



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА У
НОВОМ САДУ



Милош Николић

**ЈЕДНО РЕШЕЊЕ ФИЗИЧКЕ АРХИТЕКТУРЕ
ЗА УПРАВЉАЊЕ ЈЕДНОСМЕРНИМ
МОТОРОМ БЕЗ ЧЕТКИЦА СА ЧЕТИРИ
ЕЛЕКТРОНСКА ПРЕКИДАЧА**

МАГИСТАРСКИ РАД

Ментор:

доц. др. Небојша Пјевалица

Нови Сад, 2014



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ • ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА
21000 НОВИ САД, Трг Доситеја Обрадовића 6

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, РБР :	
Идентификациони број, ИБР :	
Тип документације, ТД :	Монографска документација
Тип записа, ТЗ :	Текстуални штампани материјал
Врста рада, ВР :	Магистарски рад
Аутор, АУ :	Милош Николић, дипл. инж.
Ментор, МН :	доц. др Небојша Пјевалица
Наслов рада, НР :	Једно решење физичке архитектуре за управљање мотором без четкица са четири електронска прекидача
Језик публикације, ЈП :	Српски / ћирилица
Језик извода, ЈИ :	Српски
Земља публикавања, ЗП :	Република Србија
Уже географско подручје, УГП :	Војводина
Година, ГО :	2014
Издавач, ИЗ :	Ауторски репринт
Место и адреса, МА :	Нови Сад; трг Доситеја Обрадовића 6
Физички опис рада, ФО : (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	9 поглавља / 114 страна / 65 цитата / 8 табела / 82 слике
Научна област, НО :	Електротехника и рачунарство
Научна дисциплина, НД :	Рачунарска техника
Предметна одредница/Кључне речи, ПО :	Једносмерни мотор без четкица, управљање мотором, директна контрола струје, Холлови сензори, локално програмабилне секвенцијалне мреже, претварачи, импулсно ширинска модулација
УДК	
Чува се, ЧУ :	У библиотеци Факултета техничких наука, Нови Сад
Важна напомена, ВН :	
Извод, ИЗ :	Ова магистарска теза бави се истраживањем у области управљања моторима једносмерне струје без четкица. Циљеви су дефинисање развојног окружења које ће омогућити развој једног модерног система за управљање моторима, затим истраживање различитих топологија претварачког система и анализа управљачких техника Уз одговарајућу технику управљања циљ је реализација платформе за израду прототипа за управљање једносмерним моторима без четкица, такве да може да послужи развоју прототипа интегрисаног кола и евентуално да послужи као комерцијално решење. У тези се анализирају релевантни аспекти проблематике, предлаже се решење у складу са постављеним циљевима и користе се објективне мере за мерење перформанси појединих делова решења.
Датум прихватања теме, ДП :	
Датум одбране, ДО :	
Чланови комисије, КО :	Председник: др Никола Теслић, ред. проф.
	Члан: др. Миодраг Темеринац, ред. проф.
	Члан: др. Јован Ђорђевић, ред. проф.
	Члан: др Никола Челановић, ванредни професор
	Члан, ментор: др Небојша Пјевалица, доцент

	Потпис ментора



KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO :			
Identification number, INO :			
Document type, DT :	Monographic publication		
Type of record, TR :	Textual printed material		
Contents code, CC :	Master Thesis		
Author, AU :	Miloš Nikolić		
Mentor, MN :	Nebojša Pjevalica, PhD		
Title, TI :	Hardware solution of BLDC motor control using four power switches		
Language of text, LT :	Serbian		
Language of abstract, LA :	Serbian		
Country of publication, CP :	Republic of Serbia		
Locality of publication, LP :	Vojvodina		
Publication year, PY :	2014		
Publisher, PB :	Author's reprint		
Publication place, PP :	Novi Sad, Dositeja Obradovica sq. 6		
Physical description, PD : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graph)	9 chapters / 114 pages/ 65 references / 8 tables / 82 pictures		
Scientific field, SF :	Electrical Engineering		
Scientific discipline, SD :	Computer Engineering, Engineering of Computer Based Systems		
Subject/Key words, S/KW :	Brushless DC motor, Motor control, direct current control, Hall sensors, three phase BLDC motor, field-programmable gate arrays (FPGA), inverters, motion control, pulsewidth modulation (PWM)		
UC			
Holding data, HD :	The Library of Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, Serbia		
Note, N :			
Abstract, AB :	This thesis addresses area of brushless DC motor control. Goals of research are definition of development environment which will provide development of modern motor control system, then research of different inverter topologies and analysis of control algorithms. The goal is also realization of prototyping platform of brushless DC motor control system that can be used for development of application specific integrated circuit or eventually become commercial solution. Thesis analyses important aspects of the problem, proposes solution based on given goals and applies objective measures to measure performance of certain parts of the system.		
Accepted by the Scientific Board on, ASB :			
Defended on, DE :			
Defended Board, DB :	President:	dr Nikola Teslić, Professor	Menthor's sign
	Member:	dr. Miodrag Temerinac, Professor	
	Member:	dr. Jovan Đorđević, Professor	
	Member:	dr. Nikola Čelanović, Associate Professor	
	Member, Mentor:	dr. Nebojsa Pjevalica, Professor	

Захвалност

Најискреније се захваљујем проф. др. Николи Теслићу за надзор и праћење мог рада на пројектима и на овој тези, као и на пружању изврсног окружења за истраживање.

Захвалност дугујем проф. др. Владимиру Ковачевићу, проф. др. Јовану Ђорђевићу, проф. др. Миодрагу Темеринцу и проф. др. Николи Челановићу на темељној рецензији и сугестијама које су биле од велике помоћи у току израде тезе.

Такође изражавам своју захвалност ментору, доценту др Небојши Пјевалици за пружање одговора на многобројна питања, преношење огромног искуства из области истраживања и усмеравање у току истраживања.

Проф. др. Николи Миливојевићу са универзитета у Чикагу захваљујем се за помоћ при избору литературе и усмеравање у току истраживања, на сарадњи при изради симулационог окружења и на великом броју симулационих модела за моторе који су били предмет истраживања.

Реализација система као што је овај, захтева интеграцију више решења из различитих области, па овим путем захваљујем великом тиму колега са којима сам имао срећу да сарађујем.

Велика одрицања и коришћење слободног времена били су неопходни за израду ове тезе и без безграничне помоћи и бескрајног разумевања породице овај рад не би никада био уобличен у целину и угледао светлост дана. Посебно се захваљујем породици са напоменом да је ова теза наш заједнички успех и резултат.

САДРЖАЈ

1. УВОД.....	1
2. ПРЕГЛЕД РАЗВОЈА ОБЛАСТИ ИСТРАЖИВАЊА И ПОСТАВКА ЦИЉЕВА ИСТРАЖИВАЊА.....	6
2.1 Историја једносмерних мотора без четкица.....	8
2.1.1 Једносмерни мотор са четкицама.....	8
2.1.2 Једносмерни мотори без четкица.....	9
2.1.3 Управљање једносмерним моторима без четкица.....	10
2.2 Поставка циљева истраживања	10
3. ЈЕДНОСМЕРНИ МОТОР БЕЗ ЧЕТКИЦА	12
3.1 Конструкција и карактеристике једносмерних мотора без четкица	13
3.2 Моделовање ЈМБЧ.....	18
3.2.1 Електрична једначина	19
3.2.2 Механичка једначина и преносна функција система.....	20
3.3 Радно окружење једносмерног мотора без четкица	21
3.4 Претварачко коло енергетске електронике	22
3.4.1 Трофазни претварач	23
3.4.2 Методе контроле претварача.....	27
3.4.3 Управљање струјним хистерезисом.....	30
3.5 Управљачка стратегија	32
3.5.1 Константан угао између флуксева	32

4.	ПРЕГЛЕД РЕЛЕВАНТНИХ ИЗВОРА ИНФОРМАЦИЈА.....	34
4.1	Преглед литературе	34
4.1.1	Системи управљања без детектора позиције ротора.....	35
4.1.2	Системи са поједностављеном топологијом.....	36
4.2	Постојећа решења за управљање ЈМБЧ.....	41
4.2.1	Решења заснована на микроконтролеру.....	43
4.2.2	Решења заснована на наменским интегрисаним колима.....	46
5.	ОПИС СИМУЛАЦИОНОГ ОКРУЖЕЊА.....	48
5.1	Симулациони модел мотора	50
5.1.1	Мерење параметара мотора	50
5.2	Симулациони модел кола енергетске електронике	52
6.	ОПИС РЕАЛИЗАЦИЈЕ ФИЗИЧКЕ АРХИТЕКТУРЕ.....	55
6.1	Претварачка плоча са 6 прекидача.....	56
6.2	Претварачка плоча са 4 прекидача.....	58
6.3	Прототипска плоча	59
6.3.1	Локално програмабилне секвенцијалне мреже – ФПГА	62
6.3.2	Улазно излазне спреге.....	65
6.3.3	Коло за регулацију напајања	66
6.4	Плоча за пријем сигнала са Холових сензора	68
6.5	Плоча са струјним сензорима	69
6.6	Комплетна развојна платформа	70
6.7	Структура система	72
7.	РЕФЕРЕНТНИ СИСТЕМ ЗА УПРАВЉАЊЕ ЈЕДНОСМЕРНИМ МОТОРОМ БЕЗ ЧЕТКИЦА.....	74
7.1	Концепт референтног система за контролу ЈМБЧ.....	75
7.2	Симулација система за контролу ЈМБЧ са 6 прекидача и 3 струјна сензора.....	77
7.2.1	Резултати симулације.....	80
7.3	Прототип референтног управљачког система.....	84
7.3.1	Избор фреквенције такта	84
7.3.2	Промена домена такта.....	86
7.3.3	Комутација	86

7.3.4	Хистерезисна контрола	87
7.4	Експериментални резултати	88
7.5	Закључак	92
8.	УПРАВЉАЊЕ ЈЕДНОСМЕРНИМ МОТОРОМ БЕЗ ЧЕТКИЦА КОРИШЋЕЊЕМ ТОПОЛОГИЈЕ СА 4 ПРЕКИДАЧА	93
8.1	Концепт система за управљање ЈМБЧ са 4 прекидача и 2 кондензатора	94
8.1.1	Комутација ЈМБЧ у систему претварача са 4 прекидача и 2 кондензатора.....	95
8.1.2	Контрола ЈМБЧ уз помоћ претварача са 4 прекидача.....	97
8.1.3	Имплементација струјно контролисане ИШМ.....	100
8.2	Симулација система за контролу ЈМБЧ са 4 прекидача и 2 струјна сензора.....	101
8.2.1	Резултати симулације.....	102
8.3	Прототип управљачког система	108
8.4	Експериментални резултати	108
8.5	Закључак	111
9.	ЗАКЉУЧАК	112
10.	ЛИТЕРАТУРА	115

СПИСАК СЛИКА

Слика 3.1 Упрошћена конструкција мотора	12
Слика 3.2 Принципска шема мотора – електромагнетно коло.....	13
Слика 3.3 Индукована ЕМС трапезног облика.....	14
Слика 3.4 ЕМС синусоидног облика.....	15
Слика 3.5 Напон напајања фаза и излази Холовог сензора	17
Слика 3.6 Редослед напајања фаза у зависности од излаза са сензора.....	17
Слика 3.7 Дијаграм струје и индукована ЕМС све три фазе мотора	18
Слика 3.8 Еквивалентно коло трофазног ЈМБЧ и механички модел.....	19
Слика 3.9 Преносна функција ЈМБЧ.....	21
Слика 3.10 Блок дијаграм система	22
Слика 3.11 Полумост	23
Слика 3.12 Поједностављено коло трофазног претварача.....	24
Слика 3.13 Распоред напајања намотаја	26
Слика 3.14 Трофазни претварач са 4 прекидача	27
Слика 3.15 Облик фазног напона	28
Слика 3.16 Импулсно ширинска модулација	28
Слика 3.17 ИШМ у 6 сектора	30
Слика 3.18 Хистерезисна контрола прекидача	31
Слика 4.1 Еквивалентно коло трофазног ЈМБЧ.....	36
Слика 4.2 Трофазни претварач са 4 прекидача	37

Слика 4.3 Функционални блок дијаграм TMS320F2806.....	44
Слика 4.4 Функционални блок дијаграм FCM8531.....	46
Слика 5.1 ПСИМ програмски пакет и спрежни додаци.....	49
Слика 5.2 Основни делови програмског пакета ПСИМ	49
Слика 5.3 Модел претварачке плоче у ПСИМ пакету	53
Слика 5.4 Параметри модела мотора	54
Слика 6.1 Претварачко коло са 6 прекидача	56
Слика 6.2 Шема кола за напајање једне од фаза мотора.....	57
Слика 6.3 Претварачка плоча са 6 прекидача	57
Слика 6.4 Трофазни претварач са 4 прекидача	58
Слика 6.5 Претварачка плоча са 4 прекидача	59
Слика 6.6 Детаљна структура развојне прототипске плоче	60
Слика 6.7 Структура развојне прототипске плоче	61
Слика 6.8 Општа архитектура ФПГА	62
Слика 6.9 Двојни домени такта	64
Слика 6.10 Коло за регулацију напајања	67
Слика 6.11 Спрежна плоча за везу са Холовим сензорима мотора	68
Слика 6.12 Плоча са струјним сензорима.....	69
Слика 6.13 Развојна платформа - повезане прототипска и претварачка плоча	70
Слика 6.14 Комплетна развојна платформа	71
Слика 6.15 Структура физичке архитектуре	73
Слика 7.1 Дигитална контрола уз помоћ струјног хистерезиса	75
Слика 7.2 Намотаји мотора за пример када је фаза Б неактивна	76
Слика 7.3 Блок дијаграм хистерезисног управљачког кола	77
Слика 7.4 Параметри моделованог мотора	78
Слика 7.5 Опште информације о моделованом мотору	78
Слика 7.6 Симулација система за управљање ЈМБЧ са 6 прекидача и 3 струјна сензора	80
Слика 7.7 Симулација модела референтног система: 2000оум, 1А, 0,03Nm.....	81
Слика 7.8 Симулација модела референтног система: 2000оум, 2А, 0,06Nm.....	81
Слика 7.9 Симулација модела референтног система: 2000оум, 3А, 0,09Nm.....	81
Слика 7.10 Симулација модела референтног система: 3000оум, 2А, 0,06Nm.....	82

Слика 7.11 Симулација модела референтног система: 3000оум, 3А, 0,1Nm.....	82
Слика 7.12 Симулација модела референтног система: 4000оум, 3А, 0,1Nm.....	82
Слика 7.13 Домени тактова у систему	86
Слика 7.14 Окружење за израду прототипа	88
Слика 7.15 Резултати експеримента са струјном контролом при 1000оум	90
Слика 7.16 Резултати експеримента без струјне контроле при 1000оум	90
Слика 7.17 Резултати експеримента са струјном контролом при 1500оум	91
Слика 7.18 Резултати експеримента без струјне контроле при 1500оум	91
Слика 8.1 Управљачки систем ЈМБЧ са 4 прекидача.....	94
Слика 8.2 Асиметрична ИШМ за претварач са 4 прекидача.....	95
Слика 8.3 Стања прекидача у 6 радних режима	96
Слика 8.4 Карактеристика индуковане ЕМС и струје у фазама ЈМБЧ.....	98
Слика 8.5 Симулација контроле ЈМБЧ без струјне контроле при константном оптерећењу и брзини од 2000оум.....	99
Слика 8.6 Контрола струје и прекидачка секвенца	100
Слика 8.7 Симулација система за управљање ЈМБЧ са 4 прекидача и 2 струјна сензора	102
Слика 8.8 Резултати симулације: Брзина 500о/м, струјни лимит 0,5А	103
Слика 8.9 Резултати симулације: Брзина 500о/м, струјни лимит 1А	103
Слика 8.10 Резултати симулације: Брзина 500о/м, струјни лимит 2А.....	104
Слика 8.11 Резултати симулације: Брзина 500о/м, струјни лимит 3А.....	104
Слика 8.12 Резултати симулације: Брзина 1000о/м, струјни лимит 0,5А.....	105
Слика 8.13 Резултати симулације: Брзина 1000о/м, струјни лимит 1А.....	105
Слика 8.14 Резултати симулације: Брзина 1000о/м, струјни лимит 2А.....	105
Слика 8.15 Резултати симулације: Брзина 1000о/м, струјни лимит 3А.....	106
Слика 8.16 Резултати симулације: Брзина 2000о/м, струјни лимит 0,5А.....	106
Слика 8.17 Резултати симулације: Брзина 2000о/м, струјни лимит 1А.....	107
Слика 8.18 Резултати симулације: Брзина 2000о/м, струјни лимит 2А.....	107
Слика 8.19 Резултати симулације: Брзина 3000о/м, струјни лимит 0,5А.....	107
Слика 8.20 Резултати симулације: Брзина 3000о/м, струјни лимит 1А.....	108
Слика 8.21 Резултати експеримента са струјном контролом при 500оум	109
Слика 8.22 Резултати експеримента са струјном контролом при 750оум	110

Слика 8.23 Резултати експеримента са струјном контролом при 1000оум 110

Табела 1.1: Учесће мотора у укупној потрошњи електричне енергије [4]	3
Табела 3.1 Управљање прекидачима за ротацију мотора у смеру казаљке сата ..	25
Табела 3.2 Управљање прекидачима за ротацију мотора у смеру супротном од смера казаљке сата.....	25
Табела 6.1 Распоживи ресурси у изабраном ФПГА колу	63
Табела 7.1 Вредности параметара симулација.....	83
Табела 7.2 Управљање прекидачима за ротацију мотора у смеру казаљке сата ..	87
Табела 7.3 Управљање прекидачима за ротацију мотора у смеру супротном од смера казаљке сата.....	87
Табела 8.1 Управљање прекидачима за ротацију мотора у смеру супротном од смера казаљке сата.....	97

СКРАЋЕНИЦЕ

ЈМБЧ	–	Једносмерни мотор без четкица
ЕМС	–	Електромоторна сила
BLDC	–	<i>Brushless DC motor</i> , једносмерни мотор без четкица
HARD DISC	–	Јединица масовне меморије, чврсти диск
ФПГА	–	<i>Field Programming Gate Array</i> , Локално програмабилне секвенцијалне мреже
CAN	–	<i>Bus for Controller Area Network</i> , стандард за комуникацију између уређаја у возилима без надзора процесора
LIN	–	<i>Local Interconnect Network</i> , серијски мрежни протокол који се користи за комуникацију између компоненти у возилима
USB	–	<i>Universal Serial Bus</i> , индустријски стандард за серијску комуникацију који дефинише врсте каблова, конектора и комуникационих протокола између рачунара и електронских уређаја
CPU	–	<i>Central Processor Unit</i> , Централни процесор
uC	–	Микроконтролер

SPI	– <i>Serial Peripheral Interface</i> , серијска спрега за трансфер синхронизованих података
оум	– Обртаја у минути, мера брзине обртања ротора мотора
GPIO	– <i>General purpose Input/Output</i> , Улазно излазне линије опште намене
GND	– Ознака за сигнал на нултом потенцијалу

1. Увод

Пројектовање дигиталних и рачунарских система представља основу рачунарске технике [1].

Технолошки напредак у свим сегментима индустрије је перманентан. Слично је и у сегменту рачунарске технике, за коју се може рећи и да је једна од оних који напредују најбрже.

Задатак пројектовања дигиталног система, осим основног задатка да се постигне жељено понашање система, представља и постизање што ниже цене дигиталног система.

Минимална цена може се посматрати са више аспеката. То може бити тежња ка дигиталном систему који ће користити најмању могућу количину компоненти и тада говоримо о оптимизацији броја компоненти (и сложености интегрисаног кола уколико се ради о пројектовању таквог система). Други аспект може бити енергија која се користи у току експлоатације дигиталног система, тада говоримо о оптимизацији потрошње енергије дигиталног система. Ова два аспекта су важна у производњи дигиталних система и/или интегрисаних кола и представљају основне захтеве при анализи и пројектовању.

Поред ова два, постоји још један начин да се утиче на цену. У случају када се дигитални систем користи као управљачки елемент над неким другим дигиталним или механичким системом, могуће је пројектовати систем тако да он у току управљања у обзир узима и параметре управљаног система и утиче на потрошњу енергије уређаја

за чије управљање се користи. Са аспекта данашње терминологије, говоримо о енергетској ефикасности уопште.

Енергетска ефикасност представља важан фактор који утиче на развој људског друштва. Стални раст броја становника на планети узрокује све већу потрошњу свих видова енергије.

Паралелно са растом броја становника, одвија се и технолошки развој који омогућава становницима приступ све већем броју уређаја који се напајају електричном енергијом чији се раст потрошње бележи непрекидно од њеног увођења у модерном друштву.

Енергетску ефикасност описује однос укупно утрошене енергије и корисне енергије која је обавила потребан рад, односно функцију (осветљење, грејање, хлађење простора, индустријска производња, саобраћај, транспорт...).

Енергетска ефикасност не представља штедњу, већ је циљ да смањење потрошње енергије, док сви захтеви за квалитетом услуга и производа морају остати на истом нивоу.

Појам „енергетска ефикасност“ најчешће се односи на два могућа значења, једно су уређаји и њихова потрошња, а друго су мере и понашање или чињење.

Под енергетски ефикасним уређајем сматрамо онај који има висок степен корисног дејства, тј. мале губитке приликом трансформације енергије из једног облика у други.

Модерно друштво се свакодневно суочава са изазовима, константним повећањем потрошње и ограниченим ресурсима енергије, потребом да се у условима економске кризе економично управља енергетским ресурсима. Енергетска ефикасност је драгоцену средство за решавање свих ових изазова. Она побољшава безбедност снабдевања друштва смањењем потрошње примарне енергије. То помаже да се смањи емисија гасова и тиме ублаже климатске промене чиме се умањује опасност од ефеката стаклене баште.

Прелазак на енергетски ефикаснију економију треба да убрза ширење иновативних технолошких решења и побољша конкурентност привреде, подстакне економски раст и покрене квалитетне послове у више сектора које се односе на енергетску ефикасност.

Увођење норми, стандарда и препорука како за производњу тако и за управљање и коришћење мотора представља важан сегмент политике енергетске ефикасности [2]. Стимулативне мере влада широм света се свакодневно увећавају, а препоруке међународних тела се свакодневно унапређују и усавршавају. Од 2010. основни циљ је да економски раст постане независан од коришћења енергије, што је до скора изгледало као немогуће.

Један од најважнијих сегмената потрошње енергије чине електрични мотори и посебна пажња свих економских анализа и анализа енергетске ефикасности увек полазе од ове области. На рад електромотора троши се више од 60% укупне електричне енергије која се користи у светској индустрији, као и 15% укупне потрошње енергије у индустрији, ако узмемо у обзир све типове енергије који се у индустрији користе [3]. Самим тим се може сматрати да унапређење енергетске ефикасности целог друштва значајним делом значи унапређење енергетске ефикасности мотора.

Сектор	Потрошња електричне енергије [TWh/година]	Удео у укупној енергији која се троши	Проценат електричне енергије коју троше мотори у сваком од сектора	Укупни проценат електричне енергије коју троше мотори
Индустријски	4488	63%	69%	44%
Комерцијални	1412	20%	38%	8%
Становништво	948	13%	22%	3%
Транспорт и пољопривреда	260	4%	39%	1%
				55%

Табела 1.1: Учесће мотора у укупној потрошњи електричне енергије [4]

Енергетски ефикасни мотори произведени су од квалитетнијих материјала коришћењем нових технологија које су успостављене на темељима енергетске ефикасности.

Цене енергената које стално расту и потражња за новим енергетски ефикаснијим производима ће стално јачати потражњу за енергетски ефикаснијим моторима. Владе подржавају уштеду енергије повољнијом политиком и подстицајима. Ово такође гура произвођаче да искористе новије могућности на домаћем и извозним тржиштима. Очекује се да брзи раст тржишта енергетски ефикасних мотора донесе могућности, као и изазове за све учеснике на тржишту. Сви главни произвођачи енергетски

ефикасних мотора концентришу се на будуће примене ових производа и примену различитих стратегија за смањење трошкова кроз повећање издржљивости, поузданости, смањење величине и кроз конкуренцију другим производима који штеде енергију.

Стални пораст потрошње електричних мотора и аутоматизација доводе до све већих захтева за енергетски ефикасним електричним моторима. Све чешће коришћење великих мотора у индустрији, као и повећање коришћења малих мотора у преносивим уређајима довели су до нових захтева да се повећа енергетска ефикасност електричних мотора. Врста намотаја или квалитет ламелирања статора или ротора, су само неки од могућих начина за постизање боље енергетске ефикасности и спадају у домен технологије производње мотора.

У последњих неколико година, многе студије идентификовале су велики потенцијал енергетске ефикасности електромотора и моторних система које дају вишеструке могућности за уштеду и врло кратак период исплативости. Чак и после неколико деценија од увођења правила енергетске ефикасности у области електричних мотора значајан потенцијал енергетске ефикасности се и даље може уочити, на пример инвестирањем у ефикасније моторе или инсталирања претварача који боље контролишу рад мотора.

Контрола мотора, тренутно је један од главних параметара који утичу на енергетску ефикасност. Група мотора која је обухваћена истраживањем у овој тези су мотори једносмерне струје без четкица. Код ове врсте мотора комутацију обавља претварачко коло које је саставни део контроле погона мотора, коло енергетске електронике (*eng. inverter*).

Веома брз напредак технологије у области израде интегрисаних кола веома велике скале интеграције, као и техника аутоматизације развоја електронских кола довели су до стварања могућности за развој сложених и истовремено малих (компактних) управљачких компоненти за индустријске системе који по својим особинама задовољавају највише стандарде.

Ово су разлози који су били мотив да се приступи истраживању ефикасних решења у овој области. Детаљи истраживања дати су у следећим поглављима.

У поглављу 2 дат је преглед историјског развоја мотора једносмерне струје и мотора без четкица. Такође је представљен и развој области контроле мотора. У овом делу текста постављени су и циљеви истраживања овог рада.

У поглављу 3 дат је преглед карактеристика ЈМБЧ. Наведени су поједини типови конструкција мотора и њихове карактеристике. Извршено је моделовање мотора које је неопходно за симулације. Наведени су основни принципи рада мотора и неке од управљачких стратегија са нагласком на оне блиске теми овог рада.

Поглавље 4 бави се истраживањем досадашњих достигнућа у овој области. Преглед стручне литературе усмерен је, осим на радове уско везане за тему управљања мотором уз помоћ 4 прекидача, делимично и на радове који ће послужити за поређење резултата. У циљу постављања оквира управљачког система анализирани су и постојећи производи на тржишту.

У поглављу 5 описано је симулационо окружење. За мотор који ће служити у каснијим експериментима су измерени параметри и описан је симулациони модел. Описан је и модел претварачког кола енергетске електронике.

Поглавље 6 даје преглед реализованих компоненти физичке архитектуре. Детаљно су описане претварачке плоче са 6 и 4 прекидача, затим плоча за имплементацију прототипа, плоча за пријем сигнала са Холових сензора и плоча са мерним струјним сензорима. За сваку од плоча поред описа дате су и слике.

У поглављу 7 описан је референтни систем за управљање ЈМБЧ. То је систем са стандардним претварачким колом са 6 прекидача, који омогућава управљање мотором уз максималне перформансе. За такав систем дати су резултати симулације, а потом је описан прототип који је касније послужио за поређење резултата са резултатима које даје систем управљања са 4 прекидача у претварачком колу.

Поглавље 8 даје опис реализованог система за управљање ЈМБЧ коришћењем претварачке плоче са 4 прекидача. Најпре је описан процес управљања и дати резултати симулације. Потом је описана реализација система и дати су експериментални резултати.

У поглављу 9 дат је закључак истраживања са даљим правцима развоја.

2. Преглед развоја области истраживања и поставка циљева истраживања

У најновијим академским истраживањима, мотори једносмерне струје без четкица представљају чест избор, како због великог потенцијала за повећање њихове ефикасности, тако и због других бројних позитивних особина о којим ће бити речи у даљем тексту.

Конвенционални мотори једносмерне струје веома су ефикасни и њихове карактеристике чине их погодним за употребу. Међутим, основна мана је да се код конвенционалних мотора једносмерне струје користе комутатор и четкице које могу да изазову потенцијалне проблеме одржавања. Када се функције комутације и четкица спроводе уз помоћ полупроводничке електронике, реализују се мотори једноставни за одржавање. Ови мотори су познати као мотори једносмерне струје без четкица.

Мотор једносмерне струје, једносмерни мотор без четкица или (ЈМБЧ), у ствари, oponаша рад мотора једносмерне струје са четкицама. То се остварује помоћу статора који се састоји од арматуре са намотајима и ротора са сталним магнетима који производи поље. Као што ће касније бити објашњено, наизменична струја у намотајима статора код ЈМБЧ мора да се укључује синхронизовано са положајем ротора у циљу успостављања оријентације поља или оптималне релације струје статора и флуksа ротора, као што је то пример са комутатором, четкицама и намотајима код класичних машина једносмерне струје. То је једино могуће остварити

уз помоћ енергетске електронике, што је релативно нова област развоја, а самим тим се може сматрати да су ЈМБЧ на самом почетку свог укључивања у инфраструктуру свакодневног живота. ЈМБЧ контрола је једна од најбрже растућих области у свету данас, а очекује се да ће се тај тренд наставити како предности ЈМБЧ буду постајале познате широј јавности.

Употреба перманентних магнета у електричним машинама на местима где је потребна једносмерна побуда, даје за резултат многе предности, као што су непостојање губитака на побуду, једноставнија конструкција, већа ефикасност, брзе динамичке перформансе и висок обртни момент. Побуда перманентним магнетима је први пут коришћена почетком 19. века, али није широко прихваћена због ниског квалитета перманентних магнета. 1932. године је откриће АЛНИКО материјала (алуминијум - *aluminum (Al)*, никл - *nickel (Ni)* и кобалт - *cobalt (Co)*, или *al-ni-co*) оживело идеју о коришћењу побудних система са перманентним магнетом. Међутим то је и даље било ограничено само на моторе мале снаге.

У XX веку су најпопуларнији електрични мотори били кавезни асинхрони мотори, захваљујући њиховој робусности. Напредак у енергетској електроници и дигиталној обради сигнала додатно су омогућили овој групи мотора да овладају у индустријским погонима. Међутим, кавезни индукциони мотори имају лоше карактеристике фактора снаге и ефикасности у односу на синхроне моторе. С друге стране, синхрони мотори и једносмерни комутаторски мотори имају ограничења, као што су брзина, проблеми са буком и електромагнетском интерференцијом због употребе комутатора и четкица. Ови проблеми су довели до развоја синхроног мотора са перманентним магнетом и без четкица (или без комутатора) који уместо једносмерне струјне побуде, на ротору имају перманентни магнет.

Дакле, мотори са перманентним магнетом и без четкица могу се посматрати као нека врста трофазног синхроног мотора, који има перманентне магнете на ротору, а који нема механички комутатор и четкице. Комутација се постиже електронским прекидачима, који снабдевају струјом намотаје мотора у синхронизацији са позицијом ротора.

2.1 Историја једносмерних мотора без четкица

ЈМБЧ представљају један од најважнијих покретача данашње индустрије. Предности које ЈМБЧ пружају у свим апликацијама за које се користе су велике и употреба ових мотора може уштедети, под правим околностима, скоро било којој грани индустрије, много времена и новца. ЈМБЧ заправо представља најновији крајњи резултат дуге еволуције технологије мотора.

2.1.1 Једносмерни мотор са четкицама

Темеље теорије савремених електричних машина поставио је Фарадеј 1831. Он је уочио феномен електромагнетне индукције, а први мотор је направљен 1840. године.

Једносмерни мотор са четкицама открио је 1856. чувени немачки изумитељ и индустријалац Ернст Вернер фон Сименс. Фон Сименс је човек по коме је међународна стандардна јединица електричне проводности добила име. Фон Сименс је дао велики допринос свету електротехнике, укључујући и први електрични лифт 1880.

Теслин асинхрони мотор, који је током XX века био један од најзаступљенијих у индустрији и кућним апаратима настао је много касније. Ову врсту мотора измислио је Никола Тесла 1924.

Фон Сименсов једносмерни мотор са четкицама био је прилично неразвијен, а унапређен је од стране Хари Вард Леонарда (*Harry Ward Leonard*), који је усавршио први ефикасан систем контроле мотора при крају 19. века. Овај рад први пут је објављен 1891. године. Вард Леонардов систем користио је реостат за контролу струје у намотајима, и овај систем није напредовао све до 1960. Откриће тиристорских уређаја, за које се везује патент који су 1955. године објавили Херисон и Ри (*Harrison i Rye*), допринело је да се направи стабилан контролер. Тиме је Вард Леонардов систем замењен овим једноставнијим и ефикаснијим. Та технологија је усвојена од стране скоро свих произвођача и данас је још увек у употреби. Представља врло једноставан концепт контроле, јер користи најмањи могући број компоненти потребних да се произведе варијабилна брзина електричног мотора.

2.1.2 Једносмерни мотори без четкица

Пошто је проналаском тиристора повећана ефикасност мотора са четкицама, отворене су могућности још ефикаснијим моторним погонима. Први подаци о ЈМБЧ појављују се 1962. када су Т.Г. Вилсон и П.Х. Трики (*T.G. Wilson, P.H. Trickey*) објавили свој рад који објашњава функционисање мотора без четкица [5]. Велики значај је имало и коришћење Холових елемената за утврђивање позиције. Разлика у односу на моторе са четкицама била је у револуционарној идеји да нови мотор нема четкице. Временом је овај мотор развијан и унапређиван и врло брзо постао је популарно решење у уређајима као што су рачунарске јединице масовне меморије (*hard disc*), у роботици и авио индустрији. Чињеница да се ЈМБЧ користе у овим уређајима и данас, након педесет година, говори само по себи о њиховој ефикасности. Разлог због кога ови мотори представљају прави избор за ове уређаје је тај да је код поменутих уређаја, хабање четкица представљало велики проблем, било због интензивног коришћења или, на пример, у случају авиона због ниске влажности ваздуха. Због изостанка четкица које су могле да се хабају, ови мотори представљају велики корак напред у развоју технологије овог типа уређаја.

У време појаве ЈМБЧ проблем је представљала чињеница да, иако поуздани, ови мотори нису могли произвести снагу изнад неколико киловата. Разлог је лежао у томе да технологија производње магнета није била довољно развијена. Тек средином осамдесетих година двадесетог века, са појавом снажних материјала перманентних магнета, као и транзистора за високе напоне, могућност да се произведе једносмерни мотор без четкица за велике снаге, постаје реалност. Један од првих „великих“ ЈМБЧ (више од 50KW) дизајнирао је Роберт Лордо (*Robert E. Lordo, POWERTEC Industrial Corporation*) [6]. Данас се производе мотори снаге од више стотина KW.

У години 1978. је на сајму у немачком Хановеру први пут представљен ЈМБЧ, што је означило улазак ЈМБЧ у фазу практичне примене.

Следећа фаза развоја наступа у последњој деценији XX века, када су рачунарска техника и теорија управљања моторима брзо напредовали микропроцесори, микроконтролери, процесори намењени обради дигиталних сигнала ДСП, локално програмабилне секвенцијалне мреже (FPGA) дали су немерљив допринос, а квалитативни напредак се стално прави на пољима брзине извршавања инструкција и простору за складиштење података. Штавише, читави низови управљачких стратегија

и метода се стално користе у управљачким колима ЈМБЧ. Ове методе и њихов развој стално доприносе побољшању перформанси система и поправљању појединих параметара, о чему ће више речи бити у наредним поглављима.

2.1.3 Управљање једносмерним моторима без четкица

Управљање ЈМБЧ се врши истим принципом као и код осталих једносмерних мотора, али је конструкција мотора таква да се извор магнетног поља, који је у овом случају перманентни магнет, налази на осовини мотора, а да се намотаји налазе на спољашњој арматури. При томе, поље, или перманентни магнет, ротира, док су намотаји стационарни.

У циљу опонашања комутатора (који више не мора да постоји јер су намотаји стационарни), неопходно је постојање уређаја који ће вршити одређивање позиције ротора. На основу позиције ротора се уз помоћ једноставне логике врши усмеравање електричне енергије у одговарајуће намотаје.

Уз помоћ погонског претварача и његових прекидача за високи напон напајају се одговарајући намотаји мотора у тренуцима када је позиција одговарајућа. На тај начин мотор и управљачко коло раде синхроно и опонашају мотор са четкицама.

Погонско претварачко коло користи се у скоро непромењеном облику од тренутка његовог открића јер је концепт добар. Унапређују се перформансе прекидачких компоненти које се користе у реализацији.

2.2 Поставка циљева истраживања

Унапређење управљања мотором је тема која је заступљена у великом броју академских радова због великог потенцијала и разноврсности техника којима је то могуће постићи. Такође, индустрија мотора је заинтересована за унапређење управљања, како због повећања енергетске ефикасности мотора, тако и због смањења трошкова производње сваког појединачног дела система у који спада и управљачки део мотора.

Управљање мотором у реалном времену је сложен систем који се дели на две целине:

- Погонско претварачко коло енергетске електронике и

- Дигитални систем за управљање претварачким колом енергетске електронике, тј. мотором.

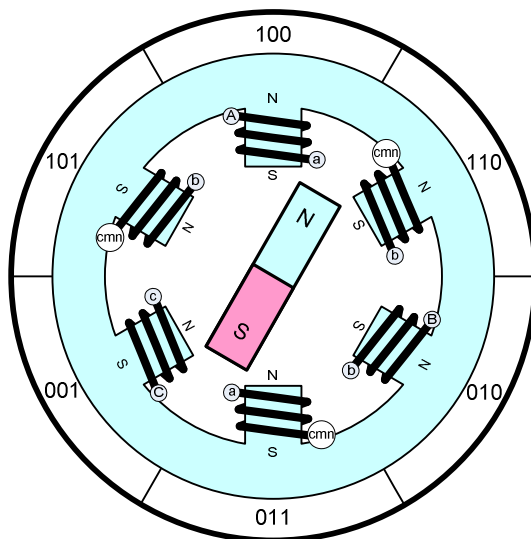
Код погонског претварачког кола енергетске електронике се у предлозима нових решења све чешће могу препознати тежње да се број електронских прекидача смањи и да се пронађу решења која заједно са унапређењем управљачког система усавршити карактеристике целог система. У складу са тиме дефинисани су следећи циљеви:

- пројектовати модел погонског претварачког кола енергетске електронике са редукованим бројем електронских прекидача и на нивоу симулације испитати функционалност,
- извршити практичну реализацију моделованог погонског претварачког кола,
- пројектовати модел дигиталног система за управљање мотором за такво погонско коло и на нивоу симулације испитати функционалност,
- извршити практичну реализацију наменске физичке архитектуре коришћењем програмабилне секвенцијалне мреже,
- реализовати прототип предложеног решења за управљање мотором у реалном времену,
- извршити мерење битних параметара система и упоредити резултате реализованог система са референтним решењима.

3. Једносмерни мотор без четкица

ЈМБЧ припадају групи синхроних мотора. То значи да се магнетна поља статора и ротора врте истом брзином, тј. да нема клизања као код Теслиног асинхроног мотора.

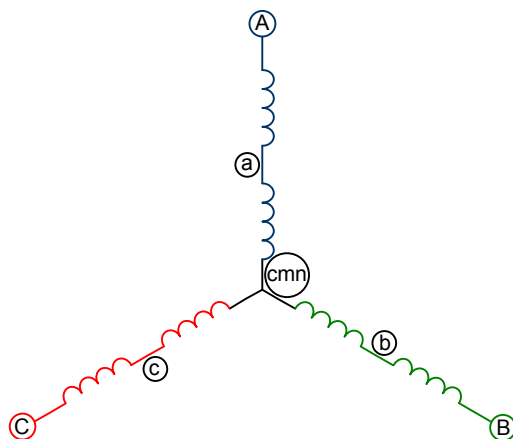
ЈМБЧ могу бити једнофазни, двофазни и трофазни у зависности од броја намотаја на статору, при чему се најчешће користе трофазни мотори. ЈМБЧ се састоји од ротора који носи перманентни магнет и статора са намотајима жице.



Слика 3.1 Упрошћена конструкција мотора

Електрична енергија се претвара у механичку уз помоћ магнетних сила између перманентних магнета на ротору и обртног магнетног поља које индукују намотаји на статору.

На слици 3.1 приказана је упрошћена конструкција ЈМБЧ.



Слика 3.2 Принципска шема мотора – електромагнетно коло

На слици 3.2 виде се три електромагнетна кола повезана на заједничку тачку. Ово је еквивалентно коло мотора са слике 3.1.

3.1 Конструкција и карактеристике једносмерних мотора без четкица

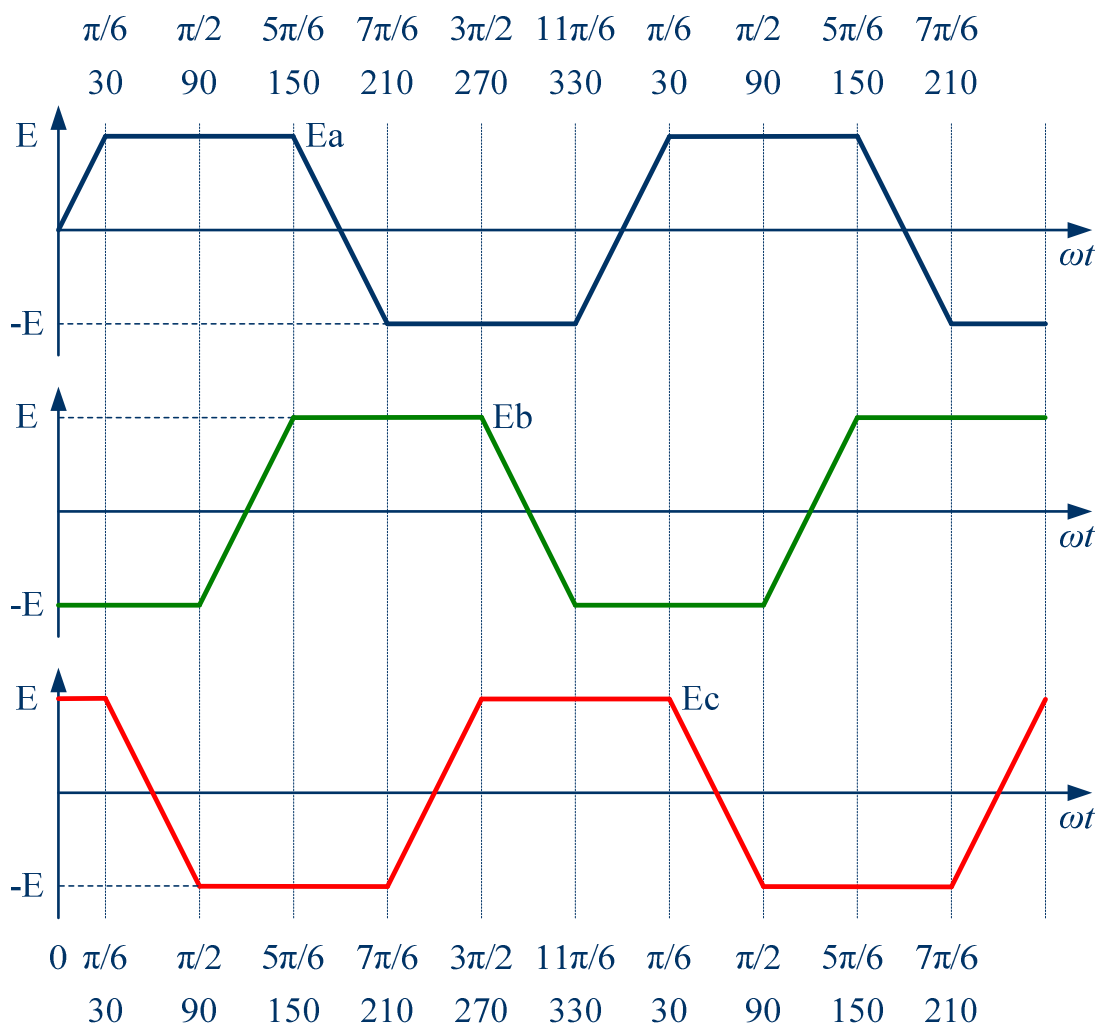
Статор по конструкцији подсећа на статор индукционог мотора, а разликују се по намотајима који су дистрибуирани на другачији начин. Статор ЈМБЧ састоји се од наслаганих челичних лимова. Једна од карактеристика ових мотора је индукована електромоторна сила која, у зависности од повезивања и намотавања статорских намотаја [7], може бити трапезног или синусоидног облика као што је приказано на сликама 3.3 и 3.4.

Индукована електромоторна сила често се назива контра електромоторном силом јер је њен поларитет увек такав да се супротставља електромоторној сили која изазива струју кроз намотај (у овом случају је то напон намотаја).

ЈМБЧ су посебно дизајнирани да би производили скоро константан излазни обртни момент. Постоје одређене разлике у карактеристикама обртног момента код синусног и трапезног мотора јер је код синусног мотора карактеристика равнија,

али су ти мотори скупљи па су мотори са трапезном ЕМС популарнији у практичним применама уз незнатно лошије перформансе.

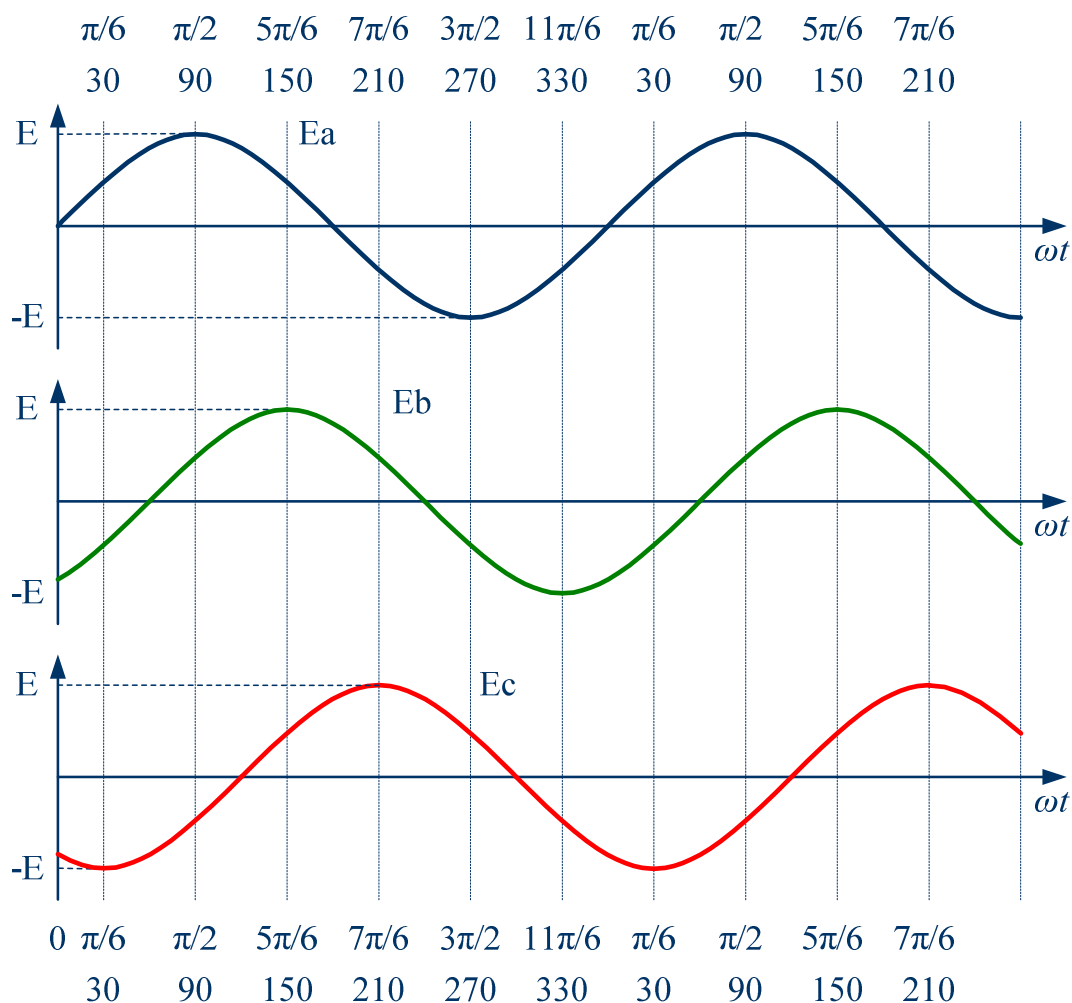
Ротор мотора производи се од перманентног магнета. Број полова мотора које срећемо у пракси најчешће варира у границама од два до осам. Полови су постављени северни насупротив јужног.



Слика 3.3 Индукована ЕМС трапезног облика

У зависности од легуре од које је начињен перманентни магнет ротора варира густина магнетног поља ротора. Феритни магнети су доста често коришћени за производњу перманентних магнета. Како технологија напредује, легуре ретких земних магнета стичу све већу популарност. Феритни магнети су јефтинији али имају недостатак у виду ниске густине флукса за своје димензије. Насупрот њима, легирани материјали имају велику магнетну густину по запремини и омогућују да се димензије ротора смањују док производе исти обртни момент [8].

Такође, легирани магнети побољшавају однос између величине и тежине и дају виши обртни момент као мотор истих димензија са феритним магнетом.



Слика 3.4 ЕМС синусоидног облика

Неодијум (Nd), самаријум кобалт (SmCo), и легуре неодијума, гвожђа и бора (NdFeB) су неки од примера легура ретких земних магнета. Непрекидно истраживање стално унапређује карактеристике ротора тако што повећава густину флукса и смањује димензије ротора.

Комутација ЈМБЧ се врши уз помоћ електронских компоненти и да би се мотор вртео неопходно је да намотаји статора буду оптерећени у пару и одређеним редоследом. Одређивање парова намотаја и редоследа у коме се они оптерећују врши се на основу позиције ротора, која се најчешће одређује уз помоћ Холових сензора мада постоје и решења са оптичким сензорима или тзв. резолверима.

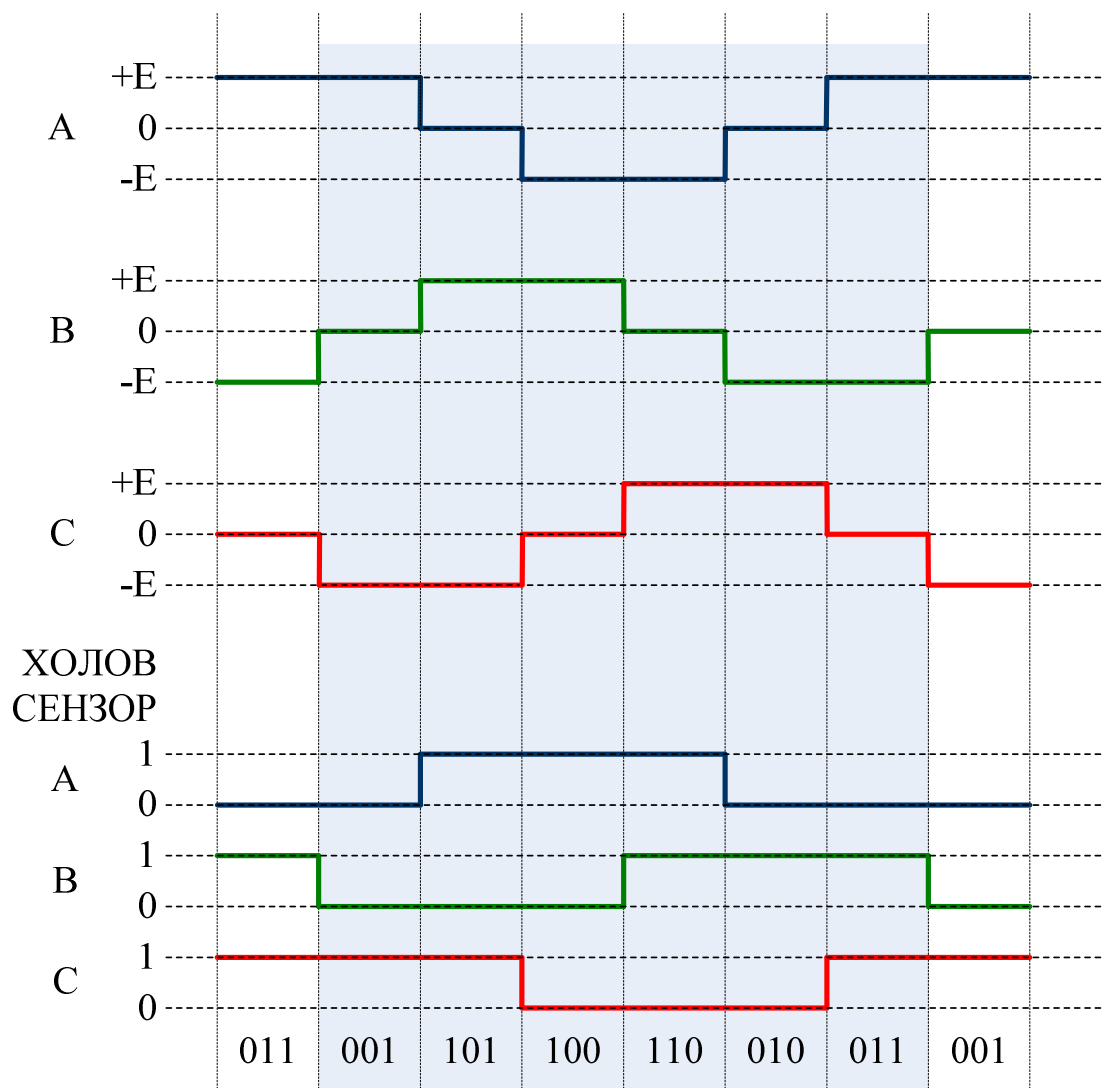
Неопходно је споменути и појам електричне ротације. Механичка ротација мотора представља окретање ротора око осе за 360 степени. Термин електричне ротације је у директној вези са бројем пари полова мотора. За мотор који има један пар полова, електрична ротација је једнака механичкој ротацији па је број механичких и електричних ротација једнак, а самим тим је угао електричне ротације једнак углу механичке ротације.

Код мотора који имају више од једног пара полова механичка и електрична ротација нису једнаке. Како број пари полова расте тако расте и број електричних ротација које се дешавају у току једне механичке ротације.

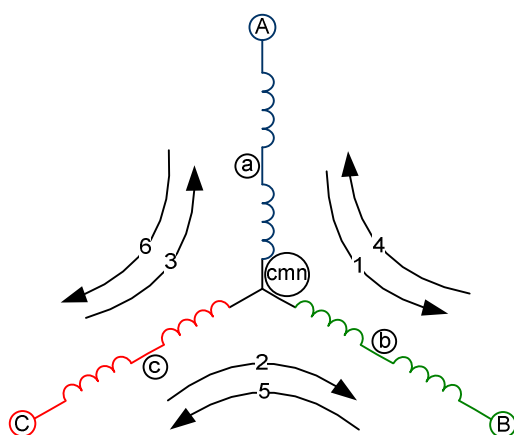
$$\begin{aligned} \text{Број електричних ротација} & \\ &= \text{број полова} \times \text{број механичких ротација} \end{aligned} \quad 3.1$$

Већина ЈМБЧ има Холове сензоре интегрисане у статору мотора. Сваки Холов сензор даје на свом излазу висок логички ниво за 180 степени електричне ротације и низак логички ниво за осталих 180 степени електричне ротације. Кад год магнетни полови ротора прођу поред њих, Холови сензори дају на свом излазу висок или низак логички ниво, показујући при томе да поред сензора пролази северни или јужни пол. Број Холових сензора једнак је броју фаза мотора. У случају трофазног мотора, три сензора су међусобно померени за 120 електричних степени тако да је сваки сензорски излаз у равни са једним од електромагнетних кола [9]. Ова три сензора генеришу скуп дигиталних сигнала – кодне речи, у облику бинарних записа ширине 3 бита – кодове позиције. Овај скуп представљају вредности од 1 до 6. Сваки од ових кодова представља сектор од 60 степени електричне ротације у коме се ротор тренутно налази. На тај начин се одређује који пар намотаја је потребно оптеретити да би се мотор вртео. Кодне речи 1 и 7 су неочекиване вредности на излазу из Холових сензора. За разлику од конвенционалних мотора једносмерне струје, код ЈМБЧ није неопходна информација о позицији ротора непрекидно у времену, већ је довољно знати позицију у 6 дискретних апсолутних позиција.

Временски дијаграм који приказује везу између сензорских излаза и потребне побуде на намотајима приказан је на слици 3.5. Бројеви на доњој оси представљају бинарни код који је репрезент позиције ротора.



Слика 3.5 Напон напајања фаза и излази Холовог сензора

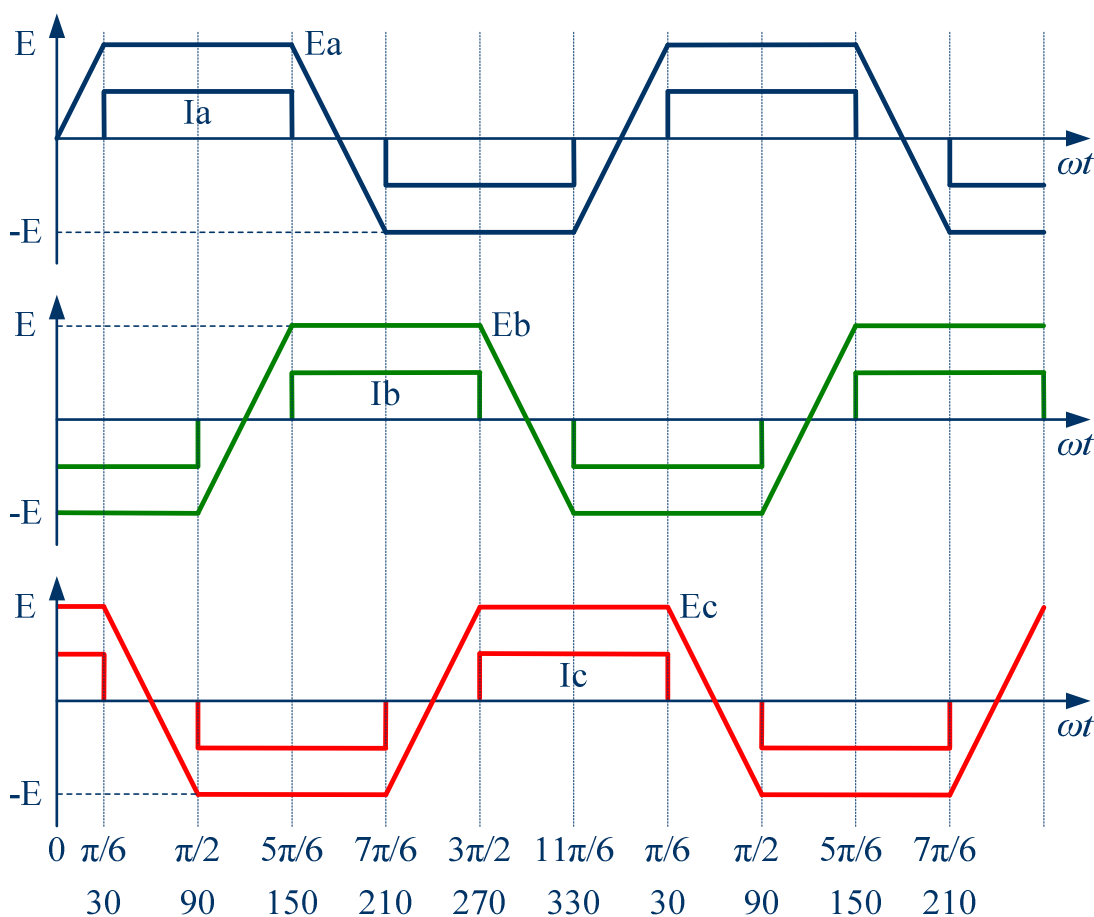


Слика 3.6 Редослед напајања фаза у зависности од излаза са сензора

На слици 3.6 илустровано је како би требало да буду напајани намотаји у зависности од излаза Холових сензора да би се мотор вртео.

3.2 Моделовање ЈМБЧ

Извођење модела засновано је на претпоставкама да мотор има три фазе, иако је процедура извођења модела тачна за било који број фаза, затим да су индуковане струје у ротору изазване хармонијским пољем статора занемарљиве, као и губици у гвожђу. Када се каже ЈМБЧ најчешће се мисли на мотор са трапезном индукованом ЕМС, па ћемо у моделовању претпоставити и то да је ЕМС трапезног облика.



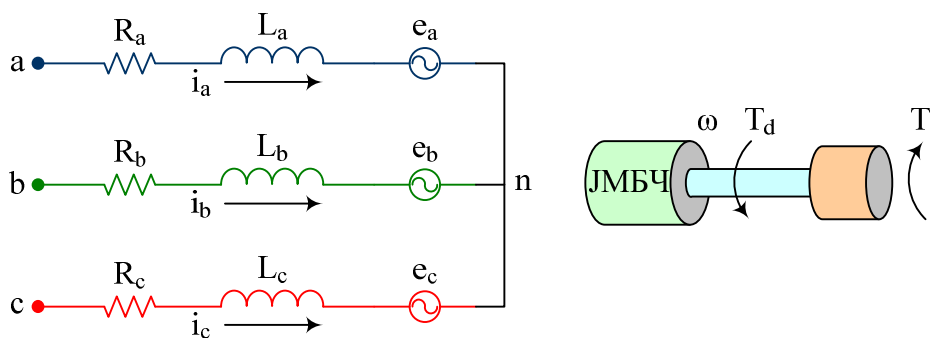
Слика 3.7 Дијаграм струје и индукована ЕМС све три фазе мотора

Ако је дистрибуција флукса у ЈМБЧ трапезног облика, кларкова и паркова трансформација, и механизми везани за њих, нису применљиви, јер се применом тих трансформације, осим у случају синусоидних сигнала, не добијају независне

вредности индуктивности. У том случају се користе фазне променљиве у изворном облику за креирање модела, тј. анализа се ради у „abc“ домену [13].

3.2.1 Електрична једначина

На слици 3.8 су еквивалентно електрично коло и механички модел трофазног мотора. (Извођење преузето из [14][15]).



Слика 3.8 Еквивалентно коло трофазног ЈМБЧ и механички модел

Уведимо обележавање:

$v_x(t)$ – фазни напон,

$i_x(t)$ – фазна струја,

$e_{xs}(t)$ – фазна индукована ЕМС, претпоставља се да је трапезоидног облика

R_s – фазни отпор намотаја (отпор статора), претпоставља се да је једнак у свим фазама,

L – индуктивност фазе

Једначине статорских намотаја са слике могу се написати као:

$$\begin{bmatrix} v_{an}(t) \\ v_{bn}(t) \\ v_{cn}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a(t) \\ e_b(t) \\ e_c(t) \end{bmatrix} \quad 3.2$$

Електромагнетни обртни момент је дат као:

$$T_{em}(t) = [e_a(t)i_a(t) + e_b(t)i_b(t) + e_c(t)i_c(t)] \frac{1}{\omega_m} (\text{N} \cdot \text{m}) \quad 3.3$$

Електрична једначина једне фазе може се из 3.2 изразити као:

$$v_{an} = R_a \cdot i_a(t) + L_a \cdot \frac{di_a(t)}{dt} + e_a(t) \quad 3.4$$

Једначином је представљено коло фазе „а“ с обзиром да су све три фазе идентичне. Ова једначина представља Омов закон за коло статора. Индукована ЕМС, добија се као последица механичког узрока [16].

$$e_a(t) = k_m \omega(t) \quad 3.5$$

Константа пропорционалности k_m је фазна константа индуковане ЕМС. Сада једначину 3.4 можемо писати као:

$$v_{an}(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + k_m \omega(t) \quad 3.6$$

Уобичајено је да се ова једначина представи у комплексном домену тако што се на њу примени Лапласова трансформација. Уз претпоставку о нултим почетним условима, једначина 3.6 постаје:

$$v_{an}(s) = R_a i_a(s) + L_a s i_a(s) + k_m \omega(s) \quad 3.7$$

Из претходне једначине можемо изразити струју једне фазе као:

$$i_a(s) = \frac{v_{an}(s) - k_m \omega(s)}{R_a + s L_a} \quad 3.8$$

3.2.2 Механичка једначина и преносна функција система

$$T_{em}(t) = \omega(t)b + J \frac{d\omega(t)}{dt} + T_L(t) \quad 3.9$$

Где су:

$T_{em}(t)$ – развијени електромагнетни обртни момент,

$\omega(t)$ – угаона брзина ротора,

b – константа трења,

J - момент инерције ротора,

T_L - обртни момент оптерећења мотора.

Слично, електромагнетни обртни момент после Лапласове трансформације је:

$$T_{em}(s) = b\omega(s) + Js\omega(s) + T_L(s) \quad 3.10$$

Такође комбиновањем једначина 3.4 и 3.9 добијамо:

$$T_{em}(s) = k_t i_a(s) \quad 3.11$$

Изједначавањем електричних и механичких израза за електромагнетни обртни момент, 3.10 и 3.11 добијамо:

$$T_{em}(s) = k_t i_a(s) = b\omega(s) + Js\omega(s) + T_L(s) \quad 3.12$$

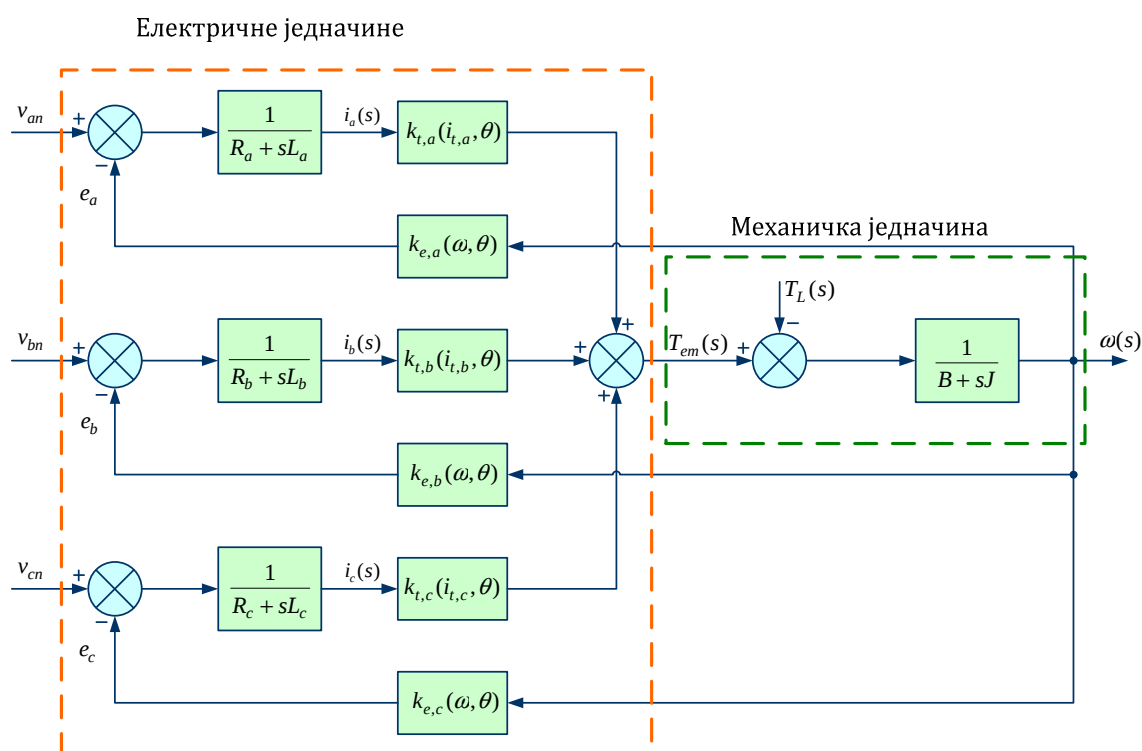
Тако добијамо израз за угаону брзину:

$$\omega(s) = \frac{T_{em}(s) - T_L(s)}{b + sJ} \quad 3.13$$

И израз за електромагнетни обртни момент на основу 3.8 и 3.12:

$$T_{em}(s) = k_t \frac{v_{an}(s) - k_m \omega(s)}{R_a + sL_a} \quad 3.14$$

На основу једначина 3.13 и 3.14 можемо нацртати преносну функцију система (слика 3.9).



Слика 3.9 Преносна функција ЈМБЧ

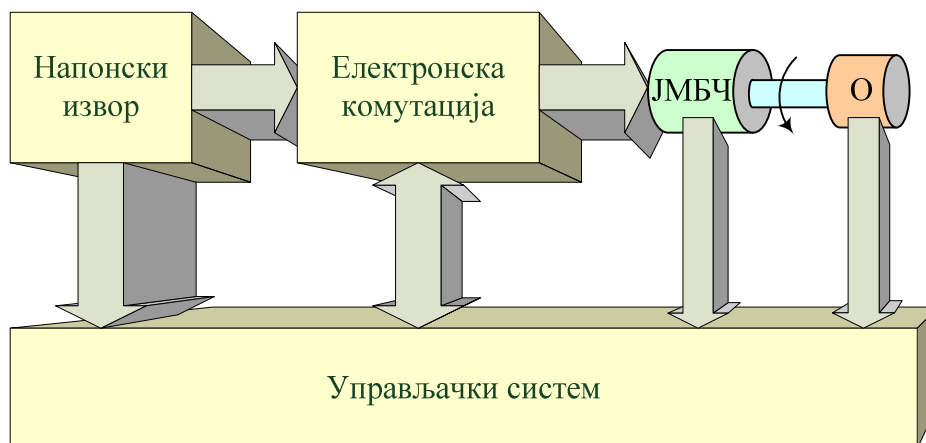
3.3 Радно окружење једносмерног мотора без четкица

Радно окружење ЈМБЧ састоји се од:

- Извора једносмерног напона,
- Кола енергетске електронике које врши електронску комутацију,
- ЈМБЧ и оптерећења,

- Дигиталног управљачког склопа.

Блок дијаграм овог система приказан је на слици 3.10.



Слика 3.10 Блок дијаграм система

За реализацију оваквог система неопходно је анализирати све чиниоце. Математички модел мотора са оптерећењем је приказан у претходном тексту. Тиме је створен предуслов за дефинисање циљева у приступу контроли мотора. Циљеви су:

- Пројектовање претварачког кола за вршење комутације,
- Пројектовање дигиталног система за контролу комутације и контролу брзине окретања мотора уз обезбеђење што константније карактеристике обртног момента.

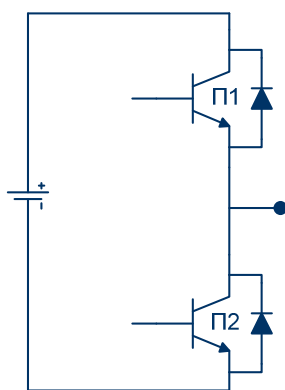
3.4 Претварачко коло енергетске електронике

Један од фактора који је битно утицао на развој ЈМБЧ је свакако погонско претварачко коло. То је део система који омогућава напајање намотаја мотора високим струјама уз могућност једноставне контроле тог напајања, при чему су граничне вредности брзине укључивање и искључивања, као и напона и струја у порасту са сваком новом генерацијом ових производа. Све то доводи до повећања прецизност управљања. Неки од најпопуларнијих прекидачких уређаја у претварачком колу енергетске електронике су диоде, „MOSFET“ транзистори и биполарни транзистори са изолованим гејтом (*IGBT*) [10].

3.4.1 Трофазни претварач

У литератури се може пронаћи више различитих типова претварача са различитим топологијама, а у случају ЈМБЧ најчешће се користи трофазни претварач. Претварачи са струјним изворима (*Current Source Inverter CSI*) користе се једино у случајевима када су у питању велике снаге тако да претварачи са напонским изворима (*Voltage Source Inverter VSI*) представљају доминантну топологију, иако је једино што се контролише при управљању мотора заправо струја. У даљем тексту подразумева се да се говори о трофазном напонском претварачу и користиће се скраћено само назив претварач.

Сваки пар редно везаних прекидача зове се фаза инвертора. Трофазни претварач има три излаза од којих је сваки везан за средишњу тачку једне фазе претварача. Ова редна веза два прекидача позната је и као полумост [11]. Полумост (слика 3.11) је на својим крајевима повезан на извор једносмерног напона. Ни у једном тренутку времена не би смело да се деси да су укључена оба прекидача полумоста јер би то довело да кратког споја једносмерног међукола.

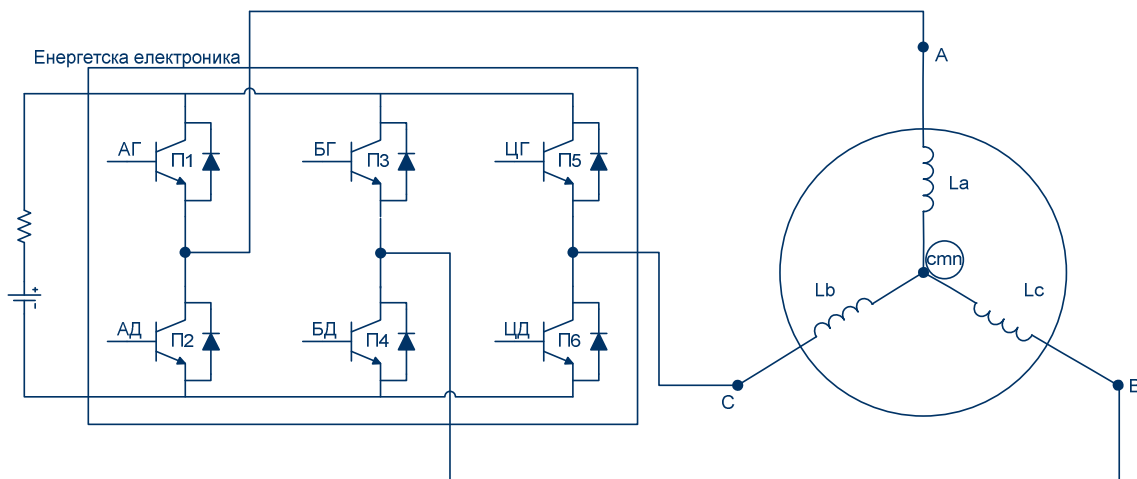


Слика 3.11 Полумост

С обзиром на то да се излаз може повезати на два потенцијала, ово се још зове и претварач за два нивоа. Облик сигнала на излазу претварача са напонским извором зависе од начина на који се врши функција прекидања [12].

Време укључења и искључења прекидача је коначно мало, па је потребно унапред одредити интервал у коме су оба прекидача искључена, тј. интервал који је потребно да протекне од тренутка команде за искључење једног прекидача до тренутка почетка укључења другог прекидача полумоста. Овај временски период назива се „мртво време“.

Поједностављено коло напајања мотора трофазним претварачем дато је на слици 3.12. Претварач се састоји од три полумоста, једног за сваку фазу, при чему сваки полумост заправо чини пун мост у пару са било којим од друга два полумоста, у зависности који је активан. Погонским мостом управља се довођењем управљачких сигнала на прекидаче.



Слика 3.12 Поједностављено коло трофазног претварача

ЈМБЧ се покреће напонским импулсима који треба да су у синхронизму са положајем ротора. Једна електрична ротација мотора подељена је на 6 сектора од по 60 степени и у сваком од шест сектора потребно је напајати два намотаја једносмерним напонам супротног поларитета, док трећи треба да је неоптерећен. Из перспективе сваког од намотаја, 360 степени електричне ротације подељено на 6 сектора тако да је потребно да је намотај повезан на тачку позитивног потенцијала 120 степени или два сектора, а у наредном сектору (60 степени) треба да је без напајања, затим на тачку негативног потенцијала 120 степени и на крају у последњем сектору треба да је без напајања. Овакав тип побуде се може назвати и побуда од 120 степени, јер постоје и варијације у којим је бар један од два прекидача једног полумоста увек укључен. Та варијанта управљања је везана за групу под називом „Модулација просторних вектора“, или једноставније векторска контрола мотора. Код такве побуде се у сваком тренутку напајају сва три намотаја.

Пример секвенце напајања трофазног мотора види се на слици 3.5. Напајање сва три намотаја врши се на исти начин али је фазно померено за 60 степени електричне ротације, те се тако добија да су у сваком тренутку времена тачно два

намотаја под напоном. Такође се види да је у сваком од шест сектора, један од намотаја неоптерећен што значи да су оба прекидача искључена.

Процес напајања намотаја само две фазе који се обавља сваких 60 степени представља електронску комутацију. Мотор се константно напаја из трофазног претварачког кола, а распоред укључивања прекидача је усаглашен са позицијом ротора.

Претварач са 6 прекидача									
сектор	Вредност излаза Холових сензора			Стање прекидача					
	Ц	Б	А	ЦГ	ЦД	БГ	БД	АГ	АД
1	1	0	1	0	1	1	0	0	0
2	1	0	0	0	1	0	0	1	0
3	1	1	0	0	0	0	1	1	0
4	0	1	0	1	0	0	1	0	0
5	0	1	1	1	0	0	0	0	1
6	0	0	1	0	0	1	0	0	1

Табела 3.1 Управљање прекидачима за ротацију мотора у смеру казаљке сата

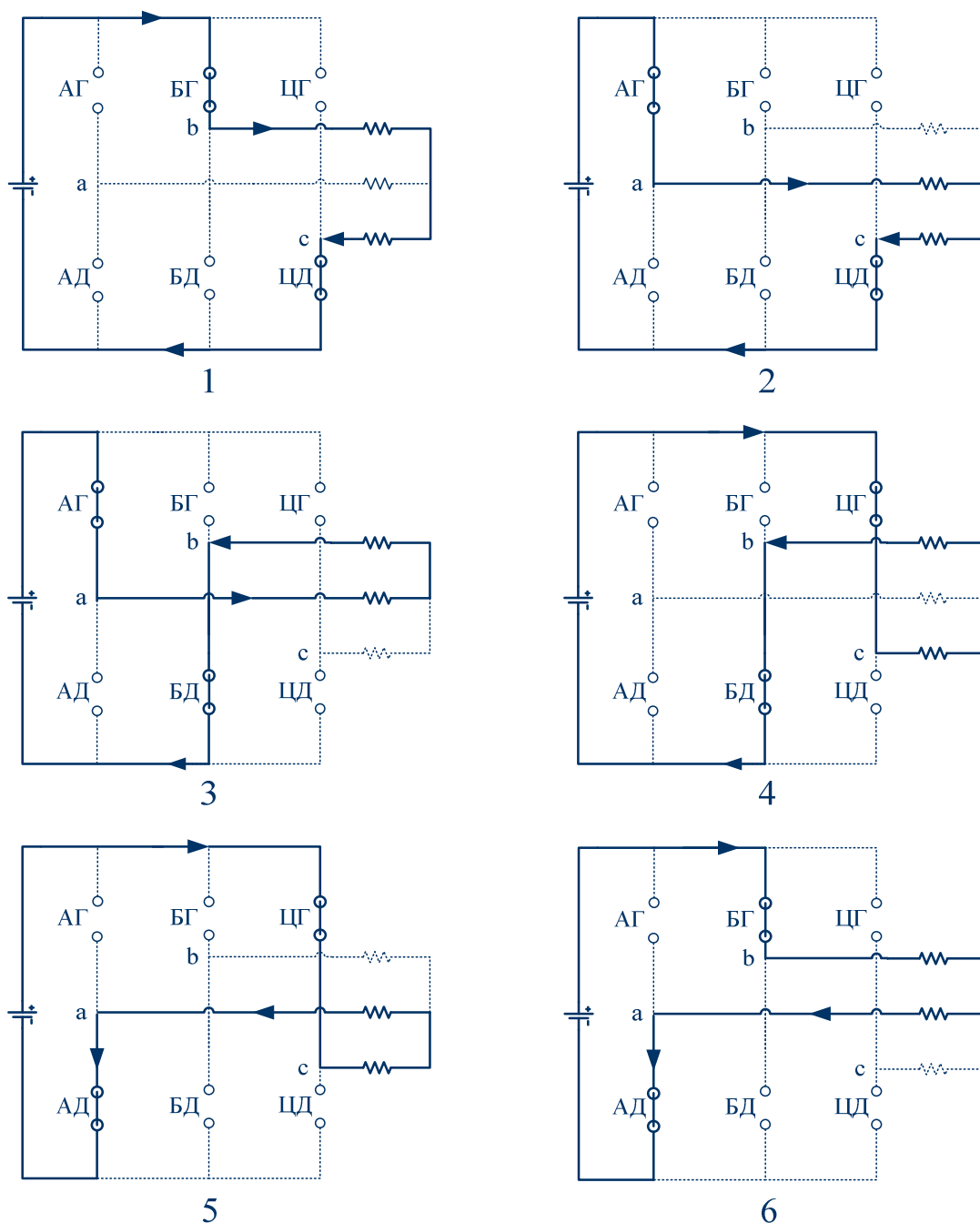
Редослед укључивања појединачних прекидача претварачког моста за случај окретања мотора у смеру казаљке сата дат је у табели 3.1. У табели 3.2 је редослед укључивања прекидача претварачког моста за случај ротације у смеру супротном од смера казаљке сата.

Претварач са 6 прекидача									
сектор	Вредност излаза Холових сензора			Стање прекидача					
	Ц	Б	А	ЦГ	ЦД	БГ	БД	АГ	АД
1	1	0	1	0	0	1	0	0	1
2	1	0	0	0	1	1	0	0	0
3	1	1	0	0	1	0	0	1	0
4	0	1	0	0	0	0	1	1	0
5	0	1	1	1	0	0	1	0	0
6	0	0	1	1	0	0	0	0	1

Табела 3.2 Управљање прекидачима за ротацију мотора у смеру супротном од смера казаљке сата

Из табела се види да је у сваком полумосту задовољен захтев да је највише један прекидач укључен.

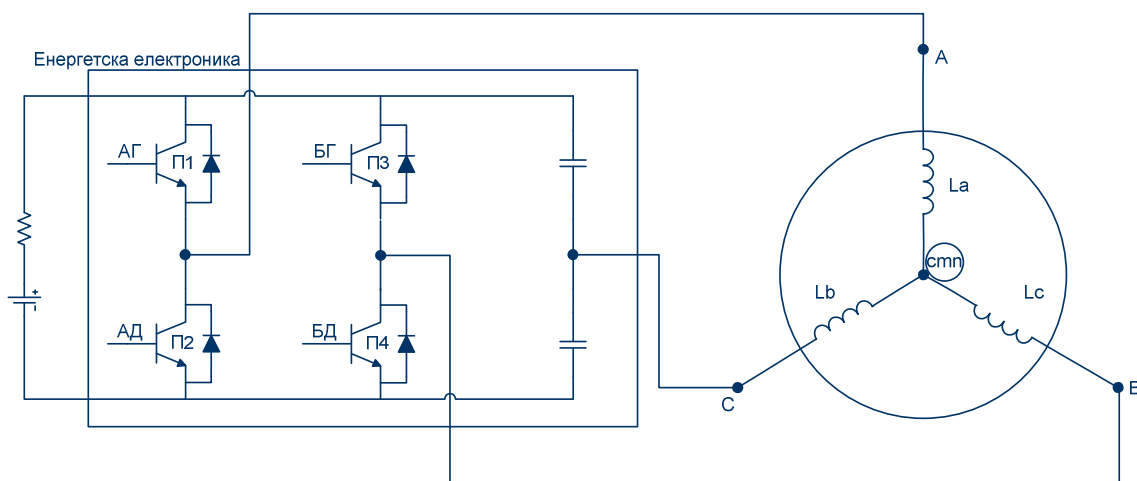
На слици 3.13 приказан је редослед напајања појединих намотаја у зависности од стања на излазу Холовох сензора. Овај распоред одговара стањима прекидача из табеле 3.1.



Слика 3.13 Распоред напајања намотаја

3.4.1.1 Трофазни претварач са 4 прекидача

За примене у колима високих напона цена прекидачких компоненти представља значајну ставку па је приметан тренд у коме се тежи смањењу броја прекидача у циљу смањења цене система. У литератури све чешће се може срести претварач чија је топологија измењена у односу на стандардну, топологију са 6 прекидача, која је била приказана у претходном тексту. На слици 3.14 приказан је претварач са 4 прекидача.



Слика 3.14 Трофазни претварач са 4 прекидача

Тема овог рада везана је за овакву топологију претварача и у даљем тексту ће бити више детаља о њој.

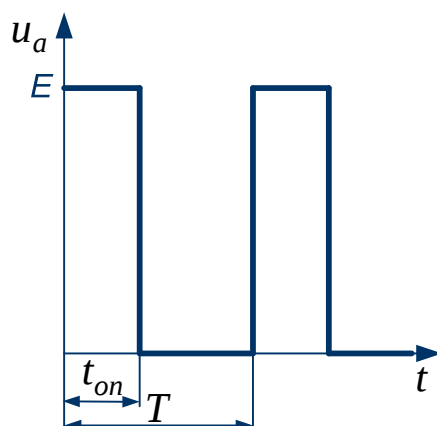
3.4.2 Методе контроле претварача

Најчешће коришћени метод контроле претварача је коришћењем импулсно ширинске модулације (ИШМ) (*pulse width modulation PWM*). Следи кратак преглед најчешће коришћених ИШМ за контролу претварача у колу ЈМБЧ, са ограничењем дискусије на методе контроле које одговарају мотору са трапезном индукованом ЕМС и побудом од 120 степени.

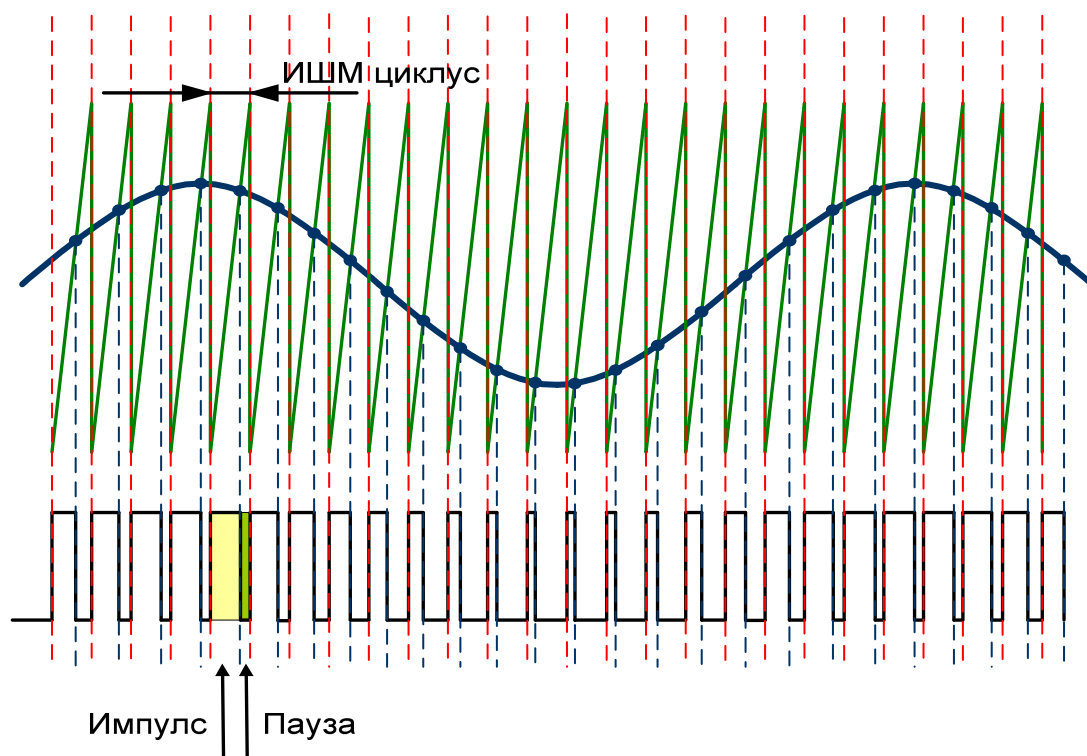
3.4.2.1 Импулсно ширинска модулација

Следи кратак осврт на теорију ИШМ. Ова модулација омогућава контролу средње вредности излазног напона за константну вредност улазног напона, и та контрола даје излазни напон у опсегу од 0V до максималне вредности која је једнака вредности улазног напона. Како јој и име каже, она информацију о

тренутној вредности сигнала претвара у импулс одговарајуће ширине. Трајање трансформације једне тренутне вредности назива се трајање циклуса ИШМ. Сваки циклус се састоји од импулса и паузе чије је укупно трајање једнако трајању циклуса.



Слика 3.15 Облик фазног напона



Слика 3.16 Импулсно ширинска модулација

На слици 3.15 је увећан један период модулације T . Средња вредност напона је пропорционална интервалу у коме је прекидач укључен.

$$U_{sr}(t) = \frac{1}{T} \cdot \int u_a dt = \frac{t_{on}}{T} \cdot E \quad 3.15$$

У свакој трансформацији трајање импулса може имати вредност од максималне која је једнака трајању ИШМ циклуса и која одговара максималном улазном напону, до минималне где импулс и не постоји већ постоји само пауза и која одговара минималном улазном напону. Трансформација би требало да се врши одабирањем на учестаностима много већим од учестаности самог сигнала који се модулише (слика 3.16).

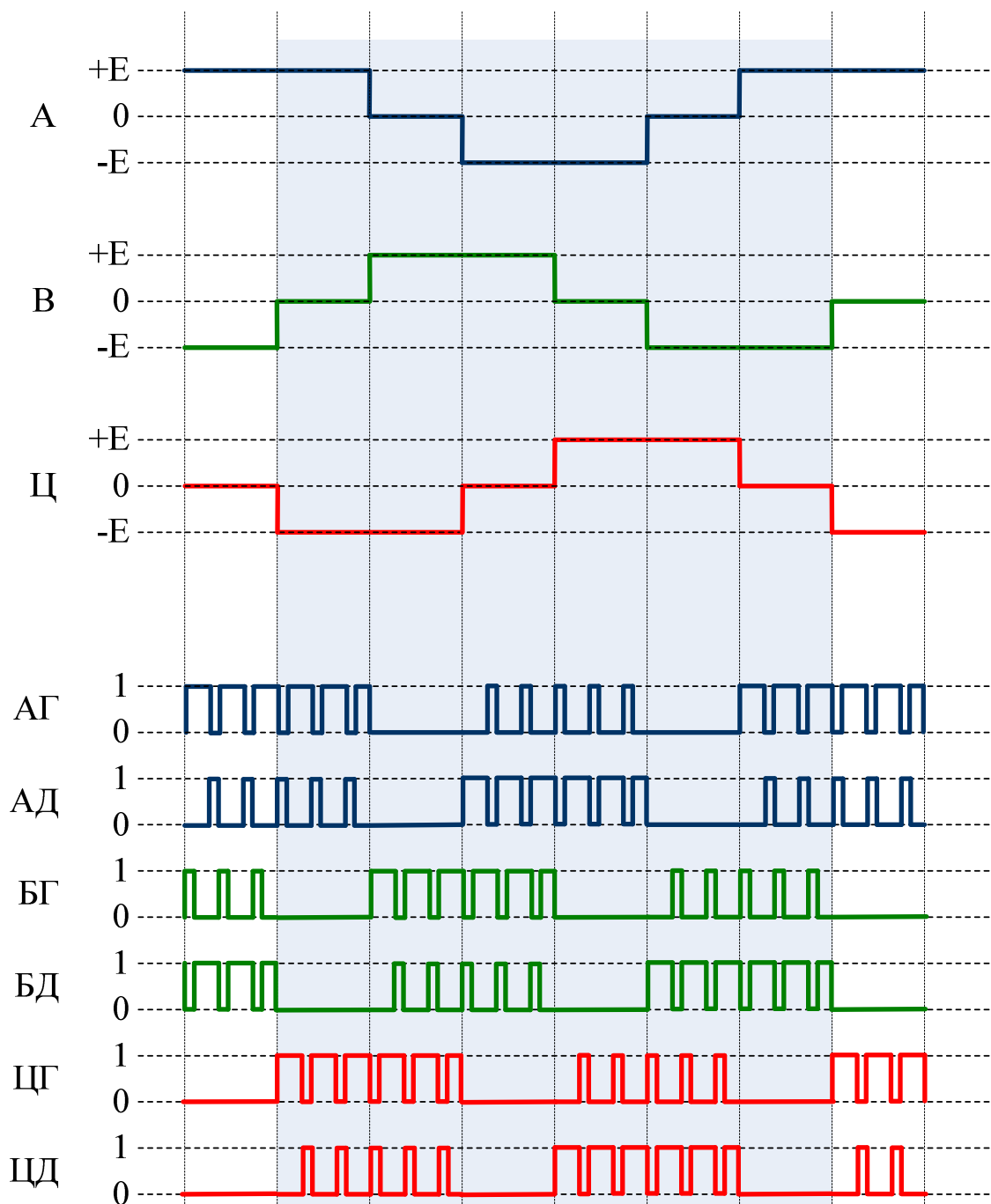
3.4.2.2 Побуда у 6 сектора

Ово је најједноставнији вид побуде претварачког кола. Представља директну побуду намотаја по моделу датом у табелама 3.1 и 3.2. У овом случају је намотај оптерећен у сваком сектору једном од три могуће вредности, позитивним или негативним максималним напонам или је потпуно неоптерећен (слика 3.5).

Брзина мотора код оваквог решења може се мењати променом побудног једносмерног напона чиме се контролише амплитуда излазног напона. Овај метод је по природи сигнала најпогоднији за контролу мотора трапезног типа.

3.4.2.3 Импулсно ширинска модулација у 6 сектора

Принципски представља исто решење као и побуда у 6 сектора. Разликују се по томе што се контрола амплитуде напона врши уз помоћ прекидача и ИШМ. Постоје три варијације овог решења. У првом, комутација се врши сетом горњих прекидача, док се модулација врши доњим прекидачима. У другом, комутација се врши сетом доњих прекидача, док се модулација врши горњим прекидачима, и у трећем решењу оба прекидача у сваком полумосту врше комутацију и ИШМ (слика 3.17). За случај када је трајање импулса једнако трајању ИШМ циклуса, овај метод представља исту побуду као што је побуда у 6 сектора.



Слика 3.17 ИШМ у 6 сектора

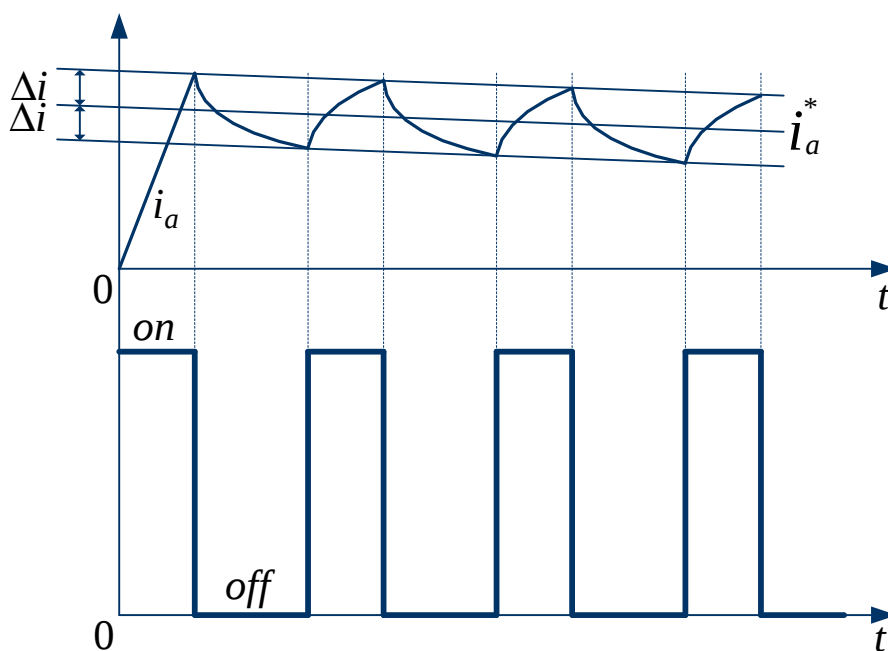
3.4.3 Управљање струјним хистерезисом

Управљање струјним хистерезисом је метода у чијој основи стоји праћење и директна контрола вредности струје намотаја. При томе се тежи да струја буде у одређеном опсегу око задате вредности, што се постиже директним контролом прекидача у колу намотаја. Код ове контроле не постоје временски интервали у

којима прекидач треба да је укључен или искључен већ то зависи од струјног сигнала. Самим тим је јасно да је то величина која утиче на фреквенцију рада прекидача на коју се утиче ширином хистерезиса.

Иако ова контрола има недостатак у виду сметњи које уноси променљива фреквенција рада прекидача, предност представља чињеница да је заштита од прекомерне струје у колу увек активна јер се вредност струје константно прати. Ово је веома значајно за ситуације када долази до брзих пораста струје (нпр. блокада ротора), што спречава оштећење мотора.

Код ЈМБЧ се контрола струјним хистерезисом састоји у појединачној контроли фазне струје сваког намотаја. То се постиже укључивањем прекидача када је вредност струје мања од задате вредности и искључивањем када је та вредност већа од задате, чиме се вредност струје у намотају одржава у оквиру задатих граница.



Слика 3.18 Хистерезисна контрола прекидача

Овиме се практично постиже да се напонски извор претвара у струјом контролисани напонски извор. Висина одступања струје од задате вредности Δi одређује отвор хистерезиса. На слици 3.18 виде се контролна (i_a) и задата (i_a^*) струја у намотају. Напон намотаја одређује се на следећи начин [10]:

$$i_a \leq i_a^* - \Delta i, \quad v_x = V_s \quad 3.16$$

$$i_a > i_a^* + \Delta i, \quad v_x = 0 \quad 3.17$$

3.5 Управљачка стратегија

Избор стратегије за управљање мотором захтева дуготрајну анализу. За то је веома важно утврдити критеријум за оцену перформанси система. Постоји више различитих приступа за оцену перформанси система. Издвојићемо неке [10]:

- Што мањи фазни став излазне струје у односу на улазни напон,
- Константан угао између флуксева,
- Оптималан обртни момент по јединици струје,
- Максимална ефикасност мотора,
- Максимални обртни момент,
- Једноставна контрола.

Дакле, важно је приметити да не постоји јединствени параметар који би се користио за оцену перформанси система. На основу поменутих критеријума постоје и различите стратегије управљања мотором. Једна од стратегија која је често коришћена је стратегија одржавања угла између флуксева статора и ротора константним.

3.5.1 Константан угао између флуксева

Једносмерни напон се у инвертору претвара у једну врсту трофазног система напона одређене учестаности који се доводи на намотаје статора. Струје у статорским намотајима стварају флукс Φ_i док на ротору постоји константан побудни флукс Φ_r . Развијени електромагнетни обртни момент тада износи:

$$T_e = k\Phi_i\Phi_p\sin\delta \quad 3.18$$

Где су:

k – константа,

δ – угао између флуксева статора и ротора, или тзв. угао обртног момента.

ЈМБЧ постиже максимални момент када је $\delta = 90^\circ$. У пракси је немогуће остварити прав угао за сваку позицију ротора јер су статорски намотаји распоређени дискретно по ободима статора. Детаљнијом математичком анализом се показује да је обртни момент пропорционалан струји, чиме се контрола своди на

контролу струје. Овај вид контроле представља неку врсту основне контроле коју у мањој или већој мери све методе контроле користе.

Практично гледано, из претходне анализе може се извести закључак да је основни циљ управљања постизање константне карактеристике обртног момента. Такође је важно приметити да је обртни момент пропорционалан струји, па се може сматрати да је у случајевима када је струја намотаја константна, обртни момент такође константан. Ово је значајан закључак јер је у пракси врло важно да за постизање одређеног критеријума, није тешко одредити перформансе система. Ова претпоставка се у пракси показала као јако добра за иницијално одређивање перформанси система.

За одржавање струје на константној вредности веома ефикасно служи и управљање струјним хистерезисом.

4. Преглед релевантних извора информација

Као што је у уводном делу речено, стратегија развоја индустрије уопште постављена је тако да је потрошња енергије једно од најважнијих ограничења. Таква стратегија је довела до повећаног интересовања за смањењем трошкова у моторним системима што је иницирало да део научног истраживања буде усмерен ка томе. Најочигледнији пример су били Јапан и САД, који су још крајем прошлог века утврдили стратегије економске ефикасности у којима доминантну улогу имају електрични мотори као највећи потрошачи у индустрији и код становништва.

У тексту који следи дат је преглед академске литературе, а затим и преглед релевантних комерцијалних решења из области управљања ЈМБЧ.

4.1 Преглед литературе

Тренутно се могу јасно издвојити три правца у развоју технологије ЈМБЧ. Први правац се односи на унапређење система управљања и повећање ефикасности мотора. Други правац чине методе поједностављења топологије претварачког кола чиме се смањује цена коштања система, али се мења концепт система управљања услед промењених параметара система. Трећи правац чине методе за одређивање позиције ротора без коришћења сензора и смањење цене система на рачун

елиминације сензора из њега. Сва три правца се развијају независно јер сваки за себе доноси предности систему у целини, али се међусобно не искључују јер сваки од њих користи решења и алгоритме других.

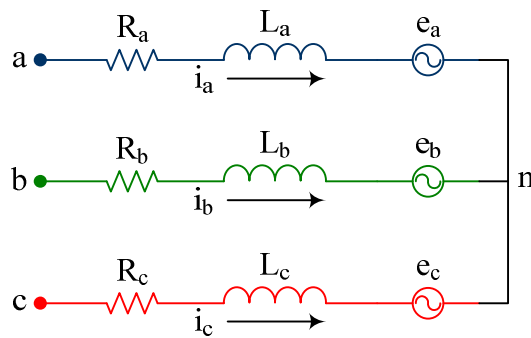
Пошто се ова теза бави системом за управљање ЈМБЧ уз помоћ претварача са редукованом топологијом, у истраживању се подразумевају сензори за одређивање позиције ротора.

4.1.1 Системи управљања без детектора позиције ротора

Стална тежња да се број компоненти у систему смањи довела је до идеје да се из система искључи сензорско коло које даје информацију о позицији ротора. Међутим, ово смањење цене самим смањењем броја компоненти је ограничено и ценом решења које ће заменити сензорско коло. Решења се најчешће свде на одређивање позиције на основу информације коју систем пружа на својим намотајима и које су лако доступне. За одређивање позиције није довољно само праћење вредности напона и струја у намотајима статора, већ је неопходно применити додатне рачунске технике уз примену разних алгоритама, за шта је свакако потребно коришћење додатних ресурса у виду процесора и меморије. Знајући да цена микроконтролера као и програмабилних секвенцијалних мрежа свакодневно пада, јасно је да ове методе имају потенцијал.

За анализу је неопходно извести одговарајући модел система. Еквивалентно коло ЈМБЧ са слике 4.1 најчешће се користи за моделовање. У неоптерећеном намотају се индукује ЕМС која је последица кретања ротора. Ова величина је пропорционална брзини ротора, а зависна је и од његове позиције. На основу ових чињеница су развијене методе за одређивање позиције ротора на основу индуковане ЕМС ([17]-[34]).

Овај приступ има многе предности међу којима су смањена цена инсталације система, смањење димензија система, нема ограничавајућих фактора средине који су присутни код примене сензора (притисак, влажност ваздуха и температура које могу бити сметња сензорима у уређајима беле технике) и свакако смањење цене управљачког склопа.



Слика 4.1 Еквивалентно коло трофазног ЈМБЧ

Постоје и друге методе одређивања позиције без коришћења сензора и већину можемо сврстати у следеће групе:

- Метода одређивања позиције ротора на основу сигнала индиковане ЕМС,
- Метода одређивања позиције ротора на основу промене индуктивности калемова,
- Метода одређивања позиције ротора на основу промене флукса,
- Остале методе.

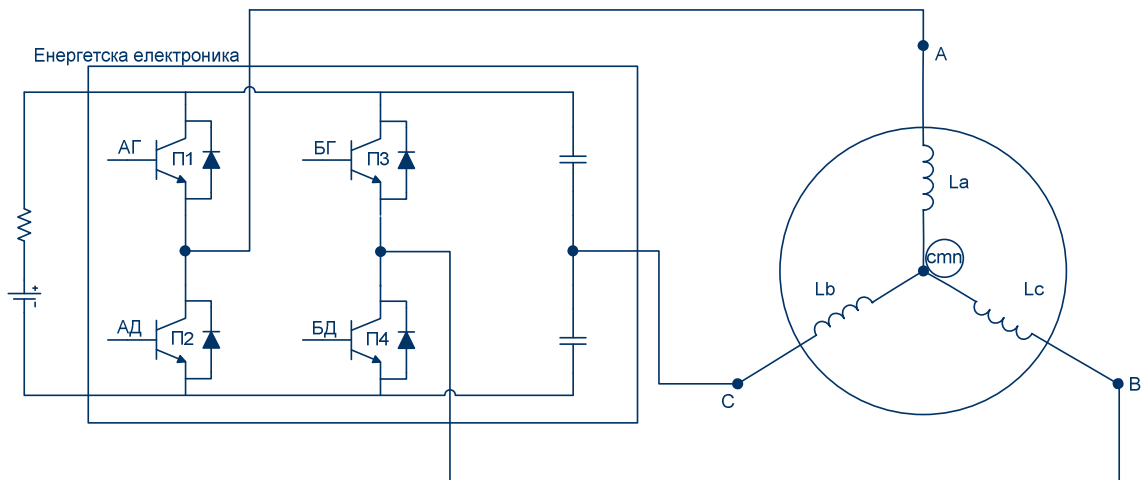
4.1.2 Системи са поједностављеном топологијом

Један од начина да се смањи број компоненти у систему је смањење броја прекидача у претварачком колу. Такав приступ захтева додатни напор за адаптацију система управљања што је довело до појаве бројних радова на ову тему.

Са аспекта топологије, у академским часописима и радовима на конференцијама све чешће се јављају теме везане за смањење броја прекидача у управљачком претварачком колу. Сви ти предлози представљају само полазну тачку јер свака промена у топологији захтева и промене у систему за управљање које ће бити прилагођене новој топологији тако да се перформансе система не умање у односу на претходна решења. Свако од тих решења даје нови потенцијал развоју ове области.

Следи преглед радова на тему смањеног броја прекидача који су везани за ЈМБЧ. Међу првим радовима који повезују ЈМБЧ и топологију са мањим бројем прекидача су радови објављени крајем прошлог и почетком овог века [35][36][37][38][39]. Неки од ових радова представљају основу и темеље данашњих истраживања. Један од најчешће цитираних радова у овој области објавио је Ли

(Byoung-Kuk Lee) 2003. године и у њему је предложено смањење броја прекидача са 6 на 4 [40]. Поједностављени дијаграм је приказан на слици.



Слика 4.2 Трофазни претварач са 4 прекидача

Аутори су предложили методу за управљање уз помоћ струјом контролисане ИШМ. Ово решење представља једну варијанту контроле струјним хистерезисом која је описана у поглављу 3.4.3 овог рада. У својим анализама аутори су поредили резултате предложеног решења са резултатима система који користи претварач са 6 прекидача, чиме су доказали оправданост оваквог приступа. Као недостатак наводи се ограничење брзине мотора. Ово ограничење је последица напајања намотаја који су у већини времена напојени само половином напона напајања, међутим предложено је решење за овај проблем. Треба нагласити следеће особине овог решења:

- Топологија са редукованим бројем прекидача,
- Струјна контрола ИШМ уз помоћ 2 струјна сензора,
- Одређивање позиције уз помоћ Холових сензора.

Ли је извршио симулацију и имплементацију оваквог решења и уз помоћ мерења показао да метода задовољава захтев за прецизном контролом обртног момента.

Чињеница да су за одређивање позиције коришћени сензори, не умањује вредност оваквог приступа јер је оваква контрола јефтина и ефикасна, а функционише у било ком систему без обзира на начин којим се одређује позиција. То значи да је метода актуелна и да нове методе одређивања позиције ротора без

сензора могу само додатно унапредити систем као целину али тај сегмент не утиче на управљачки део система.

За исту топологију предложена су и решења у којим се за генерисање ИШМ сигнала користи векторска контрола [42][43][44]. Тачније у питању је контрола уз помоћ модулације просторних вектора. Приступ који је утврдио Кореа (*Maurício Beltrão de Rossiter Corrêa*) подразумева математичке трансформације за прелазак у такозвани α - β домен и релативно сложен алгоритам за управљање ИШМ-ом. Тиме се ово решење сврстава у групу компликованијих.

Веома значајна је чињеница да је векторска контрола применљива на овој топологији. Ако се узме у обзир прецизност, мала таласност обртног момента и брз динамички одзив ове методе можемо је сматрати једном од најперспективнијих, али треба напоменути да је, по досадашњим реализацијама, ова метода најзахтевнија са аспекта ресурса потребних за имплементацију и у том смислу најскупља. Узимајући у обзир претходно излагање, ова метода се мора раздвојити од метода које спадају у групу јефтиних решења. У случајевима где није неопходна веома велика прецизност и постизање максималних перформанси мотора, ова метода свакако не би требало да буде интересантна.

Мало једноставнији приступ је увео Озтурк (*Salih Baris Ozturk*) [44] који је користио векторску контролу са циљем одржања обртног момента константним. Аутор је уз помоћ табеле напонских нивоа, који се односе на вредности индиковане ЕМС у специфичним позицијама ротора, вршио избор просторног вектора за напајање намотаја. Тиме је избегнут прелазак у α - β домен чиме је метода знатно поједностављена. Недостатак је то што је неопходно да се одреде напонски нивои, тј. константе индиковане ЕМС за сваки мотор за који је предвиђена евентуална примена. У поређењу са претходним решењем ово је свакако много једноставније јер нема трансформација координатног система што знатно умањује комплексност.

4.1.2.1 Системи за управљање струјним хистерезисом

Следи преглед радова који су везани за ову тезу својом стратегијом управљања. Заједничко је то што користе поједностављену топологију и струјом контролисану ИШМ.

У свом истраживању, Родригез (*Fernando Rodriguez*) [45] је констатовао да су трансформације за прелазак у $d - q$ домен (тј. примена Паркове и Кларкове

трансформације) корисне једино у случају мотора са сталним магнетом код којих је индукована ЕМС синусног облика. Овакве трансформације не елиминишу из једначина индуктивности које су функције угла код мотора са трапезним обликом индуковане ЕМС. Аутор такође наводи да је струјом контролисана ИШМ веома распрострањена метода за контролу мотора, као и чињеницу да је пропорционално интегрални регулатор довољан да се успостави ефикасна контрола мотора.

За разлику од претходно поменутих радова, Родригез посматра ЈМБЧ као дигитални систем и на основу те претпоставке предлаже нову методу за контролу мотора. ЈМБЧ се посматра као дигитални систем који може радити у само два предефинисана стања тако што у једном стању мотор треба да се окреће ниском брзином ω_n , а у другом стању високом брзином ω_v . Дакле, ако је тренутна брзина мотора нижа од задате, тада мотору треба задати контролу убрзања, а ако је брзина виша од задате, мотор треба успоравати. На тај начин је превео контролу у бинарни запис. Аутор предлаже две методе за контролу брзине мотора и обе се концептуално заснивају на методи са струјним хистерезисом. У презентованом раду је успешно постигнута регулација брзине на два задата нивоа са обе коришћене методе струјне контроле. Експерименталним резултатима је показана исправност идеје. Аутори овог рада су у фази која претходи експериментима, користили ПСИМ симулатор за развој идеје у симулационом окружењу.

Рад који су објавили Лин (*Cheng-Tsung Lin*) и група аутора [46], представља један од првих радова који су за практичну реализацију предложеног решења користили локално програмабилне секвенцијалне мреже. Данас је приметан тренд коришћења програмабилних компоненти за управљање мотором, уместо интегрисаних кола намењених обради дигиталних сигнала или микроконтролера. Лин је такође користио топологију са четири електронска прекидача и представио методу за одређивање позиције мотора без сензора. Оно што је за овај рад много интересантније је начин управљања мотором.

Аутори су као основу користили секвенцу за побуду коју је предложио у свом раду Ли [40]. На основу те секвенце Лин је предложио нови тип ИШМ како би карактеристика обртног момента била што равнија. Контрола је имплементирана уз помоћ ФПГА и то коришћењем компоненте Спартан3 при чему је констатовано да се може користити најмања компонента из ове серије што је, са аспекта цене,

прихватљиво чак и за комерцијалну употребу. Такође, приказани експериментални резултати показују да је и само решење такође довољно квалитетно за комерцијалну употребу. Код овог решења још треба напоменути да се код стартовања мотора и одређивање иницијалне позиције користи техника довођења мотора у познату позицију „насилним“ напајањем одређених намотаја, што у пракси доводи до непредвидивог смера кретања до довођења мотора у ту позицију.

Ниасар (*Abolfazl Halvaei Niasar*) [47] у свом раду фокусира се на управљање мотором без сензора позиције, али такође користи претварач са четири прекидача. У свом раду је нагласио предности коришћења четири електронска прекидача уместо шест. Од интереса за ову тезу је метода контроле, а аутори у свом раду представљају технику струјне контроле. Ниасар је у потпуности преузео и применио идеју коју је предложио у свом раду Ли [40]. У питању је техника директне контроле струје сваке од фаза коришћењем струјних сензора. Алгоритам управљања је реализован коришћењем ДСП-а. Резултати који су представљени поново говоре у прилог чињеници да се може постићи карактеристика обртног момента која је по својим особинама једнака карактеристици која се добија коришћењем претварача са шест прекидача.

Још један рад на тему топологије са четири прекидача и струјне контроле објавио је Ђиа (*Changliang Xia*) [48]. Он предлаже поједностављену топологију као ефикасну меру снижавања цене производа, међутим наглашава и проблеме у управљању са фазом која се напаја преко кондензатора. Проблеми су нарочито изражени у случају када се користи само један струјни сензор.

Ђиа користи управо контролу једним струјним сензором и предлаже начин на који се могу превазићи проблеми у два од шест режима рада у којима би требало да је струја кроз грану са кондензаторима једнака нули. Аутор је експериментално приказао проблеме који се јављају због ове чињенице и констатовао да је неопходно обезбедити да у сваком од шест режима управљања мотором, неопходно да струја постоји у тачно два намотаја мотора.

На тај начин Ђиа је издвојио два режима у којима се појављује проблем и у њима увео додатну логику која обезбеђује да струја буде једнака нули. То је постигао дељењем поменутих режима рада на по четири под режима у којима се користи нови алгоритам управљања на основу мерења струје у заједничкој грани.

Приказани резултати показују да је струја квази правоугаона у сва три намотаја мотора, што директно значи и да је карактеристика обртног момента равна, а то је управо критеријум оцене ефикасности методе. У овом раду је такође још приказана и метода контроле брзине мотора коришћењем пропорционално интегралног регулатора. Уз речено треба напоменути чињеницу важну за овај рад, да је за одређивање позиције мотора, аутор овог рада, користио Холове сензоре.

Озтурк (*Salih Baris Ozturk*) је у још једном раду [49] представио контролу ЈМБЧ са несинусном индукованом ЕМС. Поново је у питању рад који се односи на претварач са топологијом са четири електронска прекидача. Нагласак је на директној контроли обртног момента. Аутор предлаже векторску контролу уз помоћ табеле вредности напона индуковане ЕМС помоћу које се врши контрола мотора.

Мохсен (*Mohsen Ebadpour*) [50] је објавио рад у коме је предложио претварач са четири електронска прекидача и струјну контролу коришћењем једног струјног сензора. За одређивање позиције ротора користио је методу детектовања нулте вредности напона који су изведени из разлике фазних напона мерених на прикључцима мотора.

Слично као Ћиа [48], Мохсен је користио контролу једним струјним сензором и имплементирао технику у којој се посебно посматрају два од шест режима рада, у којима би требало да је струја, кроз грану претварачког моста у којој су кондензатори, буде једнака нули. Поменута два режима рада је поделио на 4 под режима за које развијен посебан контролни алгоритам. Исто као и Ћиа, Мохсен користи један струјни сензор и струјну контролу мерењем једне струјне величине. Аутор је своје анализе верификовао коришћењем симулационог окружења у Матлаб-у.

4.2 Постојећа решења за управљање ЈМБЧ

У овом поглављу су анализирана постојећа решења у области система за управљање ЈМБЧ како би се могле уочити њихове основне функционалности и карактеристике и упоредити са онима које систем обрађен у овој тези пружа.

На тржишту се може уочити неколико врста решења које можемо сврстати у следеће групе:

- решења заснована на процесорима намењених обради дигиталних сигнала (ДСП) или микроконтролерима, која у основи представљају само имплементацију одређеног алгорита на платформи реализованој уз помоћ поменутих компоненти и неколико наменских интегрисаних кола. У решењима се најчешће налазе А/Д претварачи, интегрисано коло за генерисање ИШМ сигнала и друга интегрисана кола која се разликују од решења до решења,
- решења заснована на наменским интегрисаним колима, која, у мањој или већој мери, представљају решења из претходне тачке интегрисана у једно коло.

Решења из прве групе су тренутно много више заступљена и то из више разлога. Један од разлога је универзалност, јер се променом садржаја ДСП-а или микроконтролера може извршити промена намене решења, тако да се једно решење физичке архитектуре може користити за управљање више различитих типова ЈМБЧ. Други разлог је тај што постоји много различитих ЈМБЧ који се разликују по разним параметрима те је тешко направити универзално решење за већи број мотора, а постоји мало модела или типова мотора који су ушли у масовну производњу до те мере да су произвођачи имали потребу за развојем таквих наменских интегрисаних кола.

И поред ових чињеница ипак постоје тржишта код којих постоји потреба за великим бројем производа једне врсте и за које постоји потенцијал да се произведе наменско интегрисано коло. Примери таквог тржишта, чији раст је уочљив у свакодневном животу, свакако су тржиште електричних бицикала и уређаја беле технике. Ове две групе се веома разликују по начину контроле мотора те постоји неколико врста наменских интегрисаних кола која су реализована за поједине типове мотора и за одређену врсту њиховог коришћења.

Основне разлике у начину контроле су те што код уређаја беле технике, мотор има константно оптерећење и најчешће треба да се врти константно на брзини која има једну, две или три дискретне вредности. Код електричних бицикала је потребно

обезбедити рад у ширем опсегу оптерећења са континуалном променом брзине при чему ни оптерећење није константно.

4.2.1 Решења заснована на микроконтролеру

4.2.1.1 Texas instruments INSTA SPIN

Инста спин (*INSTA SPIN*) је технологија управљања ЈМБЧ. Намењена је решењима са ниским трошковима. Инста спин заправо представља технику контроле и у документацији [51] се наводи да је успешно тестиран на више од 50 различитих типова мотора. Као предност се наводи чињеница да за контролу није потребно познавање ни једног параметра мотора. Произвођач обезбеђује референтно решење за скуп мотора за које је тестирано решење, али даје слободу и кориснику да сам развија своје алгоритме на моторима који не припадају групи тестираних од стране произвођача.

Инста спин је контрола заснована на праћењу флукса мотора, на основу чега се одређују моменти за комутацију. Развијено је веома напредно графичко окружење које кориснику пружа могућност да прати сигнал флукса мотора и да подешава ниво флукса за који мотор треба да врши комутацију. Такође, корисник може пратити сигнале напона и струје у овом графичком окружењу.

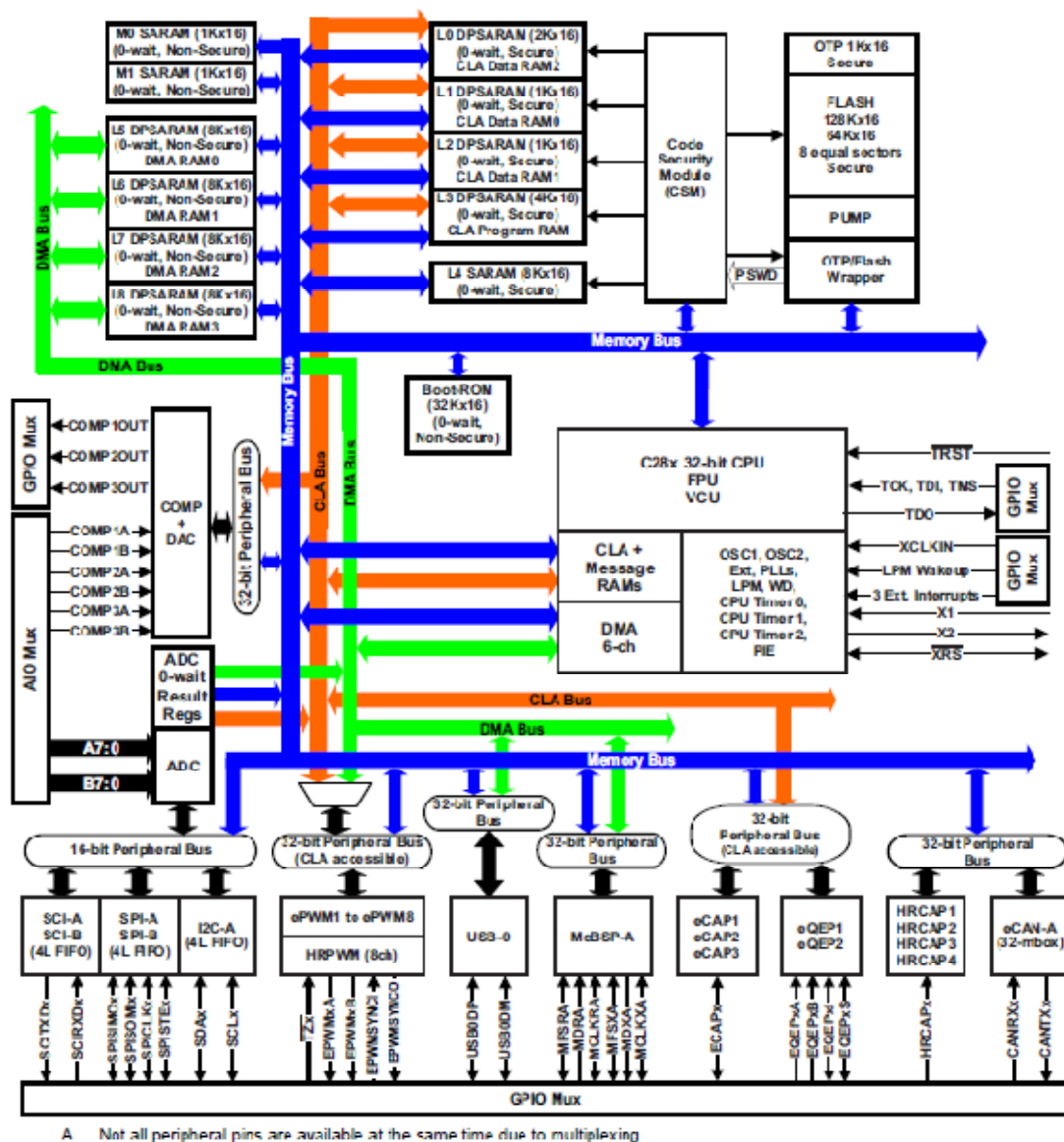
Коришћење флукса за комутацију, у поређењу са методама коришћења индуковане ЕМС, омогућава стабилнији рад при нижим брзинама. За разлику од сигнала флукса, амплитуда сигнала индуковане ЕМС смањује се на нижим брзинама, што доводи до лошег сигнала и шума. Инста спин омогућава лакши рад при малим брзинама, а обезбеђује поузданије покретање мотора, чак и под великим оптерећењем.

4.2.1.2 TMS320F2806x (Piccolo) Микроконтролер

Овај микроконтролер омогућава приступ информацијама о:

- Флуксу (**Flux**),
- Углу (**Angle**),
- Брзини (**Speed**),
- Обртном моменту (**Torque**).

Уз познавање ове четири величине у реалном времену могуће је вршити правилну контролу мотора коришћењем различитих техника и алгоритама. Детаљна архитектура овог микроконтролера дата је на слици 4.3. У комбинацији са F2806х, управљачким колом за периферијске уређаје, омогућава покретање и контролу мотора без коришћења сензора позиције. То подразумева како детекцију, тако и контролу брзине. У овом решењу користи се векторска контрола [52] која на располагању има софтверски модул.



Слика 4.3 Функционални блок дијаграм TMS320F2806

F2806х (или C28х) је члан фамилије TMS320C2000 микроконтролера. C28 су засновани на 32-битној архитектури са непокретним зарезом и представљају врло ефикасну C/C++ платформу, што кориснику омогућује да развија разноврсне

алгоритме у језицима вишег нивоа. 32-битни блок за множење са акумулацијом је један од основних елемената у дигиталној обради сигнала чиме овај микроконтролер сврстава у групу оних који могу са доста високом прецизношћу и брзином да обављају захтевне математичке операције. Требало би напоменути и проточну архитектуру са осам нивоа.

Ово решење је карактеристично још и по томе што кориснику пружа готово решење за управљање ЈМБЧ, али омогућава и развој других врста контрола заснованих на праћењу неког од параметара који су на располагању.

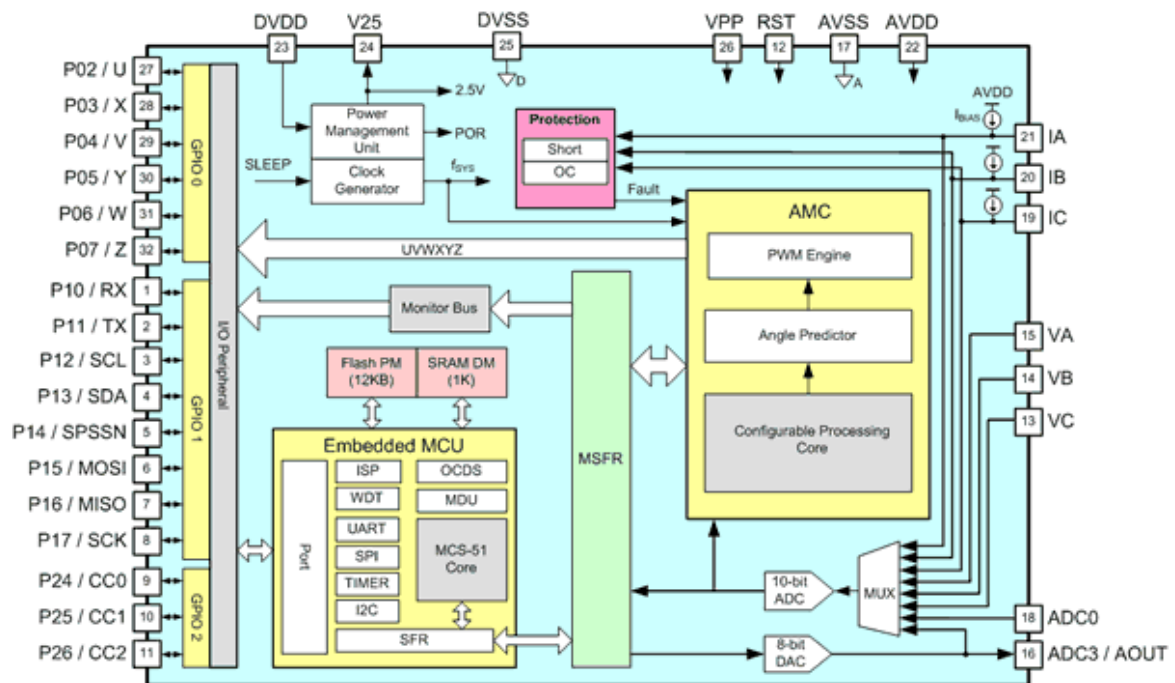
Слична решења овом су:

- 56800/E (*Freescale Semiconductor*), је решење контроле трофазног ЈМБЧ засновано на 56800/E фамилији која представља комбинацију процесорске снаге једног ДСП-а и функционалности микроконтролера. Коло садржи ИШМ, АД конверторе и тајмере и многе спрежне системе, што га чини добрим кандидатом у избору контролног модула мотора [53].
- C8051F31x (*Silicon Laboratories*), је микроконтролер са језгром које је компатибилно са 8051 архитектуром и периферијом неопходном за примену у контроли мотора. Коло садржи улазно/излазне сигнале генералне намене, серијске спреге типа UART и SPI, тајмере, температурни сензор и улазне АД конверторе. У пакету са развојном платформом AN1916 произвођач нуди и решење управљања мотором без сензора као референтни дизајн [54].
- LPC292 (*NXP*), у основи представља APM9 микроконтролер уз спрежне системе као што су CAN (*controller area network*), LIN (*Local Interconnect Network*) и USB (*Universal Serial Bus*). Такође поседује 10-битне АД конверторе и различите серијске и паралелне спрежне системе [55]. Произвођач нуди и развојну платформу OM11025 [56] и референтни дизајн.
- *Microsemi – SmartFusion Dual motor Control Kit*, развојну плочу са ARM Cortex M3 процесором поред ког је на располагања сва неопходна аналогна периферија [57].

- *STM8 MCKIT* (STMicroelectronics), је интегрисани систем који омогућава целовито решење управљања мотором. То је у суштини *STM8* микроконтролер са неколико под система који су неопходни да обезбеде улазне аквизиционе сигнале или излазне прилагођене сигнале. Платформа је намењена трофазним ЈМБЧ. Карактеристично је што референтни дизајн позицију мотора и брзину одређује уз помоћ Холових сензора [58].

4.2.2 Решења заснована на наменским интегрисаним колима

4.2.2.1 Fairchild Semiconductors FCM8531



Слика 4.4 Функционални блок дијаграм FCM8531

Ово интегрисано коло је намењено за векторску контролу ЈМБЧ и представља решење са два процесорска језгра, од којих је једно такозвани „унапређени контролер за моторе“ (*Advanced Motor Controller – AMC*), а други је процесор са архитектуром и инструкцијским сетом компатибилним са 8051.

АМЦ је специјално дизајниран за управљање моторима и представља комбинацију конфигурабилног процесорског језгра и спрежних кола која му омогућују векторску контролу. 8051 служи као спрега ка кориснику. Предност овог двопроекторског решења је паралелно извршавање задатака намењених управљању

мотором као што су алгоритми за управљање, генерисање ИШМ сигнала, праћење нивоа напона и струје у намотајима, прекострујна заштита у реалном времену и рачунање позиције ротора са једне стране, и задатака обраде команди ка мотору од стране корисника кроз спрежне системе које интегрисано коло обезбеђује са друге стране.

Слична решења овом су:

- *ST EVAL6235PD (ST Microelectronic)* платформа [60], са *L6235* [61] који представља потпуно интегрисано решење са трофазним претварачем и прекострујном заштитом. Ово интегрисано коло садржи све електронске компоненте неопходне да се управља мотором. Интегрисани су, поред поменутих енергетских прекидача, ИШМ блок и логичка структура за декодовање сигнала са Холових сензора. Ово интегрисано коло представља решење које по особинама одговара решењима која ће бити описана у овом раду.
- *L6235 (ST Microelectronic)*, је интегрисано коло врло слично претходном са разликом што врши контролу мотора без коришћења сензора [62].
- *TB6575FNG (TOSHIBA)* је интегрисано коло које омогућује комутацију без коришћења сензора као и ИШМ контролу струје за трофазни ЈМБЧ [63]. Ово интегрисано коло обезбеђује и прекострујну заштиту. Треба нагласити да ово интегрисано коло даје ИШМ излазе и нема интегрисане енергетске прекидаче.

5. Опис симулационог окружења

Процес реализације једног решења увек креће од идеје и у почетној фази развоја неопходно је окружење које ће омогућити једноставно и брзо креирање модела система и његову брзу функционалну проверу.

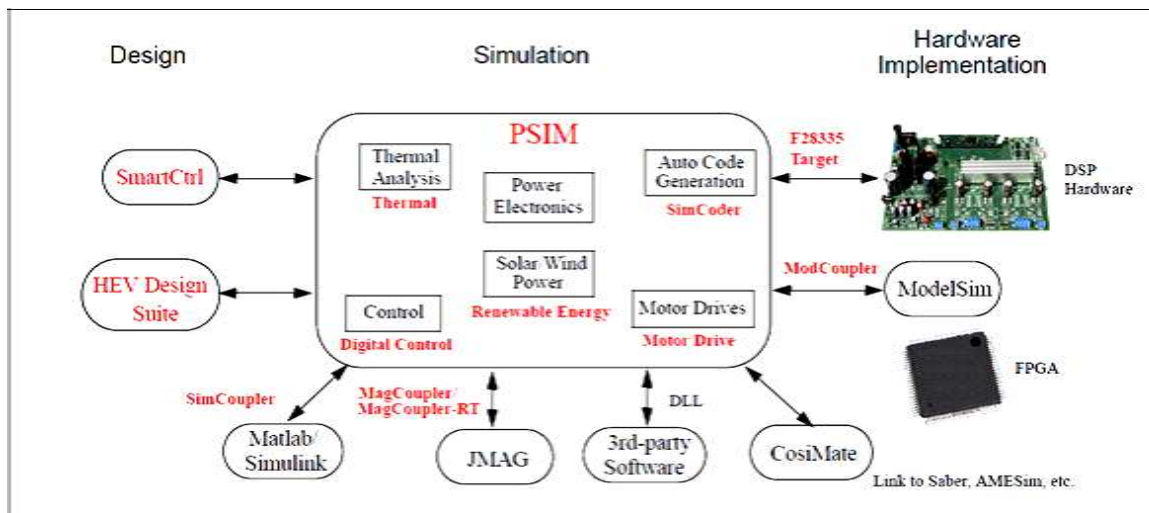
За развој система за управљање мотором потребно је окружење које обезбеђује моделовање мотора, енергетске електронике као и система за управљање. Једно од таквих окружења је симулациони пакет ПСИМ (*PSIM*).

ПСИМ представља симулационо окружење наменски развијено за моделовање енергетске електронике и мотора и поседује велику библиотеку различитих компоненти потребних за моделовање управљачких система везаних за моторе. Међу њима издвајамо:

- Модели мотора, представља скуп основних типова мотора како једносмерних мотора тако и синхроних и асинхроних мотора, који су описани мноштвом параметара које корисник може мењати и прилагођавати конкретним примерима из праксе,
- Компоненте за дигитално управљање, у које спадају дискретни елементи у Z -домену (кола за кашњење, дигитални филтри, разне функције преноса у Z -домену)
- Термални модули, који омогућују рачунање губитака у полупроводницима,
- Елементарне логичке компоненте.

Такође у ПСИМ пакету налазе се бројне компоненте за спрегу са другим програмским пакетима међу којима издвајамо:

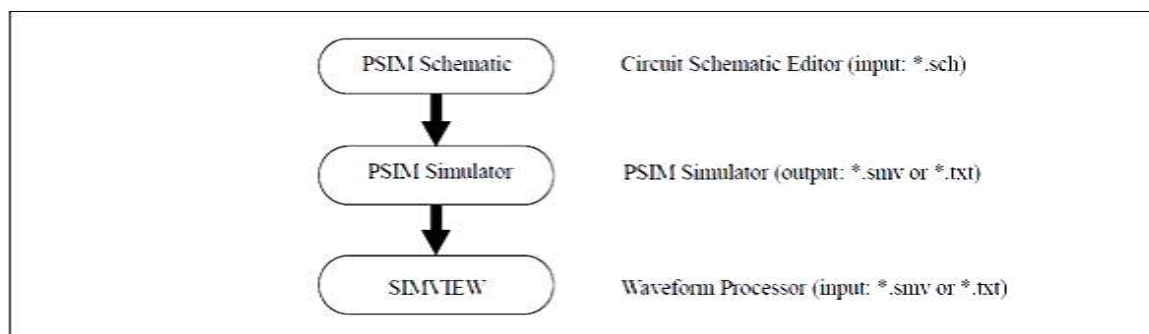
- Модул *SimCoupler*, модул који омогућује спрегу између ПСИМ-а и програмског пакета *Matlab*,
- Модул *ModCoupler-Verilog*, представља модул за спрегу софтвера за РТЛ симулацију *ModelSim* и симулатора *PSIM*.



Слика 5.1 ПСИМ програмски пакет и спрежни додаци

Поред ових програмски пакет ПСИМ поседује још бројне могућности које су делимично приказане на слици 5.1.

Овај програмски пакет има једноставно графичко окружење у коме се може на нивоу шематског повезивања функционалних блокова описивати понашање система.



Слика 5.2 Основни делови програмског пакета ПСИМ

Програмски пакет ПСИМ састоји се из три целине и то су:

- Графичко окружење за развој система у шематској форми,
- Симулатор,

- Графичко окружење за приказ симулације.

Графичко окружење за развој у шематском облику садржи елементарне логичке компоненте којима се могу креирати дигитални управљачки системи и добра су основа за развој једноставнијих система управљања. За сложеније управљачке системе згодније је користити *ModCoupler-Verilog*. Највећа предност оваквог окружења је свакако веран модел мотора који може послужити за развој управљачког система и у раној фази омогућити проверу исправности концептуалног решења.

5.1 Симулациони модел мотора

За потребе симулације потребно је начинити што вернији симулациони модел мотора који ће генерисати што реалније сигнале одзива на задате управљачке сигнале. У ту сврху је неопходно познавати све физичке параметре моторе како би моделовање било што прецизније.

За сваки мотор произвођач обезбеђује одређену документацију али не постоји стандард који одређује скуп параметара који би требало да се нађу у документацији па се често дешава да су поједини параметри непознати. У тим случајевима неопходне је извршити лабораторијско одређивање параметара.

5.1.1 Мерење параметара мотора

За моделовање у ПСИМ пакету постоји минимални скуп параметара који прецизно описују понашање ЈМБЧ. То су:

- Напонска константа мотора $K_e \left(\frac{V \cdot s}{rad} \right)$
- Константа обртног момента $K_T \left(\frac{lb \cdot in}{amp} \right)$
- Отпор намотаја мотора $R_a (\Omega)$
- Индуктивност намотаја мотора $L_a (H)$
- Инерција мотора $J_m (lb \cdot in \cdot s^2)$

Следи опис техника уз помоћ којих се могу одредити параметри из овог скупа.

5.1.1.1 Напонска константа мотора

За мерење ове величине потребно је обезбедити механичко окретање мотора одређеном брзином, при чему је на осцилоскопу потребно мерити вршне вредности напона између две фазе. Тада се напонска константа мотора одређује дељењем измереног напона (од врха до врха) брзином:

$$K_e = \frac{U[V]}{\text{брзина}[\text{rad/s}]} \quad 5.1$$

5.1.1.2 Константа обртног момента

Константа обртног момента рачуна се помоћу напонске константе као:

$$K_T \left[\frac{\text{lb} \cdot \text{in}}{\text{A}} \right] = \frac{K_e}{0.00684} \left[\frac{V_{l-l}}{\text{rpm}} \right] \quad 5.2$$

или ако се јединица обртаја у минути (оум) претвори у радијане у секундама ($\frac{\text{rad}}{\text{s}}$):

$$K_T \left[\frac{\text{lb} \cdot \text{in}}{\text{A}} \right] = 15.3 \cdot K_e \left[\frac{V_{l-l}}{\frac{\text{rad}}{\text{s}}} \right] \quad 5.3$$

Уместо сложеног извођења овде су наведене само крајње једначине.

5.1.1.3 Отпор намотаја

Произвођачи најчешће наводе отпор и индуктивност намотаја као параметре мотора, а у случају да нису наведени потребно је измерити их. Отпор намотаја мери се на приступима два намотаја. Уколико су намотаји ротора везани у звезду, добијена вредност дели се са два и тако добијена вредност представља отпор намотаја једне фазе.

5.1.1.4 Индуктивност намотаја

Индуктивност намотаја може се одредити уз помоћ импедансе ако се познаје отпорност намотаја. У ту сврху је потребно оптеретити два намотаја мотора наизменичним напоном и мерити напон и струју. Треба водити рачуна о чињеници да су ЈМБЧ најчешће везани у звезду па мерене вредности представљају вредност за два намотаја.

$$\text{импеданса}[\Omega] = \frac{\text{напон}[V]}{\text{струја}[A]} \quad 5.4$$

$$\text{импеданса}[\Omega] = \sqrt{\text{реактанса}^2 + \text{резистанса}^2} \quad 5.5$$

$$\text{индуктивност}[H] = \frac{\text{реактанса}[var]}{2 \cdot \pi \cdot f[Hz]} \quad 5.6$$

5.1.1.5 Инерција мотора

Инерција ротора може се мерити експериментом. Инерција се рачуна из једначине:

$$\text{инерција} = \frac{\text{обртни момент}}{\text{убрзање}} \quad 5.7$$

Произвођачи најчешће обезбеђују овај параметар али ако није доступан потребно је измерити обртни момент и убрзање, што често није једноставно. Један пример како је то могуће извести је уз помоћ амперметра који је серијски повезан на намотај мотора. Мерену максималну вредност струје треба конвертовати у момент на основу познате релације:

$$T = i \cdot K_T \quad 5.8$$

Мерење убрзања је компликованије. Потребно је користити тахометар да би се мерила брзина. Тахометар се везује на осовину мотора. У случају да се на намотаје мотора доводи струја која расте у дискретним корацима, мотор ће убрзавати експоненцијално. Убрзање је мера односа промене брзине у одређеном временском периоду.

Мерењем времена за које се брзина мотора стабилизује и при томе мерењем брзине у два дискретна временска тренутка у којима је она константа можемо доћи до потребних вредности.

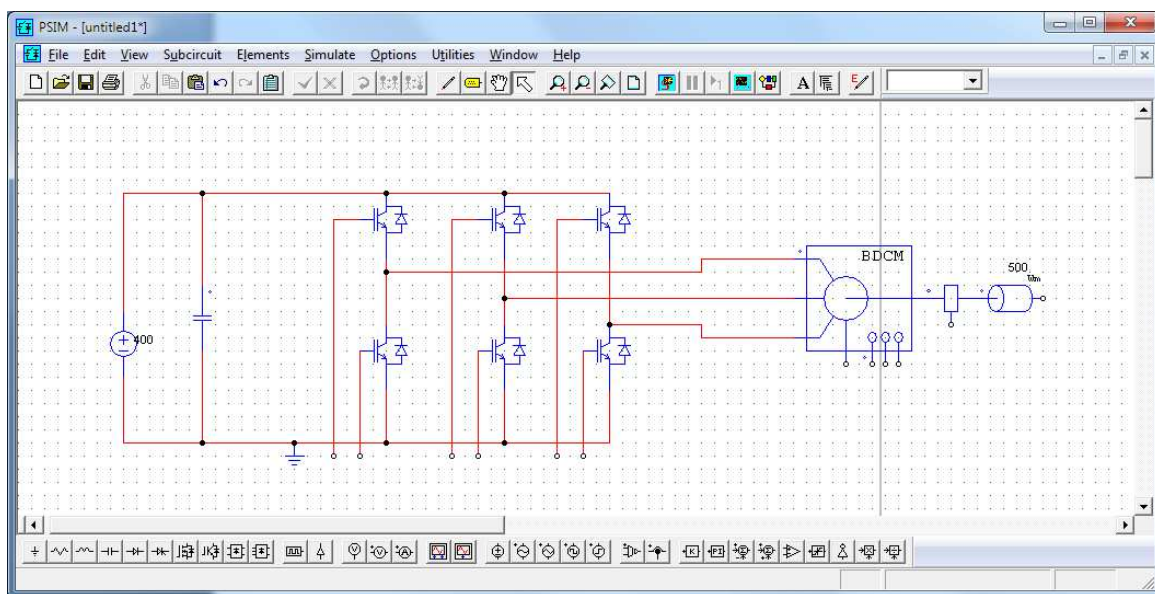
5.2 Симулациони модел кола енергетске електронике

За креирање модела енергетске електронике постоји велика библиотека компоненти креираних управо за намене развоја система за управљање моторима. У случају управљања ЛМБЧ најважније је имати модел прекидача који описује

понашање реалних компоненти. ПСИМ то обезбеђује уз веома згодно графичко окружење које даје велику слободу у раду.

На слици 5.3 приказан је пример моделовања претварачког кола са потпуном функционалношћу и моделовањем кашњења одзива. На слици се виде ИГБТ прекидачи чије базе је потребно контролисати у циљу преношења ИШМ сигнала из управљачког кола на мотор.

Такође се види и мотор на чије је улазе повезано претварачко коло. Са друге стране, на мотор је повезано оптерећење и уређај за мерење напона који је пропорционалан обртном моменту.



Слика 5.3 Модел претварачке плоче у ПСИМ пакету

Свака од компоненти са слике 5.3 има своје параметре које корисник може уносити. На слици 5.4 приказан је дијалог за уношење параметара мотора. Слично је и са осталим компонентама које су доступне у овом програмском пакету, за сваку од њих је могуће дефинисати поједине параметре који боље описују њено понашање.

Brushless DC Machine

Parameters | Other Info | Color

Brushless dc machine (trapezoidal) Help

		Display
Name	BDCM1	☐
R (stator resistance)	11.9	☐
L (stator self ind.)	0.00207	☐
M (stator mutual ind.)	-0.00069	☐
Vpk / krpm	32.3	☐
Vrms / krpm	22.9	☐
No. of Poles P	4	☐
Moment of Inertia	7E-006	☐
Mech. Time Constant	0.006	☐
theta_0 (deg.)	0	☐
theta_advance (deg.)	0	☐
Conduction Pulse Width	120	☐

Torque Flag	1	☐
Master/Slave Flag	1	☐

Слика 5.4 Параметри модела мотора

6. Опис реализације физичке архитектуре

У тексту који следи биће приказана 2 прототипа управљачког система ЈМБЧ. Осим основног циља, да послуже за развој управљачких система, ови прототипи послужиће и као корак напред ка имплементацији наменског интегрисаног кола, тј. испитаће потенцијал за ову могућност. Међутим, иако до сада у пракси програмабилне компоненте нису често коришћене у крајњим производима, развој ове технологије и све нижа цена, довео је до тога да и та могућност постане актуелна. Све је више уређаја који користе програмабилне компоненте уместо интегрисаних кола, самим тим можемо и ова решења посматрати као потенцијално комерцијална.

У оквиру ове тезе реализовано је неколико прототипа контроле мотора, које можемо на основу топологије претварачког кола поделити у две групе:

- Управљање мотором уз помоћ топологије са 6 прекидача,
- Управљање мотором уз помоћ топологије са 4 прекидача и 2 кондензатора, који представљају замену за прекидаче једног полумоста.

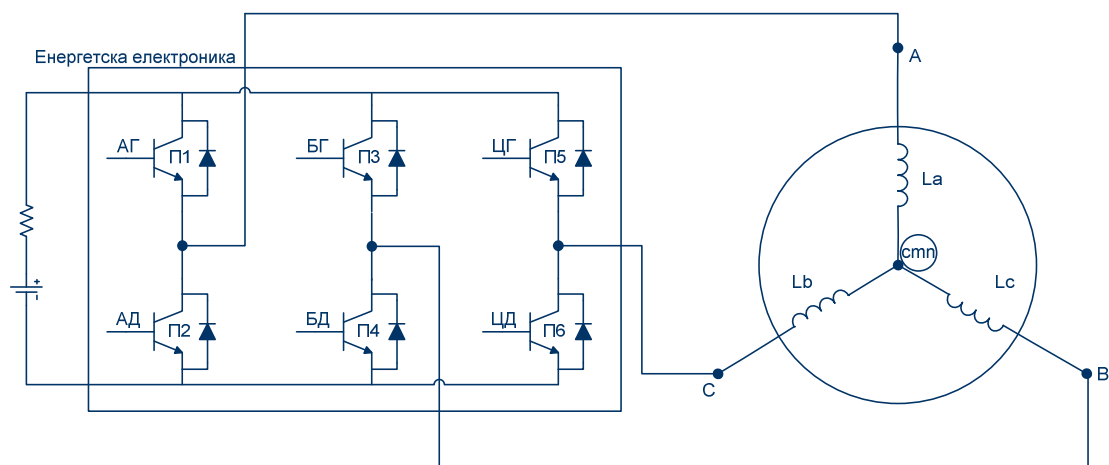
За сваку од две топологије реализоване су развојне претварачке плоче које су омогућиле, осим њихове основне функције, везу између развојног прототипа и мотора.

За реализацију прототипа коришћена је још једна развојна плоча која садржи програмабилну компоненту на себи – прототипска плоча.

У наставку следи опис поменутих плоча и опис прототипа који су на њима реализовани.

6.1 Претварачка плоча са 6 прекидача

Претварачка плоча на себи носи прекидачке компоненте, МОСФЕТ транзисторе, намењене високим напонима, са пратећом аналогном електроником. Она треба да обезбеди управљачке ИШМ сигнале на напонским нивоима од 20-50V у зависности од врсте мотора, и то на основу сигнала који долазе са прототипске плоче, а који су генерисани на напонским нивоима реда неколико волти. Намотаји мотора директно се повезују на секције претварачког кола, тј. на спојеве једног полумоста који чине два транзистора. Поједностављена слика претварачког кола и начин повезивања мотора, приказани су на слици 6.1. Транзисторима се управља уз помоћ 6 управљачких сигнала који долазе са прототипске плоче (АГ, АД, БГ, БД, ЦГ, ЦД).

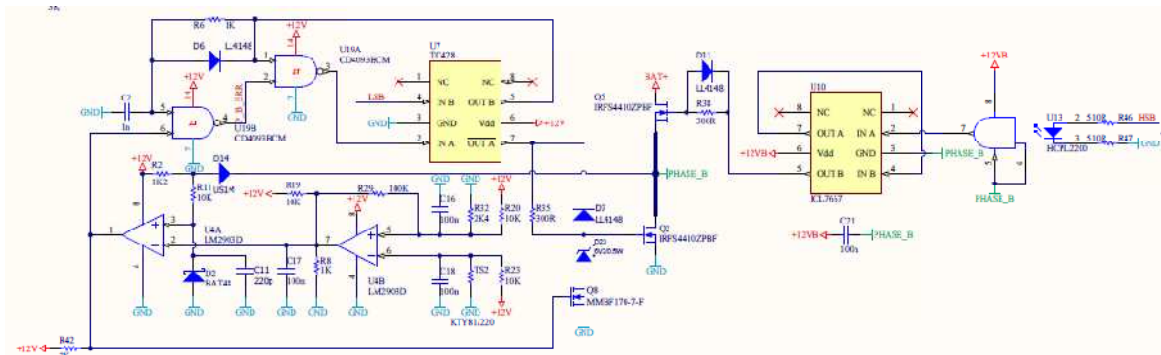


Слика 6.1 Претварачко коло са 6 прекидача

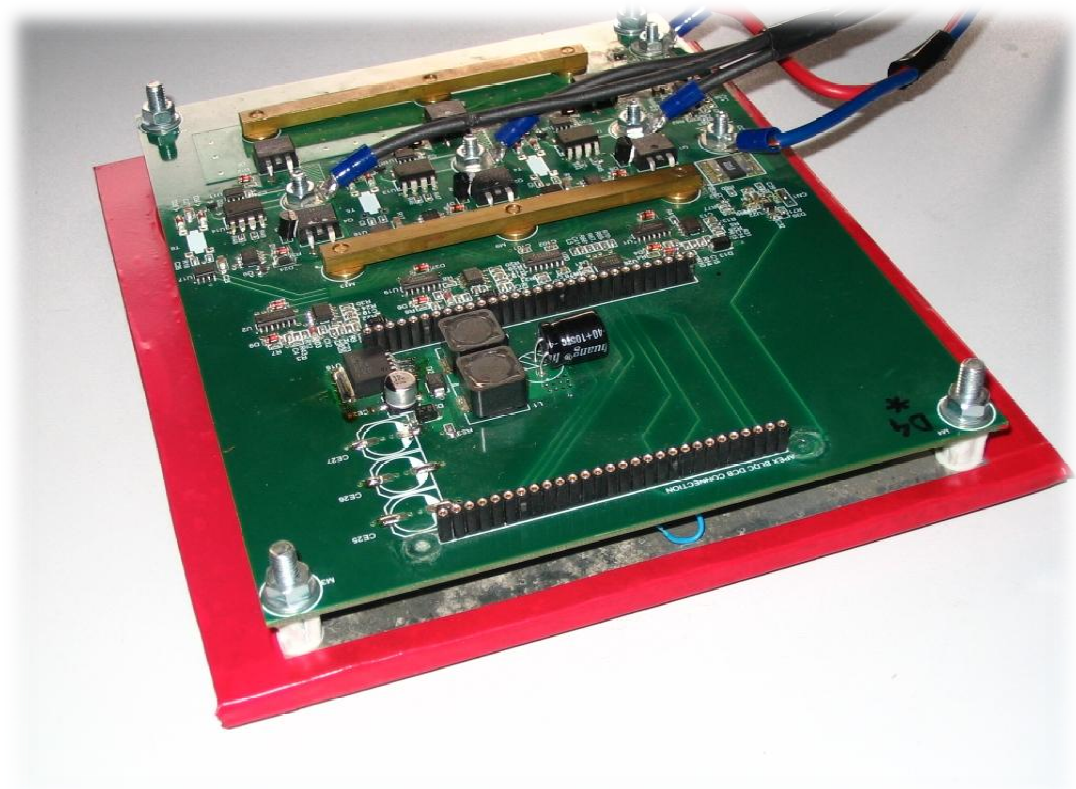
Осим прекидачке, плоча обавља и функцију сигурносног кола. Пошто постоји велики ризик да у случају неправилног управљања претварачком плочом дође до укључивања оба транзистора једног полумоста, а при чему долази до кратког споја, сваки полумост претварачке плоче је осигуран колом за заштиту које треба да спречи ову ситуацију.

У основи решење је коло за кашњење које неће дозволити укључење горњег транзистора једног полумоста док год је укључен доњи транзистор и још одређени временски период након његовог искључења (исто важи и за пример укључења доњег прекидача док ради горњи). Поред овог кола постоји и заштитно коло од прекомерне струје у свакој од грана претварача.

У грани напајања постоји шант отпорник који служи за мерење струје у грани напајања, која се често користи и за контролу мотора.



Слика 6.2 Шема кола за напајање једне од фаза мотора



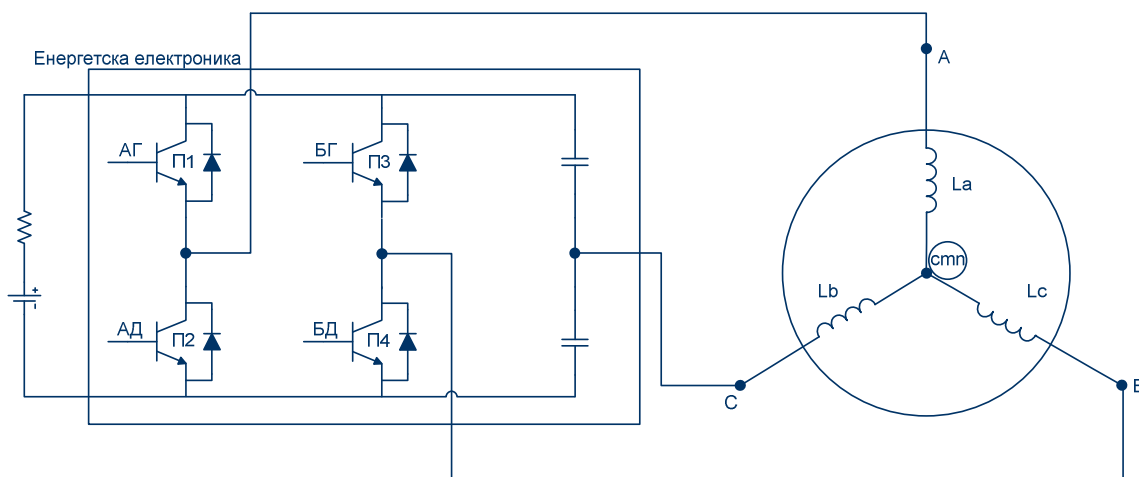
Слика 6.3 Претварачка плоча са 6 прекидача

Решење са 6 прекидача представља најчешће коришћену топологију у пракси и представља почетну тачку у анализи и развоју система заснованог на топологији са 4 прекидача.

Овакав тип претварачке плоче често се у литератури назива и конвенционална претварачка плоча [40][44][45][46][47][48][49], јер се у пракси најчешће користи.

6.2 Претварачка плоча са 4 прекидача

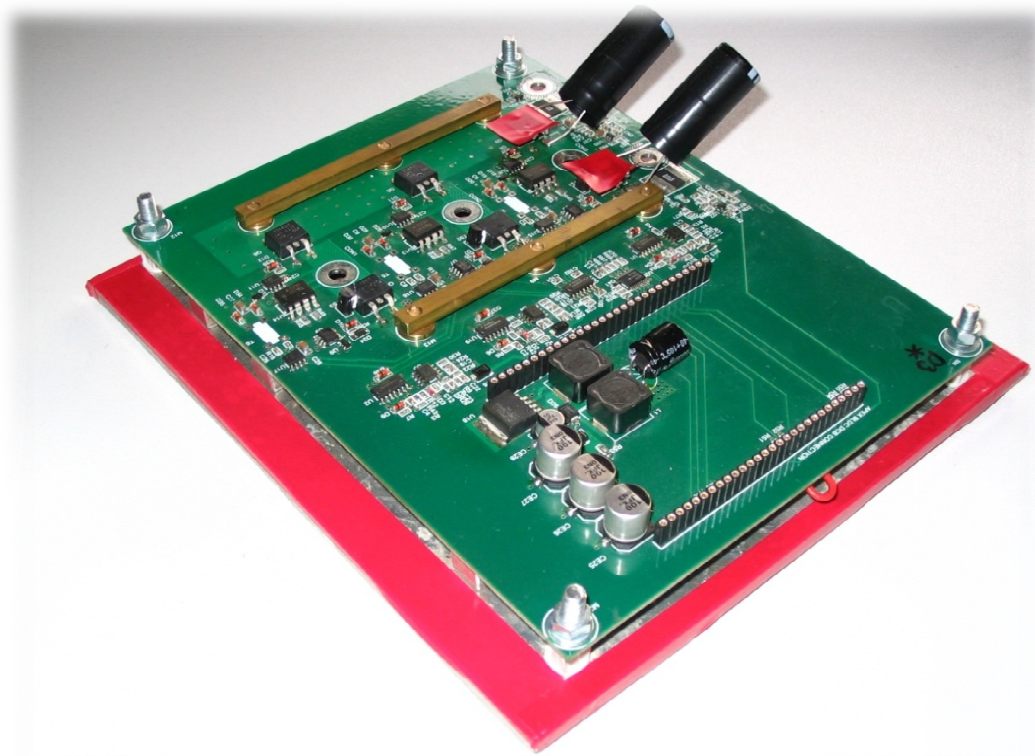
Ова плоча је врло слична претходној и разлику представља то што је један транзисторски пар, тј. један полу мост, замењен кондензаторима. Овим се број управљачких сигнала смањује што доводи до промена и у управљачком делу о чему ће бити више детаља у наредним поглављима.



Слика 6.4 Трофазни претварач са 4 прекидача

Разлике су минималне те се постојеће конвенционалне плоче могу лако конструкцијски адаптирати за овакву топологију.

Због ове чињенице се врло често спомиње идеја да оваква топологија једну од примена може наћи у системима код којих је битна велика поузданост, тако да при отказу једне од прекидачких секција, скуп транзистори буду замењени кондензаторима, или да се кондензатори одмах поставе у колу са додатном логиком која аутоматски замењује прекидачку секцију кондензаторском. Овакве замене су ограничене на највише једну секцију.



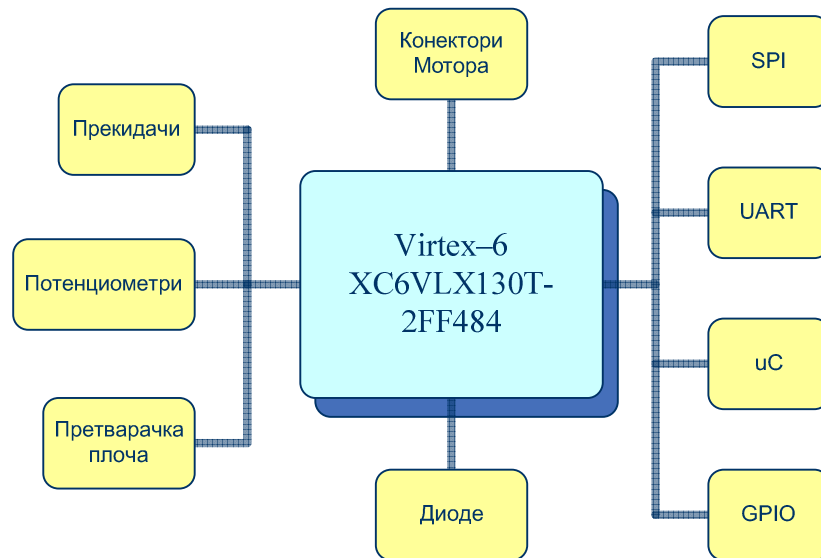
Слика 6.5 Претварачка плоча са 4 прекидача

6.3 Прототипска плоча

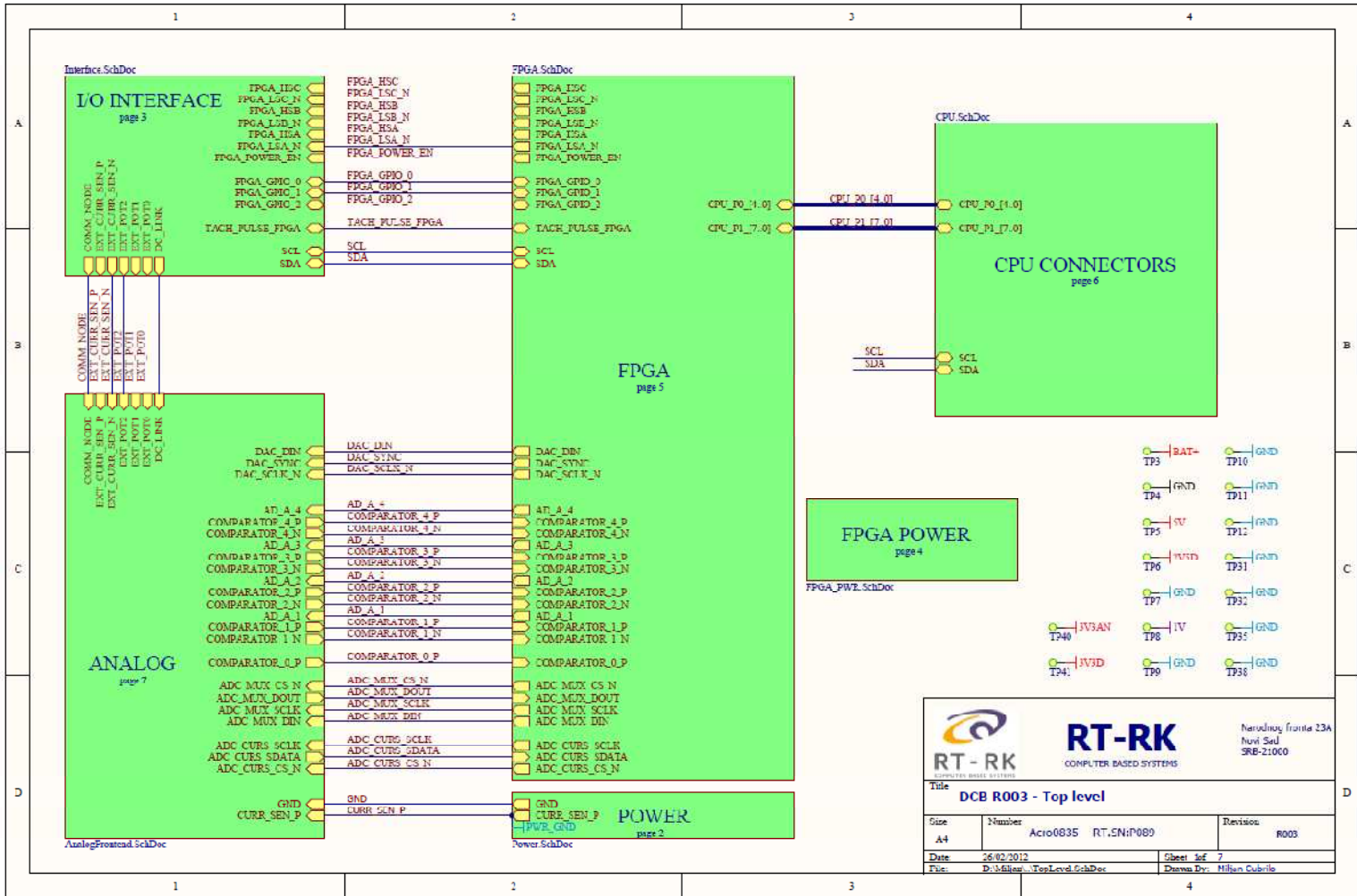
Ова плоча развијена је наменски за развој управљачког дела система ЈМБЧ. Плоча садржи следеће целине:

- Локално програмабилну секвенцијалну компоненту – ФПГА (FPGA *Field-programmable gate array*), и то Xilinx Vitrex6, модел XC6VLX130T-2FF484, са припадајућим спрежним колом за програмирање уз меморијски модул за аутономно програмирање ФПГА.
- Улазно излазне системе:
 - спрежно коло за везу са рачунаром путем серијске комуникације по RS-232 протоколу,
 - спрежно коло за везу са микроконтролером путем серијске комуникације типа SPI (*Serial Peripheral Interface*),
 - наменско спрежно коло за везу са претварачком плочом,

- наменско спрежно коло за везу са мотором,
 - улазно излазна секција општег типа (*GPIO*) ширине 48 бита,
 - прекидаче, тастере, диоде, реостате за генерисање улазних сигнала.
- Коло за регулацију напајања.



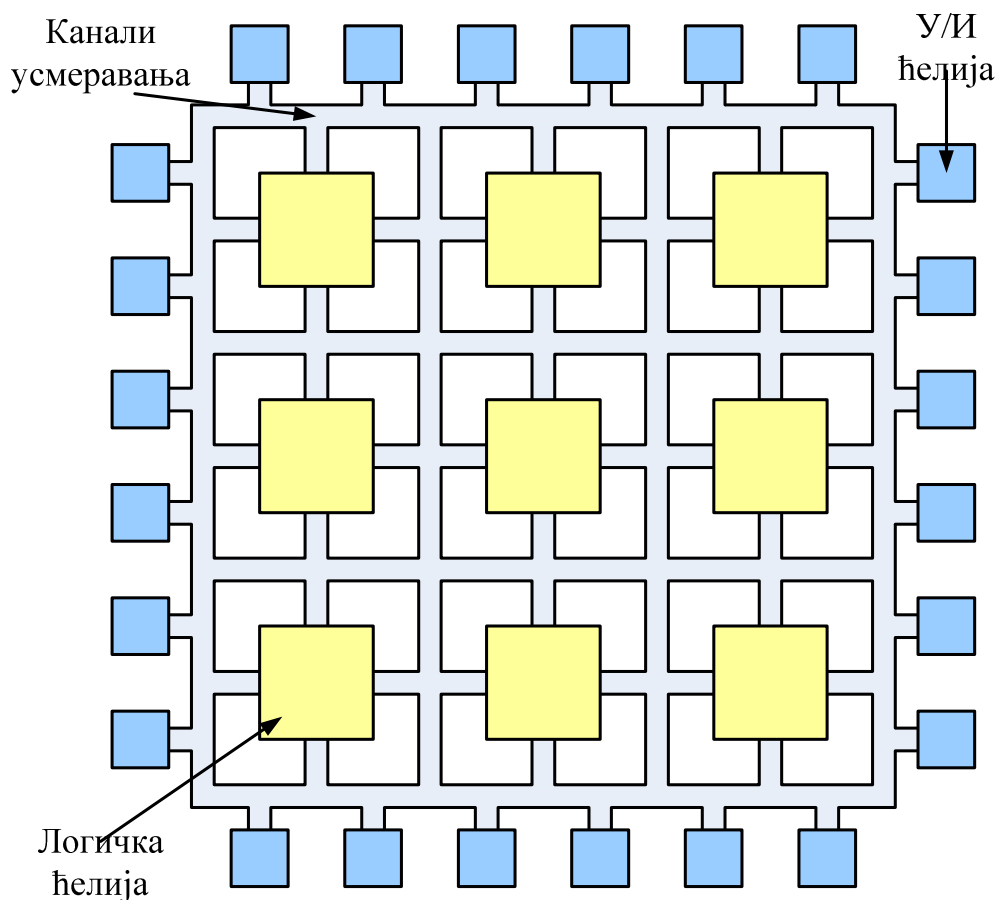
Слика 6.6 Детаљна структура развојне прототипске плоче



Слика 6.7 Структура развојне прототипске плоче

6.3.1 Локално програмабилне секвенцијалне мреже – ФПГА

Програмабилне секвенцијалне мреже су се дуго година у применама у рачунарској техници користиле као спрежна кола, кола за контролу периферних јединица, транслацију сигнала са једног типа магистрале на други или за обједињење контролне логике за коју би иначе било потребно више интегрисаних кола. У претходних неколико година ФПГА се све чешће користе у апликацијама за дигиталну обраду сигнала или као додатна периферијска јединица за извршење комплексних рачунских операција. Ове две улоге су додељене програмабилним секвенцијалним мрежама због њихове могућности за паралелно извршење више рачунских операција, њиховог све већег капацитета и све мање потрошње енергије. Такође, њихова репрограмабилност омогућава инжењерима да по потреби лако замене функционалност имплементираног алгорита. У случају коришћења ФПГА за емулацију, основна предност је у чињеници да је извршавање у реалном времену многоструко брже од симулације.



Слика 6.8 Општа архитектура ФПГА

Локално програмабилне секвенцијалне мреже (ФПГА) су матрице логичких ћелија које комуницирају међусобно и са У/И ћелијама преко водова унутар канала усмеравања (слика 6.8). Слично као код наменских матрица логичких кола, које се састоје од матрице транзистора, ФПГА се састоји од матрице логичких ћелија (блокова). У матрицама логичких елемената усмеравање је прилагођено крајњим корисницима без програмабилних елемената. У ФПГА постоје и жични ресурси: водови који чине хоризонталне и вертикалне колоне (канални усмеравања) који повезују програмабилне елементе. Водови за усмеравање такође повезују логику са У/И изводима. Логичке ћелије и архитектуре усмеравања се разликују од произвођача до произвођача. У општем случају логичке ћелије реализују мање функције него комбинациони производи и макроћелије ЦПЛД-ова (*complex programmable logic device*), а веће функције се реализују каскадирањем логичких ћелија.

На слици 6.6 приказана је структура прототипске плоче. Ова развојна плоча је заснована на ФПГА јединици Виртекс 6. Овај модул изабран је због карактеристике да поседује велики број логичких ћелија које су намењене за дигиталну обраду сигнала (ДОС), као и због великог капацитета, што омогућује велику слободу у развоју, на пример, због чињенице да се за потребе примене унутрашњег логичког анализатора може одвојити довољно ресурса и тиме обезбедити већи број линија као и већи временски интервал у коме је могуће вршити праћење сигнала из ФПГА.

Ресурси ФПГА компоненте приказани су у табели:

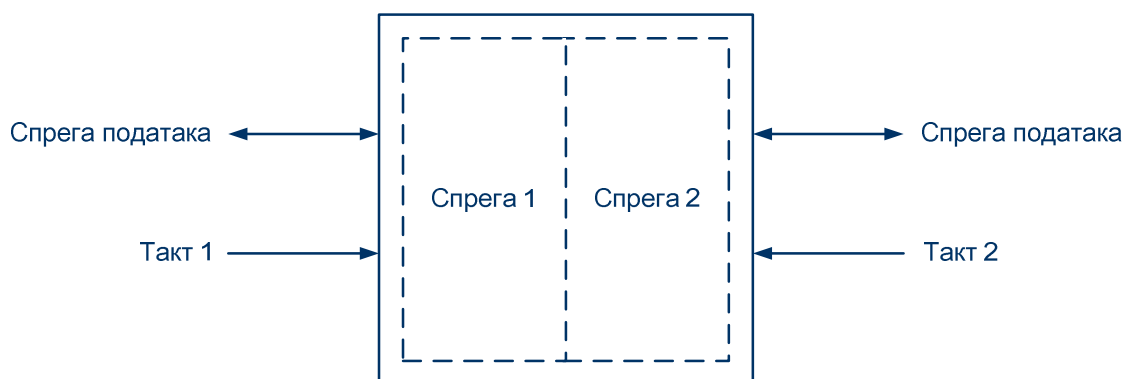
Ресурс	XC6VLX130T
Основних логичких ћелија (<i>logic cells</i>)	128000
Наменских блокова за ДОС	480
Укупан капацитет наменских меморијских блокова (<i>BRAM</i>)	9504 килобајта
Наменских етернет контролера (<i>Ethernet MAC</i>)	4
Наменских <i>PCI Express</i> спрежних блокова	2
Максималан број корисничких улаза-излаза	600

Табела 6.1 Распоживи ресурси у изабраном ФПГА колу

Такође, на примеру конкретне примене за управљање моторима, често је потребно вршити адаптације одређених параметара за сваки тип мотора који се користи у систему, а и у оквиру дигиталне контроле може се користити и спрега са другим интегрисаним колима, па је и због ових чињеница згодно користити компоненту са више расположивих ресурса. Са аспекта расположивих ресурса у овој компоненти, могуће је имплементирати управљачки алгоритам велике комплексности коришћењем ове програмабилне компоненте.

6.3.1.1 Домени такта

Домен такта је логичка област у којој на све синхроне елементе (флип-флопове, синхроне РАМ блокове, линијске множаче, итд) сигнал такта шаље иста мрежа. Ако на све флип-флопове сигнал такта шаље глобална мрежа, рецимо главни улазни сигнал такта у програмабилну секвенцијалну мрежу, тада постоји само један домен такта. Ако постоје два улаза сигнала такта у дигитални систем, рецимо један за спрегу 1 и један за спрегу 2 као што је приказано на слици 6.9, тада говоримо о два домена такта.



Слика 6.9 Двојни домени такта

Осим што могу постојати посебни извори такта, сваки сигнал такта који је изведен из основног, проласком кроз логичко коло или секвенцијалну мрежу, има другачију фазу у односу на почетни сигнал и сматра се за нови сигнал такта због различитог временског кашњења проузрокованог физичким процесима у самим логичким колима или флип-флоповима.

Због свега поменутог, посебна пажња у дизајну мора се посветити променама домена такта, тј. преласцима сигнала из једног домена у други и њихова синхронизација у новом окружењу. Веома је важно напоменути да се проблеми

синхронизације не могу уочити у симулационим окружењима, већ је неопходно разумети како треба пројектовати поуздан дигитални систем и избећи потребу за откривањем проблема у синхронизацији. Постоје различита решења и нека од њих овде спомињемо:

- Фазна контрола, код које је решење унутар ФПГА коришћењем интерног ПЛЛ-а или ДЛЛ-а, при чему један такт мора бити производ другог и тада се користи уклапање фаза ради отклањања фазног помераја.
- Двоструко окидање, техника која се може користити када сигнали ширине једног бита пролазе између два асинхрона домена такта. Решење се своди на провођење сигнала кроз два флип-флопа који су постављени један за другим, чиме се минимизује вероватноћа појављивања метастабилности.
- ФИФО структуре, служе за синхронизацију сигнала вишебитне ширине тако што се подаци уписују са једног домена такта, а читају из другог, при чему је осигурано да се читање обавља једино када је ФИФО пун или попуњен изнад неке границе, чиме се обезбеђује стабилност података који су на реду за читање.

6.3.2 Улазно излазне спреге

Основну спрегу са мотором чине линије за повезивање намотаја мотора и претварачког кола. Ове линије пролазе кроз струјне сензоре да би се обезбедило праћење нивоа струје у сва три намотаја. Уз помоћ АД конвертора се аналогни напонски сигнали, који су пропорционални нивоу струје у намотајима, доводе на улаз дигиталног управљачког система.

Веза са рачунаром је остварена уз помоћ серијске спреге.

Поред везе са рачунаром омогућене су и везе ка језгру микроконтролера 8051 које су остварене уз помоћ наменски развијене паралелне спреге и виртуелног регистра, који се налази у адресном простору 8051 архитектуре намењеном регистрима специјалне намене.

Могуће је повезати се и на микроконтролере који су реализовани као наменски пројектована интегрисана кола и то уз помоћ серијске везе SPI.

Једна од важнијих спрега у овом систему је спрега са претварачком плочом. Наменско спрежно коло са претварачком плочом представља једносмерну спрегу. Дигитални управљачки сигнали који се генеришу на прототипској плочи повезани су на претварачку плочу преко оптичких компоненти чиме је обављено и галванско раздвајање.

На располагању су још и три потенциометра којима се може вршити задавање појединих улазних променљивих, на пример згодни су за задавање тренутне брзине окретања мотора.

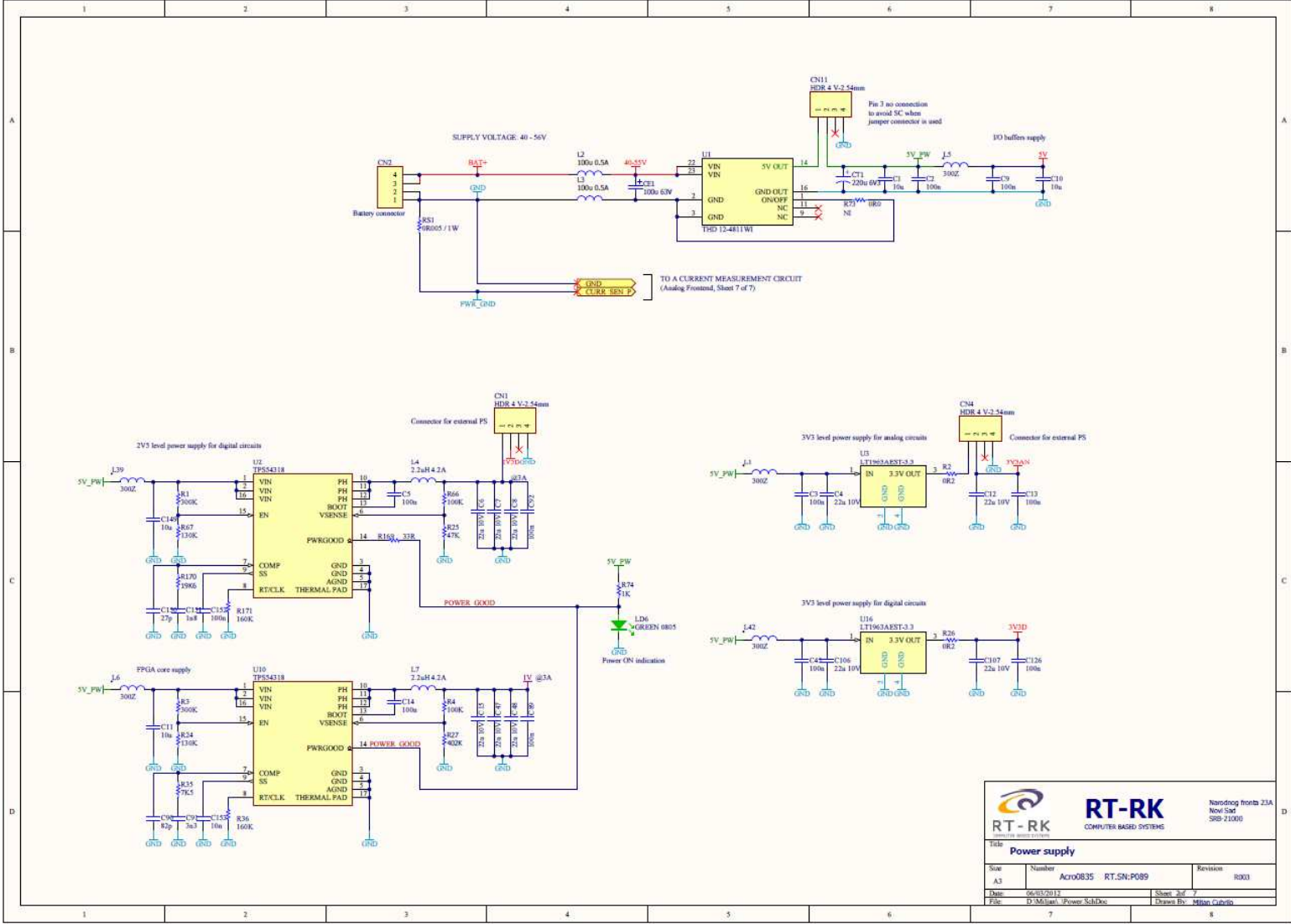
Прекидачи и диоде су неопходни на свакој развојној платформи па тако постоје и на овој. Често се користе за једноставније улазне и излазне сигнале.

6.3.3 Коло за регулацију напајања

Коло за регулацију напајања је имплементирано јер постоји неколико напонских нивоа неопходних за правилно функционисање система. То су:

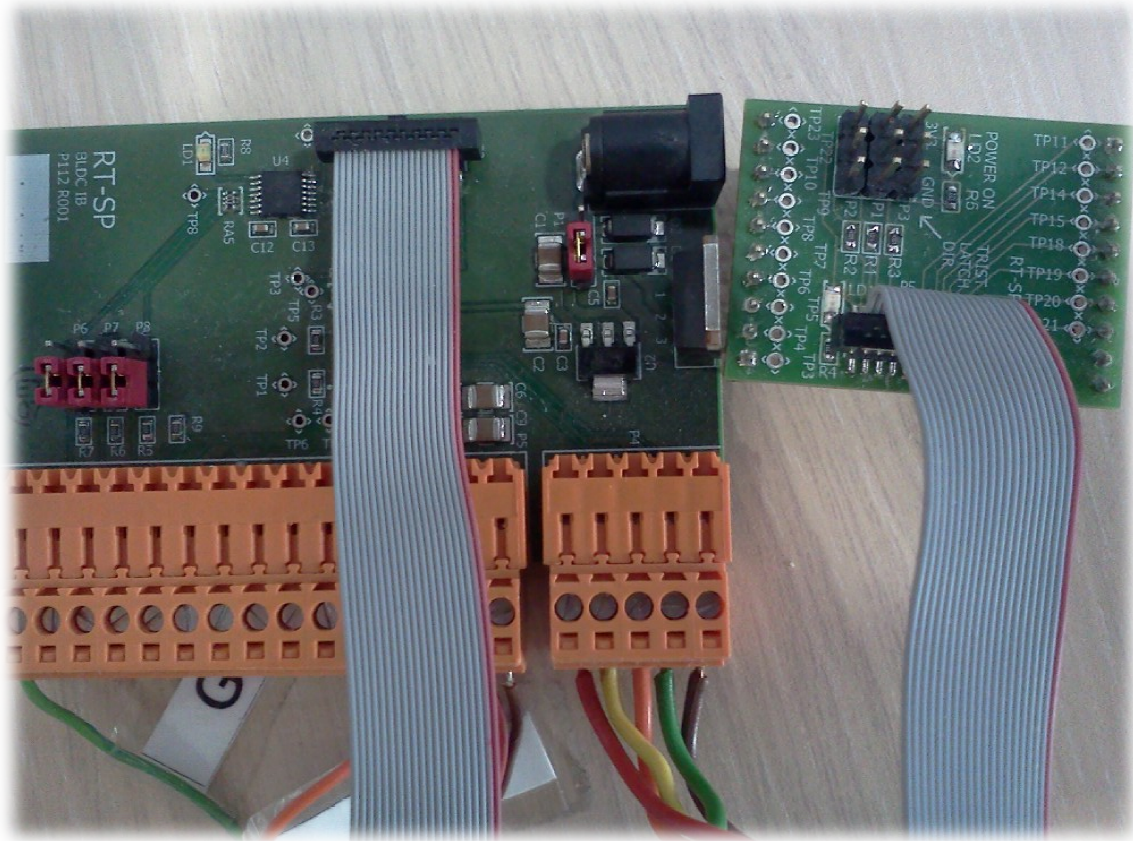
- 24V, изабрани мотор има ову називну вредност напона. Платформа је и намењена моторима чији је називни напон од 20-50V,
- 5V, поједине интегрисане компоненте неопходне на прототипској плочи захтевају напајање овим напонским нивоом. Међу њима су прилагодни улази за мерење струје.
- 3.3V, Д/А конвертори, потенциометри као и спреге према микроконтролеру, серијска спрега итд.
- 2.5V, напонски ниво на коме ради изабрана ФПГА компонента.

Шема кола за напајање дата је на слици 6.10.



Слика 6.10 Коло за регулацију напајања

6.4 Плата за пријем сигнала са Холових сензора



Слика 6.11 Спрежна плата за везу са Холовим сензорима мотора

Спрега са Холовим сензорима (слика 6.11), који су постављани на мотору, остварена је уз помоћ додатне плоче која обезбеђује напајање Холових сензора као и адаптацију напонског нивоа са нивоа Холових сензора (од 5V) на напонски ниво ФПГА (2.5V). На слици се виде две плоче:

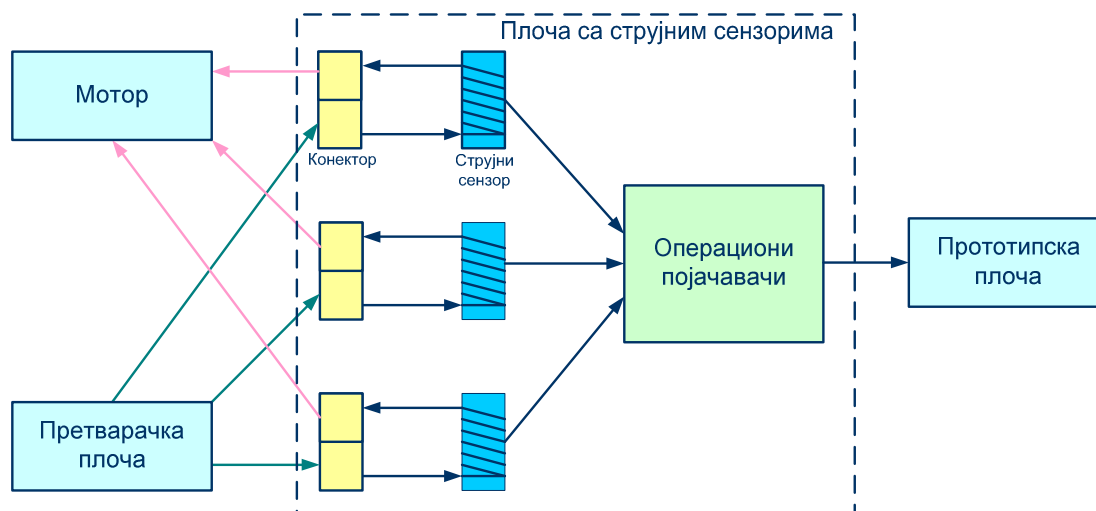
- спрежна плата за пријем сигнала са Холових сензора и сигнала са уређаја за механичко одређивање позиције ротора (на левој страни слике 6.11), при чему се ове две групе сигнала могу обе пратити у исто време,
- плата за повезивање на прототипску плочу (на десној страни слике 6.11), прилагођена за повезивање преко наменске спреге ка микроконтролеру (слика 6.6). Њена једина функција је прилагођење

сигнала и спровођење линија од плоче за праћење Холових сензора до ФПГА.

Са овим плочама је употпуњен минималан скуп компоненти неопходан за праћење свих улазних сигнала у систем, као и за генерисање управљачких сигнала.

6.5 Плата са струјним сензорима

Ова плата на себи носи три струјна сензора и операционе појачаваче који служе да прилагоде напонске нивое, аналогног сигнала који долази са струјних сензора, са опсега $(-12,12)V$ на опсег $(0,3.3)V$. Тада су сигнали струја који су из опсега $(-5, 5)A$, преведени у напонске сигнале из опсега $(0, 3.3)V$. Овакав сигнал је прилагођен улазу у АД конвертор, а потребно је још у дигиталном систему обавити калибрацију, тако да напонски нивои који су на улазу буду правилно интерпретирани. Тада свака дигитална вредност коју добијамо на излазу АД конвертора има одговарајући ниво струје.

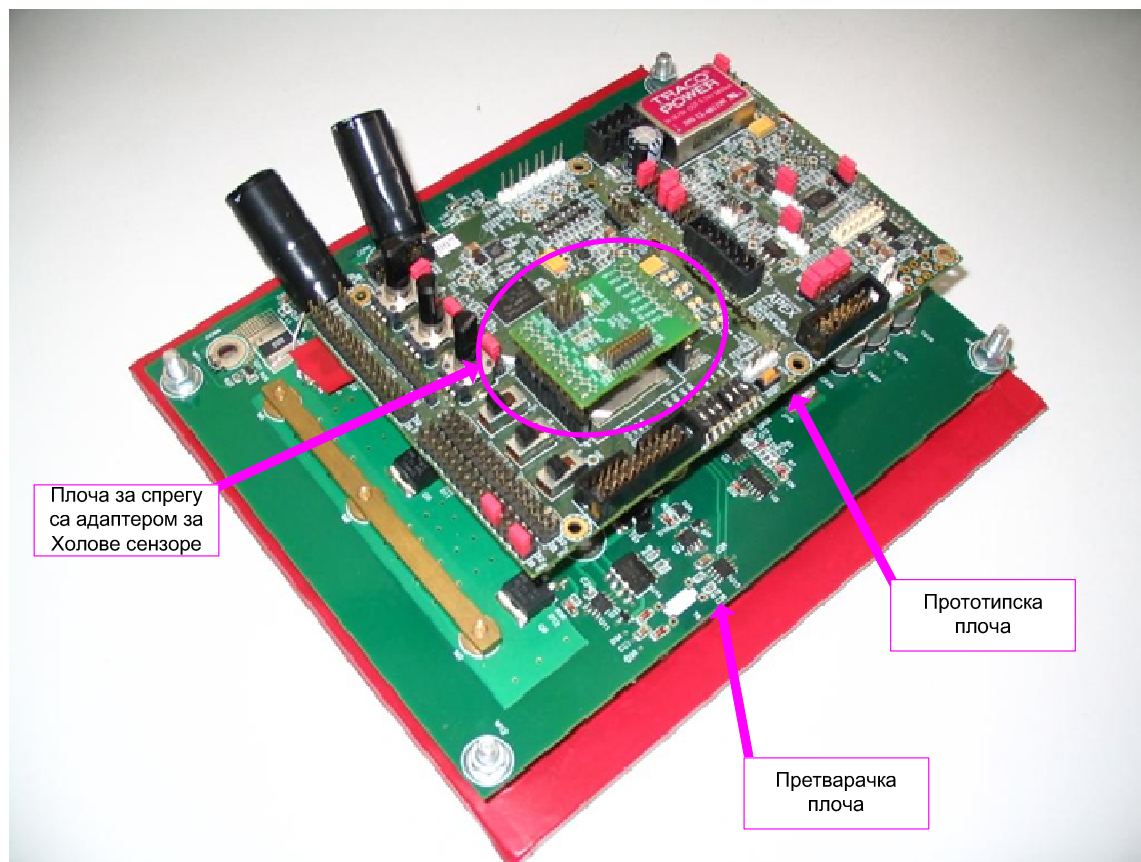


Слика 6.12 Плата са струјним сензорима

На слици 6.12 приказана је структура плоче са струјним сензорима. На њој се виде везе између ове плоче и осталих компоненти физичке архитектуре из овог решења.

6.6 Комплетна развојна платформа

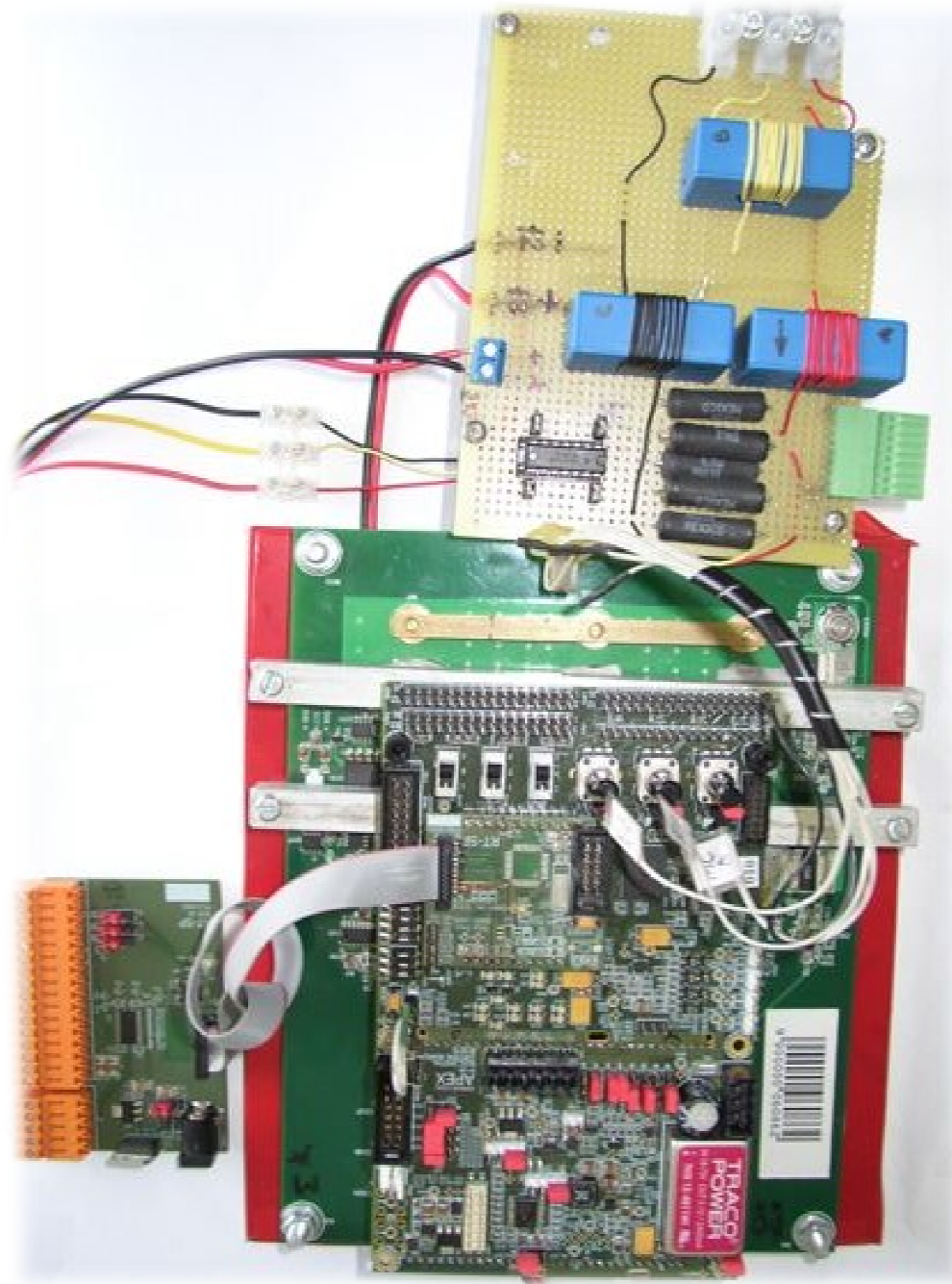
На слици 6.13 приказане су две развојне плоче, претварачка и прототипска, повезане у једну функционалну целину. Овако повезане плоче у једну целину чине платформу која је веома флексибилна, из разлога што сваки њен део има одређени степен аутономије и могућност једноставне замене новијим или у случају квара исправним компонентама, као и због чињенице да је учестаност модулације, коју може да произведе, далеко изнад могућности прекидача доступних на тржишту што јој даје потенцијал да може да служи сврси у дужем временском периоду.



Слика 6.13 Развојна платформа - повезане прототипска и претварачка плоча

Цео систем напаја се коришћењем једног извора напајања, повезаног преко прототипске плоче на којој се налази коло за генерисање свих неопходних напонских нивоа за прототипску плочу. Претварачка плоча такође се напаја директно из извора, с тим што је веза ка извору остварена преко прототипске плоче.

За исправно генерисање напона на прототипској плочи неопходно је са извора напајања обезбедити минимално 20V, а тај напон се директно води на претварачку плочу и коло за регулацију напајања.



Слика 6.14 Комплетна развојна платформа

Делови платформе међусобно су повезани пин летвицама, док је веза плоче са струјним сензорима и улаза у АД конверторе остварена жицама. Веза жицама је

омогућила приступ струјним сондама осцилоскопа. Тако је омогућено и директно праћење сигнала струје у појединим намотајима.

6.7 Структура система

Структура система представљена је на слици 6.15. У систему разликујемо следеће целине:

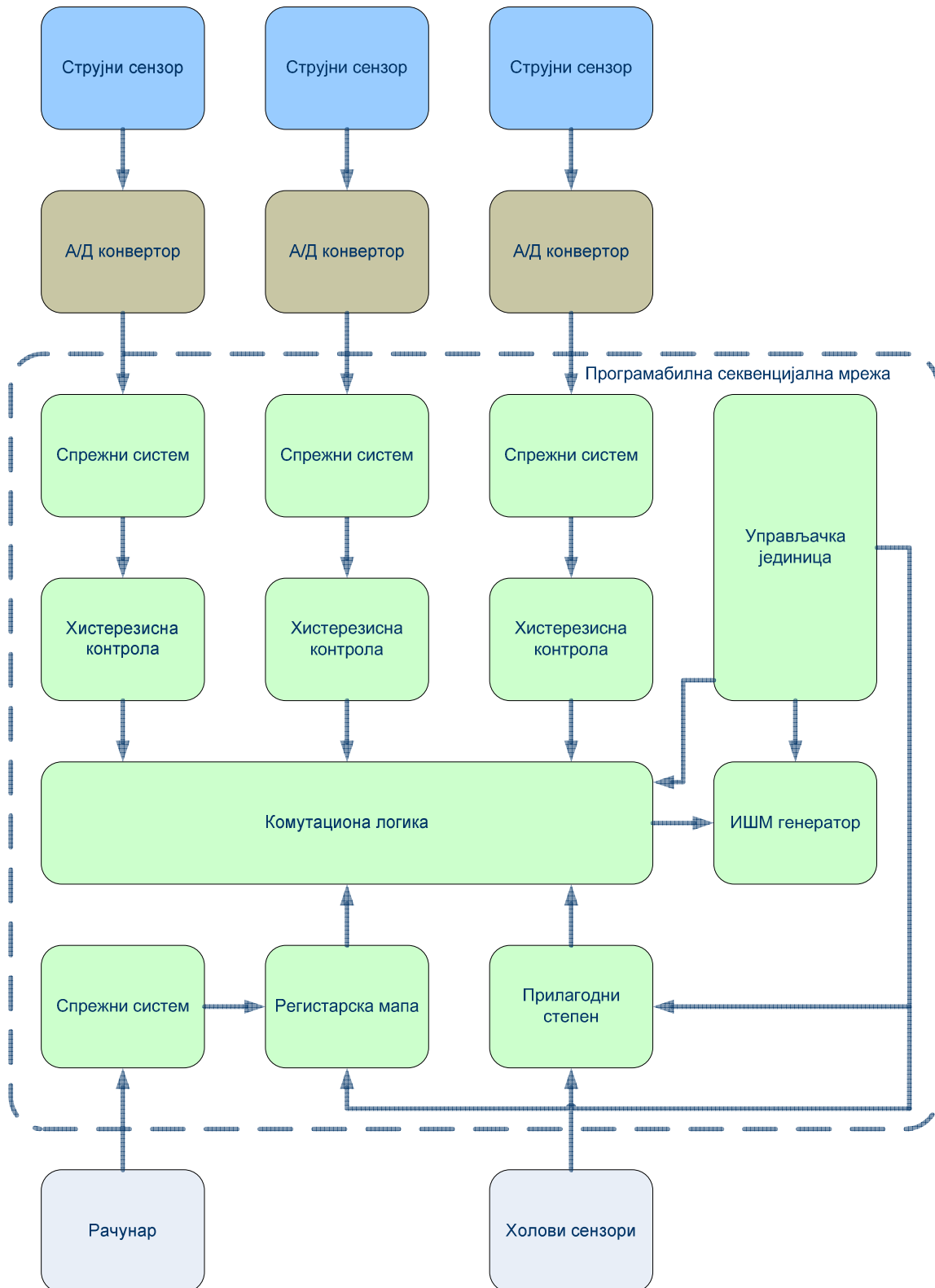
- Аналогни домен, претварачка плоча и плоча са струјним сензорима
- Дигитални домен. Прототипска плоча.

Аналогни део система је већ детаљно описан. Струјни сензори обезбеђују информацију о вредности струје у сваком од намотаја. Резултати мерења струје се преко АД конвертора доводе на улаз дигиталног система. Претварачка плоча даје ИШМ сигнал одговарајућег нивоа на основу улазних сигнала из дигиталног система.

Дигитални систем састоји се од следећих делова:

- Спрежни систем према АД конверторима,
- Блокови за појединачну хистерезисну контролу струје све три фазе,
- Комутациона логика,
- Управљачке јединице,
- ИШМ генератор,
- Регистарска мапа,
- Спрежни систем према рачунару.

Међу овим блоковима у досадашњем тексту није споменута само спрега према рачунару. Спрега према рачунару је важна у развоју, јер омогућава коришћење најпре различитих система за визуализацију вредности променљивих које су од значаја. Такође, омогућава приступ управљачким сигнаlima. Иако је циљ да се направи аутономно интегрисано коло, приступ рачунара систему омогућава и да се систем прати и њиме управља и уз помоћ рачунара, као и да се у раној фази развоја алгоритма користе језици вишег нивоа. У случајевима веома сложених алгоритама ФПГА се може овом спрегом повезати и на микроконтролер или ДСП процесор у циљу развоја алгоритма коришћењем језика вишег нивоа.



Слика 6.15 Структура физичке архитектуре

7. Референтни систем за управљање једносмерним мотором без четкица

Прегледом литературе и постојећих решења може се закључити да топологија са шест прекидача представља решење које се најчешће користи у пракси, а у складу са тим је и број решења контроле ЈМБЧ везаних за ту топологију најбројнији. Због тога свака измена топологије најпре захтева поређење резултата са резултатима које омогућује топологија са шест прекидача.

У складу са тиме, у овом раду најпре је имплементиран конвенционални претварач који има шест прекидача. Решење које даје резултате једнаке оним у литератури је узето као референтно.

У даљем току истраживања критеријум за оцену квалитета решења је облик карактеристике обртног момента за коју се очекује константна вредност.

Референтни систем, осим претварача са шест прекидача, има и три струјна сензора за појединачну контролу струје у свакој фази. За управљачку технику је одређена метода струјног хистерезиса или метода директне контроле обртног момента.

У овом поглављу представљен је референтни систем за управљање ЈМБЧ. Најпре је генерисан модел система у окружењу за симулацију енергетске електронике чиме је представљен концепт управљања уз помоћ струјног хистерезиса. Када је утврђено да систем задовољава задате критеријуме прешло се

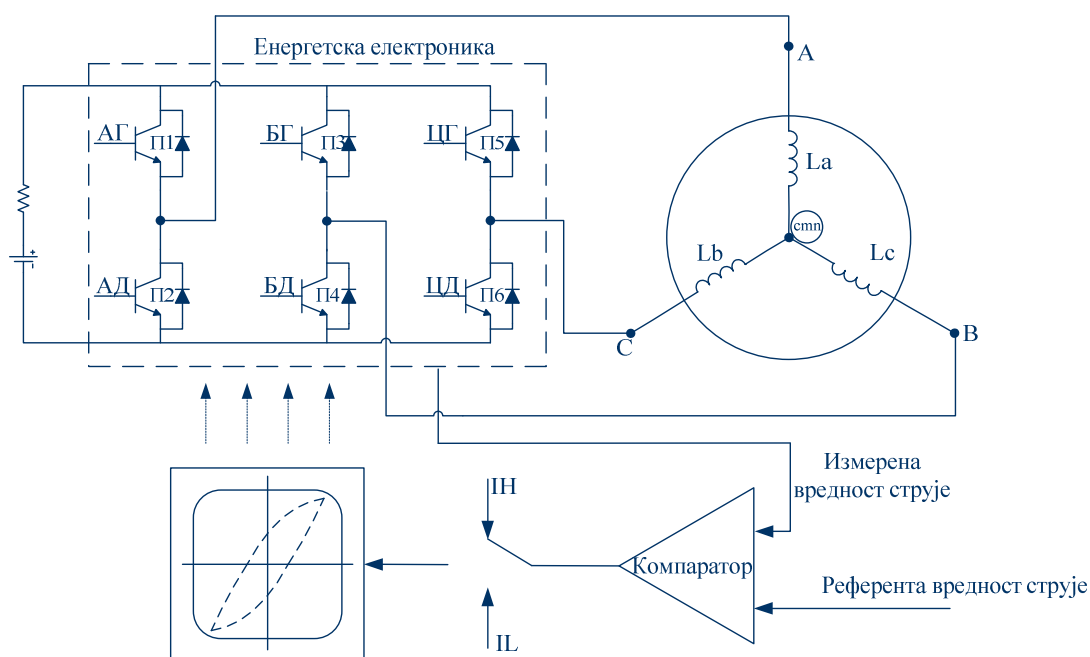
на пројектовање дигиталног система и његову симулацију. На крају је концепт проверен експериментално коришћењем конвенционалног претварачког модула и реализованог прототипа.

7.1 Концепт референтног система за контролу ЈМБЧ

Основни задатак је савладати технику управљања тако да се за променљиво оптерећење обезбеди правилан одговор система на такав начин да се вредност струје одржава константном, тј. да је карактеристика струје константна. Тада се може приступити реализацији система за контролу брзине регулацијом референтне вредности струје.

Концепт управљања струјним хистерезисом могао би се представити као на слици 7.1. Код оваквог управљања је струја напајања стално под надзором и игра много битнију улогу него код других врста управљања код којих се ова величина прати само у сврху заштите од прекомерних вредности.

Следи опис управљања уз помоћ струјног хистерезиса за једну, циљану, вредност струје. Како је већ описано у поглављу 3.4.3, основа ове методе је праћење струје и одржавање њене вредности у одређеном опсегу уз помоћ електронских прекидача. Тада се управљање ЈМБЧ своди на струјом контролисану ИШМ.



Слика 7.1 Дигитална контрола уз помоћ струјног хистерезиса

Ова врста управљања директно омогућава и контролу обртног момента, тако што користи чињеницу да је обртни момент директно пропорционалан струји у намотајима:

$$T_{em}(s) = k_t i(s) \quad 7.1$$

У прегледу литературе, у поглављу 4.1, утврђено је да је циљ постизање константне карактеристике обртног момента. Из претходне једначине јасно је зашто су аутори овај циљ остваривали тако што су тежили управљању на начин да обезбеде константну вредност струје у намотајима.

Код оваквог типа побуде једна грана претварачког моста је увек неактивна (слика 7.2), тј. оба прекидача једног полумоста су истовремено неактивна, и то периодично у трајању од 60 електричних степени. Струја у два намотаја је истог интензитета, а супротног смера, док је у трећој, неактивној фази, струја једнака нули.

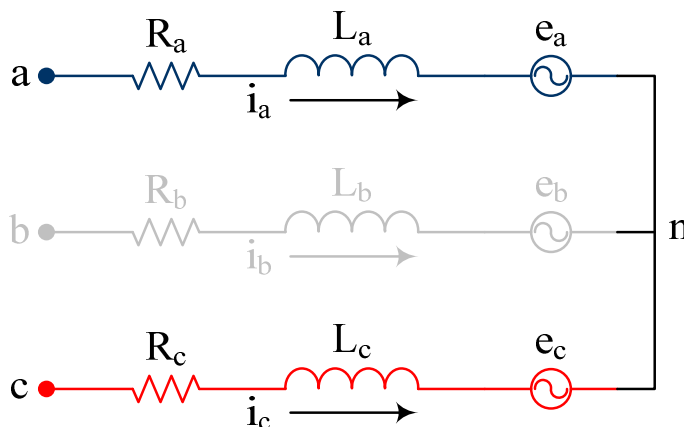
На основу I Кирхофовог закона, као и на основу раније поменутог може се написати следеће:

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad 7.2$$

а пошто је струја у једној фази увек једнака нули можемо писати и

$$i_a = -i_c, i_b = 0, \text{ (за пример када је неактивна фаза б)} \quad 7.3$$

одакле се види да се мерењем може одредити тачна вредност струје у остала два намотаја који су под напајањем. Постављањем струјних сензора у сваку грану претварачког моста вредност струје свих фаза је позната у сваком тренутку времена.

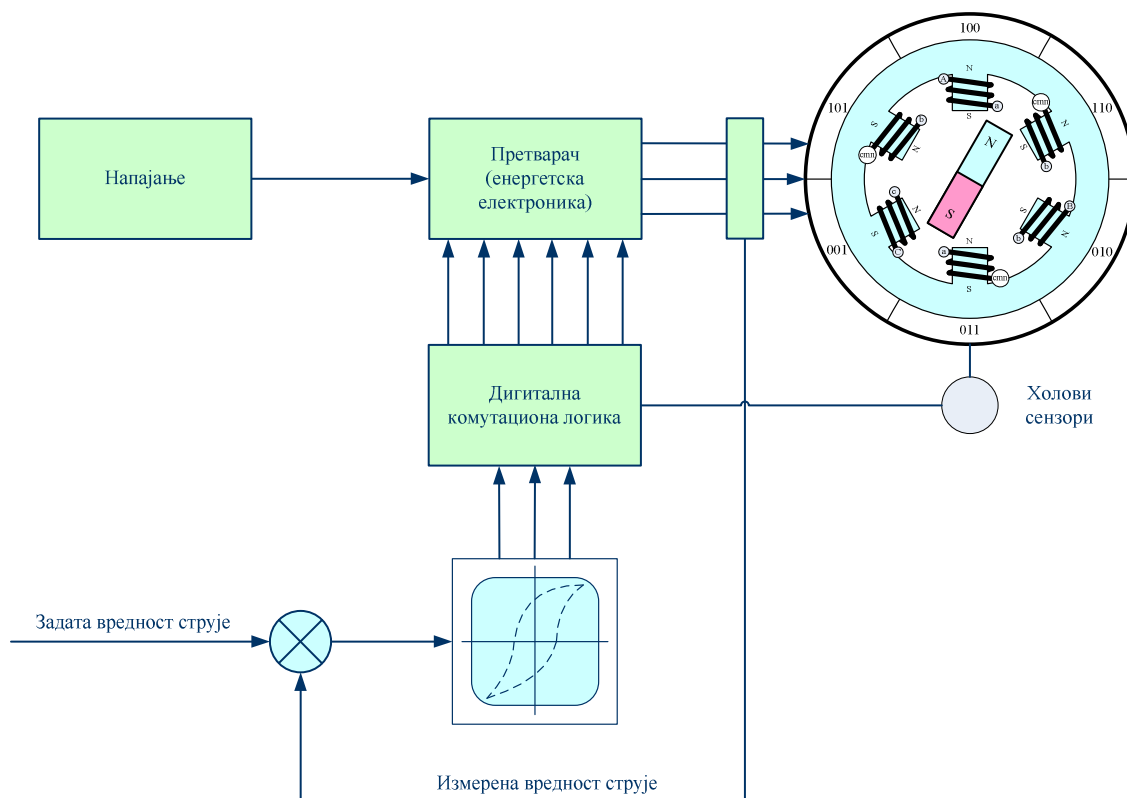


Слика 7.2 Намотаји мотора за пример када је фаза Б неактивна

Праћењем вредности струје у једном намотају и контролом која обезбеђује да та вредност не изађе из одређених граница око задате вредности, може се постићи да карактеристика струје буде константна са малим осцилацијама око задате вредности. Ова идеја се користи да карактеристике струје у све три гране буду константне, а самим тим и константан ниво обртног момента у току времена.

7.2 Симулација система за контролу ЈМБЧ са 6 прекидача и 3 струјна сензора

Структура кола за управљање ЈМБЧ методом струјног хистерезиса приказана је на слици 7.3. Појединачне вредности фазних струја контролишу се независним дигиталним хистерезисним системима који имају подесиве вредности параметара, референтну вредност струје и граничне вредности хистерезиса.



Слика 7.3 Блок дијаграм хистерезисног управљачког кола

Комутациона логика, описана у поглављу 3, комбинује се са хистерезисном контролом и тако заједно чине управљачки систем.

Референтни модел реализован је најпре у симулационом окружењу, а симулација система извршена је коришћењем програмског пакета ПСИМ.

За потребе симулације било је потребно измерити параметре мотора и начинити релевантан модел. Мерења параметара мотора обављена су на начин који је описан у поглављу 5.1.1., а резултати су приказани на сликама 7.4 и 7.5.

Brushless DC Machine

Parameters | Other Info | Color

Brushless dc machine (trapezoidal) Help

Parameter	Value	Display
Name	BLY173S	☐
R (stator resistance)	0.46	☐
L (stator self ind.)	0.00035	☐
M (stator mutual ind.)	-0.0001666	☐
Vpk / krpm	3.744273	☐
Vrms / krpm	2.6476	☐
No. of Poles P	8	☐
Moment of Inertia	63.75E-006	☐
Mech. Time Constant	2.83	☐
theta_0 (deg.)	0	☐
theta_advance (deg.)	0	☐
Conduction Pulse Width	120	☐
Torque Flag	1	☒
Master/Slave Flag	1	☐

Слика 7.4 Параметри моделованог мотора

Brushless DC Machine

Parameters | Other Info | Color

Brushless dc machine (trapezoidal) Help

Parameter	Value	Display
Name	BLY173S	☐
Voltage Rating	24	☐
Current Rating	3	☐
Power Rating	70W	
Speed Rating	4000	
Manufacturer	Anaheim	
Part No.		

Слика 7.5 Опште информације о моделованом мотору

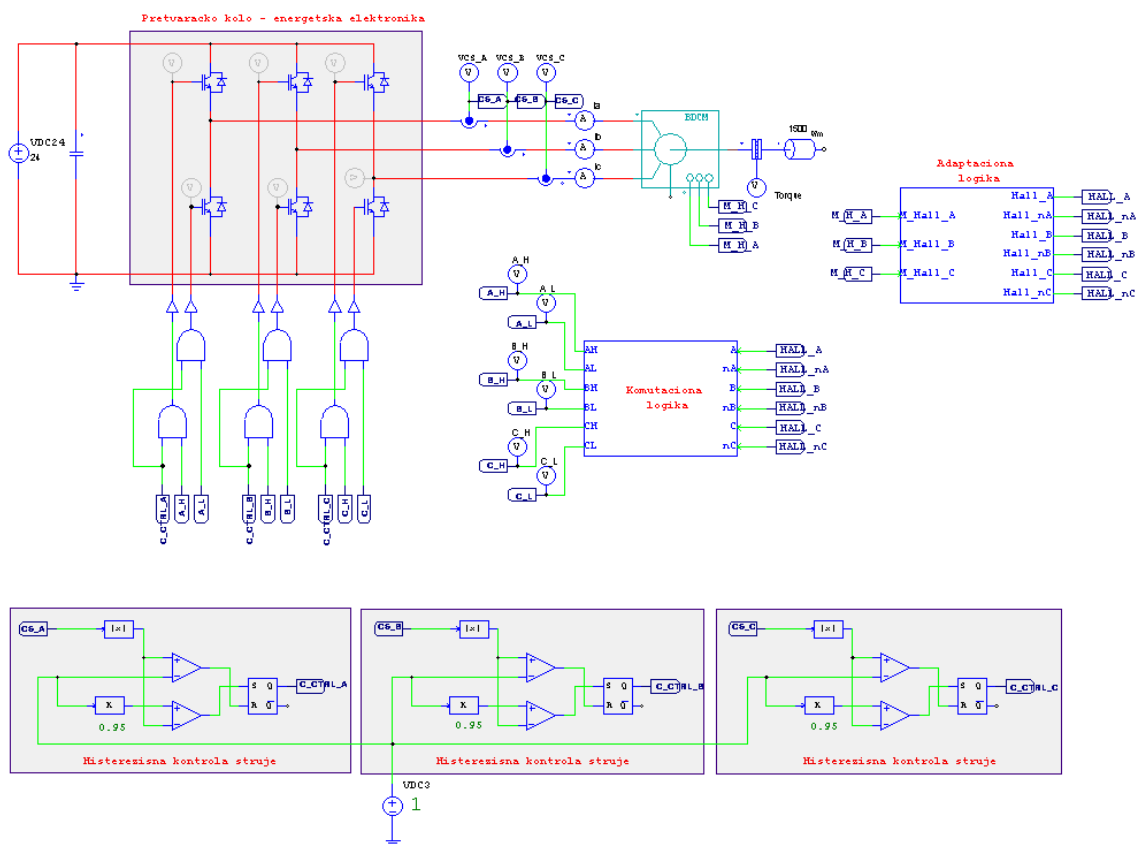
У овом примеру мотор је оптерећен механичким оптерећењем и задата је брзина од 1500 обртаја у минути.

Модел мотора из окружења симулације ПСИМ обезбеђује сигнале Холових сензора који не одговарају у потпуности облику сигнала какве најчешће срећемо у пракси, а што је још важније не одговарају сигналама са сензора које даје моделовани мотор. Због тога је изведена логичка адаптација излазних сигнала Холових сензора. Овај логички склоп се види на слици 7.6 на којој је обележен као адаптациона логика и имплементиран је на посебној шеми у ПСИМ-у. Овај блок није имплементиран у физичкој архитектури већ само омогућава да улазни сигнали у управљачки модул имају исти облик као што је случај у реалном систему.

Моделовање претварачког кола је извршено коришћењем ИГБТ прекидача, чије се понашање у симулацијама показало у досадашњој пракси као довољно веран модел прекидачких компоненти које су планиране за имплементацију у физичкој архитектури.

Моделовање дигиталне логике за интерпретацију улазних сигнала са Холових сензора и генерисање комутационих сигнала изведено је уз помоћ елементарних логичких кола која су на располагању у ПСИМ програмском пакету. Тај логички склоп је на слици 7.6 обележен као комутациона логика и такође је имплементиран на одвојеној шеми у ПСИМ-у.

У доњем делу слике 7.6 виде се три модула који представљају хистерезисну контролу за сваку од фаза. Струјни сензори генеришу аналогне напонске сигнале који су пропорционални струјама које протичу кроз њих. Ти сигнали су улаз у хистерезисне модуле. Сензори су постављени на самој вези између мотора и претварачке плоче да би се добила што прецизнија информација о струји. У физичкој реализацији која је обављена у оквиру овог рада користе се струјни сензори који одговарају сензорима из симулације. Разлика између симулације и реализованог система је та што је хистерезисна контрола у физичкој архитектури реализована као део дигиталног система и што су уз помоћ АД конвертора сигнали са струјних сензора преведени у дигитални домен и такви доведени на улаз дигиталног система. У пракси се показало да је због једноставности решења у симулацији боље користити аналогне компоненте као и да то ни на који начин не умањује веродостојност симулационог модела.

Струјна histerezisna kontrola JMBC (rad u 6 sektora)

Слика 7.6 Симулација система за управљање ЈМБЧ са 6 прекидача и 3 струјна сензора

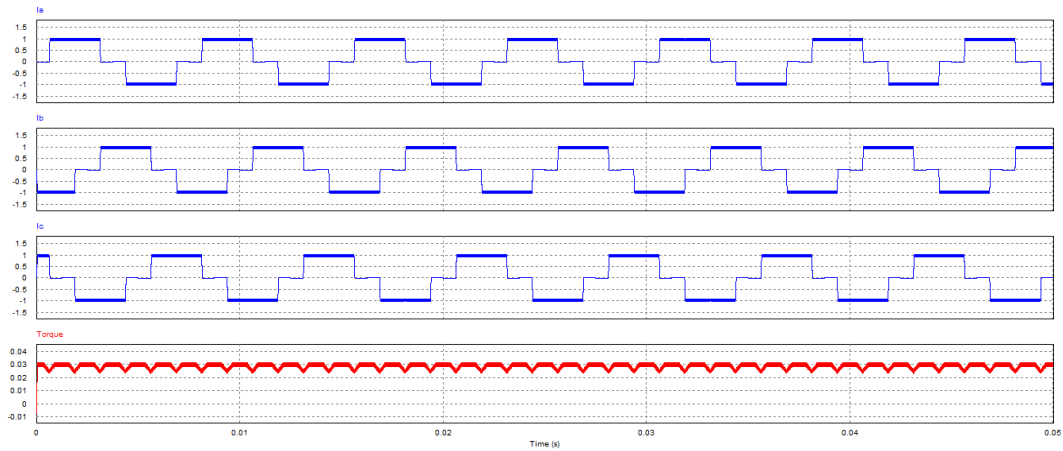
7.2.1 Резултати симулације

Извршена је симулација са променљивим оптерећењем и на различитим брзинама окретања мотора у циљу стицања што боље слике о понашању система у окружењу са променљивим параметрима.

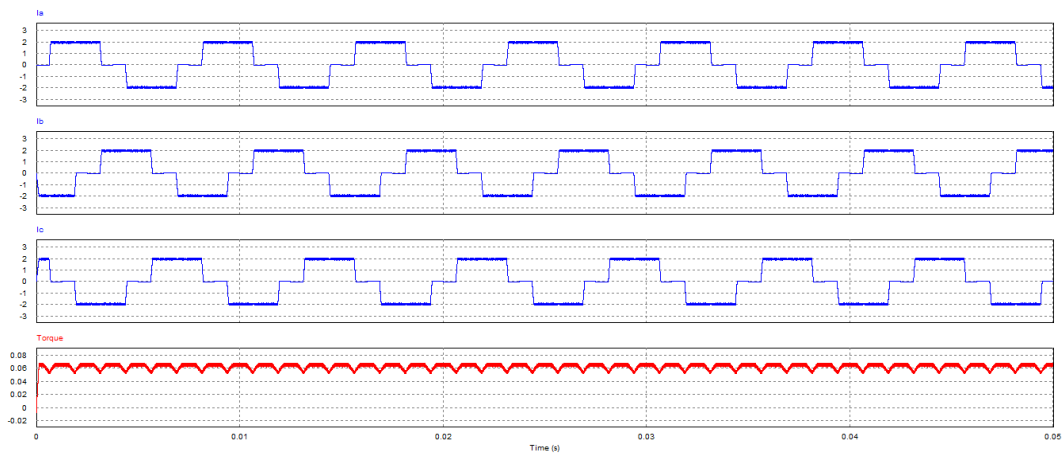
Изабрано оптерећење у симулацији диктира констатну брзину окретања мотора. На промене осталих параметра система, овакво оптерећење обезбеђује да је брзина увек једнак задатој константи брзине која је један од параметара компоненте.

У више симулационих сценарија задаване су и различите референтне вредности струје. Моделовани мотор је, како се види на слици 7.5, *Anaheim BLY173s*, називних вредности 70W, 3A, 4000оум. На слици 7.7 приказани су резултати симулације при задатој брзини од 2000 обртаја у минути и референтном вредношћу струје од 1A. Овај дијаграм приказује вредности струје и вредност

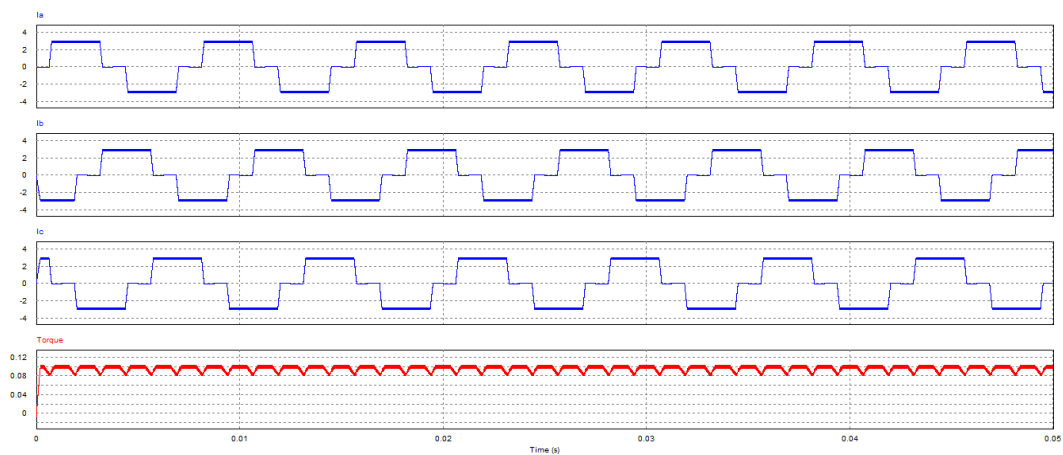
обртног момента, и види се да су све три струјне карактеристике потпуно равне у регионима у којим одговарајући прекидач проводи струју.



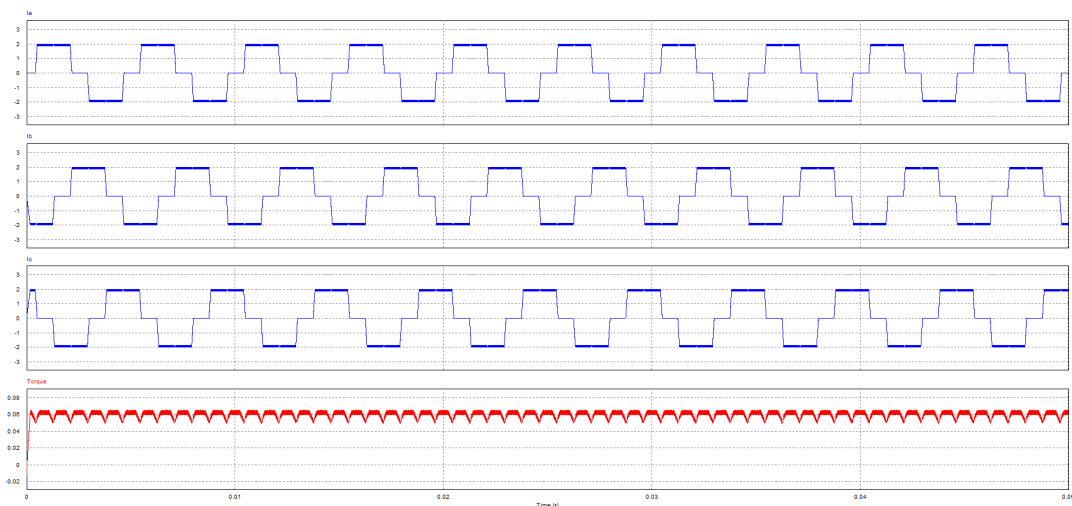
Слика 7.7 Симулација модела референтног система: 2000оум, 1А, 0,03Nm



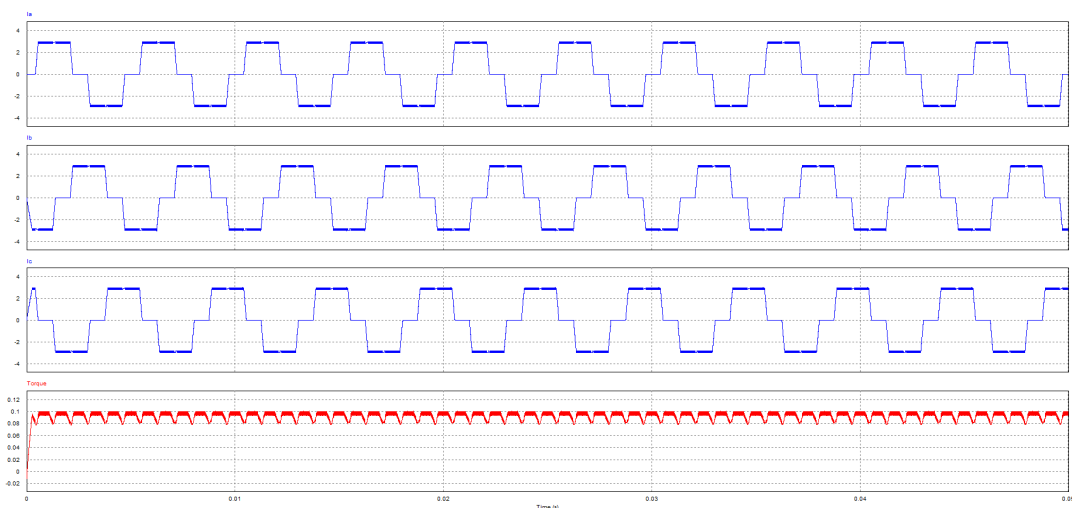
Слика 7.8 Симулација модела референтног система: 2000оум, 2А, 0,06Nm



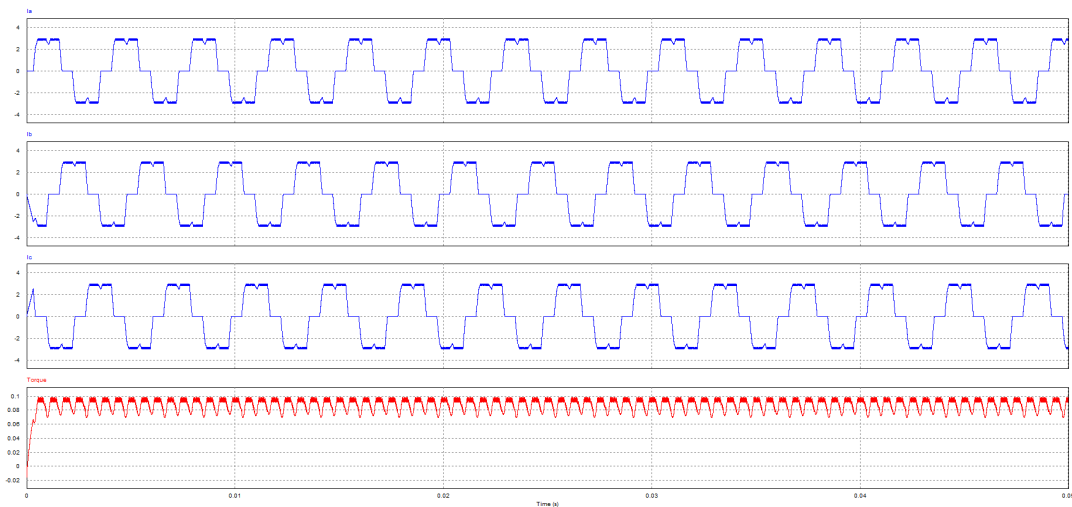
Слика 7.9 Симулација модела референтног система: 2000оум, 3А, 0,09Nm



Слика 7.10 Симулација модела референтног система: 3000оум, 2А, 0,06Nm



Слика 7.11 Симулација модела референтног система: 3000оум, 3А, 0,1Nm



Слика 7.12 Симулација модела референтног система: 4000оум, 3А, 0,1Nm

Такође се види да је прелазак сваког од прекидача из проводног у непроводно стање довољно брз да не изазива битне промене у карактеристици обртног момента за коју се такође може уочити да је равна са незнатним променама у тренуцима промене прекидача. На сликама 7.7 и 7.8 су као пример показани и резултати симулације за брзину од 2000 обртаја али за референтне струје од 1А и 2А респективно. Осим резултата приказаних на сликама 7.7 – 7.12, симулација је извршена за следеће вредности струје и брзине мотора:

Anaheim BLY173s-24V-4000	Брзина обртања мотора [обртаја/минути]	Референтна вредност струје [А]
	3000	3
	3000	2
	3000	1
	3000	0.5
	2000	3
	2000	2
	2000	1
	2000	0.5
	1000	3
	1000	2
	1000	1
	1000	0.5

Табела 7.1 Вредности параметара симулација

Са дијаграма који су представљени, може се уочити исто понашање као оно описано за пример из претходног текста, у коме је брзина обртања 3000 и референтна вредност струје 1А. На основу тога изведен је закључак да се модел референтног система понаша у складу са теоријом и да има смисла прећи на његову физичку реализацију.

7.3 Прототип референтног управљачког система

За опис дигиталног управљачког система током рада на овој тези, коришћен је програмски језик за опис физичке архитектуре Верилог (*Verilog*). За симулацију физичке архитектуре коришћен је *ModelSim* који представља унифицирану симулациону платформу како за Верилог тако и за друге језике за опис физичке архитектура, пре свих *VHDL* и *SystemC*.

Један од циљева рада било је оптимално решење са аспекта заузетости физичких ресурса у ФПГА, тј. у евентуалном наменском интегрисаном колу. Из тог разлога реализована је структура физичке архитектуре на такав начин да, уз максималну редукцију коришћених компоненти, решење задовољи критеријуме за оцену ефикасности управљања мотором.

Полазна тачка била је имплементација целокупне структуре са слике 7.6 да би се резултати симулације доказали и на прототипу.

7.3.1 Избор фреквенције такта

За исправно функционисање система било је неопходно анализирати параметре система како би се правилно изабрала радна фреквенција система. Основна ограничења била су:

- а) *Специфицирана фреквенција улазног такта у АД конвертор.* Предвиђено је да овај АД конвертор ради са фреквенцијама улазног такта од 8 до 16MHz.
- б) *Трајање АД конверзије.* Једна конверзија аналогног сигнала у дигитални облик траје 16 циклуса такта. Битно са аспекта генерисања ИШМ сигнала са динамиком довољном да обезбеди услове за правилну контролу ЈМБЧ.
- в) *Архитектура дигиталног система.* Дигитални управљачки систем треба да обави алгоритам контроле ЈМБЧ у једном циклусу комутације чије трајање зависи од брзине мотора.

Мотор који је коришћен у експериментима има 4 пара полова. Ако претпоставимо да се мотор врти максималном брзином од 4000 обртаја у минути, на основу једначине 3.1 се закључује да је тада број електричних ротација за мотор

у овом случају 16000 у минути. Свака електрична ротација је подељена на 6 сектора у којима треба вршити комутацију.

$$\begin{aligned} 6[\text{сектора}] \times 16000 \left[\frac{\text{електричних ротација}}{\text{минути}} \right] &= 96000 \left[\frac{\text{комутација}}{\text{минути}} \right] \\ &= 1600 \left[\frac{\text{комутација}}{\text{секунди}} \right] \end{aligned} \quad 7.4$$

То значи да између две комутације, при највећој брзини мотора, протекне 625us.

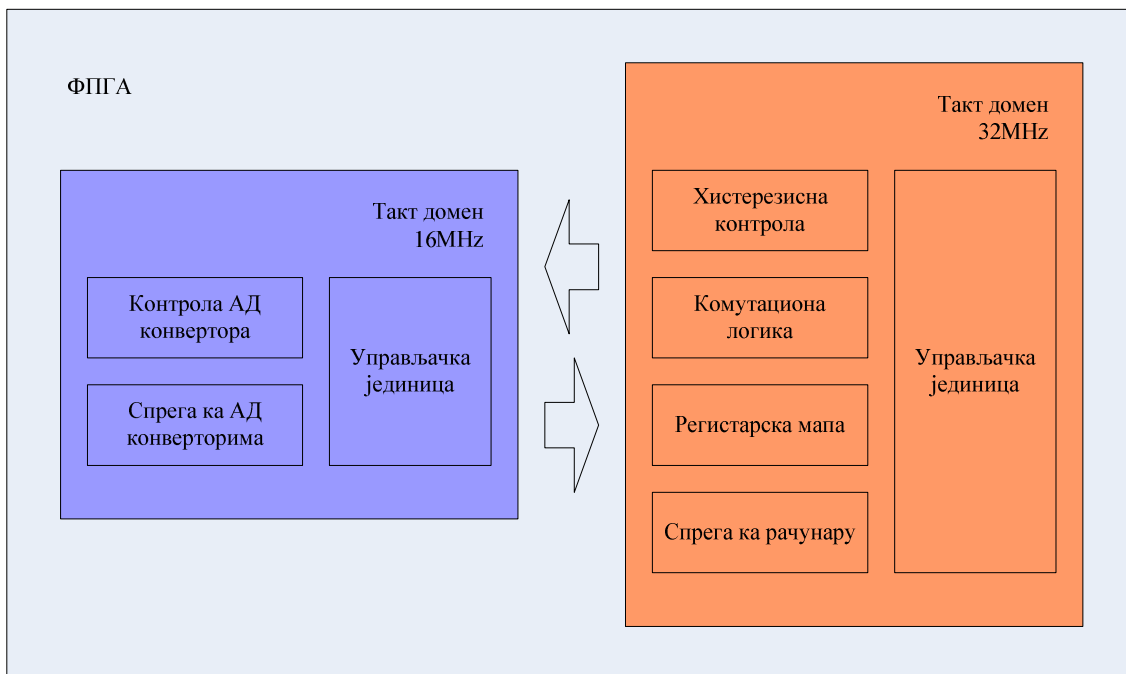
Изабрани АД конвертор који се налази на прототипској плочи је *Texas Instruments* ADC128S102. То је осмоулазни АД конвертор, са једним излазом. У сваком тренутку може вршити конверзију једног улазног аналогног сигнала који се бира селекционим улазом у АД конвертор. Ако претпоставимо да је на улазу АД конвертора обезбеђен такт од 16MHz, тада једна АД конверзија траје:

$$\frac{16 [\text{циклуса}]}{16000 [\text{MHz}]} = 1[\mu\text{s}] \quad 7.5$$

Види се да у случају максималне брзине мотора можемо обавити највише 625 АД конверзија, а у режиму споријег окретања и више. Смањење фреквенције улазног такта у АД конвертор довело би до споријег одговора на промену струје и слабијег квалитета управљачких сигнала те је тако и утврђено да фреквенција такта за АД конвертор буде 16MHz. На основу тога је одређена и доња граница за фреквенцију такта у овом домену управљачког дела физичке архитектуре, јер је осим такта, за АД конверзију неопходно обезбедити и контролне сигнале у сваком циклусу конверзије. Аналогни сигнали са струјних сензора из све три фазе мотора доведене су на улазе једног АД конвертора и управљачким сигнаlima се врши селекција са ког улаза се врши конверзија сигнала.

За радну фреквенцију такта у остатку дигиталног управљачког дела одређен је ниво од 32MHz, чиме је обезбеђено да се између две комутације може вршити квалитетно контролисање како нивоа струје тако и брзине мотора у режиму променљивог оптерећења. За случај да платформа послужи за развој комплекснијег алгорита контроле ЛМБЧ, на пример векторске контроле или контроле без коришћења сензора, фреквенција такта се може подићи и на ниво доста виши од овог, јер то омогућава архитектура изабране програмабилне компоненте. Са аспекта

интегрисаног кола, добро је радну фреквенцију спустити на што нижи ниво да би се обезбедила мања дисипација снаге. Овај ниво радне фреквенције такта управљачког домена дигиталног система је после анализе изабран као оптималан.



Слика 7.13 Домени тактова у систему

7.3.2 Промена домена такта

У овом раду коришћена је метода ФИФО структуре за превођење података после АД конверзије из домена 16MHz у домен 32MHz. Контролу и надзор овог дела система обавља управљачка јединица.

7.3.3 Комутација

Процес комутације обавља се сваких 60 електричних степени. Мотор се константно напаја из трофазног претварачког кола, а распоред укључивања прекидача је усаглашен са позицијом ротора. У табелама 7.2 и 7.3 приказана је секвенца комутације за ротације у смеру казаљке сата и смеру супротном њој. Сектор у коме се налази ротор одређује се на основу стања излаза из Холових сензора. На основу сигнала из Холових сензора једнозначно се одређује тренутна позиција ротора и на основу ње се одређује које прекидаче на претварачкој плочи треба укључити и тиме напојити одговарајуће намотаје.

Претварач са 6 прекидача									
сектор	Вредност излаза Холових сензора			Стање прекидача					
	Ц	Б	А	ЦГ	ЦД	БГ	БД	АГ	АД
1	1	0	1	1	0	0	1	0	0
2	1	0	0	0	0	0	1	1	0
3	1	1	0	0	1	0	0	1	0
4	0	1	0	0	1	1	0	0	0
5	0	1	1	0	0	1	0	0	1
6	0	0	1	1	0	0	0	0	1

Табела 7.2 Управљање прекидачима за ротацију мотора у смеру казаљке сата

Претварач са 6 прекидача									
сектор	Вредност излаза Холових сензора			Стање прекидача					
	Ц	Б	А	ЦГ	ЦД	БГ	БД	АГ	АД
1	1	0	1	0	0	0	0	0	1
2	1	0	0	1	0	0	1	0	0
3	1	1	0	1	0	0	1	1	0
4	0	1	0	0	1	0	0	1	0
5	0	1	1	0	1	1	0	0	0
6	0	0	1	0	0	1	0	0	1

Табела 7.3 Управљање прекидачима за ротацију мотора у смеру супротном од смера казаљке сата

7.3.4 Хистерезисна контрола

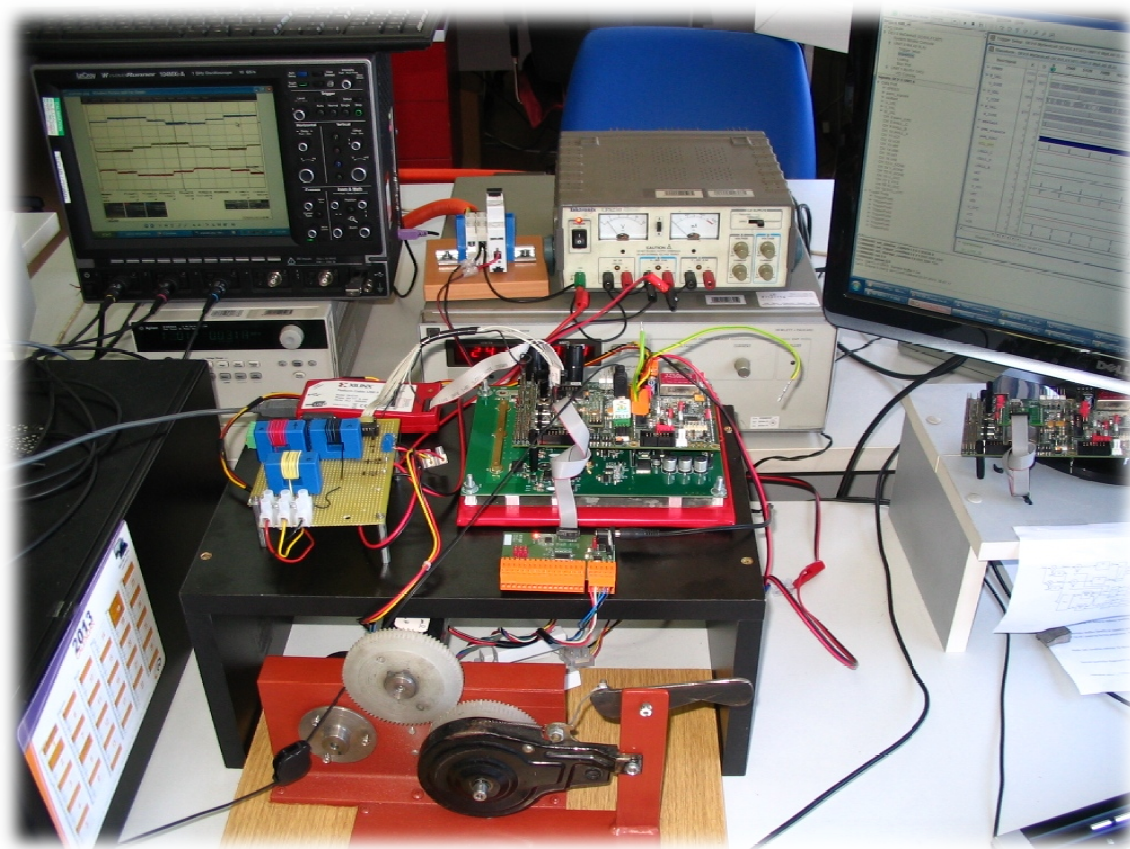
Хистерезисна контрола се врши на нивоу сектора од 60 електричних степени. Између два тренутка комутације неопходно је вршити генерисање ИШМ сигнала тако да је карактеристика струје у сваком од намотаја константа, то значи да је неопходно током овог периода вршити што брже мерење вредности струје и побуда прекидача уз помоћ струјне контроле.

За магистралу података одабрана је ширина 12 бита, што омогућује довољно прецизно читавање резултата мерења вредности струје и АД конверзију. Пошто имамо само један АД конвертор са осам улаза и селекцијом, коришћењем временског мултиплекса вршимо конверзију резултата мерења струје на сва три намотаја. Сваки трећи одбирок односи се на једну фазу, чиме је обезбеђено праћење

сва три намотаја једним АД конвертором. Ипак, трајање АД конверзије од $1\mu s$ омогућује довољно информација са сва три намотаја у реалном времену за квалитетну контролу струје.

7.4 Експериментални резултати

Реализовани дигитални управљачки систем верификован је најпре уз помоћ симулације. Ипак, коначна верификација је извршена уз помоћ експеримената. Експериментално окружење сачињено је повезивањем имплементираних делова физичке архитектуре у једну целину, коришћењем развојне платформе са слике 6.14 и мотора, чиме је добијено окружење за први прототип који треба да послужи за генерисање референтних резултата. Целокупно окружење за израду прототипа са мерним инструментима приказано је на слици 7.14



Слика 7.14 Окружење за израду прототипа

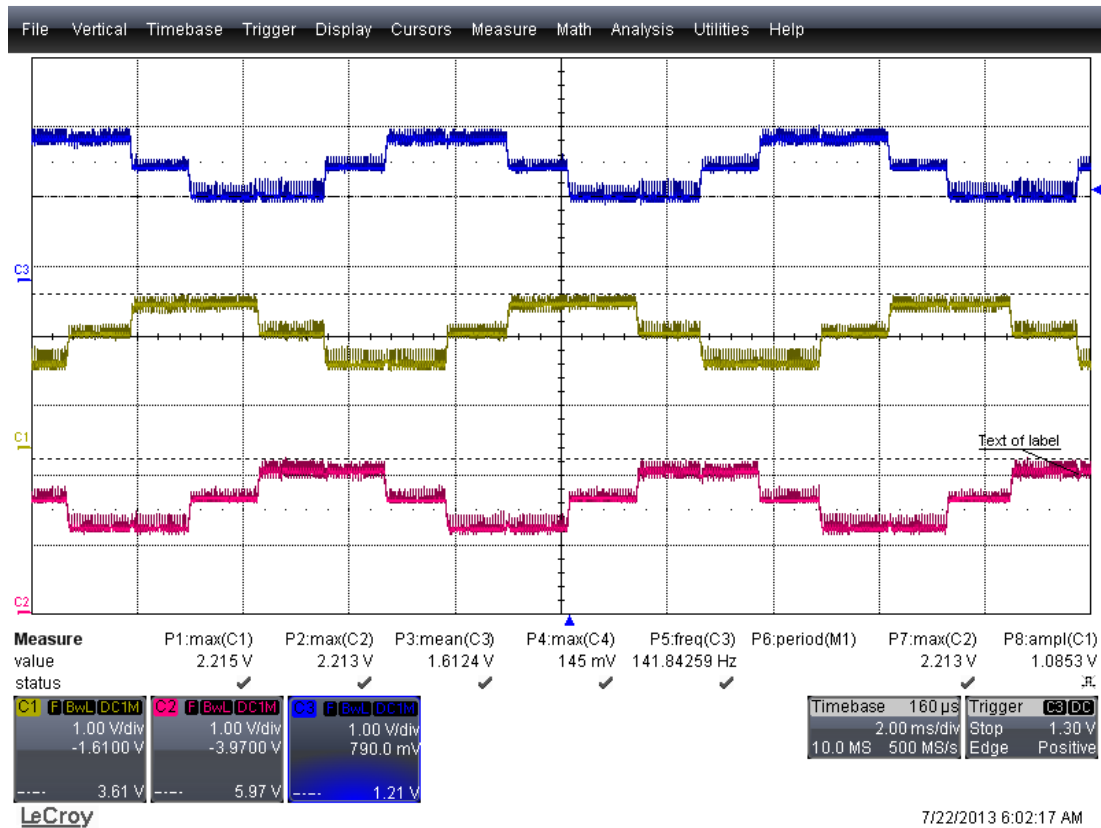
Коришћени ЈМБЧ је *Anaheim* BLY173s, називних вредности 70W, 3A, 4000оум. Мотор је везан у звезду. Параметри мотора делимично су преузети из

произвођачке спецификације, а делимично су измерени коришћењем техника објашњених у поглављу 5.1.1.

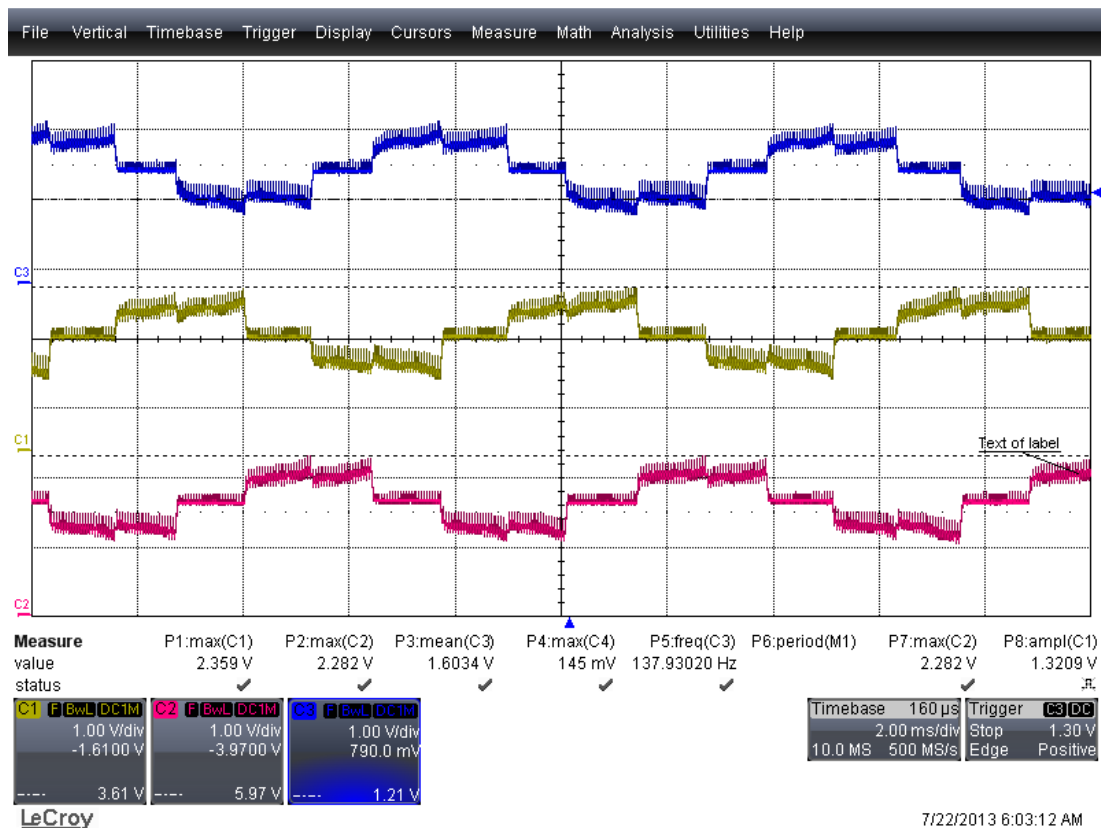
Механичко оптерећење је неопходно да буде што константније. Ово је постигнуто уз помоћ механичке кочнице која омогућује три степена кочења. С обзиром да је у питању механичка кочница, подразумева се поновљив кочиони момент за сваки степен кочења. Промена силе кочења врши се оптерећивањем полуге кочнице вертикалном силом, тј. теговима који су круто везани са полугом кочнице.

Експериментални резултати мерења струје приказани су на сликама 7.15 – 7.18. Прве две слике (Слика 7.15 и Слика 7.16) приказују карактеристике струје у три намотаја мотора при укљученој и искљученој струјној контроли, респективно, при брзини окретања ротора од 1000 оум. У овом експерименту је примењено минимално оптерећење осовине ротора. Види се да су карактеристике струја равније у случају када је струјна контрола укључена.

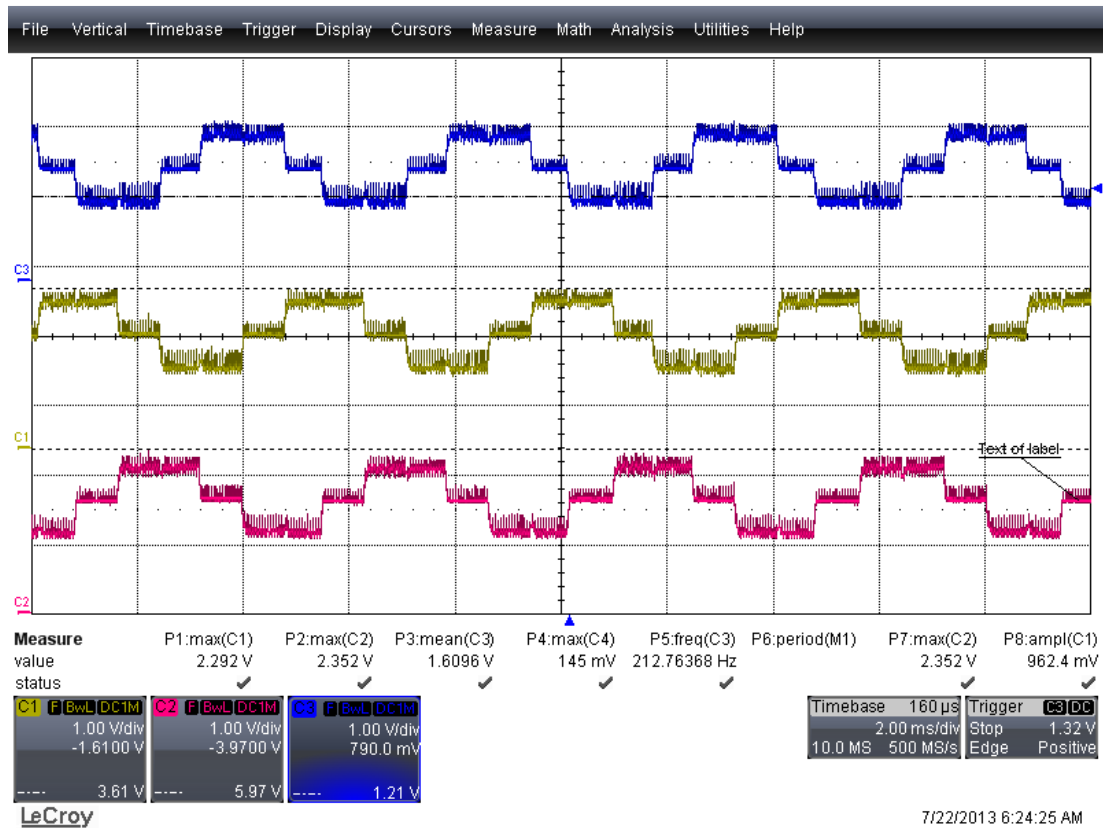
Слично је и на сликама 7.17 и 7.18, при чему је у овом случају експеримент обављен при брзини од 1500 оум и такође минималним оптерећењем. У овом примеру је још очигледније да је струјна контрола дала равну карактеристику и тако обезбедила већу ефикасност. Са слика се види да је за исто оптерећење и исту брзину обртања, ниво струје који протиче кроз намотаје, нижи у случају коришћења струјне контроле.



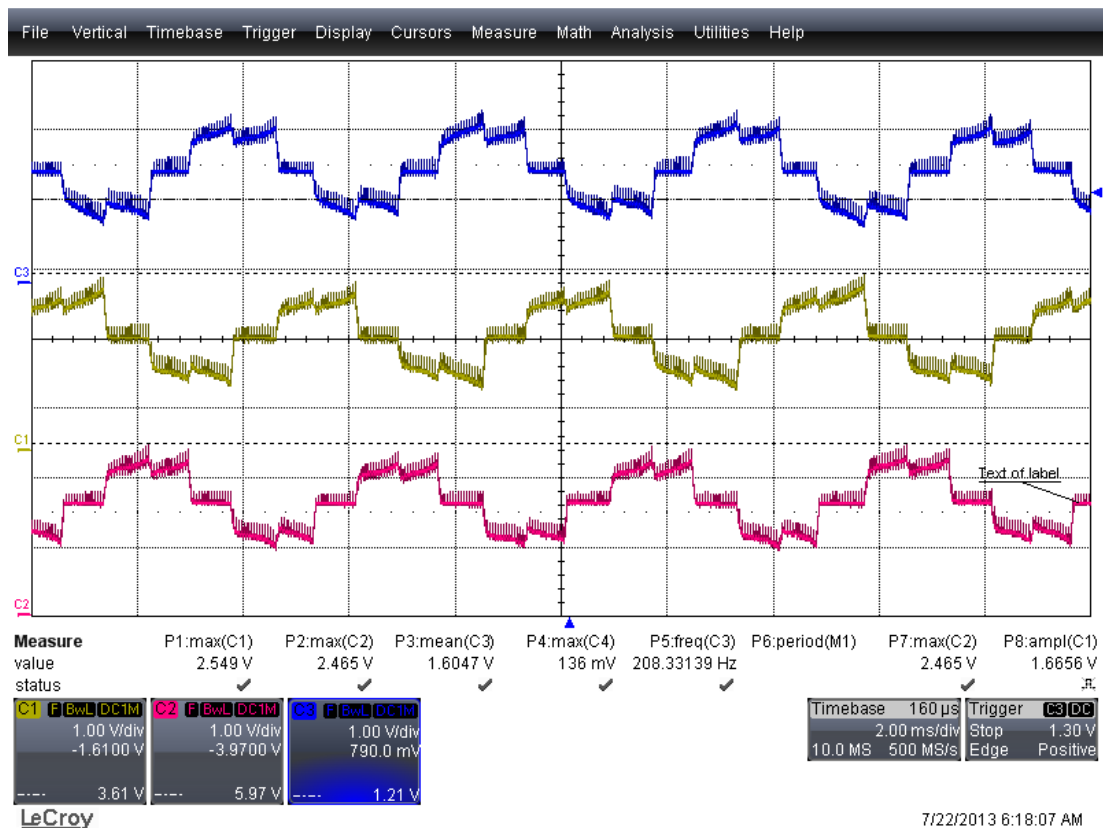
Слика 7.15 Резултати експеримента са струјном контролом при 1000оум



Слика 7.16 Резултати експеримента без струјне контроле при 1000оум



Слика 7.17 Резултати експеримента са струјном контролом при 1500оум



Слика 7.18 Резултати експеримента без струјне контроле при 1500оум

7.5 Закључак

На основу представљених експерименталних резултата види се да је обезбеђена карактеристика струје која је једнака карактеристикама које су представљене у литератури. На основу претходно представљене анализе може се закључити да је карактеристика обртног момента мотора такође у складу за постављеним циљевима. Управљачки део је имплементиран у ФПГА као дигитални систем, укључујући А/Д конверзију, комутацију и хистерезисну контролу.

Одступања карактеристике струје од очекиване нису примећене ни у једном од експеримената на основу чега се може закључити да пројектовани систем у потпуности одговара симулацијама те се може користити као референтни у даљим истраживањима.

На крају, ово поглавље представља почетак истраживања и представља верификацију концепта управљања. Такође, из свега споменутог може се закључити да експериментални резултати у потпуности одговарају резултатима симулације, а то значи да је направљено развојно окружење које је поуздано са аспекта моделовања. Тиме је постигнут један од основних циљева овог рада, а то је развој модерног окружења за развој система управљања ЈМБЧ. Такође, платформа за израду прототипа показала је потпуну функционалност и потенцијал да служи за развој веома сложених алгоритама за управљање ЈМБЧ.

8. Управљање једносмерним мотором без четкица коришћењем топологије са 4 прекидача

У овом поглављу описан је наставак истраживања технике контроле ЈМБЧ. Као наставак претходног поглавља, у овом је описана претварачка плоча која има 4 прекидача и два кондензатора, којима су замењени прекидачи једног полумоста, задуженог за управљање напоном у једном од намотаја мотора. У односу на контролу из претходног поглавља, овакав приступ захтева додатну анализу управљачког алгорита, како са аспекта комутације тако и са аспекта контроле струје због одређених специфичности.

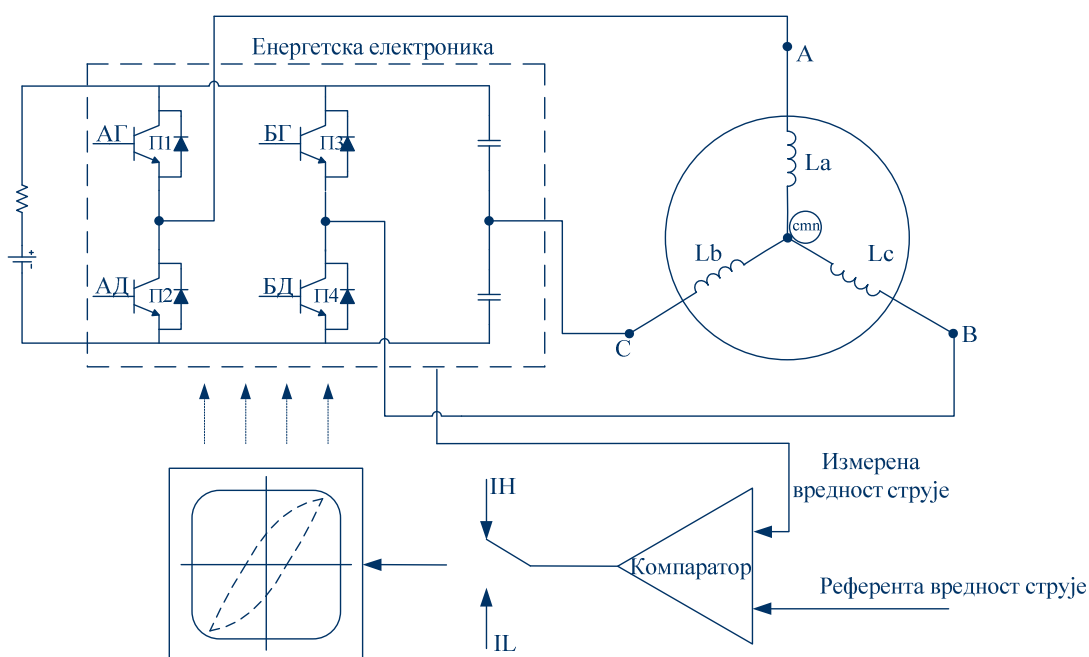
У претходном поглављу представљен је концепт управљања који је у потпуности применљив и на топологију са 4 прекидача. Експериментални резултати су доказали да је струјна контрола ефикасна, како при различитим брзинама, тако и при различитим оптерећењима.

Код топологије са умањеним бројем прекидача примењена је иста методологија у приступу пројектовању. Најпре је генерисан модел система у окружењу са симулацију енергетске електронике. Када је утврђено да систем задовољава задате критеријуме прешло се на пројектовање дигиталног система и његову симулацију. На крају је концепт проверен експериментално тако што је

претварачка плоча адаптирана да одговара новој топологији и на њу примењен нови управљачки прототип.

8.1 Концепт система за управљање ЈМБЧ са 4 прекидача и 2 кондензатора

Коришћењем искустава стечених пројектовањем система са конвенционалном топологијом, приступ пројектовању управљачког система ЈМБЧ за топологију са 4 прекидача почињемо симулацијом. Концепт управљања приказан је на слици 8.1.



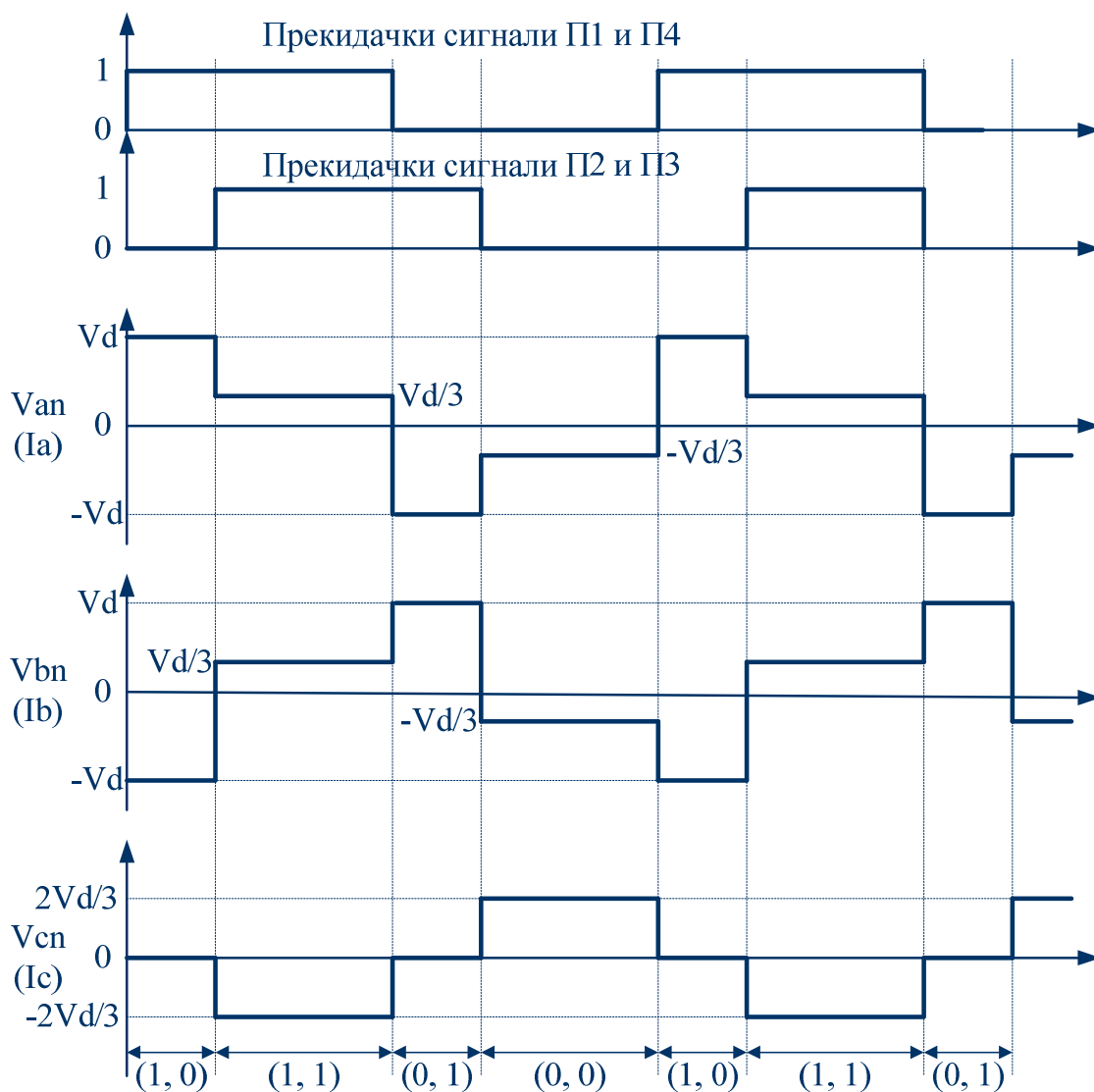
Слика 8.1 Управљачки систем ЈМБЧ са 4 прекидача

У поређењу са референтном топологијом, основна разлика је у начину комутације.

Што се тиче струјне контроле разлика је у чињеници да је струја, у фази која је прикључена на грану моста коју чине кондензатори, практично без директне контроле. Ипак, на ову струју је свакако могуће утицати индиректно, контролом струје у остале две фазе мотора што ће бити и описано.

8.1.1 Комутација ЈМБЧ у систему претварача са 4 прекидача и 2 кондензатора

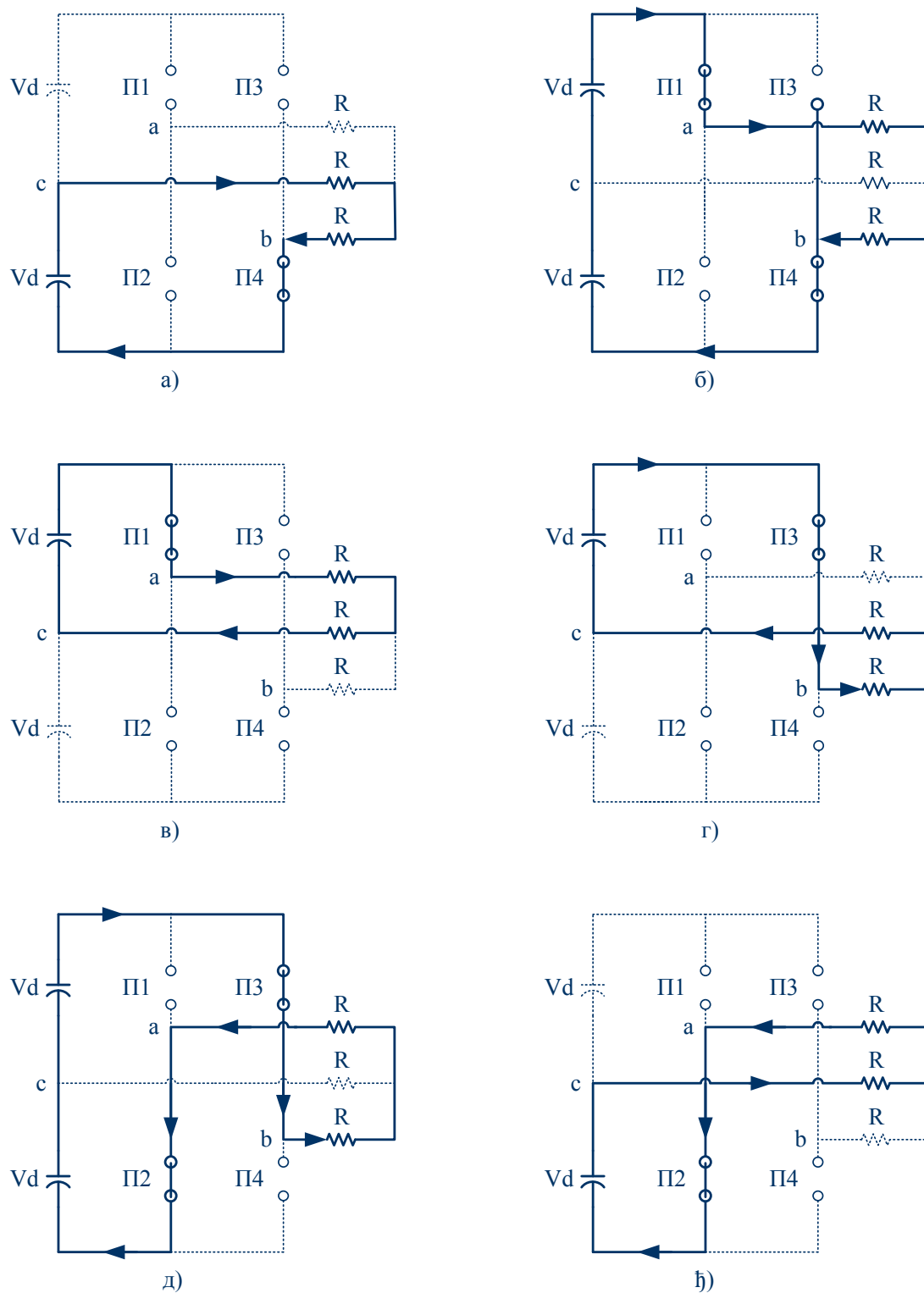
Као што је приказано на слици 8.1, развијена претварачка плоча ЈМБЧ састоји се од две прекидачке гране (4 прекидача П1-П4) и једне гране са кондензаторима. Тополошки, претварач је исти као код индукционих мотора.



Слика 8.2 Асиметрична ИШМ за претварач са 4 прекидача

Међутим, код претварача са четири прекидача, генерисање струја са профилем 120 степени је само по себи тешко због својих ограничених вектора напона. Овај проблем се у литератури назива проблем несиметричних напона и приказан је на слици 8.2. То значи да се стандардна шема комутације четири прекидача за

индукциони мотор не може директно применити на ЈМБЧ. Због тога су развијене нове методе комутације за трофазне ЈМБЧ.



Слика 8.3 Стања прекидача у 6 радних режима

ЈМБЧ мотор у топологији са 4 прекидача може бити описан са 6 различитих радних режима и редослед прекидања је одређен у складу са тим режимима. Детаљан статус прекидања и провођења је описан сликом 8.3 као и табелом 8.1.

	Холови сензори	активне фазе	неактивна фаза	укључени прекидачи
режим а	101	Б и Ц	А	П4
режим б	100	А и Б	Ц	П1 и П4
режим в	110	А и Ц	Б	П1
режим г	010	Б и Ц	А	П3
режим д	011	А и Б	Ц	П2 и П3
режим ђ	001	А и Ц	Б	П2

Табела 8.1 Управљање прекидачима за ротацију мотора у смеру супротном од смера казаљке сата

У складу са тиме имплементирана је логика за комутацију. У табели 8.1 види се прекидачка секвенца којом је потребно побуђивати претварачки модул да би се обезбедило протицање струје кроз одговарајуће фазе ЈМБЧ. Циљ је да се постигне иста побуда као код претварача са 6 прекидача.

Поређењем табела 8.1 и 7.3, у којима је представљена секвенца комутације за конвенционални систем и систем са 4 прекидача, може се уочити да се оне у потпуности поклапају са изузетком фазе Ц, која код система са 4 прекидача није контролабилна, јер не садржи прекидаче. Јасно је да се комутациона логика може у потпуности преузети од конвенционалног система.

Ова чињеница нас доводи до једне од највећих предности система са 4 прекидача, а то је могућност коришћења система за комутацију конвенционалног система.

8.1.2 Контрола ЈМБЧ уз помоћ претварача са 4 прекидача

За контролу постоји више решења, а једно од њих је и струјом контролисана ИШМ, које је већ описана у претходном тексту. Ова метода обезбеђује ефикасну контролу ЈМБЧ која има особину да веома брзо и ефикасно одговара на захтеве промене брзине и оптерећења.

Оптимална ИШМ има такозвану квази правоугаону карактеристику у свакој фази, што директно доводи до резултата да је карактеристика обртног момента

константна. Правилна и правовремена комутација обезбеђује да струје фаза буду у синхронизму са индукованом ЕМС.

Из угла погона мотора идеална индукована ЕМС трофазног мотора и жељени струјни облик може се описати сликом 8.4.

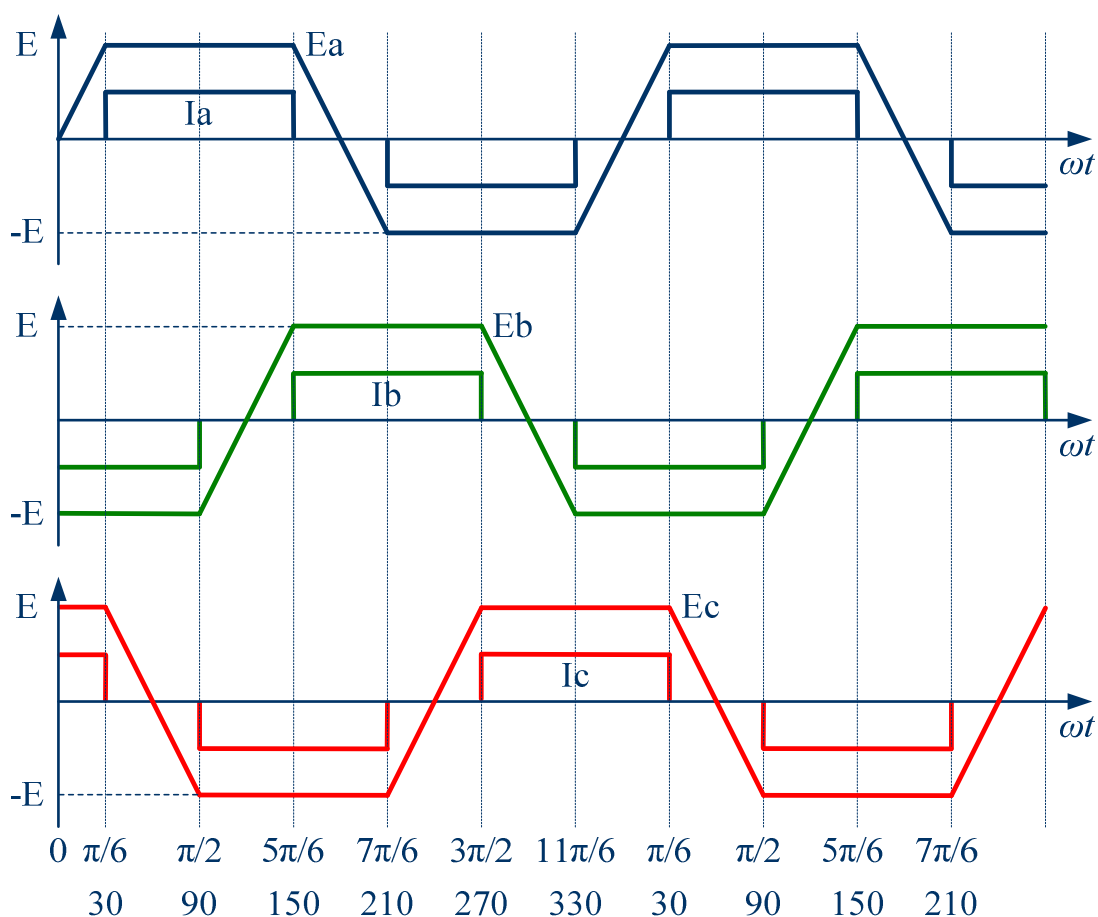
На основу детаљних истраживања конфигурације са 4 прекидача као и повратне ЕМС и струјних облика на сликама 8.2 и 8.4, можемо извести управљачку стратегију за претварач са 4 прекидача и трофазни ЈМБЧ мотор.

У случају избалансираних услова, трофазне струје увек задовољавају следећи услов:

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad 8.1$$

Што се може записати и као:

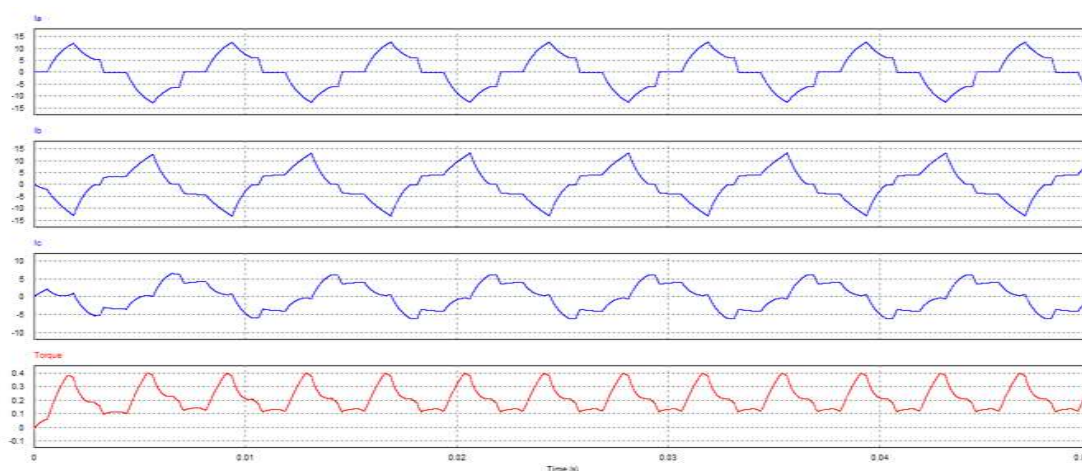
$$i_c = -(i_a + i_b) \quad 8.2$$



Слика 8.4 Карактеристика индуковане ЕМС и струје у фазама ЈМБЧ

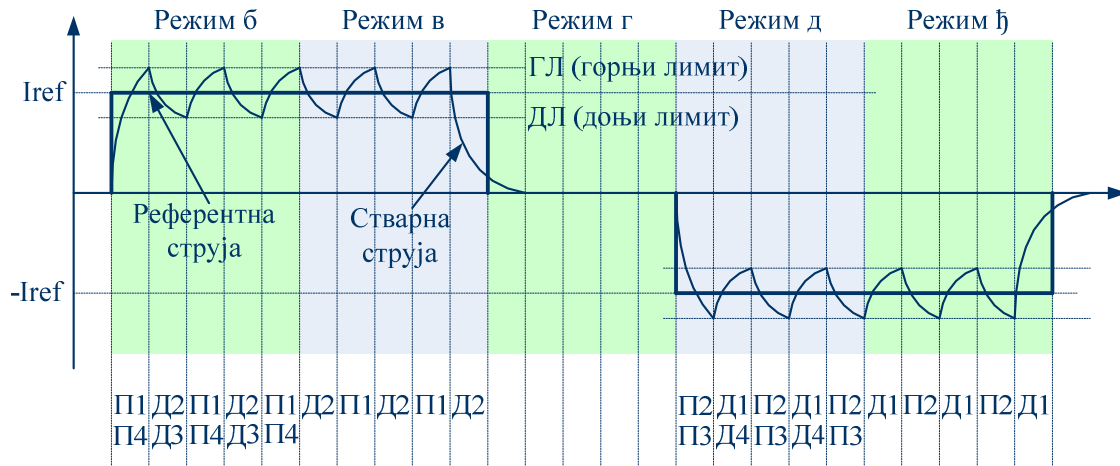
Дакле, једна од три фазне струје може се изразити преко струје остале две фазе. То значи да контрола струје две фазе може гарантовати генерисање трофазних струја које имају не нула вредност у трајању од 120 електричних степени. За постизање овакве контроле, струја две фазе мора се директно контролисати хистерезисном методом.

Почетна симулација, у којој је коришћена напонски контролисана ИШМ, показала је да оваква врста комутације даје само делимично резултат који се очекује (Слика 8.5). Одговарајуће фазе ЈМБЧ су оптерећене у одговарајућим тренуцима, међутим јасно је видљива потреба за контролом струје.



Слика 8.5 Симулација контроле ЈМБЧ без струјне контроле при константном оптерећењу и брзини од 2000оум

8.1.3 Имплементација струјно контролисане ИШМ



Слика 8.6 Контрола струје и прекидачка секвенца

Опис имплементације дат је на примеру фазе А. Сам механизам контроле струје додатно описују и Слика 8.3 и Слика 8.6.

Случај I: $I_a > 0$

- Период 1: $I_a < \text{ДЛ}$ → Прекидач П1 је укључен
- Период 2: $I_a > \text{ГЛ}$ → Прекидач П1 је искључен и Д3 проводи
- Период 3: $\text{ДЛ} < I_a < \text{ГЛ}, \frac{dI_a}{dt} > 0$ → Прекидач П1 је укључен
- Период 4: $\text{ДЛ} < I_a < \text{ГЛ}, \frac{dI_a}{dt} < 0$ → Прекидач П1 је искључен и Д3 проводи

Случај II: $I_a < 0$

- Период 1: $I_a > \text{ГЛ}$ → Прекидач П3 је укључен
- Период 2: $I_a < \text{ДЛ}$ → Прекидач П3 је искључен и Д1 проводи
- Период 3: $\text{ДЛ} < I_a < \text{ГЛ}, \frac{dI_a}{dt} < 0$ → Прекидач П3 је укључен
- Период 4: $\text{ДЛ} < I_a < \text{ГЛ}, \frac{dI_a}{dt} > 0$ → Прекидач П3 је искључен и Д1 проводи

Исто објашњење може бити примењено и на контролу фазе Б. Такође, напонске и струјне једначине за сваки од 6 режима може бити изражен као:

- Режим а: $V_{c2} = 2RI_c + 2L \frac{dI_c}{dt} + e_{cb}$
- Режим б: $V_{c1} + V_{c2} = 2RI_a + 2L \frac{dI_a}{dt} + e_{ab}$

- Режим в: $V_{c1} = 2RI_a + 2L \frac{dI_a}{dt} + e_{ac}$
- Режим г: $-V_{c2} = 2RI_b + 2L \frac{dI_b}{dt} + e_{bc}$
- Режим д: $-(V_{c1} + V_{c2}) = 2RI_b + 2L \frac{dI_b}{dt} + e_{ba}$
- Режим ђ: $-V_{c1} = 2RI_c + 2L \frac{dI_c}{dt} + e_{ca}$

Посебну пажњу треба обратити на режиме б и д. У тим ситуацијама фазе А и Б проводе струју, тако да се очекује да у тим режимима струја у фази Ц буде једнака нули. У пракси је ипак другачије, јер се индукована ЕМС у фази Ц може понашати као струјни извор и узроковати неочекивану струју у фази Ц, а то за последицу има изобличења струја у фазама А и Б. Због тога је неопходно анализирати проблем индуковане ЕМС у фази Ц, када је ова фаза неактивна. У литератури је овај проблем наглашен од стране аутора метода за управљање ЈМБЧ уз помоћ претварача са 4 прекидача [40][41][42][43][44][45][46][47][48][49][50].

У ситуацији када се индукована ЕМС у фази Ц понаша као струјни извор, довољно је да се остале две фазе посматрају као независни струјни извори да би се у потпуности могао искључити утицај струје у фази Ц. То значи да увођењем директне контроле струје у фазама А и Б поменути проблем може бити решен и та чињеница је искоришћена у овом раду.

8.2 Симулација система за контролу ЈМБЧ са 4 прекидача и 2 струјна сензора

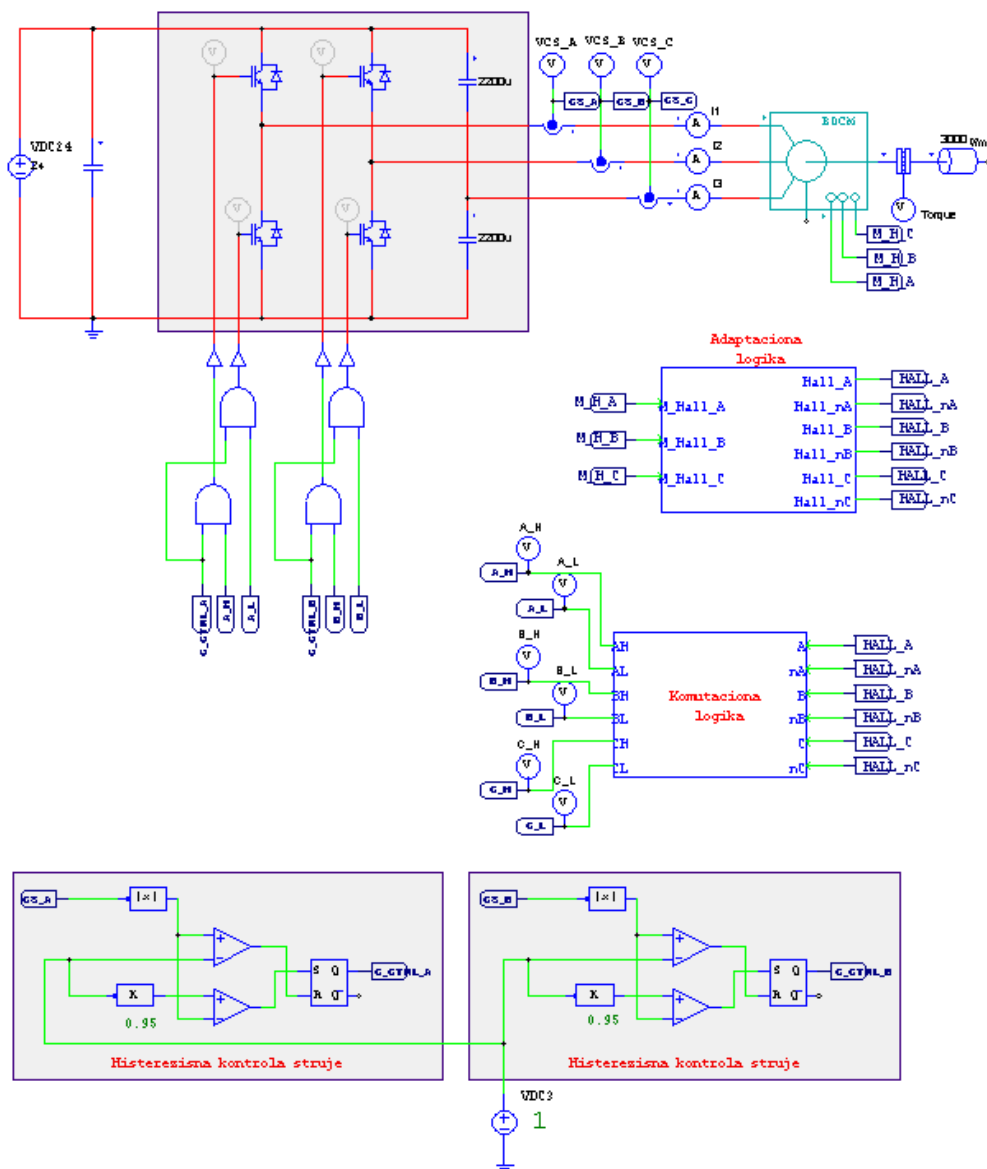
Структура кола за управљање ЈМБЧ методом струјног хистерезиса приказана је на слици 7.3. Слична структура се користи и за топологију са 4 прекидача.

Појединачне вредности фазних струја контролишу се независним дигиталним хистерезисним системима који имају подесиве вредности параметара, референтну вредност струје и граничне вредности хистерезиса. Једина разлика у односу на систем са 6 прекидача је што у овом случају имамо само два независна дигитална хистерезисна система контроле струје.

На слици 8.7 види се да је адаптациона логика поново употребљена због свођења излаза Холових сензора на облик који одговара сигнаlima које генерише

мотор. Моделовање претварачког кола, хистерезисне контроле и дигиталне логике извршено је на сличан начин као и код референтног модела.

Струјна хистерезисна контрола ЈМБЧ (рад у 6 сектора)



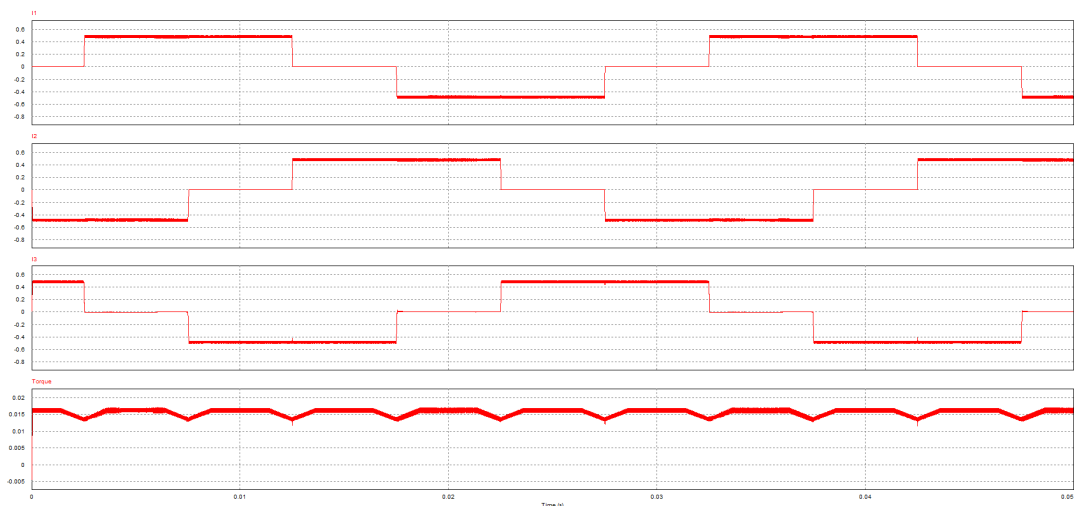
Слика 8.7 Симулација система за управљање ЈМБЧ са 4 прекидача и 2 струјна сензора

8.2.1 Резултати симулације

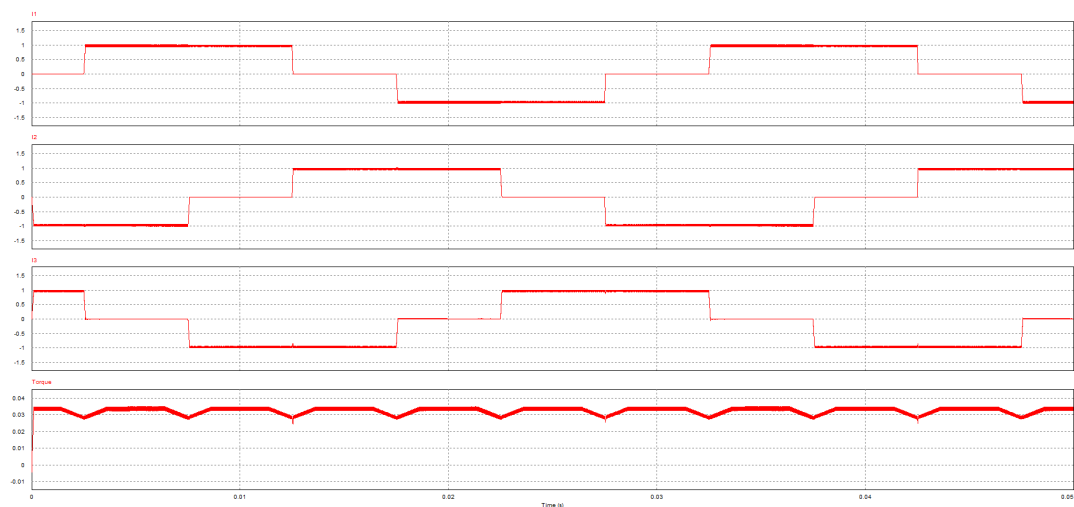
Извршена је симулација са променљивим оптерећењем и на различитим брзинама окретања мотора у циљу стицања што боље слике о понашању система у окружењу са променљивим параметрима. Такође, задаване су и различите

референтне вредности струје. Моделовани мотор је и у овом случају, *Anaheim BLY173s*, називних вредности 70W, 3A, 4000оум.

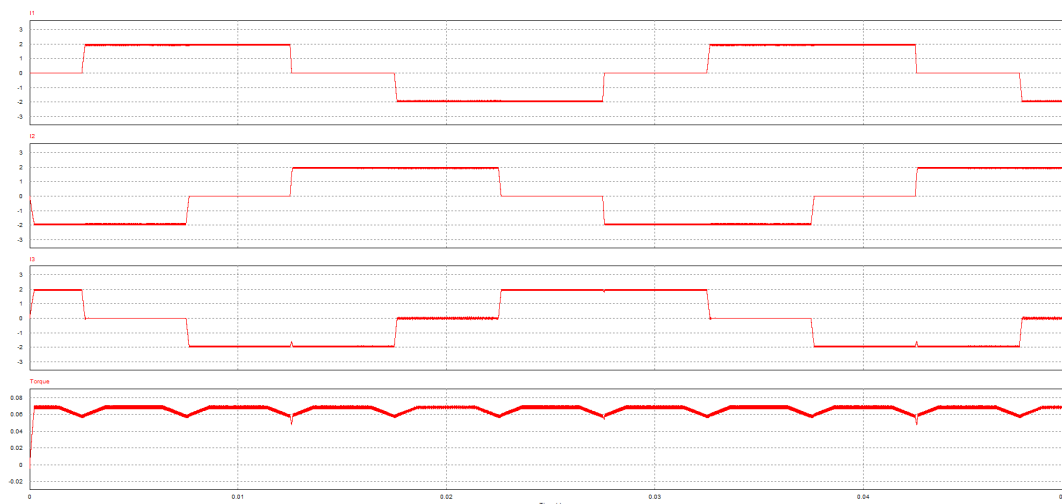
На следећем скупу слика се виде резултати симулације за брзине од 500 обртаја у минути.



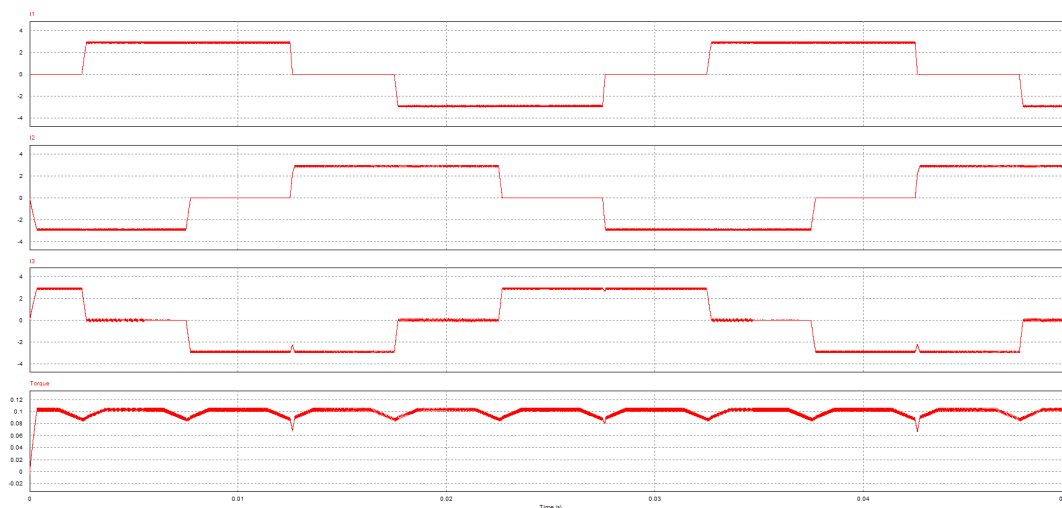
Слика 8.8 Резултати симулације: Брзина 500о/м, струјни лимит 0,5А



Слика 8.9 Резултати симулације: Брзина 500о/м, струјни лимит 1А



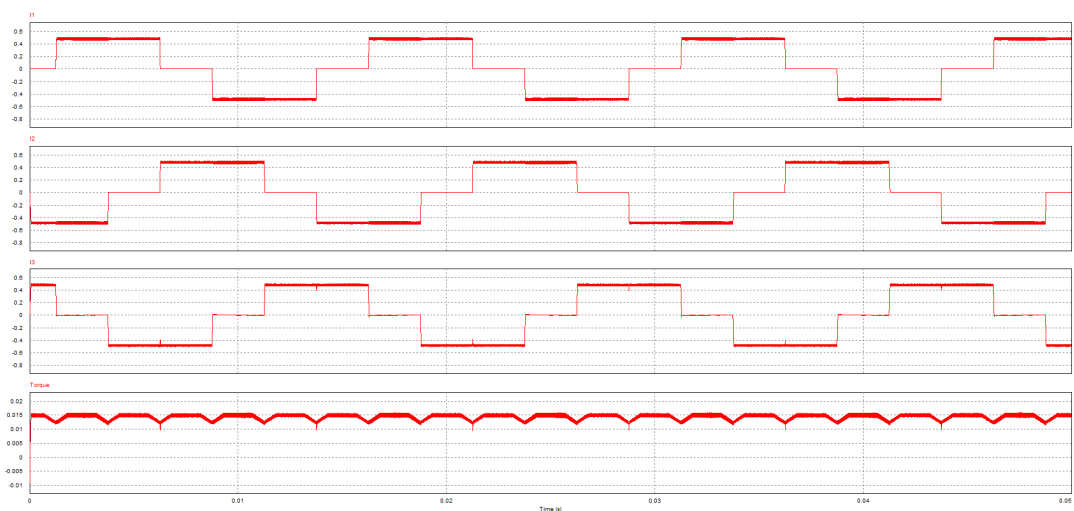
Слика 8.10 Резултати симулације: Брзина 500о/м, струјни лимит 2А



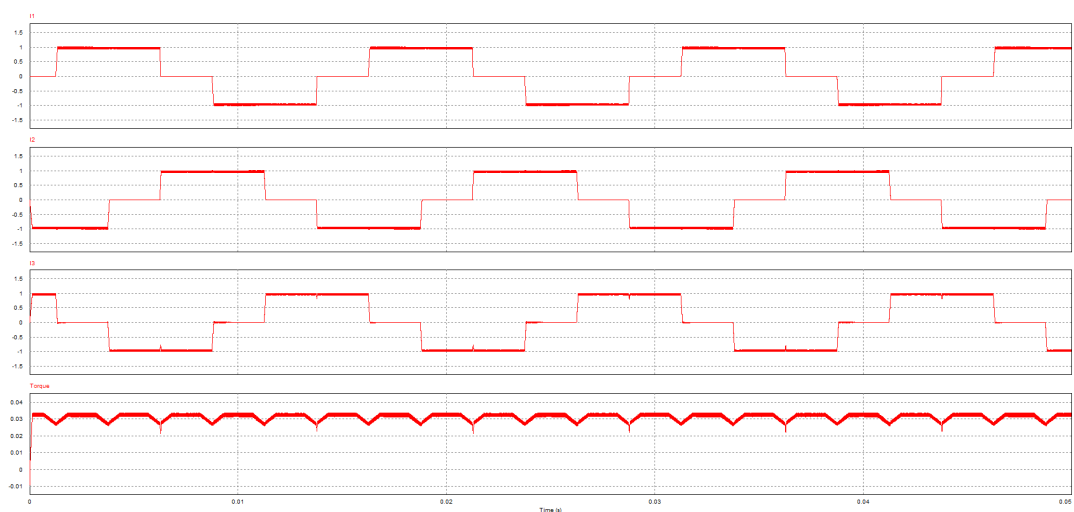
Слика 8.11 Резултати симулације: Брзина 500о/м, струјни лимит 3А

Гранична вредност струје је мењана у границама од 0,5А до 3А. Са слика се види да је карактеристика обртног момента равна са неравнинама проузрокованим променама прекидача који води у тренуцима комутације. Ниво осцилација је око 10% амплитуде обртног момента и приказани резултати могу се сматрати као прихватљиви.

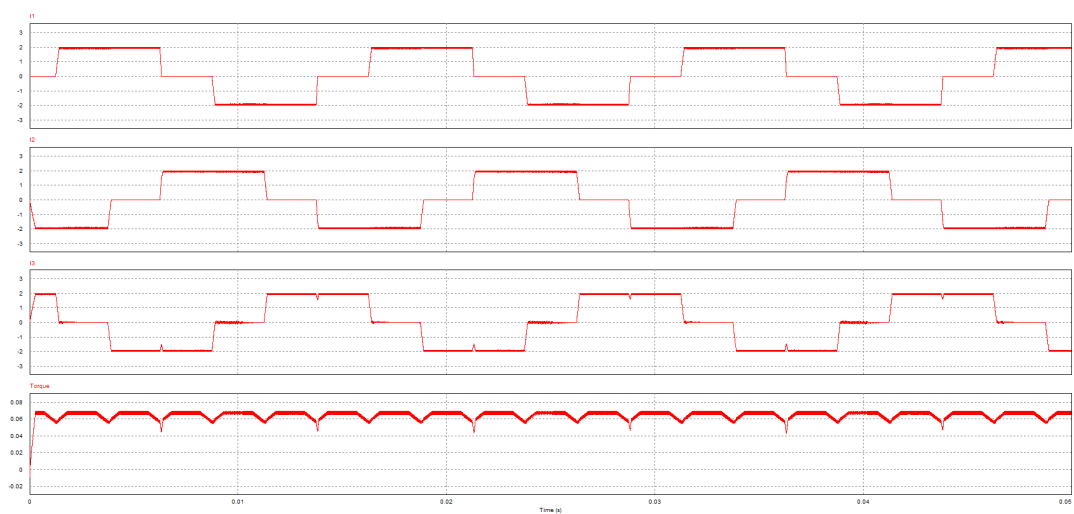
У наредној фази је брзина повећана на 1000 обртаја у минути. На следећим сликама (слике 8.12 - 8.15) види се да је карактеристика обртног момента и даље задовољавајућег квалитета.



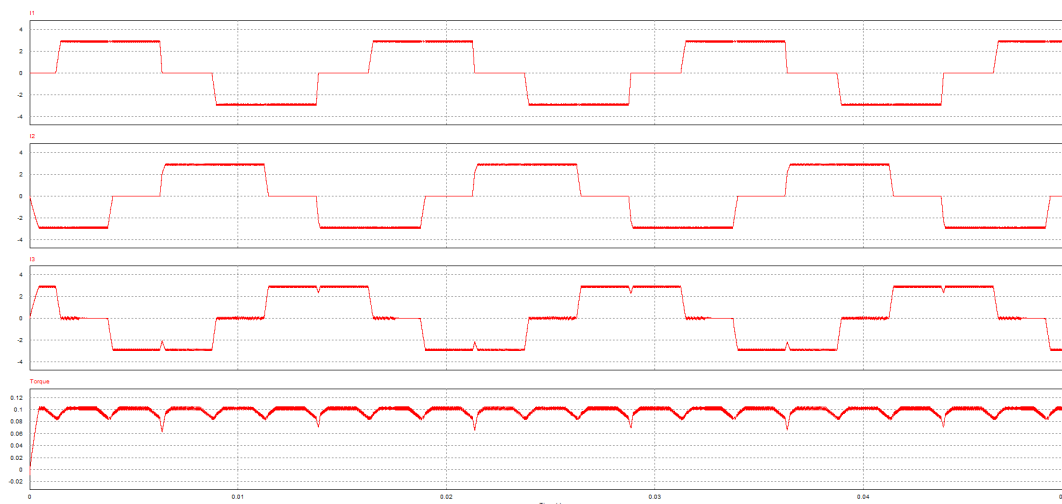
Слика 8.12 Резултати симулације: Брзина 1000о/м, струјни лимит 0,5А



Слика 8.13 Резултати симулације: Брзина 1000о/м, струјни лимит 1А

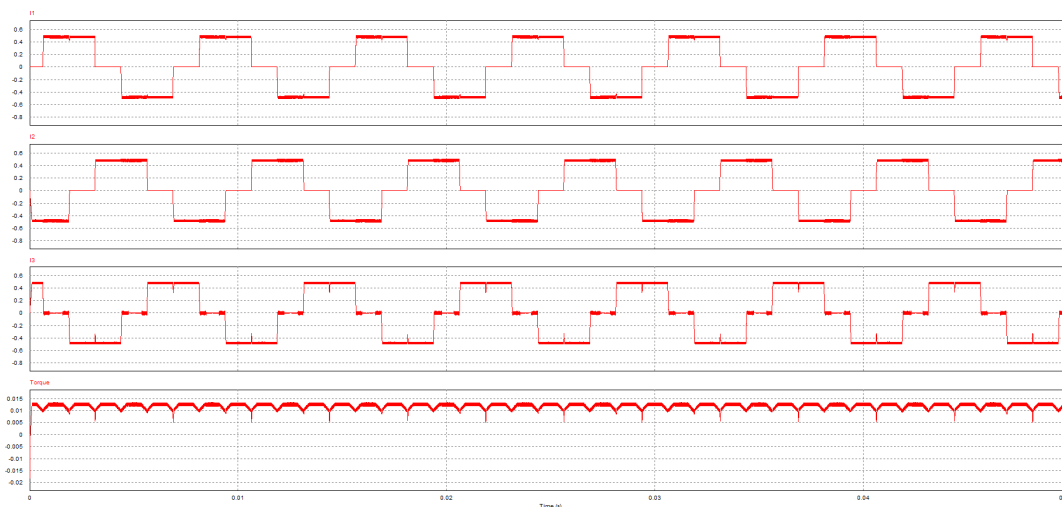


Слика 8.14 Резултати симулације: Брзина 1000о/м, струјни лимит 2А

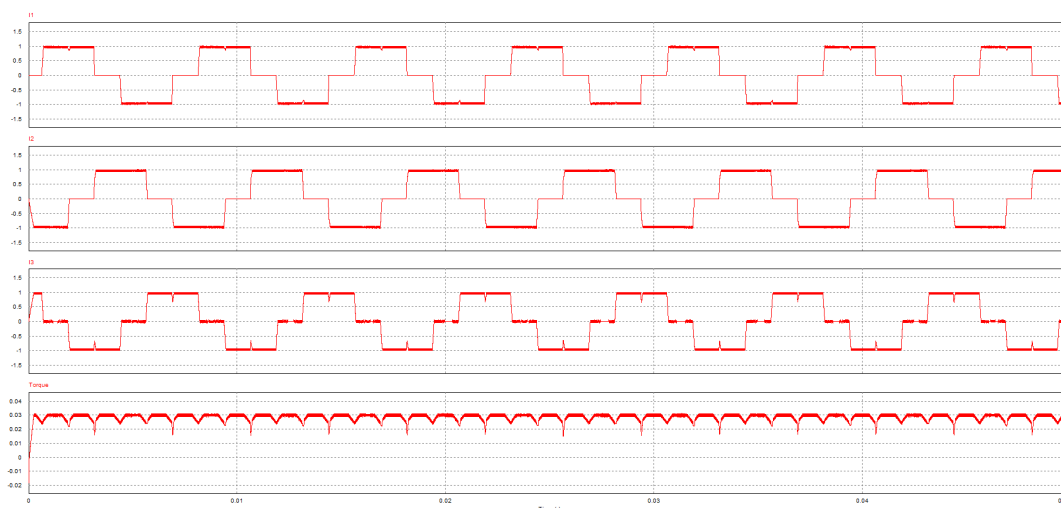


Слика 8.15 Резултати симулације: Брзина 1000о/м, струјни лимит 3А

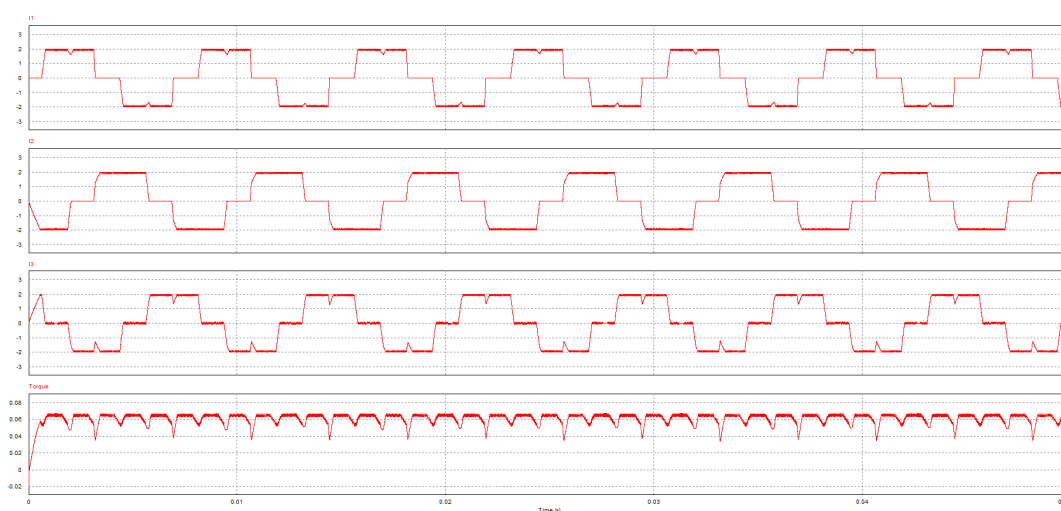
Следе резултати симулације за брзине од 2000 и 3000 обртаја у минути. На овим сликама (Слика 8.16) види се да при већим брзинама контрола струје све више утиче на ИШМ. Што је већа вредност струјног лимита који задајемо, уочава се више изобличења у карактеристици обртног момента. То значи да са порастом броја обртаја вредност струје, коју користимо као граничну, а при којој имамо задовољавајући облик карактеристике обртног момента, постаје сва мања. Овај закључак, у академском смислу не представља новину, али је битан у светлу поређења конвенционалног решења и овог са 4 прекидача. Закључак је да би требало, при избору топологије за сваку специфичну намену, поредити граничне вредности при којим облик карактеристике обртног момента постаје неприхватљивог облика.



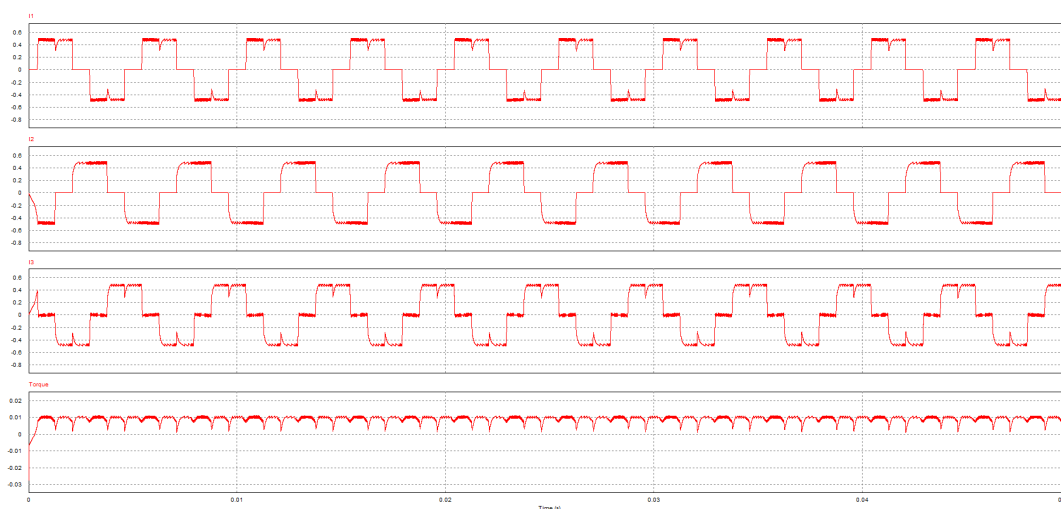
Слика 8.16 Резултати симулације: Брзина 2000о/м, струјни лимит 0,5А



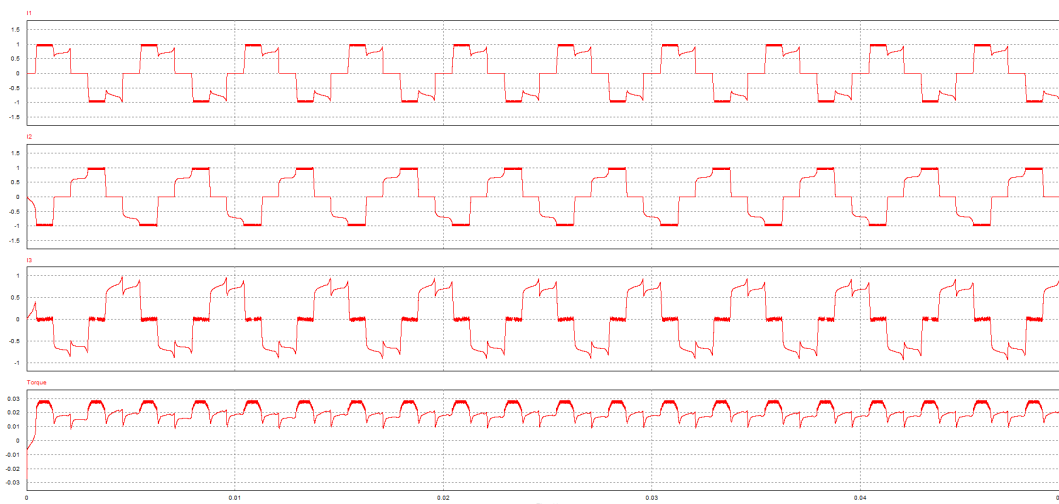
Слика 8.17 Резултати симулације: Брзина 2000о/м, струјни лимит 1А



Слика 8.18 Резултати симулације: Брзина 2000о/м, струјни лимит 2А



Слика 8.19 Резултати симулације: Брзина 3000о/м, струјни лимит 0,5А



Слика 8.20 Резултати симулације: Брзина 3000о/м, струјни лимит 1А

На симулацијама се види да систем, на већим брзинама или при већим оптерећењима, губи особину да може да контролише струју на начин да она има равну карактеристику, тј. да је обртни момент константан. Ипак, и у тим случајевима, карактеристика струја нема битне мане у поређењу са конвенционалним системом и код обе врсте система у овим режимима детектује се смањена ефикасност.

8.3 Прототип управљачког система

Једна од позитивних особина система за управљање мотором са 4 прекидача је велика сличност са конвенционалним системом.

Пошто је комутација иста, са изузетком фазе са кондензаторима, дигитални управљачки систем је преузет у целини од референтног решења.

Претварачка плоча представља разлику физичке реализације система за управљање у односу на конвенционални систем.

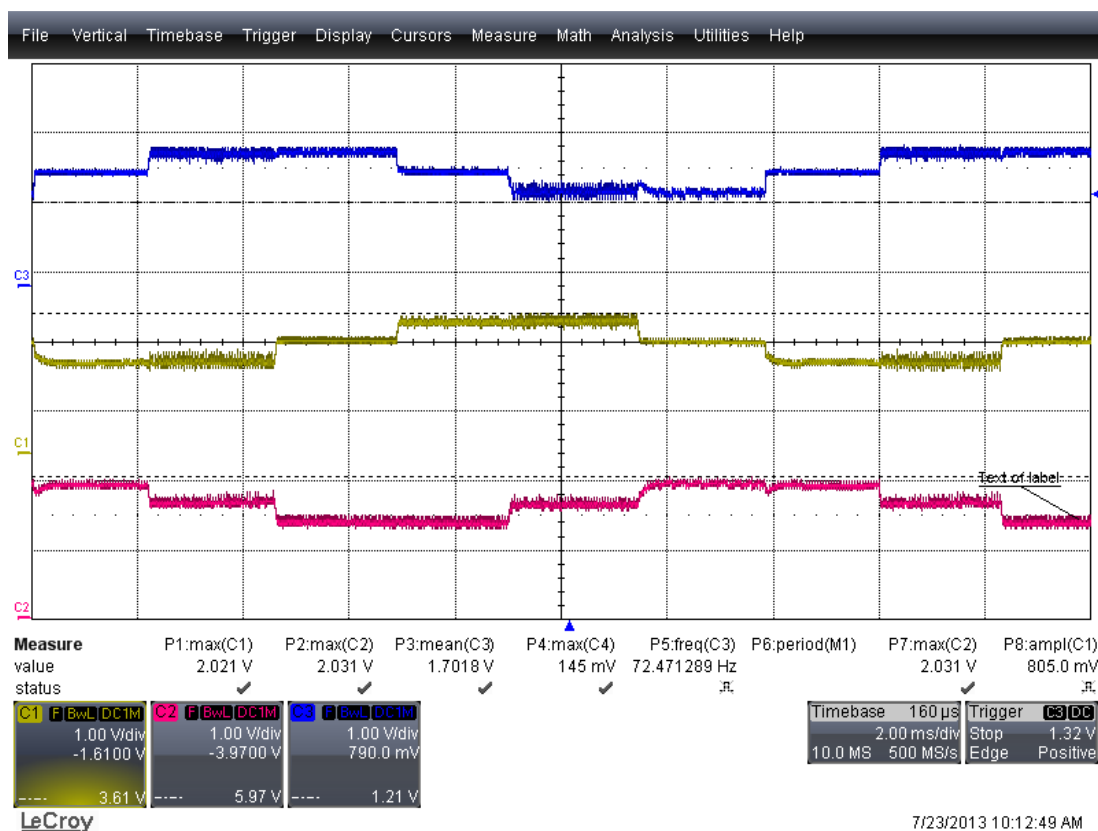
8.4 Експериментални резултати

Верификација функционалне исправности дигиталног управљачког система, извршена је уз помоћ експеримената. Експериментално окружење сачињено је повезивањем претварачке плоче са 4 прекидача и прототипске плоче. На улазе АД конвертора који су на прототипској плочи доведени су сигнали са струјних сензора.

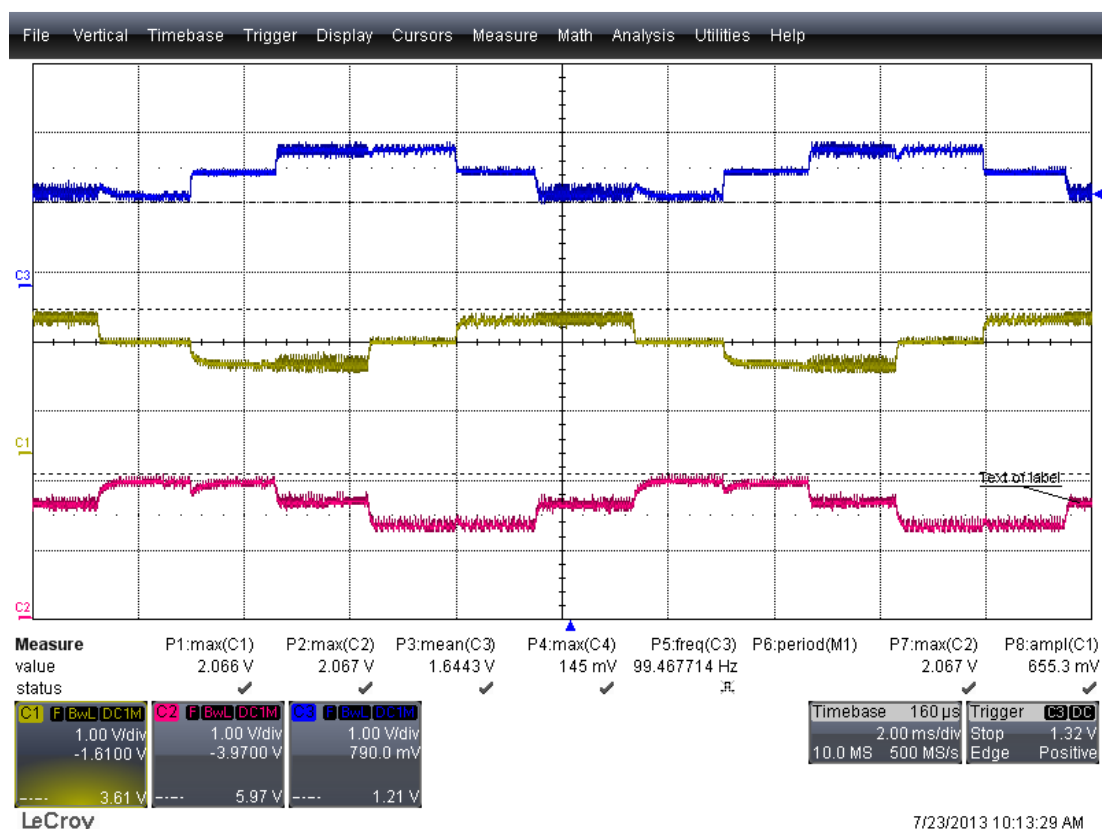
Експериментално окружење је слично као на слици 7.14 са разликом претварачке плоче која у овом случају има 4 прекидача.

Као и код експеримената везаних за конвенционални систем, коришћени ЈМБЧ је *Anaheim* BLY173s, називних вредности 70W, 3A, 4000оум. Мотор је везан у звезду. Механичко оптерећење је исто као и у експериментима са конвенционалним системом, тј. има три степена.

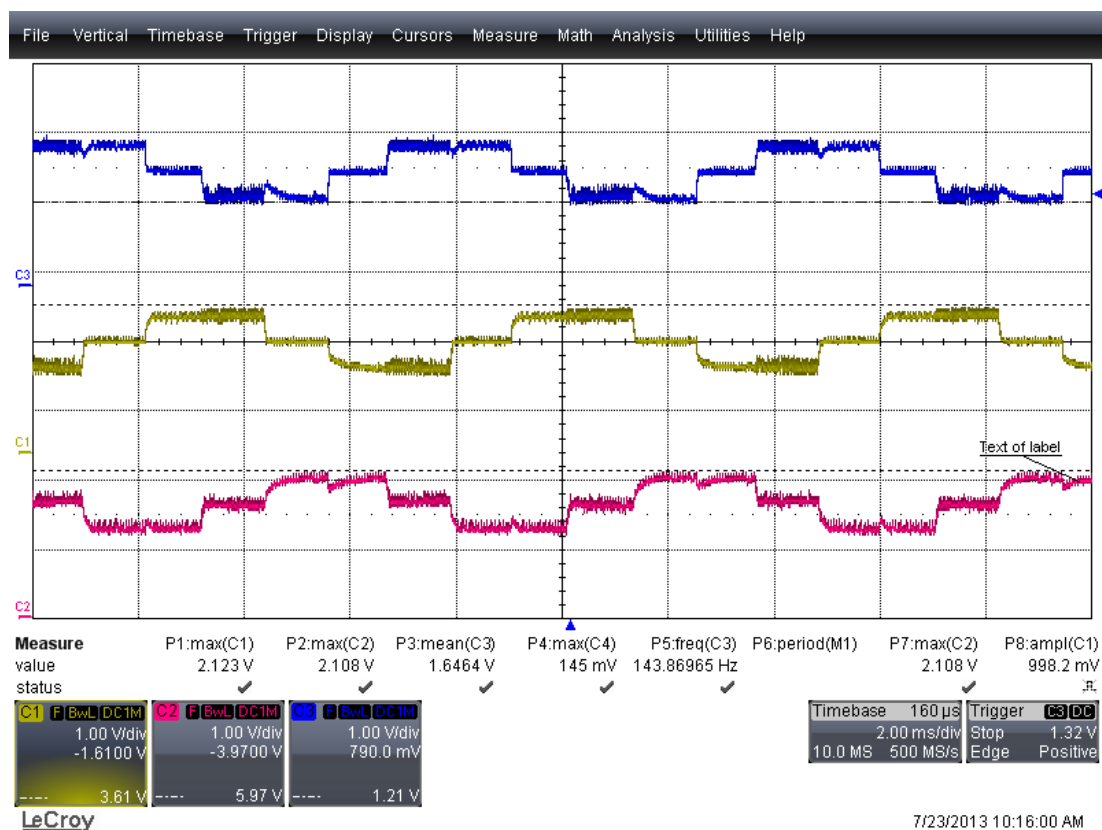
Експериментални резултати мерења струје приказани су на сликама 8.21 – 8.23. Сlike приказују карактеристике струје у три намотаја минимално оптерећеног мотора при брзини окретања ротора од 500, 750 и 1000 оум.



Слика 8.21 Резултати експеримента са струјном контролом при 500оум



Слика 8.22 Резултати експеримента са струјном контролом при 750оум



Слика 8.23 Резултати експеримента са струјном контролом при 1000оум

8.5 Закључак

На основу представљених експерименталних резултата види се да је коришћењем топологије са 4 прекидача, обезбеђена карактеристика струје која је једнака карактеристикама које су представљене у литератури. На основу претходно представљене анализе може се закључити да је карактеристика обртног момента мотора такође у складу за постављеним циљевима. Управљачки део је имплементиран у ФПГА као дигитални систем, укључујући А/Д конверзију, комутацију и хистерезисну контролу.

Одступања карактеристике струје од очекиване примећене су у експериментима са већим оптерећењем и на вишим брзинама на основу чега се може закључити да пројектовани систем генерише резултате који у потпуности одговарају резултатима добијеним у симулацијама.

Резултати су још једном доказали да је направљено развојно окружење које је поуздано са аспекта моделовања и израде прототипа. Тиме је постигнут један од основних циљева овог рада, а то је развој модерног окружења за развој система управљања ЈМБЧ. Такође, платформа за израду прототипа показала је потпуну функционалност и потенцијал да служи за развој веома сложених алгоритама за управљање ЈМБЧ укључујући и алгоритме који не користе сензоре за детекцију позиције као и за различите топологије претварачког кола.

9. Закључак

Предмет научне расправе у овом раду представља истраживање ефикасних решења у области управљања једносмерним моторима без четкица, као и унаређење постојећих решења са аспекта броја компоненти у систему.

На почетку рада, у другом поглављу, направљен је преглед развоја мотора једносмерне струје кроз историју као и развој једносмерних мотора без четкица. Представљен је и развој области контроле мотора и постављени циљеви даљег рада.

У наставку, у поглављу 3, дат је преглед карактеристика ЈМБЧ. Наведени су поједини типови конструкција мотора и њихове карактеристике. Извршено је моделовање мотора које је неопходно за симулације. Представљени су основни принципи рада мотора и неке од управљачких стратегија са нагласком на оне блиске теми овог рада.

Поглавље 4 бави се прегледом досадашњих достигнућа у овој области, стручне литературе и постојећих производа на тржишту.

У поглављу 5 описано је симулационо окружење које је развијено у оквиру рада на овој тези. За мотор који је коришћен у експериментима су измерени параметри и направљен је симулациони модел. Описан је и модел претварачког кола енергетске електронике који је коришћен у симулацијама.

Поглавље 6 даје преглед реализованих компоненти физичке архитектуре. Описане су све компоненте које су имплементиране и за сваку од њих поред описа дате су и слике.

У поглављу 7 описан је референтни систем за управљање ЈМБЧ. То је систем са стандардним претварачким колом са 6 прекидача, који омогућава управљање мотором уз максималне перформансе. За такав систем дати су резултати симулације, а потом је описан прототип који је послужио за генерисање референтних резултата.

У поглављу 8 успешно је демонстрирана примена предложеног претварача са 4 прекидача уз помоћ кога је могуће веома ефикасно управљање ЈМБЧ. Приказан је метод струјне контроле којим се директно контролише и обртни момент и чија је карактеристика равна, чиме је обезбеђена максимална ефикасност мотора и уштеда енергије. Ово је описано у осмом поглављу.

Са аспекта постављених циљева у овој тези, можемо закључити да је модел погонског претварача који је касније и физички имплементиран, у потпуности дао резултате које даје и реалан претварачки систем. Прекидачке компоненте које су изабране, ИГБТ, које су спорије од коришћених МОСФЕТ компоненти, донеле су особину кашњења коју у реалном систему даје аналогни склоп за кашњење који је описан. Тиме је модел учињен веома верном сликом реалног система. Извршена је и практична реализација овог система и то у две варијанте, са 6 и са 4 прекидача.

Дигитални системи за управљање мотором који одговарају претварачким погонским колима са 6 и 4 прекидача, успешно су пројектовани коришћењем техника за развој физичке архитектуре које су усавршене на катедри за рачунарске комуникације. Функционалност је најпре испитана у симулационом окружењу, а након практичне реализације коришћењем програмабилне секвенцијалне мреже, доказана и на практичним примерима.

На крају је имплементирано експериментално окружење и прототипи система за управљање ЈМБЧ у реалном времену. Извршено је снимање струјних карактеристика, система са 6 и 4 прекидача, и анализирани су резултати.

Реализована су два система за управљање ЈМБЧ. Први корак је био, како се често у литератури назива, конвенционални систем, са претварачким колом са шест прекидача уз коришћење Холових сензора за одређивање позиције ротора и три струјна сензора за контролу обртног момента и брзине мотора. Овај систем је имплементиран из два разлога.

Први разлог је реализација окружења које ће обезбедити референтне резултате. Сама чињеница да је претварачки склоп са 6 прекидача решење које се

најчешће среће у пракси, објашњава разлог због ког је пожељно резултате које даје овакав систем користити као референтне.

Други разлог је потреба да се у развој једног, у литератури новог решења, крене са једним релативно једноставнијим решењем, са циљем да се у првобитном решењу уоче и отклоне сви евентуални недостаци у пројектовању физичке архитектуре као неопходне инфраструктуре за креирање прототипа.

Након реализације конвенционалног система, други корак је представљао покушај да се са смањеним бројем прекидача у колу претварача постигну перформансе једнаке оним из првог корака. Многобројни академски радови објављени на ову тему су били инспирација да се изврши практична реализација и направи прототип дигиталног управљачког кола. У академској јавности нема пуно сличних примера, углавном је реч о испитивању концепта на нивоу симулације.

Овај систем, осим четири уместо шест прекидача у претварачком колу, још користи, исто као и претходни, Холове сензоре за детекцију позиције ротора и два струјна сензора.

Пројектовањем физичке архитектуре која је прототип решења за управљање ЈМБЧ, направљен је корак ка реализацији наменског интегрисаног кола, па резултати до којих се дошло у овој тези могу послужити за анализу и у индустрији при пројектовању комерцијалних решења.

Лабораторијско развојно окружење са прототипом управљачког система намењеног погону ЈМБЧ представља најзначајнији допринос овог рада. То окружење представља савремену модуларну истраживачку платформу погодну за развој различитих алгоритама управљања погоном мотора, међу којима су алгоритми засновани на управљању без коришћења сензора као и различите топологије са 6 или 4 прекидача.

10. Литература

- [1] Vladimir Kovačević, *Logičko projektovanje računarskih sistema I –projektovanje digitalnih sistema*, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet Tehničkih Nauka, 2001
- [2] Директива европске уније, *DIRECTIVE 2012/27/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 25 October 2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC*
- [3] Tobias Fleiter, Wolfgang Eichhammer, Joachim Schleich, *Energy efficiency in electric motor systems: Technical potentials and policy approaches for developing countries*, development policy, Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research Karlsruhe, United nations, industrial development organization, UNIDO 2011.
- [4] Paul Waide and Conrad U. Brunner, *Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems*, International Energy Agency
- [5] T.G. Wilson, P.H. Trickey, *DC Machine with Solid State Commutation*, AIEE paper, Oct 7, 1962
- [6] Application of brushless DC drives for blow molding – <http://powertecmotors.com/ablowe2.pdf>
- [7] Brown, Ward, *Brushless DC Motor Control Made Easy*, Microchip Application Notes – AN857 Microchip Technology Inc., 2002

-
- [8] El-Sharkawi, A Mohamed: *Fundamentals of Motor Drives*, Brooks/Cole Publishing Company, 2000.
- [9] Hendershot, J. R., and Miller, T., *Design of Brushless Permanent Magnet Motors*, Magna Physics and Oxford Science Publications, 1994.
- [10] R. Krishnan, *Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives*, CRC Press 2009
- [11] Bogdan Maciej Wilamowski, J. David Irwin, *The Industrial Electronics Handbook: Power electronics and motor drives*, Taylor & Francis Group, 2011
- [12] Mevey, James Robert, *Sensorless field oriented control of brushless permanent magnet synchronous motors*, мастер теза, Kansas State University, 2006
- [13] P. Pillay, *Modeling, simulation and analysis of permanent magnet synchronous and brushless dc motor drives*, doktorska disertacija, Blacksburg, Virginia, 1987
- [14] F. Rodriguez, *Advanced digital control techniques for brushless DC (BLDC) motor drives*, doktorska disertacija, Chicago, Illinois, 2006. страна 41.
- [15] A. Sathyan, *Digital PWM control of brushless DC (BLDC) motor drives*, doktorska disertacija, Chicago, Illinois, 2008. страна 22.
- [16] R. Krishnan, *Electric Motor Drives: Modeling, Analysis, and Control*, Prentice Hall 2001
- [17] J. P. Johnson, M. Ehsani and Y. Giizelgiinler, *Review of sensorless methods for brushless DC*, in Proc. IEEE Ind. Appl. Conf., Vol. 1, pp. 143-150, 1999.
- [18] T. H. Kim, H. W. Lee and M. Ehsani, *State of the art and future trends in position sensorless brushless DC motor/generator drives*, in Proc. IEEE Industrial Electronics Society Conf., pp. 1718-1725, 2005.
- [19] D. Montesinos, S. Galceran, F. Blaabjerg, A. Sudria and O. Gomis, *Sensorless control of PM synchronous motors and brushless DC motors - an overview and*

- evaluation*, in Proc. European Conf. Power Electronics and Applications, pp. 1-10, 2005.
- [20] P. P. Acarnley and J. F. Watson, *Review of position sensorless operation of brushless permanent magnet machines*, IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 53, No. 2, pp. 352-361, April 2006.
- [21] N. Matsui, *Sensorless PM brushless DC motor drive*, IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 43, No. 2, pp. 300-308, April 1996.
- [22] Y. Liu, Z. Q. Zhu and D. Howe, *Instantaneous torque estimation in sensorless direct-torque-controlled brushless DC motors*, IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 42, No. 5, pp. 1275-1283, Sep.-Oct., 2006.
- [23] B. G. Park, T.S.Kim, J.S. Ryu and D.S. Hyun, *Fuzzy back-EMF observer for improving performance of sensorless brushless DC motor drive*, in Proc. Applied Power Electronics Conf. and Expo., pp. 674-678, 2006.
- [24] M. Kumar, B. Singh and B.P. Singh, *Reversible permanent magnet brushless dc motor drive without mechanical sensors*, International Journal of Power and Energy Systems, Vol. 27, No. 4, pp. 346-352, 2007.
- [25] Ahfock A. and Gambetta D., '*Technique for Sensorless Commutation of Brushless DC Motors* ', Swiss Institute of Intellectual Property, Bern, Patent Application Number 00342/05, 2005.
- [26] Gambetta D., '*Sensorless Technique for BLDC Motors*', MPhil Dissertation, University of Southern Queensland, Australia, 2006
- [27] L. Kreindler, et al., *Direct field orientation controller using the stator phase voltage third harmonic*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 30, no. 2, pp. 441-447, Mar./Apr. 1994.
- [28] J. Holtz, *Sensorless control of induction motor drives*, Proceedings of the IEEE, vol. 90, no. 8, pp. 1359-1394, Aug. 2002.

-
- [29] J. Holtz, *Speed estimation and sensorless control of AC drives*, Proceedings of the International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, 1993, vol. 2, pp. 649-654.
- [30] M.J. Corley, R.D. Lorenz, *Rotor position and velocity estimation for a permanent magnet synchronous machine at standstill and high speeds*, Conference Record of the IEEE Industry Applications Conference Annual Meeting, 1996, pp. 36-41.
- [31] J. Holtz, *Sensorless control of induction machines—with or without signal injection?* IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 53, no. 1, pp. 7-30, Feb. 2006.
- [32] M. Linke, R. Kennel, J. Holtz, *Sensorless speed and position control of synchronous machines using alternating carrier injection*, Conference Record of the IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 2003, vol. 2, pp. 1211-1217.
- [33] H. Kim, R.D. Lorenz, *Carrier signal injection based sensorless control methods for IPM synchronous machine drives*, Conference Record of the IEEE Industry Applications Annual Meeting, 2004, vol. 2, pp. 977-984.
- [34] P.P. Acarnley, J.F. Watson, *Review of position-sensorless operation of brushless permanent-magnet machines*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 53, no. 2, pp. 352-362, Apr. 2006.
- [35] C. B. Jacobina, E. R. C. da Silva, A. M. N. Lima, and R. L. A. Ribeiro, *Vector and scalar control of a four switch three phase inverter,* in Proc. IEEE Ind. Appl. Conf., 1995, vol. 3, pp. 2422–2429.
- [36] J.-H. Lee, S.-C. Ahn, and D.-S. Hyun, *A BLDCM drive with trapezoidal back EMF using four-switch three phase inverter*, in Proc. IEEE Ind. Appl., 2000, vol. 3, pp. 1705–1709.
- [37] M. Azab and A. L. Orille, *Novel flux and torque control of induction motor drive using four switch three phase inverter*, in Proc. IEEE Annu. Conf. Ind. Electron. Soc., 2001, vol. 2, pp. 1268–1273.

-
- [38] Z. J. Jiang, D. G. Xu, and F. P. Wang, *An improved development of four-switch low cost inverter on voltage equilibrium with magnetic flux control method*, in Proc. IEEE Elect. Mach. Syst. Conf., 2003, vol. 1, pp. 379–382.
- [39] S.-H. Park, T.-S. Kim, S.-C. Ahn, and D.-S. Hyun, *A simple current control algorithm for torque ripple reduction of brushless DC motor using four-switch three-phase inverter*, in Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf., 2003, vol. 2, pp. 574–579.
- [40] B.-K. Lee, T.-H. Kim, and M. Ehsani, *On the feasibility of four-switch three-phase BLDC motor drives for low cost commercial applications: Topology and control*, IEEE Trans. Power Electron., vol. 8, no. 1, pt. 1, pp. 164–172, Jan. 2003.
- [41] Z. Jiang, D. Xu, and Z. Xiangjuan, *A study of the four-switch low cost inverter that uses the magnetic flux control method*, in Proc. IEEE Power Electron. Motion Control Conf., 2004, vol. 3, pp. 1368–1371.
- [42] Q. Fu, H. Lin, and H. T. Zhang, *Single-current-sensor sliding mode driving strategy for four-switch three-phase brushless DC motor*, in Proc. IEEE Ind. Technol. Conf., 2006, pp. 2396–2401.
- [43] M. Beltrao de Rossiter Correa, C. B. Jacobina, E. R. C. da Silva, A. M. N. Lima, and R. L. A. Ribeiro, *A general PWM strategy for Four-Switch Three-Phase Inverters*, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 21, issue 6, pp. 1618–1627, Nov. 2006.
- [44] S. B. Ozturk, W. C. Alexander, and H. A. Toliyat, *Direct torque control of four-switch brushless DC motor with non-sinusoidal back-EMF*, Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE , vol., no., pp.4730,4736, 15-19 June 2008
- [45] F. Rodriguez, A. Emadi, *A Novel Digital Control Technique for Brushless DC Motor Drives*, IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 54, no. 5, pp. 2365-2373, Oct 2007.

-
- [46] C. T. Lin , C. W. Hung and C. W. Liu, *Position sensorless control for four-switch three-phase brushless DC motor drives*, IEEE Trans. Power Electron., vol. 23, no. 1, pp.438 – 444 2008
- [47] Halvaei Niasar, H. Moghbelli and A. Vahedi, *A Novel Position Sensorless Control of Four-Switch, Brushless DC Motor Drive without Phase Shifter*, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 23, No. 6, November 2008, pp 3079 - 3087.
- [48] C. Xia , Z. Li and T. Shi *A control strategy for four-switch three-phase brushless dc motor using single current sensor*, IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 56, no. 6, pp.2058 -2066 2009
- [49] S. B. Ozturk, W. C. Alexander, and H. A. Toliyat, *Direct Torque Control of Four-Switch Brushless DC Motor With Non-Sinusoidal Back EMF*, IEEE Transaction on Power Electronicd, vol. 25, no. 2, pp.263 – 271 2010
- [50] M. Ebadpour, M.B.B. Sharifian, M.R. Feyzi, *A Simple position sensorless control strategy for four-switch three-phase brushless DC motor drives using single current sensor*, Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC), 2011 2nd, vol., no., pp.235,240, 16-17 Feb. 2011.
- [51] <http://www.ti.com/lit/an/sprabn7/sprabn7.pdf>, спецификација произвођача
- [52] <http://www.ti.com/lit/ug/spruhj1a/spruhj1a.pdf>, спецификација произвођача
- [53] <http://cache.freescale.com/files/product/doc/AN1916.pdf?fsrch=1&sr=1>, спецификација произвођача
- [54] <https://www.silabs.com/Support%20Documents/TechnicalDocs/C8051F31x.pdf>, спецификација произвођача
- [55] http://www.nxp.com/documents/data_sheet/LPC2926_27_29.pdf, спецификација произвођача
- [56] <http://www.nxp.com/demoboard/OM11025.html>, развојна платформа за LPC292x

-
- [57] http://www.actel.com/documents/A2F_EVAL_KIT_QS.PDF, спецификација произвођача
- [58] http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/user_manual/CD00236528.pdf, спецификација произвођача
- [59] <http://www.fairchildsemi.com/ds/FC/FCM8531.pdf>, спецификација произвођача
- [60] http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/data_brief/DM00036674.pdf, спецификација произвођача
- [61] <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/CD00002347.pdf>, спецификација произвођача
- [62] <http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/CD00287681.pdf>, спецификација произвођача
- [63] http://www.toshiba-components.com/motorcontrol/pdfs/ANs/Apli%20NoteTB6575FNG_20080325%29_E.pdf, спецификација произвођача
- [64] M. Katona, *Jedan pristup odabiru optimalne arhitekture za realizaciju algoritama digitalne obrade video signala*, doktorska disertacija, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet Tehničkih Nauka, 2007
- [65] N. Milivojevic, *Digital control of pm brushless dc machines in generating mode*, doktorska disertacija, Department of electrical and computer enegineering, Illinois Institute of Technology, 2010