци. Један од недостатака каскадне структуре манифестује се при раду у режиму слабљења поља. Електромоторна сила индукована у намотајима статора је тада блиска максималном расположивом напону инвертора. Напонска инсуфицијенција представља системско ограничење које онемогућује управљање статорском струјом. У каскадној спрези са регулатором флуksа и момента, нефункционални регулатор струје може довести до нестабилног рада погона и подржаних осцилација. Међу недостатке каскадне структуре спада и редундантност појединих управљачких акција као и субоптимално подешавање параметара регулатора флуksа, момента и струје. Поменути недостаци се могу отклонити применом структуре за управљање моментом и флуksом која неће бити каскадна.

Директно управљање машинама за наизменичну струју, познато под скраћеницом DTC (*Direct Torque Control*), елиминише недостатке каскадног приступа управљању моментом и флуksom, и налази све већу примену.

Одељак 10.5 бави се проблемима примене микропроцесорски управљаних погона велике снаге. Како ови мотори имају значајан утрошак електричне енергије, од интереса је прилагодити амплитуду флуksа оптерећењу како би се процес електромеханичке конверзије обавио уз минималне губитке снаге. За одређени радни режим, губици снаге се мењају у зависности од амплитуде флуksа као параболна функција са јединственим минимумом, тако да алгоритам за минимизацију губитака у току рада погона може користити метод градијентног претраживања. Недостатак метода који се заснивају на претраживању је потреба да се флуks непрекидно мења у мањим или већим корацима како би се кретање усмерило ка траженом минимуму. Алгоритми за минимизацију губитака у великим асинхроним моторима могу бити засновани и на функционалној апроксимацији губитака снаге, при чему се оптимална амплитуда флуksа тада израчунава директно, одређивањем минимума функције. Скоковите промене флуksа у том случају нису потребне, али је неопходно одредити функцију која на довољно прецизан начин апроксимира губитке снаге у функцији радног режима. Поменути проблеми и правци развоја изложени су у одељку 10.5.

У одељку 10.6 изложено је стање у области дигиталних уређаја и поступака који се користе у комуникацији између микропроцесорски управљаних погона, у повезивању погона са удаљеним уређајима за мерење и управљање, као и у комуникацији између погона и надређеног рачунара.

Одељак 10.7 приказује проблеме и трендове у развоју дигиталних погонских контролера. Изложени су еволуција дигиталних погонских контролера и утицај напретка у пољу микроконтролера и дигиталних сигналних процесора на развој микропроцесорски управљаних електричних погона. Указано је на основне разлике које постоје између система код којих су дигитални ресурси (DSP, RAM) и аналогни периферијски уређаји (A/D) интегрисани у јединственом колу и система код којих се аналогни и дигитални уређаји раздвајају. У оквиру дигиталног електричног погона обавља се дигитализација и обрада сигнала добијених мерењем, извршавање управљачких алгоритама и генерисање сигнала за управљање извршним органима, као што су снажни полупроводнички прекидачи у погонском претварачу. Обрада улазних и стварање излазних сигнала обавља се у оквиру периферијских уређаја међу којима је дигитални модулатор, бројачки систем за мерење ширине и броја импулса, аналогно-дигитални конвертор (A/D), ризолвер-дигитални конвертор (R/D, дигитализовани хетеродин), дигитално-аналогни конвертор (D/A) и многи други. Периферијски уређаји се могу израдити у засебном интегрисаном колу које у току рада паралелно, серијски или преко дељене меморије комуницира са дигиталним погонским контролером. Могуће је, међутим, интегрисати периферијске уређаје и погонски контролер у јединствено интегрисано коло. У поглављу су изложене и примерима илустроване предности ових

приступа и указано је на њихове недостатке. Градња дигиталних електричних погона намењених уређајима широке потрошње ствара потребу за дигиталним погонским контролерима умерених перформанси и веома ниске цене. Очекује се да у серијама реда величине 10^6 њихова цена буде нижа од једног евра. Многи уређаји широке потрошње у резиденцијалном и канцеларијском сектору раде без прекида. Због тога, као и због једноставније градње помоћних напајачких степена у оквиру погона, пожељно је да потрошња дигиталног погонског контролера буде мања од 20 mW. У оквиру поглавља су приказани контролери чије су карактеристике блиске траженим. У основним цртама је приказана и проблематика пројектовања економичних погона за уређаје широке потрошње. Захтев за увећањем нумеричких могућности дигиталних погонских контролера у погонским применама високих перформанси проузрокован је пре свега потребом да се увећа брзина и тачност позиционирања, као и да се напредним мерама надзора и дијагностике увећа продуктивност и поузданост производних аутомата. Поред овога, постоји и тренд умањења броја сензора, што захтева да се до сада мерене величине и стања одређују индиректно, на основу преосталих мерења и познате динамике објекта. Примена алгоритама за оцену стања и параметара додатно оптерећује дигитални погонски контролер. Стања електричног мотора или механичког подсистема погона све чешће се оцењују на основу специфичних карактеристика спектра мерених сигнала. Ово ствара потребу да се у реалном времену врши трансформација сигнала из временског у фреквенцијски домен (FFT – *Fast Fourier Transform*), чиме захтевани нумерички капацитет дигиталног погонског контролера превазилази 10^8 операција у секунди (100 MIPS). Првобитни покушаји градње брзе управљачке јединице на бази транспјутера резултовали су недовољно флексибилним структурама. Савремени дигитални погонски контролери за примене високих перформанси често имају засебне процесоре за обављање комуникационих и управљачких функција. Често се извршавање функција управљања подели између специјализованог сигналног процесора (DSP – *Digital Signal Processor*) и високо интегрисаног програмабилног логичког кола (FPGA – *Field Programmable Gate Array*). Веома брза израчунавања која се увек обављају на једнак начин тада се извршавају у FPGA колу, док се преостале управљачке функције повере сигналном процесору. Типичне FPGA-функције су дигитална филтрација, брзе трансформације из временског у фреквенцијски домен (FFT), векторско множење у оквиру израчунавања корелације или конволуције, као и компресија матрично уређених података. Перспективе развоја микропроцесорског управљања електричним погонима високих перформанси дате су у одељку 10.8.

Одељак 10.9 се бави проблематиком примене микропроцесорски управљаних електричних погона у уређајима широке потрошње. Пумпе, вентилатори, компресори, као и погони у оквиру других уређаја који се масовно производе, традиционално су покретани електричним моторима константне брзине обртања. У одсуству погонског претварача, напон на мотору одређен је условима у напојној мрежи и не може се регулисати. У оваквим погонима, најчешће се користе

монофазно напајани асинхрони мотори са помоћном фазом, стартним кондензатором или засењеним полом, трофазни асинхрони мотори као и колекторски мотори. У странијој литератури познат под називом универзални мотор (*universal motor*), колекторски мотор се веома често користи у кућним апаратима. По конструкцији је сличан редном мотору за једносмерну струју, с тим што у редној вези побудног и арматурног намотаја постоји наизменична струја индустријске учестаности. Одликује се добрим полазним моментом и малом стрмином механичке карактеристике, што га чини погодним за погонске примене у кућним апаратима. Присуство колектора и четкица умањује поузданост овог мотора и ограничава његову примену на област мањих снага. Монофазни и трофазни асинхрони мотори, као и колекторски мотори, при поласку имају знатно веће струје у намотајима. Поред ове непогодности, постоји и потреба да се без могућности регулације напона оствари поуздан рад при различитим оптерећењима. Као последица, поступак пројектовања мотора је знатно отежан и изискује читав низ компромисних решења која, у крајњој линији, увећавају количину бабра и гвожђа уграђеног у мотор и знатно увећавају губитке у магнетском колу и намотајима. С друге стране, фреквенцијска регулација брзине обртања асинхроног мотора захтева уградњу погонског претварача (трофазног транзисторског инвертора) као и коришћење дигиталног погонског контролера за обављање функција мерења, управљања и заштите. Приказ стања и трендова развоја дат у одељку 10.9 указује на потребу даљег технолошког напретка како би се цена микропроцесорски управљаних електричних погона умањила у мери која би омогућила њихову ширу примену.

У одељку 10.9.1 приказани су проблеми и трендови развоја електричних погона са повратном спрегом по струји међукола. Комплексност и цена фреквенцијске регулације може бити умањена редукцијом броја погонских сензора. Један од начина да се број мерења умањи је уклањање сензора струје у фазама и њихова замена јединственим сензором који мери струју у међуколу погонског претварача. Корелацијом ширински модулисаних сигнала за управљање прекидачима инвертора са сигналом мерене струје могуће је фазне струје реконструисати и даље користити у циљу управљања моментом и флуksom мотора.

Одељак 10.9.2 приказује стање у развоју алгоритама за управљање асинхроним мотором који нема давач на вратилу. Алгоритам за реконструкцију брзине обртања ротора асинхроног мотора, који би потребну информацију обезбедио у свим радним режимима погона и при томе био прихватљиве цене и умерене сложености, још увек не постоји. Практични значај уклањања давача на вратилу и евентуалне реализације *sensorless* погона чини да велики број истраживача широм света испитује различите поступке добијања сигнала брзине из терминалних величина – статорских струја и напона. У одељку 10.9.2 анализирани су предности и недостаци најуспешнијих до сада публикованих решења, и указано је на правце даљег развоја.

Предности синхроних мотора са перманентном побудом на ротору, наведене у одељку 10.9.3, ове моторе чине погодним за покретање компресора и

вентилатора у расхладним системима. Синхрони мотори са перманентном побудом немају губитака снаге у ротору. Скупљи су али и знатно ефикаснији од асинхроних мотора, па су и њихове димензије и тежина при истој снази мање. Ови мотори све чешће налазе примену у уређајима широке потрошње где су димензије и степен корисног дејства мотора од нарочитог значаја. Међу карактеристичне примене спада покретање компресора за потискивање флуида у цевоводима расхладних уређаја и система. Указано је на проблеме покретања компресорских мотора из стања мировања, као и на аспекте оцене и регулације брзине обртања. Из разлога економичности и компактности, погон са перманентно побуђеним синхроним мотором треба да функционише без давача на вратилу (*sensorless*). Проблеми пројектовања и експлоатације *sensorless* погона са синхроним мотором дискутовани су у оквиру одељка 10.9.3. Трендови у примени *sensorless* погона у кућним апаратима дискутовани су у одељку 10.9.4. У овим погонским применама захтева се поједностављење мотора, конвертора и што мањи број сензора како би се постигла мала цена. Поред универзалних (колекторских) мотора, користе се и фреквенцијски регулисани асинхрони мотори као и синхроних мотори са перманентним магнетима на ротору (PM – *Permanent Magnet Motors*). Све већу примену налазе редуковане конструкције PM мотора, међу којима је монофазни PM мотор и PM мотор са помоћном фазом.

Одељак 10.10 приказује проблеме нестабилног рада и подржаних осцилација погонске групе која има два или више асинхроних мотора. Паралелним везивањем статорских намотаја више асинхроних мотора има се могућност да се овако створена група напаја из јединственог погонског претварача. Једнака статорска учестаност и синхрона брзина мотора често погодује радном механизму који се на поменути начин покреће. Амплитуда и учестаност статорског напона заједнички су свим јединицама па не постоји могућност да се појединачним моторима обезбеди локална повратна спрега. Различити поремећаји који делују у механичким подсистемима појединих мотора могу проузроковати осцилације. Како је статорски напон јединствен за све моторе, није могуће применити засебно корективно-стабилишуће деловање регулатора само за посматрани мотор. Проблем стабилности групе фреквенцијски регулисаних асинхроних мотора који раде без локалне повратне спреге анализиран је у оквиру одељка 10.10. Посебна пажња посвећена је утицају мртвог времена у прекидачима погонског претварача као и анализи могућности за стабилизацију вишемоторног погона.

Одељак 10.11 анализира проблеме експлоатације погонских претварача и приказује основне правце развоја њихових топологија. Конвенционални погонски претварачи имају два раздвојена степена конверзије. Исправљачки степен конвертује мрежни напон у једносмерни (AC/DC). Пасивне компоненте једносмерног међукола врше филтрацију овог напона и акумулацију енергије. Трофазни напонски инвертор конвертује једносмерни напон међукола у наизменични, променљиве амплитуде и учестаности. Алтернатива двостепеној конверзији су директни AC/AC претварачи који немају међуколо већ се у њима обавља директна конверзија наизменичног напона мрежне учестаности у излазни напон варијабилне

амплитуде и учестаности. Директни претварачи се у литератури помињу као *direct frequency changers* или матрични конвертори. Конверзија снаге у оквиру погонског претварача имплицира изузетно брзе промене напона и струја у појединим гранама (di/dt , dv/dt). Пропратна појава су губици снаге, бука и електромагнетске сметње. Губици снаге у стању провођења или у току комутације умањују степен корисног дејства претварача и увећавају топлоту коју је потребно одвести. Бука створена услед појаве магнетострикције може погон начинити неприхватљивим у просторијама где има људи, док електромагнетске сметње могу онемогућити рад других блиских електронских уређаја. У оквиру поглавља, анализирани су постојеће врсте полупроводничких прекидача и показано је како се њихове особине одражавају на карактеристике погона. Пажња је посвећена утицају који брзе промене напона (dv/dt) могу имати на електрични мотор. Брзе промене напона могу довести до оштећења лежаја мотора као и убрзаног старења изолације статорског намотаја. Резонантне топологије погонског претварача елиминирају потребу за брзим променама напона, па се отвара могућност да се њиховим развојем и применом поменути проблеми отклоне. Погонски претварачи у склопу дигиталног електричног погона треба да имају одређену робусност у погледу нерегуларности мрежног напона. Поред овога, све чешће се јавља захтев да се енергија добијена кочењем погона врати у градску мрежу процесом рекуперације. Коначно, код примене електронски контролисаних погона великих снага ($P > 300 \text{ kW}$) потребно је имати погонски претварач који на својим излазним прикључцима даје наизменичан напон варијабилне учестаности и амплитуде од неколико киловолти. Најзначајније топологије претварача учестаности и трендови у развоју погонских претварача дати су у оквиру одељка 10.11. Утицај напретка у технологији полупроводничких прекидача снаге на развој микропроцесорски управљаних погона дат је у одељку 10.12, док су проблеми буке коју погони стварају у току рада изложени у одељку 10.13 уз приказ досадашњих решења и праваца истраживања.

Одељак 10.14 приказује стање и трендове развоја у пројектовању савремених мотора за наизменичну струју. Поступци пројектовања трофазних асинхронних мотора су у току читавог прошлог века били усмерени ка изради мотора напајаних из трофазне градске мреже, без могућности регулисања путем промене учестаности. При покретању мрежно напајаног асинхронног мотора, ротор је заустављен док је учестаност статорских струја једнака мрежној учестаности. Ефективна вредност струје статора вишеструко превазилази номиналну, губици у ротору и статору могу превазићи номиналну снагу, док велика вредност клизања ($s = 1$) проузрокује релативно мали покретачки момент. При пројектовању оваквих мотора предузима се низ мера усмерених ка увећању полазног момента, свођењу полазне струје на прихватљиву меру и увећању максималног (превалног) момента који мотор може развити. Као последица ових мера, мотор не може бити оптимизиран у погледу губитака снаге у празном ходу и номиналном режиму рада. Из истог разлога, утросак гвожђа и бабра, као и димензије мотора, нису сведени на најмању могућу меру. Напајањем асинхронног мотора из напонског извора променљиве учестаности отклањају се проблеми поласка. Учестаност статора се може

прилагодити брзини обртања ротора, чиме је омогућена контрола клизања. Променом односа напона и учестаности амплитуда флукса се може прилагодити оптерећењу мотора. Захваљујући дигиталном управљању, варијације у мрежном напону немају утицаја на рад мотора. Поступак пројектовања мотора се сада може знатно изменити. Као критеријум оптималности може се узети енергетска ефикасност мотора и утрошак активног материјала при изради мотора. На крају одељка разматрају се мотори са перманентним магнетима, линеарни мотори, као и основни проблеми интеграције електричних мотора и погонских претварача у заједничко кућиште.

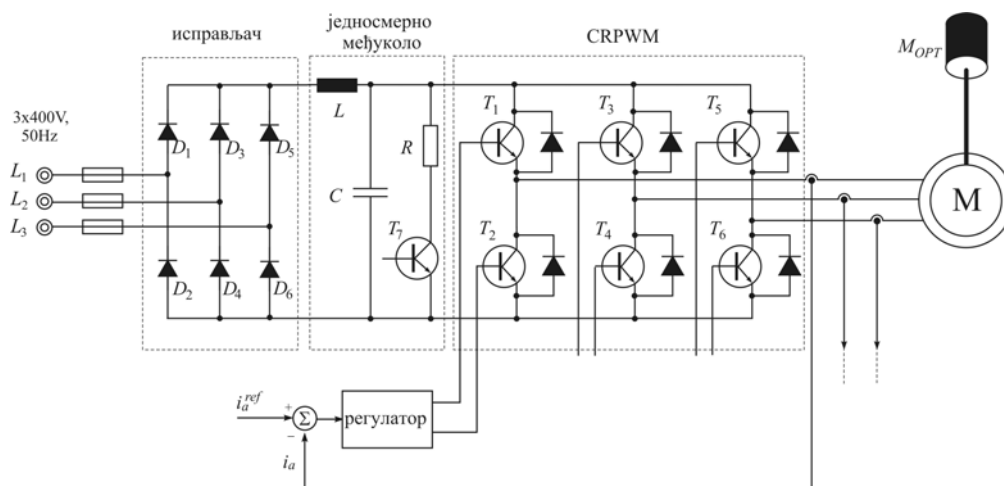
Трендови у развоју прекидачких релуктантних (SR – *Switched Reluctance*) мотора дати су у одељку 10.15. Одсуство обртног поља и импулсни карактер струја у статорском намотају разликују овај мотор од конвенционалних мотора. Асинхрони, синхрони, релуктантни мотори и мотори за једносмерну струју могу у ограниченој мери функционисати без погонског претварача и контролера; довољно је прикључити их на одговарајући извор једносмерног или наизменичног напона. SR мотор не може функционисати без нарочитог погонског претварача који ће, у зависности од положаја ротора, у статорским намотајима обезбедити импулсе струје жељеног облика. Премда познати још у деветнаестом веку, SR мотори су се изнова почели користити тек у другој половини двадесетог века. Предности и проблеми коришћења електричних погона са SR моторима, развој конверторских топологија и закона управљања SR моторима, као и перспективна поља њихове примене, предмет су анализа и излагања у одељку 10.15.

У оквиру истраживачког рада на увећању брзине и тачности система за управљање кретањем уочава се тренд децентрализације функција управљања и све већа примена линеарних мотора. Основни проблеми и резултати су укратко приказани у одељку 10.16. Проблем управљања кретањем подељен је у четири нивоа. Дате су централизоване и децентрализоване структуре и изложене су њихове основне особине. Образложен је утицај децентрализације на потискивање каскадних структура управљања и дати су захтеви који се постављају пред дигитални електрични погон. Индустијски роботи најчешће имају три до седам степени слободе кретања, па је за њихово покретање потребан исти толики или већи број независно управљаних сервомотора. Вишеосни дигитални сервопојачавачи приказани су на примеру уређаја DBM (*Digital Brushless Multiaxis Servoamplifier*) [13,29] чији је хардвер и софтвер начинио аутор ове књиге. Размотрени су проблеми преноса аналогних сигнала као и дигитална комуникација између сервопојачавача и централног рачунара и указано је на основне разлике које постоје у архитектури и одзиву система са централизованим и децентрализованим управљачким системом. Указано је на предности система који користе директно спрегнуте линеарне моторе, као и на проблеме њихове уградње и експлоатације.

У последњем, **једанаестом** поглављу ове књиге дати су закључци, наведени најзначајнији проблеми за које до сада није нађено адекватно решење и назначени најважнији правци даљег истраживачког рада.

2. Структура дигитално управљаних погона и њихова подела према називној снази, перформансама и пољу примене

Дигитални електрични погон је уређај који претвара електричну енергију, добијену из примарног извора (сл. 2.1) у механички рад. Створени механички рад се преко вратила електричног мотора предаје радној машини, чији се делови покрећу задатом брзином или прате жељену позициону трајекторију.



Слика 2.1. Структура микропроцесорски управљаног електричног погона.

Као примарни извор најчешће се има нисконапонска трофазна дистрибутивна мрежа учестаности 50 или 60 Hz, ефективне вредности линијских напона $3 \times 230 \text{ V}$, $3 \times 400 \text{ V}$ или $3 \times 460 \text{ V}$. Брзина обртања електричног мотора се у току рада континуално мења, те је потребно на исти начин мењати амплитуду и учестаност напона који се доводе на статор. Погонски претварач је уређај енергетске електронике чији је задатак да снагу примарног извора конвертује у облик који је потребно имати на статорским намотајима мотора. Најчешће се сусреће топологија приказана на слици 2.1. Ова топологија има исправљач који мрежни напон

конвертује у једносмерни (АС/DC), једносмерно међуколо у коме се за акумулацију енергије користе електролитички кондензатори, као и трофазни транзисторски инвертор који напон међукола конвертује у наизменични (DC/AC), амплитуде и учестаности прилагођене потребама мотора.

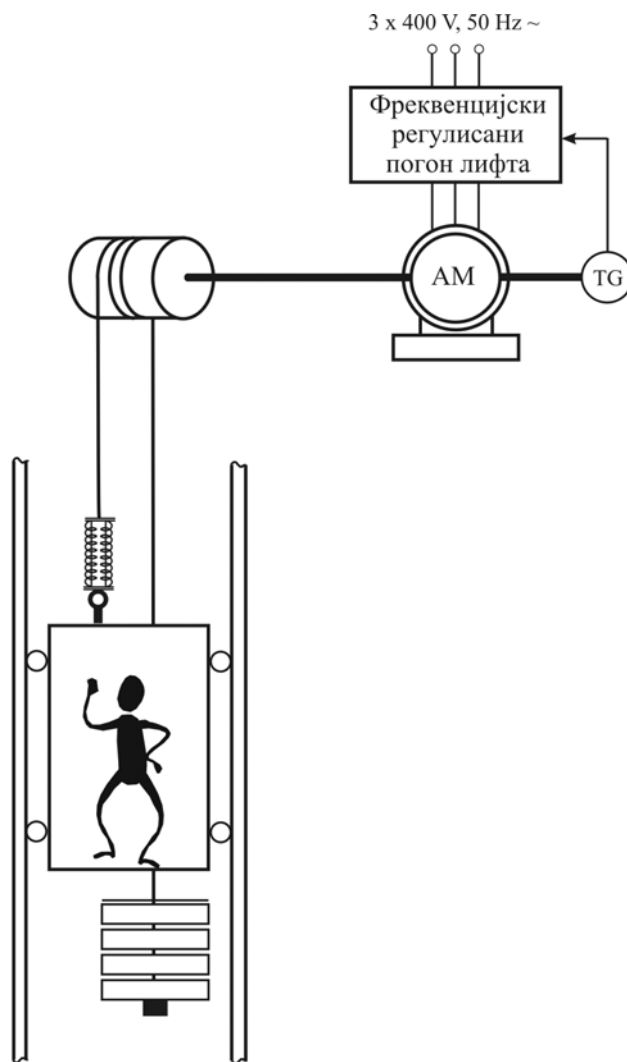
Дигитални погонски контролер има специјализоване бројачке системе који генеришу сигнале за управљање стањем полупроводничких прекидача снаге у оквиру транзисторског инвертора. Управљачки сигнали се генеришу по алгоритму регуларне или *space-vector* [30] ширинске модулације, чиме је обезбеђен статорски напон променљиве амплитуде и учестаности. Струје у фазним намотајима мотора се мере и преводе у дигитални облик помоћу А/D конвертора. Мерење струја и управљање напоном предуслов су за управљање моментом и флуksom електричног мотора. Помоћу инкременталног енкодера и бројачких система за одређивање броја и ширине импулса, дигитални погонски контролер може оценити брзину обртања и положај вратила мотора. Задата вредност брзине или позиције се може интерно генерисати или добити од надређеног рачунара путем брзих дигиталних комуникационих канала. Помоћу наведених периферијских уређаја и уз адекватну алгоритамску подршку, дигитални електрични погон је оспособљен за регулисање момента, брзине и позиције, те он тако постаје извршни орган у производним машинама и многим другим применама.

Дигитални електрични погони се могу разврстати у групе по месту примене, карактеристикама, напонском нивоу, називној снази и топологији конвертора. Може се уочити пет основних група:

- 1) електрични погони високих перформанси (сервопогони),
- 2) електрични погони опште намене,
- 3) електрични погони у производима широке потрошње,
- 4) електровучни погони, и
- 5) електрични погони велике снаге, средњег напонског нивоа.

Електрични погони високих перформанси представљају примену у којој је регулација брзине неопходна. Електрични мотор се користи као извршни орган у кругу регулације силе, момента, притиска, протока, брзине и позиције. Уобичајено је да се на вратило мотора угради давач брзине и позиције. Позициони и брзински сервомеханизми користе се у процесној индустрији, код алатних машина, у роботици, код индустријских манипулатора, у ваљаоницама, намотавачима, лифтовима (сл. 2.2), крановима, у папирној и текстилној индустрији, као и другим применама где се врши управљање кретањем. У овим погонима најчешће се сусрећу асинхрони сервомотори и синхрони мотори са перманентним магнетима на ротору [20,31]. Називна снага мотора креће се у опсегу од 0,05 до 200 kW, док је очекивани пропусни опсег регулационе контуре момента, брзине и позиције 1 kHz, 200 Hz и 60 Hz респективно. Број нових инсталација условљен је развојем

индустрије. Просечно годишње увећање броја сервопона једносмерне струје је 3%, док се број сервојединица наизменичне струје увећа за 12%.



Слика 2.2. Покретање путничког лифта помоћу микропроцесорски управљаног електричног погона са трофазним асинхронним мотором.

Дигитални електрични погони опште намене су примене у којима брзина и тачност одзива нису од пресудног значаја. Цена и поузданост у обављању основне функције су приоритети у пројектовању оваквих погона. Регулација брзине је опциона; веома често се ради економисања брзина мења у ужем опсегу или се чак примењују мотори чија се брзина не може мењати. Значај регулације

брзине је пре свега у уштеди енергије, умањењу трошкова одржавања и увећању поузданости. Код погона пумпи, вентилатора, компресора (ПВК) као и код примене електричних мотора у системима за грејање, вентилацију и кондиционирање ваздуха (HVAC – *Heating, Ventilation and Air Conditioning*), потребно је споро подешавати брзину уз релативно малу захтевану тачност. Предности добијене елиминацијом релејног управљања и механичког пригушења протока флуида чине да се број нових инсталација брзо увећава. Највећу примену имају нисконапонски асинхрони мотори снаге од 0,37 kW до 50 kW као и синхрони мотори са намотаним ротором за снаге веће од 100 kW. Мотори по правилу немају давач позиције нити тахогенератор на вратилу. Регулатор је у великом броју случајева заснован на директном векторском управљању. Топологија погонског конвертора и полупроводнички прекидачи снаге бирају се тако да се умањи стрмина напонског таласа (dV/dt) и ублажи проблем убрзаног старења изолације мотора.

Дигитални електрични погони у производима широке потрошње примењују се ради увећања удобности, уштеде електричне енергије и умањења укупне цене уређаја. Примарни захтев је мали утрошак и ниска цена материјала, као и могућност масовне и економичне производње. У ту сврху се развијају нове топологије претварача [32,33], нове врсте електричних мотора [34] и нови приступи управљању погоном без сензора на вратилу [35]. Као пример, регулисани погон снаге 0,5 kW у машини за прање рубља мора имати интерну цену мању од 15 америчких долара [34] како предности фреквенцијске регулације не би биле у сенци превисоке цене мотор-претварачке групе за покретање бубња. Производи широке потрошње се користе у резиденцијалним и канцеларијским просторима, те се од дигиталног електричног погона захтева минимално топлотно, звучно и електромагнетско загађење околине, док су динамика и тачност регулације од секундарног значаја. У оквиру кућних апарата још увек се користе универзални (колекторски) мотори као и монофазни асинхрони мотори. У зачетку је увођење фреквенцијски регулисаних асинхроних и коришћење синхроних мотора са перманентним магнетом на ротору. Сусрећу се називне снаге од 10 W до 5 kW. Мотори за једносмерну струју са перманентним магнетом на статору сусрећу се у серво и помоћним апликацијама код савремених аутомобила (вентилатори, покретање прозора и седишта, аутоматизовани сигурносни појас, итд.). Тренд интеграције управљачких електронских склопова и полупроводничких прекидача снаге у јединствено интегрисано коло, као и настојање да се погонски конвертор интегрише у кућиште мотора, обећавају даље умањење цене и ширу примену дигитално управљаних машина за наизменичну струју у уређајима који се масовно производе.

Електровучни погони са моторима за једносмерну и наизменичну струју опсега снага од 0,5 kW до 2 MW користе се за покретање возила градског саобраћаја, у железници, код манипулатора, електричних аутомобила, као и у оквиру система за брзи превоз путника (RTS – *Rapid Transportation Systems*). Желене карактеристике вучних погона су способност за рад у режиму слабљења

поља ($P = Const.$) са што већим односом максималне и номиналне брзине ($\omega_{max}/\omega_{nom}$), способност за електрично кочење, рекуперацију, као и реализација противклизезаштите заснована на брзом одзиву момента и опсерверима убрзања. У случају аутономних возила која користе акумулаторе, од значаја је што већи степен корисног дејства мотора и конвертора [36]. Једноставност конструкције ротора асинхроних машина омогућује реализацију напредних конструкција вучних мотора [37] као што је линеарни мотор (LIM) и асинхрони вучни мотор уграђен у саму погонску осовину. Електровучни конвертори се граде за низ различитих напонских нивоа. Код манипулатора и електричних аутомобила сусрећу се напони једносмерног међукола од 24 V до 300 V, док се код RTS система и железнице конвертори граде за напоне од 600 до 2500 V. За вучне конверторе граде се наменски полупроводнички прекидачи снаге, великих радних струја и напона.

На прелазу између два миленијума, значајно је увећан број примена фреквенцијски регулисаних погона у електричним возилима. Све веће загађење ваздуха створено сагоревањем фосилних горива фаворизује употребу електричних и хибридних аутомобила који су еколошки прихватљиви. За покретање HEV и ZEV возила користе се вучни мотори за наизменичну струју који су дигитално управљани.

Уређаји за помоћна кретања и сигурносне функције у аутомобилима и другим возилима се пројектују и остварују помоћу дигиталних електричних погона. Концепт пројектовања електричних уређаја и система на возилу познат под називом *x-by wire* подразумева дигитални пренос команди и стања, најчешће уз помоћ брзе двожишне серијске везе (CAN – *Controller Area Network*) развијене за примене у возилима, доцније прихваћене и у индустријској аутоматизацији. Различити уређаји и агрегати, почевши од сигнализационих светлосних извора па до система за кочење, имају локалну интелигенцију у виду минијатурног дигиталног контролера који може да комуницира путем CAN-bus мреже као и да управља полупроводничким прекидачима снаге како би се успоставила струја у одређеној сијалици, контролисала брзину обртања неког од помоћних мотора или активирао систем за кочење. Многи од помоћних уређаја на аутомобилу имају електричне машине, те стога *x-by wire* концепт ствара потребу за већом употребом дигиталних електричних погона прилагођених потребама аутомобилске индустрије. У примени овог концепта, међу европским произвођачима опреме за аутомобиле најактивнија је фабрика Magneti Marelli.

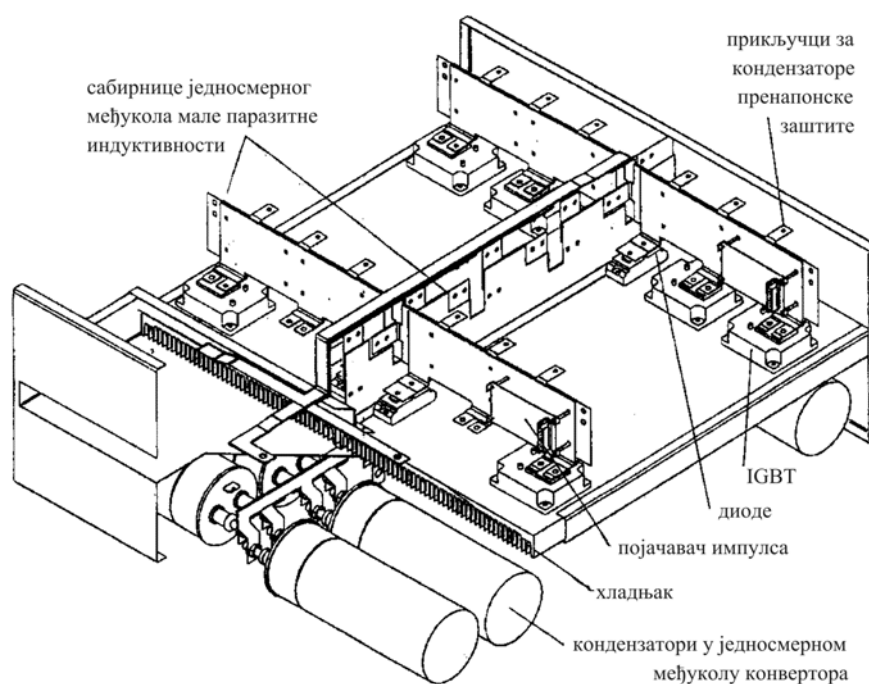
Присуство локалног контролера омогућава дијагностику и рану детекцију отказа. Ипак, релативно споро прихватање *x-by wire* концепта у електричним и хибридних возилима условљено је разлозима сигурности. Стручњаци агенција које прописују сигурносне норме сматрају да направе чије неисправно функционисање може угрозити живот не могу бити базиране на полупроводничким прекидачима снаге већ морају имати механичке прекидаче. Инверзно поларизован *pn* спој сматра се недовољно поузданим прекидом везе, док се транзистор у проводном стању сматра непоузданим везом. Из сличних разлога, микроконтролер и

његов програм се сматрају непоузданим начином за доношење виталних одлука, па је више година трајао отпор примени *x-by-wire* концепта у реализацији управљачког механизма аутомобила (тј. везе волана и предњих точкова). Управљање аутомобилом преко дигиталног преноса команде и уз коришћење дигиталних електричних погона и данас се препоручује само у градској возњи (Fiat Punto). Једнак проблем сусреће се и у области индустријских погона, где се често захтева да мотори и дигитални електрични погони буду развојени механичким прекидачима када год оператер уђе у домет хватаљки индустријског робота. Сигурносни аспекти за сада отежавају и поскупљују примену дигиталних електричних погона, захтевајући редундантне хардверске ресурсе и програмске мере као и уградњу наизглед непотребних механичких растављача. Сигурносне норме се већ прилагођавају новонасталој 'дигитализованој' ситуацији. Велики број прописа настао је у времену када дигитални микроконтролери нису били расположиви, па је сада те прописе потребно изменити. Ради достизања потребног степена сигурности, мењају се и поступци пројектовања хардвера и софтвера самих дигиталних електричних погона. Проблеми сигурности представљају поље теоријског и практичног рада као и интензивне патентне активности.

Дигитални електрични погони снаге веће од 500 kW израђују се за средњенапонске нивое. Сусрећу се стандардне вредности називних напона од 2300, 4160 и 6600 V. Области у којима се средњенапонски мотори сусрећу су ваљаонички станови [38], млинови, пумпе и компресори. Највећу примену имају асинхрони мотори, док се код изразито великих снага и потребе за компензацијом реактивне снаге примењују синхрони мотори снаге до 10 MW. Спороходни мотори се напајају из мрежом вођених циклоконвертора, синхрони мотори се напајају из струјних инвертора, док се напајање асинхронних мотора врши из инвертора са већим бројем расположивих дискретних вредности излазног напона (сл. 2.3) [39,40]. Употребом електричних погона код компресора и пумпи велике снаге у нафтној индустрији трошкови одржавања се умање са 40 USD/kW годишње, колико се има за погоне са гасном или парном турбином, на свега 10 USD/kW годишње. Даља експанзија дигиталних електричних погона велике снаге одређена је поглавито економским и еколошким чиниоцима. Топологија конвертора снаге и алгоритми управљања овим погонима нису консолидовани и представљају поље у коме је могуће дати нове и оригиналне научне и техничке доприносе.

Микропроцесорско управљање има кључну улогу у свакој од поменутих области примене електричних погона. У оквиру књиге разматрају се проблеми моделовања, синтезе и имплементације закона управљања, као и пројектовања и градње хардверских ресурса неопходних за управљање моментом, брзином и позицијом електричних мотора. Стање и перспективе развоја сваке од поменутих пет група микропроцесорски управљаних електричних погона изложене су у оквиру десетог поглавља. Размотрена је еволуција техника управљања погонима, анализиран утицај појаве наменских брзих процесора за управљање електромеханичком конверзијом и кретањем, развој напредних полупроводничких прекидача снаге и њихов утицај на топологију погонских конвертора, као и развој нових

врста електричних мотора и сензора. Уочљива су настојања [41,42] да кроз примену савремених приступа управљању електрични погони стекну способност прилагођавања и доношења дискретних одлука на начин који умањује потребу за присуством техничког особља у фази инсталације и трајног рада погона. Анализирана су могућа решења проблема електромагнетске компатибилности, перспективе развоја дигиталне комуникације између регулисаних погона и процесних рачунара, помаи ка децентрализованом управљању и дистрибуираној интелигенцији, трендови модуларног извођења и општи тренд увећања економичности путем хардверске и програмске интеграције. Проучени су захтеви које позиционим сервомеханизмима намећу савремени центри за машинску обраду и технологије резања воденим и ласерским млазом, и назначени основни правци даљег истраживања и развоја у пољу погона високих перформанси и погона опште намене.



Слика 2.3. Изглед савременог погонског конвертора чија је називна снага 500 kW.