



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ  
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА У  
НОВОМ САДУ

---




Вељко Мајсторовић

**Једно решење универзалне  
платформе физичке архитектуре за  
векторско управљање електричним  
моторима без сензора позиције**

МАСТЕР РАД

Нови Сад, 2013

	УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ • ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА 21000 НОВИ САД, Трг Доситеја Обрадовића 6	Број:
	<b>ЗАДАТАК ЗА МАСТЕР РАД</b>	

(Податке уноси предметни наставник - ментор)

СТУДИЈСКИ ПРОГРАМ:	Енергетика електроника и телекомуникације
РУКОВОДИЛАЦ СТУДИЈСКОГ ПРОГРАМА:	Др Стеван Градић

Студент:	Вељко Мајсторовић	Број индекса:	Е 10808
Област:	Пројектовање физичке архитектуре		
Ментор:	Др Небојша Пјевалица		

НА ОСНОВУ ПОДНЕТЕ ПРИЈАВЕ, ПРИЛОЖЕНЕ ДОКУМЕНТАЦИЈЕ И ОДРЕДБИ СТАТУТА ФАКУЛТЕТА ИЗДАЈЕ СЕ ЗАДАТАК ЗА МАСТЕР РАД, СА СЛЕДЕЋИМ ЕЛЕМЕНТИМА:

- проблем – тема рада;
- начин решавања проблема и начин практичне провере резултата рада, ако је таква провера неопходна;

### НАСЛОВ МАСТЕР РАДА:

Једно решење универзалне платформе физичке архитектуре за векторско управљање електричним моторима без сензора позиције

### ТЕКСТ ЗАДАТКА:

Потребно је пројектовати универзалну платформу физичке архитектуре која ће омогућити управљање електричним наизменичним моторима санге до 500W.

На платформи је потребно поставити сензоре који ће давати информацију о вредности струје, изабрати одговарајуће полупроводничке компоненте које ће формирати трофазни инвертор и омогућити спрегу са постојећом управљачком платформом на којој се врши аналогно дигитална конверзија.

Пројектовану платформу потребно је након пројектовања изградити, активирати, верификовати и укључити у постојећи аквизициони систем базиран на програмабилној логици

Руководилац студијског програма:	Ментор рада:

Примерак за: О - Студента; О - Ментора



UNIVERSITY OF NOVI SAD • FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES  
21000 NOVI SAD, Trg Dositeja Obradovića 6

## KEY WORDS DOCUMENTATION

Редни број, <b>РБР:</b>		
Идентификациони број, <b>ИБР:</b>		
Тип документације, <b>ТД:</b>	Монографска документација	
Тип записа, <b>ТЗ:</b>	Текстуални штампани материјал	
Врста рада, <b>ВР:</b>	Дипломски – мастер рад	
Аутор, <b>АУ:</b>	Вељко Мајсторовић	
Ментор, <b>МН:</b>	Др Небојша Пјевалица	
Наслов рада, <b>НР:</b>	Једно решење универзалне платформе физичке архитектуре за векторско управљање електричним моторима без сензора позиције	
Језик публикације, <b>ЈП:</b>	Српски / латиница	
Језик извода, <b>ЈИ:</b>	Српски	
Земља публиковања, <b>ЗП:</b>	Република Србија	
Уже географско подручје, <b>УГП:</b>	Војводина	
Година, <b>ГО:</b>	2013	
Издавач, <b>ИЗ:</b>	Ауторски репринт	
Место и адреса, <b>МА:</b>	Нови Сад; трг Доситеја Обрадовића 6	
Физички опис рада, <b>ФО:</b> (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	8/39/0/2/22/0/0	
Научна област, <b>НО:</b>	Електротехника и рачунарство	
Научна дисциплина, <b>НД:</b>	Рачунарска техника	
Предметна одредница/Кључне речи, <b>ПО:</b>	Impulsno širinska modulacija, fizička arhitektura, PMSM	
<b>УДК</b>		
Чува се, <b>ЧУ:</b>	У библиотеци Факултета техничких наука, Нови Сад	
Важна напомена, <b>ВН:</b>		
Извод, <b>ИЗ:</b>	Rad opisuje fizičku arhitekturu i osnovne tehnike Impulsno širinske modulacije za upravljanje elektromotorima. Osim toga opisan je celokupni sistem za kontrolu brzine elektromotora i načini zaštite od strujnog preopterećenja. Predstavljene su osnovne tehnike merenja napona i struje, kao i najčešće korišćeni strujni senzori. U radu je dat osvrt na trenutno najviše korišćene elektromotore tj. sinhronne motore sa permanentnim magnetima kao i njihove osnovne prednosti.	
Датум прихватања теме, <b>ДП:</b>		
Датум одбране, <b>ДО:</b>	25.11.2013	
Чланови комисије, <b>КО:</b>	Председник: Др Никола Теслић	
	Члан: Др Јелена Ковачевић, Др Милош Сланкаменац	Потпис ментора
	Члан, ментор: Др Небојша Пјевалица	



UNIVERSITY OF NOVI SAD • FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES  
21000 NOVI SAD, Trg Dositeja Obradovića 6

## KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, <b>ANO</b> :	
Identification number, <b>INO</b> :	
Document type, <b>DT</b> :	Monographic publication
Type of record, <b>TR</b> :	Textual printed material
Contents code, <b>CC</b> :	Master Thesis
Author, <b>AU</b> :	Вељко Мајсторовић
Mentor, <b>MN</b> :	Небојша Пјевалица, PhD
Title, <b>TI</b> :	One solution physical architecture universal platform for the vector controlling of electrical motors without position sensor
Language of text, <b>LT</b> :	Serbian
Language of abstract, <b>LA</b> :	Serbian
Country of publication, <b>CP</b> :	Republic of Serbia
Locality of publication, <b>LP</b> :	Vojvodina
Publication year, <b>PY</b> :	2013
Publisher, <b>PB</b> :	Author's reprint
Publication place, <b>PP</b> :	Novi Sad, Dositeja Obradovica sq. 6
Physical description, <b>PD</b> : <small>(chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)</small>	8/39/0/2/22/0/0
Scientific field, <b>SF</b> :	Electrical Engineering
Scientific discipline, <b>SD</b> :	Computer Engineering, Engineering of Computer Based Systems
Subject/Key words, <b>S/KW</b> :	Pulse width modulation, Physical architecture, PMSM
<b>UC</b>	
Holding data, <b>HD</b> :	The Library of Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, Serbia
Note, <b>N</b> :	
Abstract, <b>AB</b> :	This work describes the physical architecture and the basic techniques of pulse width modulation for motor control. In addition, the entire system for controlling the speed of electric motor is described and ways to protect system from current overload. Also, the basic techniques of measuring voltage and current are presented, and the most commonly used current sensors. This work gives an overview of synchronous motors with permanent magnets, which are currently most used due to their main advantages.
Accepted by the Scientific Board on, <b>ASB</b> :	
Defended on, <b>DE</b> :	25.11.2013
Defended Board, <b>DB</b> :	President: Nikola Teslić, PhD
Member:	Jelena Kovačević, PhD Miloš Slankamenac, PhD
Member, Mentor:	Nebojša Pjevalica, PhD
	Mentor's sign

**SADRŽAJ**

1. Uvod.....	1
2. Sinhroni motori sa permanentnim magnetima (PMSM).....	3
3. Načini upravljanja motorima.....	5
3.1 Polumostni i mostni naponski inverter.....	6
3.2 Trofazni naponski inverter.....	8
3.3 Sinusna Impulsno širinska modulacija (SPWM).....	10
3.4 Impulsno širinska modulacija upravljana prostornim vektorom (SVPWM).....	11
4. Kontrola upravljanja motorima.....	14
4.1 Kontrolne petlje.....	16
4.1.1 Kontrola sa otvorenom petljom.....	16
4.1.2 Kontrola sa zatvorenom petljom.....	16
4.1.3 Kontrola sa kaskadnom zatvorenom petljom.....	17
4.2 Vektorska kontrola.....	18
4.3 Značaj strujne povratne sprege.....	20
5. Tehnike merenja napona i struje.....	21
5.1 Tehnike merenja napona.....	22
5.2 Tehnike merenja struje.....	23
5.2.1 Šant.....	23
5.2.2 Strujni transformator.....	24
5.2.3 Holog senzor.....	25
5.2.4 Optički senzor.....	26
6. Projektovanje i izrada štampane ploče.....	27
6.1 Postavljeni zahtevi.....	27
6.1.1 Izbor mernih rešenja.....	28
6.1.2 Izbor MOSFET-ova i kontrolnih kola.....	29
6.2 Razvijanje šeme po blokovima.....	30
6.2.1 ISO722.....	31
6.2.2 FAN7842.....	31
6.2.3 Merenje napona i struje.....	32
6.2.4 Detekcija prekoračenja struje.....	33

---

6.3	Projektovanje štampane ploče .....	33
6.3.1	Savremeni alati za projektovanje i simulaciju štampanih ploča .....	34
6.3.2	Informacije potrebne za početak procesa projektovanja.....	34
6.3.3	Izrada štampane ploče.....	36
6.4	Verifikacija štampane ploče .....	37
6.4.1	Kvalitet merenja signala sa šanta.....	38
6.4.2	Funkcionalna verifikacija .....	40
7.	Zaključak.....	41
8.	Literatura .....	42

**SPISAK SLIKA**

Slika 2.1 Poperčni presek sinhronog motora sa permanentnim magnetima .....	3
Slika 3.1 (a) Polumostni inverter (b) Izlazni oblici napona i struje .....	6
Slika 3.2 (a) Mostni inverter (b) Izlazni oblici napona i struje .....	7
Slika 3.3 Trofazni polumostni inverter .....	8
Slika 3.4 Izlazni naponi trofaznog invertora u pravougaonom režimu .....	9
Slika 3.5 SPWM signal za trofazni inverter .....	10
Slika 3.6 Dijagram prostornih vektora napona .....	12
Slika 3.7 Primer sekvence uključivanja prekidača u prvom sektoru .....	13
Slika 4.1 Struktura sistema za upravljanje AC motorima .....	14
Slika 4.2 Blok dijagram VSD sistema sa zatvorenom petljom .....	16
Slika 4.3 Kaskadni kontroler brzine i obrtnog momenta .....	18
Slika 4.4 Uprošćena ekvivalentna šema asinhronog motora .....	18
Slika 4.5 Strujni vektori na asinhronom motoru .....	19
Slika 5.1 Tipična realizacija šanta .....	24
Slika 5.2 Principijalna šema transformatora .....	25
Slika 5.3 Ilustracija Holovog efekta .....	26
Slika 6.1 Oblasti primene poluprovodničkih prekidačkih elemenata .....	29
Slika 6.2 Blok šema štampane ploče .....	30
Slika 6.3 Funkcijski dijagram integrisanog kola ISO722 .....	31
Slika 6.4 Arhitektura gejt drajvera FAN7842 .....	32
Slika 6.5 Poprečni presek štampane ploče .....	35
Slika 6.6 3D model štampane ploče .....	37
Slika 6.7 Segment PWM ciklusa i topologija protoka struje .....	38
Slika 6.8 (a) Simulacija signala sa šanta (b) Signal na izlazu diferencijalnog pojačavača ..	39
Slika 6.9 Celokupni upravljački sistem .....	40

## **SPISAK TABELA**

Tabela 3.1 Diskretne vrednosti napona za sva moguća prekidačka stanja.....	12
Tabela 5.1 Klasifikacija voltmetra .....	22



**SPISAK SKRAĆENICA**

<b>AC</b>	- <i>Alternating Current</i> , Naizmenična veličina
<b>DC</b>	- <i>Direct Current</i> , Jednosmerna veličina
<b>PMSM</b>	- <i>Permanent Magnet Synchronous Motor</i> , Sinhroni motor sa permanentnim magnetima
<b>VSI</b>	- <i>Voltage Source Inverter</i> , Naponski inverter
<b>CSI</b>	- <i>Current Source Inverter</i> , Strujni inverter
<b>PWM</b>	- <i>Pulse Width Modulation</i> , Impulsno širinska modulacija
<b>SPWM</b>	- <i>Sinusoidal PWM</i> , Sinusna PWM tehnika
<b>SVPWM</b>	- <i>Space Vector PWM</i> , PWM tehnika modulacije prostornim vektorom
<b>VSD</b>	- <i>Variable Speed Driver</i> , Pogoni sa promenljivom brzinom
<b>VVVF</b>	- <i>Variable Speed Variable Frequency</i>
<b>ADC</b>	- <i>Analog-to-Digital Converter</i> , Analogno digitalni konvertor
<b>DAC</b>	- <i>Digital-to-Analog Converter</i> , Digitalno analogni konvertor
<b>SCR</b>	- <i>Silicon Controlled Rectifier</i>
<b>GTO</b>	- <i>Gate Turnoff Thyristor</i>
<b>FCT</b>	- <i>Field Controlled Thyristor</i> , Tiristor upravljiv poljem
<b>BJT</b>	- <i>Bipolar Junction Transistor</i> , Bipolarni tranzistor
<b>FET</b>	- <i>Field Effect Transistor</i> , Tranzistor sa efektom polja
<b>IGBT</b>	- <i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i> , Bipolarni tranzistor sa izolovanom upravljačkom elektrodom
<b>MOSFET</b>	- <i>Metal-oxide Field Effect Transistor</i>
<b>ULVO</b>	- <i>Undervoltage-Lockout</i>

## 1.Uvod

Električne mašine koje vrše pretvaranje električne energije u mehanički rad nazivaju se elektomotorima. Mehanički rad se najčešće javlja u vidu obrtnog kretanja, mada se može pojaviti i u translatorskom obliku. Elektromotori imaju široku primenu u industriji, saobraćaju i domaćinstvima. U zavisnosti od oblasti primene koriste se različite vrste elektromotora.

Na osnovu struje koju koriste elektromotori se dele na motore jednosmerne (*DC*) i motore naizmjenične (*AC*) struje. U daljem delu teksta prikazani su princip rada, primene, prednosti i nedostaci osnovnih vrsta elektromotora.

Motori jednosmerne struje se mogu podeliti na:

- Jednosmerni motori sa četkicama
- Jednosmerni motori bez četkica
- Koračni motori

Elektromotor jednosmerne struje možemo posmatrati kao uređaj kome na ulaz dovodimo pobudu u vidu električnog napona kojim upravljamo radom kola. Dobra osobina motora jednosmerne struje pre svega je u tome što se s njim lako upravlja menjanjem napona napajanja. Primenjuje se u oblastima gde se zahtevaju precizna kretanja (npr. pomoćna kretanja alata na strugu). Osnovni nedostatak je problem komutacije. Kod motora sa mehaničkim komutatorom dolazi do varničenja, koje je posledica velike brzine i velike vrednosti struja, što dovodi do trošenja četkica. Ovi nedostaci se prevazilaze elektronskom komutacijom.

Koračni (*step*) motori spadaju u specifičnu vrstu elektromotora. Naziv su dobili zbog toga što se kreću koristeći impulsnu pobudu, praveći niz diskretnih ugaonih pomeraja. Broj koraka jednak je broju upravljačkih impulsa. Upravljanje se vrši preko mikrokontrolera, a primenjuje se u oblastima gde je potrebno precizno pozicioniranje (roboti, štampači, ploteri itd.). Glavne prednosti koračnih motora su niska cena, male dimenzije, ponovljivost pokreta i mogu se realizovati za široko područje raspoloživih brzina, jer je brzina proporcionalna učestanosti ulaznih impulsa.

Motori naizmjenične struje mogu biti:

- Sinhroni motori
- Asinhroni (indukcioni) motori

Sinhroni motori imaju konstantnu brzinu koja ne zavisi od mehaničkog momenta, već isključivo zavisi od učestanosti napajanja i broja pari polova, odnosno brzina obrtanja zavisi od brzine obrtnog magnetnog polja statora. Glavni nedostatak je puštanje u rad. Naime, sinhroni motor ne može sam da krene, a razlog tome je što je brzina obrtnog polja statora velika, tako da polovi magnetnog polja rotora, zbog inercije rotora i opterećenja na osovini motora, ne mogu da prate magnetno polje statora. Jedan od načina puštanja sinhronog motora

u rad je smanjenje frekvencije napona kojim se napaja stator motora korišćenjem pretvarača sa visokom prekidačkom učestanošću.

Asinhroni motor je najvažniji pogonski motor u industriji i drugim primenama u pogonima konstantne brzine. Osnovni uzroci tome su njihova sigurnost u pogonu, jednostavnost konstrukcije kao i pristupačna cena. Međutim, sa razvojem energetske elektronike poslednjih decenija, pre svega invertora sa poluprovodničkim prekidačima: mosfetovima, tiristorima i snažnim tranzistorima, ovaj motor jednostavne konstrukcije počinje da osvaja i polja gde su dominirali motori za jednosmernu struju – pogone sa promenljivom brzinom. Šta više, uvođenjem mikrokontrolera poslednjih godina u regulacioni deo pogona, kojim se omogućava da se uz ne velike dodatne troškove postigne izvođenje i veoma složenih algoritama upravljanja, pogoni sa asinhronim motorima, postaju konkurentni pogonima za jednosmernu struju. U zavisnosti konstrukcije asinhroni motori mogu biti trofazni i monofazni [1].

U narednim poglavljima detaljnije je opisan princip upravljanja asinhronim i sinhronim motorom sa permanentnim magnetima, načini kontrole, zatim metode merenja napona i struje i dat je fizički izgled štampane ploče koja se koristi za pogonsko upravljanje motorom.

Rad je podeljen u sedam poglavlja:

- U drugom poglavlju prikazan je sinhroni motor sa permanentim magnetima i njegove osnovne prednosti u odnosu na asinhronne motore
- U trećem poglavlju opisani su osnovni načini upravljanja AC motorima
- U četvrtom poglavlju predstavljene su postupci kontrole motora
- U petom poglavlju ukratko su opisane tehnike merenja napona i struje
- U šestom poglavlju prikazani su projektovanje i izrada štampane ploče
- U sedmom poglavlju dat je zaključak

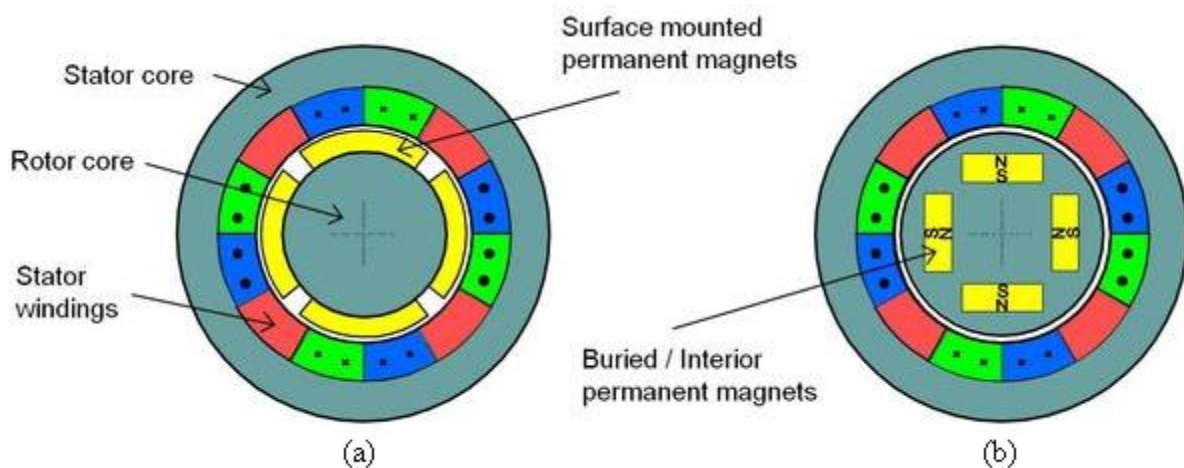
## 2. Sinhroni motori sa permanentnim magnetima (PMSM)

Motori naizmenične struje predstavljaju najviše korišćene vrste motora u savremenim aplikacijama. Poslednjih decenija asinhroni motor je prednjačio po masovnosti upotrebe, a poslednjih godina znatno se povećala upotreba sinhronih motora sa permanentnim magnetima na rotoru (PMSM). Razlog tome je pronalazak kvalitetnih magnetskih materijala sa visokim energetskim produktom, odnosno maksimumom proizvoda između magnetskog polja i magnetne indukcije (materijali na bazi retkih zemalja). Upotrebom permanentnih magneta dobijaju se visoko efikasne mašine sa izuzetno velikom specifičnom snagom. Razlog je taj što se ne koristi električno kolo za pobudu. Samim tim nema ni električnih gubitaka u tom kolu, a pošto se materijali za izradu permanentnih magneta odlikuju malom specifičnom provodnošću nema ni gubitaka usled vrtložnih struja.

Sinhroni motori sa permanentnim magnetima su jednostavne konstrukcije, a na osnovu položaja magneta na rotoru dele se na:

- Sinhroni motori sa površinskim permanentnim magnetima
- Sinhroni motori sa unutrašnjim permanentnim magnetima

Kod motora sa površinski montiranim permanentnim magnetima, magneti se pomoću specijalnih epoksidnih lepila pričvršćuju, neposredno duž statora, na samu površinu rotora u za to predviđeni prostor. Orijentacija stalnih magneta je takva da se formira rotorska pobuda u određenom smeru. Konstrukcijski problem kod rotora sa površinski montiranim permanentnim magnetima jeste mehanička čvrstoća za rad na velikim brzinama. Na slici 2.1(a) prikazan je poprečni presek PMSM sa površinskim permanentnim magnetima.



**Slika 2.1** (a) PMSM sa površinski montiranim permanentnim magnetima  
(b) PMSM sa unutrašnjim permanentnim magnetima

Druga vrsta ugradnje magneta je tzv. unutrašnja, kod koje se permanentni magneti ugrađuju u prazan prostor ostavljen u telu rotora. Statorski fluks sada nailazi na magnetni

materijal, a ne na permanentni magnet, pa se širina zazora ne povećava njihovom montažom. Magneti ovde takođe formiraju neko pobudno polje čija je prostorna orijentacija određena položajem rotora. Zahvaljujući postojanju feromagnetnog materijala i magnetne isturenosti, odnosno reluktantnog fluksa, moguće je ostvariti režim konstantne snage u širokom opsegu. Na slici 2.1(b) prikazan je poprečni presek PSMS sa unutrašnjim permanentnim magnetima [2].

Osnovne prednosti PMSM u odnosu na asinhronne motore su:

- Bolji stepen iskorišćenja, jer ne postoje gubici na rotoru
- Veći faktor snage
- Ima manji moment inercije, a time i bolje dinamičke karakteristike
- Mehanički moment koji ne zavisi od opterećenja već isključivo od učestanosti napajanja i broja pari polova
- Izvedba vektorskog upravljanja je znatno jednostavnija, jer je položaj vektora magnetnog polja čvrsto vezan za položaj rotora

### 3. Načini upravljanja AC motorima

Jedan od načina upravljanja AC motorima je korišćenje invertora. Invertori su sistemi energetske elektronike koji jednosmerni napon ili struju pretvaraju u naizmenični napon ili struju. U zavisnosti od načina rada i izvora iz kojih se napajaju invertori mogu biti naponski (*VSI – Voltage Source Inverter*) i strujni (*CSI - Current Source Inverter*). Naponski invertori omogućavaju promenu učestanosti napona kojim se napaja motor, dok se promena efektivne vrednosti napona vrši preko regulisanog ispravljača ili najčešće primenom neke od tehnika impulsno širinske modulacije. Analogno tome, ako se koristi strujni inverter, njime se može podešavati učestanost struje, dok se za podešavanje efektivne vrednosti struje mora koristiti regulisani ispravljač ili neka od tehnika impulsno širinske modulacije. Prema algoritmu upravljanja prekidačima invertori mogu biti pravougaoni, PWM i invertori sa poništavanjem napona.

Od invertora se zahteva da izlazni napon bude najčešće sinusoidalnog oblika. Sinusoidalni talasni oblik nije moguće bez disipacije stvoriti od napona ili struja konstantnih u vremenu, pa se zahtev za sinusoidalnim oblikom svodi na sinusoidalni oblik srednje vrednosti izlazne veličine tokom periode prekidanja. Stoga se usrednjavanje često koristi prilikom analize invertora, što na nivou periode prekidanja, što na nivou modulišućeg signala, koja je obično znatno veća od periode prekidanja, pa se usrednjavanje svodi na određivanje jednosmerne komponente [3].

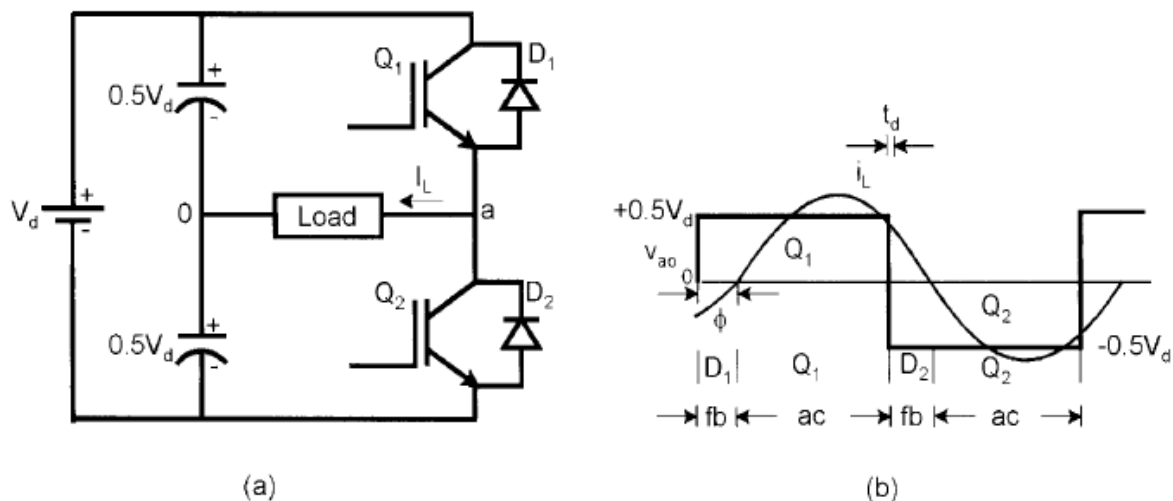
Najčešće korišćena metoda za upravljanje motorima je PWM (*Pulse Width Modulation*). Pošto inverter poseduje elektronske prekidače moguće je kontrolisati izlazni napon i optimizovati harmonike naizmeničnim uljučivanjem i isključivanjem invertora konstantnim jednosmernim naponom. Postoji nekoliko PWM tehnika koje su razvijene za upravljanje motorima.

U ovom poglavlju biće objašnjeni osnovni naponski invertori i dve najviše korišćene PWM tehnike.

### 3.1 Polumostni i mostni naponski inverter

Polumostni naponski inverter predstavlja najjednostavniju izvedbu invertora i koristi se u aplikacijama sa niskim vrednostima napona. Prekidači su realizovani preko unidirekcionih kontrolisanih prekidača i anti-paralelno vezanih zamajnih dioda. Zamajna dioda se koristi da preuzme struju suprotnog smera koja bi prolazila kroz prekidač. Kao prekidači uobičajeno se koriste poluprovodničke tranzistorske ili tiristorske komponente, IGBT, MOSFET-ovi, zavisno od snage i naponskog opsega samog pretvarača. Na slici 3.1(a) predstavljena je topologija polumostnog naponskog invertora.

U cilju smanjenja harmonijskih izobličenja koja nastaju pri radu invertora, potrebno je koristiti kondenzatore sa velikom kapacitivnošću. Poluprovodničke komponente se uključuju naizmenično sa faznim pomerajem od  $180^\circ$  radi generisanja izlaznog napona pravougaonog oblika, pri čemu samo jedan prekidač sme biti uključen. Polumostni inverter je predviđen za rad u dvokvadratnom modu. Rad u četvorokvadratnom modu se može dobiti ako se na ulazu koristi kapacitivni razdelnik ili izvor napona koji poseduje srednji izvod, kao što je prikazano na slici 3.1(a).

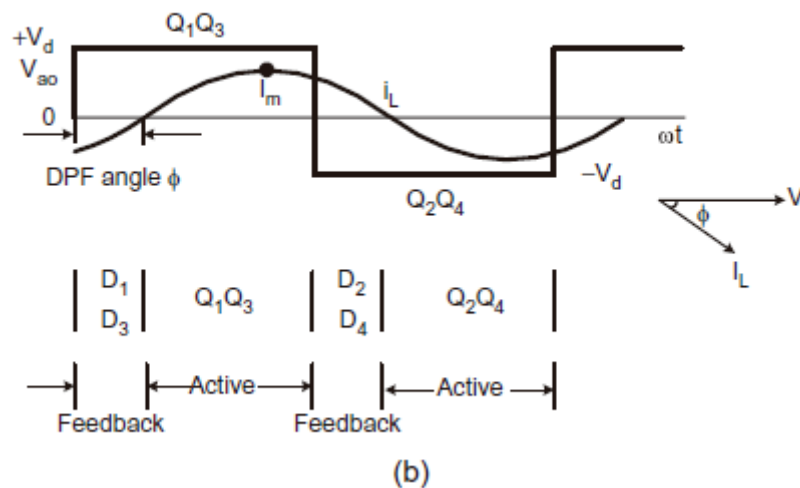
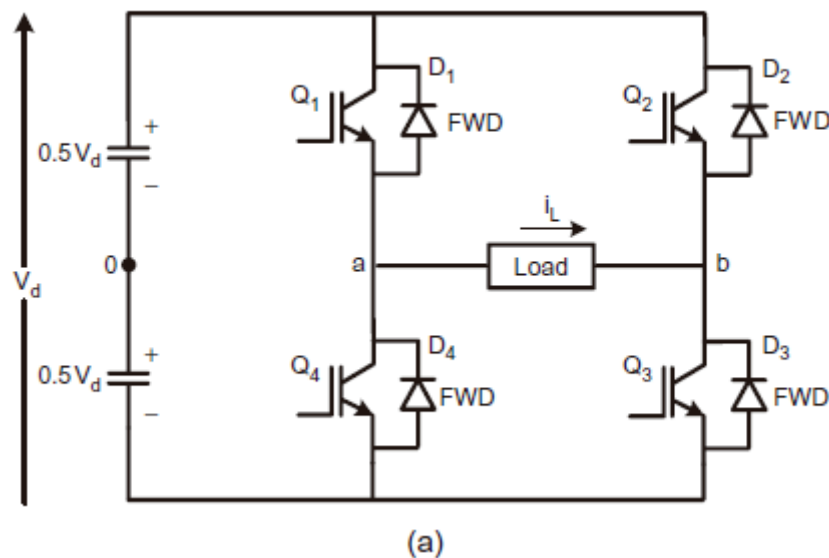


**Slika 3.1** (a) Polumostni inverter (b) Izlazni oblici napona i struje

Motor kojim se upravlja, odnosno opterećenje, je induktivnog karaktera i bez obzira na korišćenje filtera struja sinusnog oblika kasnije za naponom za ugao  $\theta$ . Prilikom isključivanja jednog i uključivanja drugog prekidača potrebno je ostvariti kratak vremenski period u kojem nijedan od prekidača nije uključen, odnosno pauzu. Pauza je definisana vremenom  $t_d$ , čime je inverter zaštićen od kratkog spoja. Kada su napon i struja opterećenja istog polariteta, inverter je u aktivnom modu, što znači da opterećenje apsorbuje snagu. U drugom slučaju kada su napon i struja suprotnog znaka (vreme kada vodi jedna od dioda) energija se vraća u izvor. Na slici 3.1 (b) prikazani su oblici signala napona i struje na opterećenju.

Mostni inverter (*H bridge*) sastavljen je od dva polumostna invertora. Za generisanje izlaznog napona pravougaonog oblika, prekidački parovi  $Q_1Q_3$  i  $Q_2Q_4$  se naizmenično uključuju sa faznim pomerajem od  $180^\circ$ . Kao u prethodnom slučaju, kada su napon i struja istog polariteta, mostni inverter je u aktivnom režimu rada. U trenucima kada nijedan od prekidačkih parova nije uključen strujno kolo se zatvara kroz parove dioda  $D_1D_3$  ili  $D_2D_4$  pri čemu se energija vraća u izvor. Takođe, u zavisnosti od ugla između napona i struje zavisi način rada invertora. Ukoliko je ugao  $\phi < 90^\circ$  energija se troši na opterećenje, a za  $\phi > 90^\circ$  energija će se vratiti u izvor.

Na slici 3.2 (a) prikazana je topologija mostnog invertora.



**Slika 3.2** (a) Mostni inverter (b) Izlazni oblici napona i struje

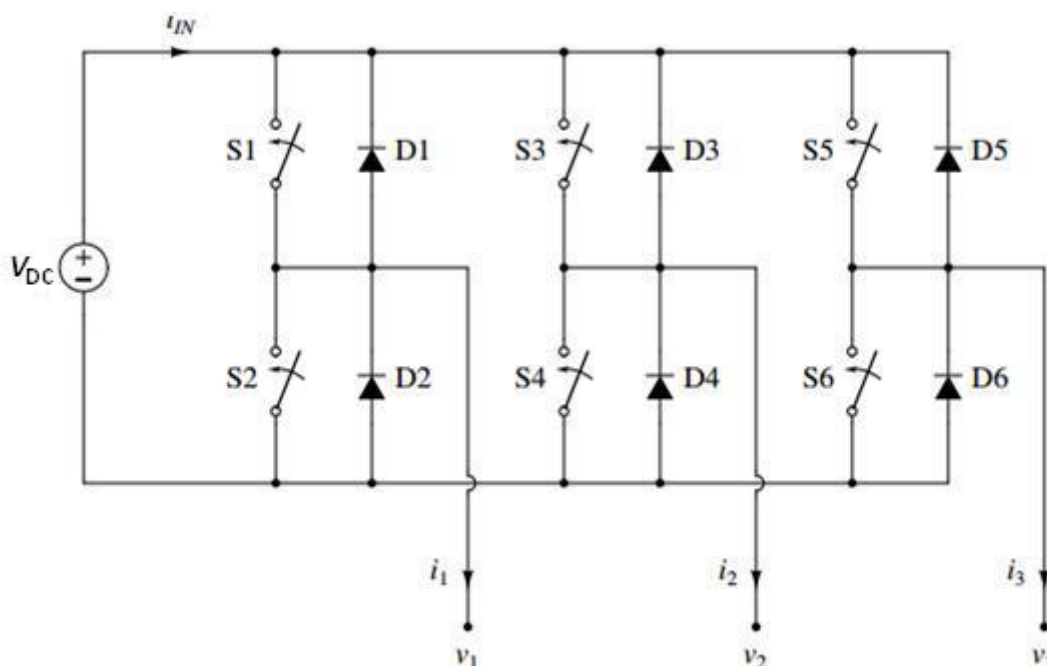
Slika 3.2 (b) prikazuje oblike napona i struje kao i trenutke u kojima vode parovi prekidača ili parovi dioda [4].



### 3.2 Trofazni inverter

Trofazni inverter sastoji se od tri polumosna naponska invertora. Trofazno invertorsko kolo ima osam ( $2^3 = 8$ ) prekidačkih stanja koja definišu osam mogućih prostornih vektora napona. Prekidačka funkcija grane određena je tako da je njena vrednost jednaka logičkoj jedinici kada je gornji prekidač uključen, odnosno jednaka logičkoj nuli kada je uključen donji prekidač.

Na slici 3.3 prikazan je trofazni inverter.



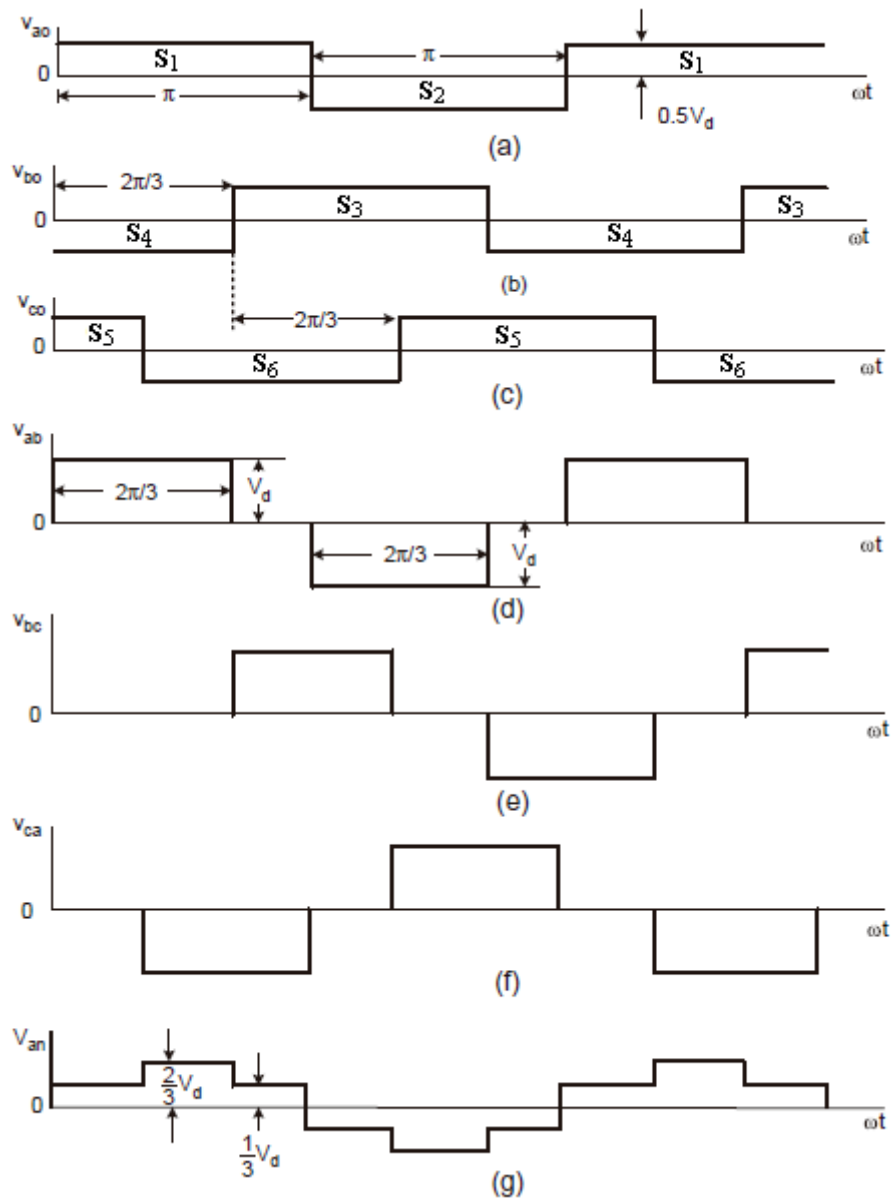
Slika 3.3 Trofazni inverter

Generator napona  $V_a$  može se predstaviti kao redna veza dva generatora napona vrednosti  $V_a/2$ , gde se čvor u kome se dati naponi vezuju može koristiti kao referentni čvor. Taj čvor se može koristiti za vezivanje na potrošač i na njega se vezuje nulti provodnik. U tom slučaju imamo trofazni sistem sa četiri provodnika (*four-wire system*), međutim ovakav sistem se u praksi malo koristi. Mnogo češće se koristi način koji je prikazan na slici 3.3 odnosno trofazni sistem sa tri provodnika (*three-wire system*).

Na prikazanoj hardverskoj izvedbi trofaznog polumostnog naponskog invertora moguće je izvršiti različite tehnike modulacije. Kreiranjem odgovarajućeg softverskog koda bira se PWM tehnika, a samim tim i vremena komutacije prekidača.

Trofazni inverter može raditi i u pravougaonom režimu. Fazni naponi se dobijaju naizmeničnim uključivanjem odgovarajućih parova prekidača ( $S_1S_4$ ,  $S_2S_5$ ,  $S_3S_6$ ) i međusobno su pomereni za  $120^\circ$ . Linijski naponi se dobijaju oduzimanjem odgovarajućih faznih napona.

Kao primer izlaznog faznog napona dat je oblik napona  $V_{an}$ . Napon  $V_{an}$  dat je izrazom  $V_{an} = \frac{2}{3} V_{ao} - \frac{1}{3} V_{bo} - \frac{1}{3} V_{co}$ , slično se dobijaju ostali fazni naponi [5]. Slika 3.4 prikazuje oblike napona na terminalima i linijskih napona

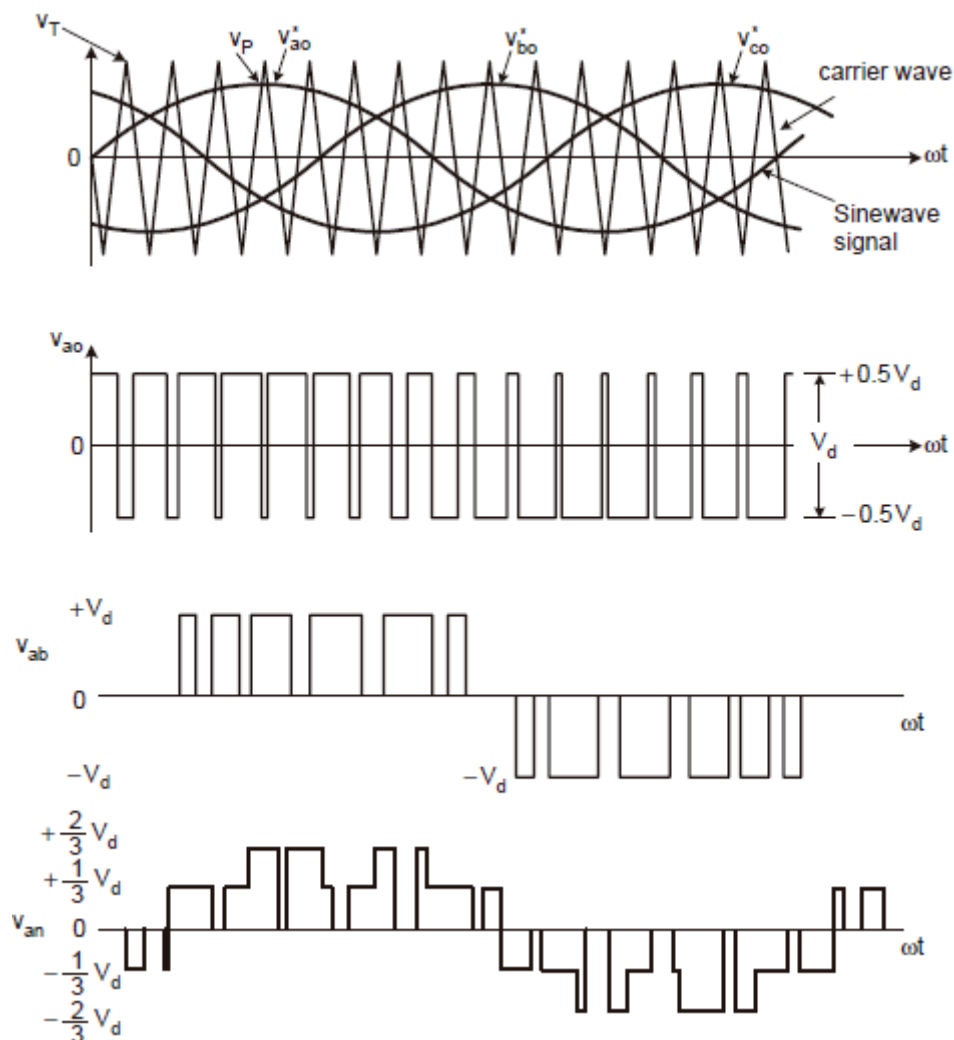


**Slika 3.4** Izlazni naponi trofaznog invertora u pravougaonim režimu

### 3.2 Sinusna Impulsno širinska modulacija (SPWM)

Kod ove tehnike modulacije, izlazni PWM signali se dobijaju poređenjem referentnog napona koji je sinusnog oblika i trougaonog nosioca [5]. Referentni signal predstavlja željeni oblik izlaznog napona i on se naziva modulišući jer od njegove amplitude i frekvencije zavisi oblik PWM signala. Trougaoni nasilac ima višestruko veću učestanost od modulišućeg signala i njegova učestanost praktično predstavlja prekidačku učestanost pretvarača. Ako je učestanost nosioca celokupni umnožak osnovne učestanosti izlaznog napona, tada govorimo o sinhronizovanoj modulaciji, nasuprot nesinhronizovanoj (*free-running*) sinusnoj modulaciji. U drugom slučaju prekidačka učestanost i osnovna učestanost izlaznog napona su fizički nesamerljive.

Tačke preseka sinusnog referentnog signala i trougaonog nosioca određuju izgled PWM signala i predstavljaju trenutke komutacije prekidača, kao što je prikazano na slici 3.5.



**Slika 3.5** SPWM signal za trofazni inverter

Oblik napona  $V_{ao}$  prikazan je na slici. Slično se dobijaju oblici napona  $V_{bo}$  i  $V_{co}$  s tim što su svi modulišući sinusni naponi međusobno pomereni za  $120^\circ$ .

Rad impulsno širinskog modulatora može se podeliti na dva moda:

- linearni mod
- nelinearni mod

U linearnom modu vrh modulišućeg signala je jednak ili manji od vrha nosećeg signala. Ako je učestanost nosećeg signala bar 20 puta veća od učestanosti modulišućeg signala pojačanje impulsno širinskog modulatora je jedan.

U nelinearnom modu vrh modulišućeg signala je veći od vrha nosećeg signala. Pojačanje je manje od jedan i harmonijska distorzija izlaznih napona je veća od distorzije napona u linearnom modu.

Unutar linearnog opsega prekidačka učestanost je konstantna, a subharmonici trougaonog nosioca su vrlo mali. Zbog svoje jednostavnosti i povoljnog harmonijskog spektra, koji je koncentrisan na nosećoj učestanosti, PWM se široko koristi u naizmeničnim elektromotornim pogonima. Da bi se eliminisali parni harmonici indeks frekventne modulacije treba da bude ceo neparan broj. Takođe, indeks frekventne modulacije treba da bude umnožak broja 3 da bi se poništili dominantni harmonici u međufaznom izlaznom naponu. Proširenje linearne oblasti rada može se postići adekvatnim izborom modulišućeg signala.

### **3.3 Impulsno širinska modulacija upravljana prostornim vektorom (SVPWM)**

SVPWM predstavlja danas najrasprostranjeniju PWM tehiku za digitalno upravljanje naponskim pretvaračima [5]. Zasnovana je na modulaciji prostornih vektora. U svakoj periodi modulacije prostornim vektorom, željeni napon se aproksimira srednjom vrednošću tri naponska vektora, tj. sa tri stanja prekidača na invertoru. Pri tome, dva vektora su susedni nenulti vektori najbliži referentnoj vrednosti, dok je treći vektor nulti. Redosled primene ovih stanja ima uticaja na strujni ripl, komutacione gubitke i spektar izlaznih napona i struja.

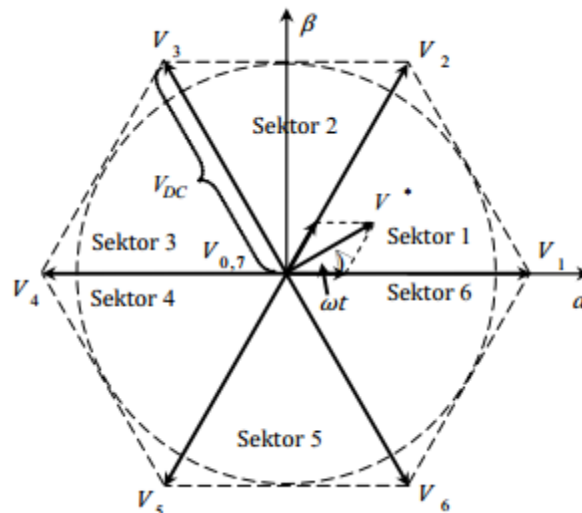
Koncept prostornih vektora pogodan je predstavljanje trofaznih napona i struja. Definisani su kompleksnom transformacijom, koja transformiše trofazne promenljive iz vremenskog domena u kompleksnu promenljivu tzv. prostorni vektor. Na taj način je dvodimenzionalni vektor, odnosno kompleksni broj, povezan sa odgovarajućom trofaznom veličinom.

Diskretne vrednosti napona mogu se transformisati u stacionarni koordinatni sistem primenom realne transformacije raspredanja. Vrednosti napona u stacionarnom koordinatnom sistemu za sva moguća prekidačka stanja pretvarača prikazane su u Tabeli 3.1.

**Tabela 3.1** Diskretne vrednosti napona za sva moguća prekidačka stanja

Vektor	$\angle(V, \alpha)$	$u_a$	$u_\beta$	$ u_{\alpha\beta} $	$S_a$	$S_b$	$S_c$
$V_1$	0	$\frac{2}{3}V_{DC}$	0	$\frac{2}{3}V_{DC}$	1	0	0
$V_2$	$\frac{\pi}{3}$	$\frac{1}{3}V_{DC}$	$\frac{\sqrt{3}}{3}V_{DC}$	$\frac{2}{3}V_{DC}$	1	1	0
$V_3$	$\frac{2\pi}{3}$	$-\frac{1}{3}V_{DC}$	$\frac{\sqrt{3}}{3}V_{DC}$	$\frac{2}{3}V_{DC}$	0	1	0
$V_4$	$\pi$	$-\frac{2}{3}V_{DC}$	0	$\frac{2}{3}V_{DC}$	0	1	1
$V_5$	$\frac{4\pi}{3}$	$-\frac{1}{3}V_{DC}$	$-\frac{\sqrt{3}}{3}V_{DC}$	$\frac{2}{3}V_{DC}$	0	0	1
$V_6$	$\frac{5\pi}{3}$	$\frac{1}{3}V_{DC}$	$-\frac{\sqrt{3}}{3}V_{DC}$	$\frac{2}{3}V_{DC}$	1	0	1
$V_7$	-	0	0	0	1	1	1
$V_0$	-	0	0	0	0	0	0

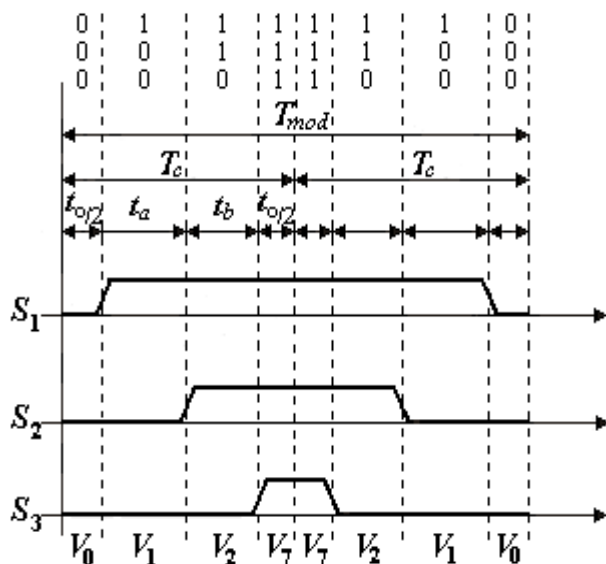
Diskretne vrednosti napona  $u_a$  i  $u_\beta$  predstavljene su u  $\alpha\beta$  koordinatnom sistemu formiraju šestougao sa centrom u koordinatnom početku. Na slici 3.6 prikazan je dijagram prostornih vektora.

**Slika 3.6** Dijagram prostornih vektora napona

Nulti vektori  $V_0$  i  $V_7$  nalaze se u koordinatnom početku, a preostali nenulti vektori obrazuju šest sektora pri čemu je svaki zahvata ugao od  $\pi/3$ . Na slici je takođe prikazan i referentni vektor faznog napona statora  $V^*$  koji se može nalaziti u bilo kojem od šest sektora. Referentni napon  $V^*$ , generisan na ovakav način, ima proizvoljnu amplitudu i fazu, pa se stoga mora aproksimirati postojećim naponskim vektorima iz Tabele 3.1. Radi smanjenja prekidačkih komutacija i što efikasnijeg iskorišćenja aktivnih vektora, sinteza referentnog vektora obavlja se posredstvom dva susedna nenulta vektora u datom sektoru i jednog ili oba nulta vektora.

Vremena vođenja aktivnih vektora su ista u većini strategija SVPWM modulatora, dok je distribucija nultih vektora unutar prekidačke periode ono što ih razlikuje. Maksimalna amplituda izlaznog napona koja se može ostvariti bez izobličenja postiže se kada je referentni napon jednak poluprečniku upisanog kruga u šestougao, slika 3.6.

Sekvencija uklapanja nenultih i nultih vektora za kreiranje referentnog napona u prvom sektoru prikazana je na slici 3.7.



**Slika 3.7** Primer sekvence uključivanja prekidača u prvom sektoru

Vektori pretvarača se u našem slučaju preklapaju po sledećem redosledu:  $V_0 \rightarrow V_1 \rightarrow V_2 \rightarrow V_7 \rightarrow V_7 \rightarrow V_2 \rightarrow V_1 \rightarrow V_0$ , odgovarajućim kombinacijama prekidača  $(0,0,0) \rightarrow (1,0,0) \rightarrow (1,1,0) \rightarrow (1,1,1) \rightarrow (1,1,1) \rightarrow (1,1,0) \rightarrow (1,0,0) \rightarrow (0,0,0)$ . Vidimo da je kao nulti vektor u jednom slučaju koristi  $V_0$ , a u drugom slučaju  $V_7$  [6]. Jednačina kojom se opisuje vrednost referentnog napona  $V^*$  glasi:

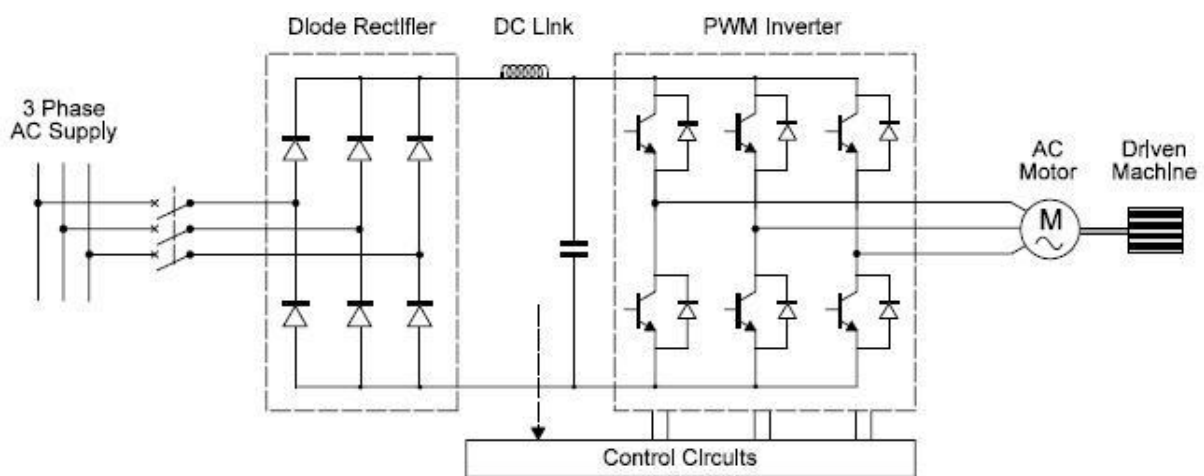
$$V^*T_c = V_1t_a + V_2t_b + (V_0 \text{ ili } V_7)t_o, \text{ gde je } T_c = t_a + t_b + t_o \text{ i } T_{mod} = 2T_c$$

## 4. Kontrola upravljanja motorima

Većina savremenih VSD (*variable speed drivers*) sistema za upravljanje AC motorima je modularne konstrukcije [7]. Sistem se sastoji iz sledećih modula:

- Ulazni DC ispravljač
- DC link
- PWM Invertor
- Kontrolni sistem

Na slici 4.1 prikazana je struktura sistema za upravljanje AC motorima.



**Slika 4.1** Struktura sistema za upravljanje AC motorima

Iako je glavna funkcija kontrolnog sistema modernih PWM invertora uključivanje i isključivanje poluprovodničkih prekidača, postoji niz drugih funkcija koje treba kontrolisati. Kontrolni sistem se može podeliti u 4 osnovne oblasti:

- Sistem kontrole invertora
- Sistem kontrole sa povratnom informacijom o brzini
- Sistem kontrole sa povratnom informacijom o struji
- Spoljni interfejs, koji obuhvata sledeće:
  - Podešavanje parametara od strane korisnika
  - Operater informacije i dijagnostika kvarova
  - Digitalni i analogni ulazi za prihvatanje kontrolnih signala
  - Digitalni i analogni izlazi za prenošenje informacije o statusu

Sa brzim napretkom digitalne elektronike tokom poslednje decenije, savremeni kontrolni VSD sistemi zasnovani su na jednom ili više mikroprocesora. Kontrolni sistemi moraju biti projektovani da postignu sledeće ciljeve:

- Visok nivo pouzdanosti
- Visoku performansu invertora kako bi se osiguralo da izlazni strujni signal obezbedi dovoljan obrtni moment motora, pri određenoj brzini, uz minimalne gubitke
- Invertorske gubitke treba minimizovati
- Mora postojati mogućnost integracije kontrolnog sistema u celokupni upravljački sistem, sa objektima za eksternu kontrolu i komunikacionim interfejsima
- Visoku toleranciju fluktacije napona i EMI

Za pouzdan rad VSD neophodno je pouzdano napajanje koje će obezbediti napajanje kontrolnih kola i analognih konvertora u otežanim uslovima, kao što su kratko smanjenje napona pri uključenju snažnih potrošača. Najjednostavniji način obezbeđivanja dodatnog napajanja za kontrolna kola konvertora je korišćenje pomoćnog transformatora. Problem sa ovakvim pristupom nastaje kada nastane prekid u električnoj mreži, jer dolazi do gubitka kontrole nad inverterima čak i za kratkotrajno opadanje napona na mreži.

Shodno tome, većina modernih analognih konvertora koristi prekidački mod napajanja SMPS (*switched mode power supply*) koji se dovodi direktno sa DC linka radi obezbeđivanja pomoćnog napajanja upravljačkog sistema. Glavna prednost ovakvog pristupa je da će snaga biti održana do trenutka kada motor stane, bez obzira na glavno napajanje. Kada, iz nekog razloga, dođe do nestanka napajanja, preko pomoćnog napajanja se održava snaga korišćenjem kondenzatora velikih kapacitivnosti, a kasnije preko inercije samog motora. Većina analognih konvertora je programirana da smanje učestanost i da preuzmu snagu sa motora, koji se tada ponaša kao generator.



## 4.1 Kontrolne petlje

Regulatori su dizajnirani tako da mogu da kontrolišu kako napon tako i frekvenciju napona sa kojim se napaja motor, zbog čega se nazivaju konvertori sa promenljivim naponom promenljive frekvencije VVVF (*variable voltage variable frequency*) [7]. Digitalni upravljački sistem automatizuje ovaj proces. Na primer, kada operater bira brzinu, kontrolni VSD sistem implementira ovu aplikaciju prilagođavanjem izlazne frekvencije i napona kako bi se osiguralo da motor radi na podešenoj brzini. Tačnost kontrolnog sistema i njegov odziv na komandu operatera određen je vrstom kontrolnog sistema koji koristi. Vrste kontrole koje se koriste u kontrolnim sistemima su:

- Kontrola sa otvorenom petljom, bez povratne informacije od strane procesa
- Kontrola sa zatvorenom petljom, sa povratnom informacijom od strane procesa
- Kaskadna zatvorena petlja, sa više povratnih informacija od strane procesa

### 4.1.1 Kontrola sa otvorenom petljom (*open-loop control*)

U mnogim aplikacijama VSD sistem mora da kontroliše brzinu na osnovu komande koju zadaje operater. Uobičajeni VVVF konvertori su uređaji koji kontrolišu amplitudu i frekvenciju izlaznog napona, dok veličina struje zavisi od opterećenja motora ali je rezultat primenjenog napona. Jedina strujna kontrola je ograničenje struje koje se vrši kada njena amplituda dostigne visok nivo, npr. 150% nominalnog strujnog opterećenja.

Kontrolni sistem nema uvid o brzini motora, tako da ne može proveriti da li motor radi na odgovarajućoj brzini i da li je motor uopšte pokrenut. Ako se moment opterećenja promeni i klizanje poveća ili smanji, konvertor neće prilagoditi izlazni napon da nadoknadi promene u procesu. Ovakav metod kontrole je karakterističan u sistemima gde imamo stabilna stanja i jednostavne aplikacije kao što su centrifugalne pumpe, ventilatori, transportni sistemi, gde je omogućeno puno vremena za promenu brzine, a posledice promena u procesu su zanemarljive.

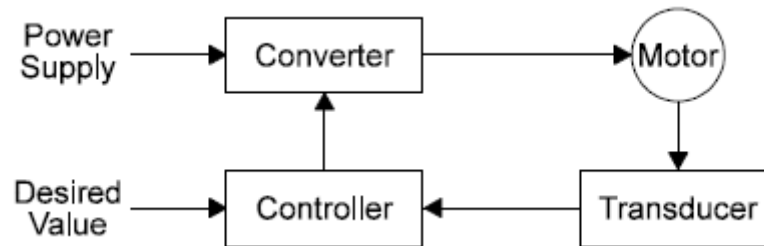
### 4.1.2 Kontrola sa zatvorenom petljom (*closed-loop control*)

U industriji postoje zahtevnije aplikacije gde se brzina i/ili snaga moraju biti stalno i precizno kontrolisani. Za aplikacije koje zahtevaju strogu dinamičku kontrolu, kontrola sa zatvorenom petljom je neophodna. Tipična konfiguracija kontrolnog sistema sa zatvorenom petljom prikazana je na slici 4.2 a sastoji se od sledećih glavnih elemenata:

- Motor, čija je uloga da konvertuje električnu energiju u mehaničku energiju neophodnu da deluje na opterećenje
- Pretvarač za merenje količine opterećenja koja se kontroliše

Signal sa pretvarača se koristi kao povratni signal do kontrolnog sistema. Ukoliko nam je potrebna informacija o brzini, kao pretvarač se može koristiti tahometar ili enkoder. Ako nam je potrebna informacija o poziciji kao davači se koriste apsolutni enkoderi, a ukoliko nam je potrebna vrednost struje koristimo strujne senzore.

- Konvertor koji kontroliše protok električne energije kroz motor
- Kontroler koji upoređuje željenu vrednost brzine ili pozicije tj. zadanu vrednost, sa izmerenom vrednošću, a zatim daje odgovarajući kontrolni izlaz koji prilagođava brzinu i obrtni moment u cilju smanjenja greške na nulu.



**Slika 4.2** Blok dijagram VSD sistema sa zatvorenom petljom

#### 4.1.3 Kontrola sa kaskadnom zatvorenom petljom (*cascade closed-loop control*)

U aplikacijama koje zahtevaju veoma preciznu kontrolu brzine i momenta, sa brzim odgovorom na promene u procesu, petlja sa jednim kontrolerom možda ne može biti adekvatna da predvidi sva kašnjenja u procesu. Ovakav kontroler je teško dizajnirati i podesiti prilikom puštanja u rad. Rešenje se sastoji u korišćenju dva kontrolera koji su povezani u kaskadnu zatvorenu petlju. Upravljanje i kontrola nad motorom obavlja se u dve faze:

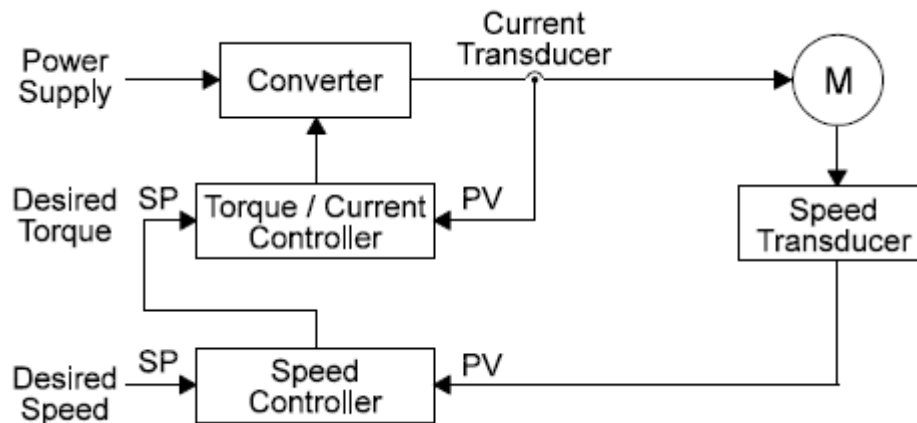
- Petlja sa kontrolerom brzine koristi grešku za izračunavanje momenta radi povećanja ili smanjenja brzine. Kontrolna petlja treba da dozvoli jedno vremensko kašnjenje u sistemu, koje predstavlja vreme koje protekne od trenutka kada se izmeri brzina do trenutka kada se promeni obrtni moment motora. Ova petlja se još naziva i spoljašnja petlja.
- Petlja sa kontrolerom obrtnog momenta upoređuje obrtni moment, izlaz iz kontrolera za brzinu, sa stvarnom izmerenom vrednošću i izračunava željenu frekvenciju. Promenljiva u ovom mernom procesu je struja motora, koja je proporcionalna momentu motora, zbog čega se ova kontrolna petlja naziva strujna petlja. Za nju se još koristi i naziv unutrašnja petlja.

Glavna prednost kaskadnog kontrolnog sistema je mogućnost limitovanja struje na pogonskom izlazu postavljanjem ograničenja na ulazu strujne petlje. Strujna petlja može veoma brzo da reguluje, za manje od 10ms, dok je vreme potrebno za reagovanje petlje za brzinu sporije, tipično oko 100ms, zbog inercije motora i opterećenja koja su obično velika.

Blok dijagram kaskadnog kontrolera obuhvata:

- Spoljašnju (glavnu) kontrolnu petlju za brzinu
- Unutrašnju (sporednu) strujnu kontrolnu petlju

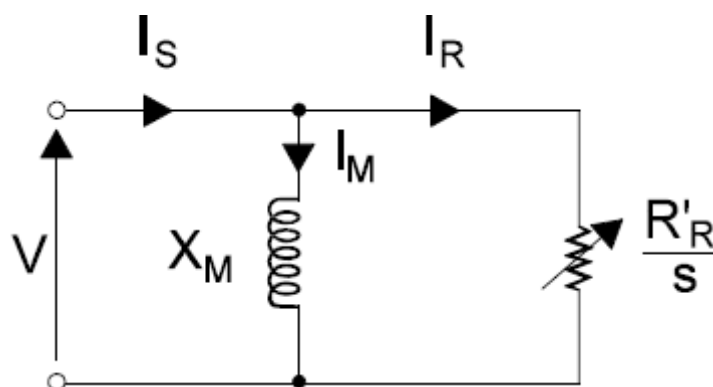
Na slici 4.3 prikazan je blok dijagram kaskadnog kontrolera.



Slika 4.3 Kaskadni kontroler brzine i obrtnog moment

## 4.2 Vektorska kontrola

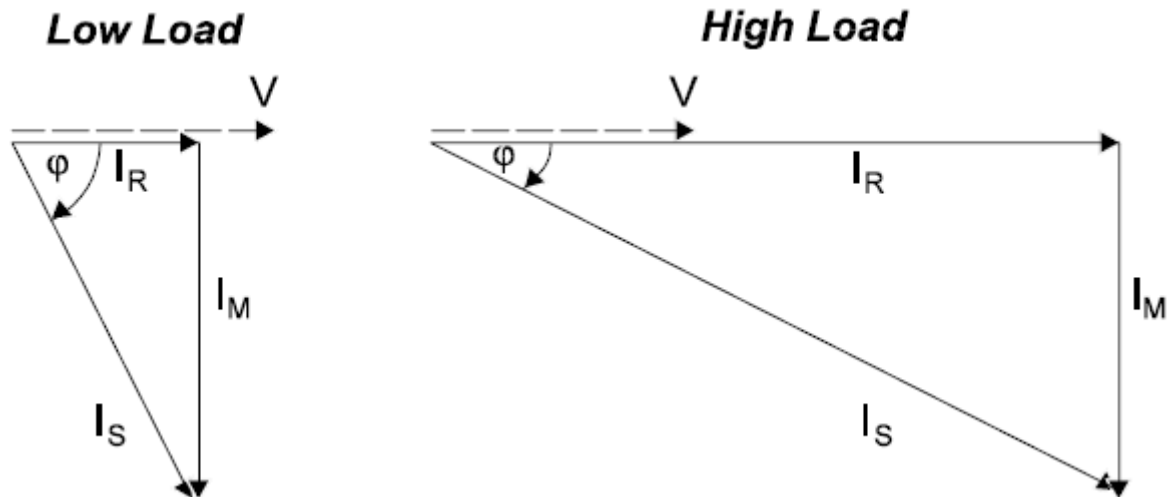
Termin vektorska kontrola postao je univerzalan naziv za uređaje koji pružaju visoke performanse [7]. Na slici 4.4 prikazana je uprošćena ekvivalentna šema asinhronog motora. Struja koja proizvodi fluks  $I_m$  i struja koja proizvodi obrtni moment  $I_r$  nalaze se unutar motora i ne mogu se meriti ili kontrolisati odvojeno. Vektorski zbir ove dve struje određuje struju statora koja se može meriti.



Slika 4.4 Uprošćena ekvivalentna šema asinhronog motora

Strategija je zasnovana na izračunavanju individualnih strujnih vektora koji omogućavaju kontrolu fluksa i/ili momenta. Izračunavanje strujnih vektora uključuje merenja raspoloživih varijabli (kao što su struja statora, napon statora, odnos faza, učestanost, brzina vratila itd.) i primenjuje ih na matematički model motora koji obuhvata konstante (kao što su

otpornost i induktivnost statora, otpornost i induktivnost rotora, broj pari polova itd.). Zbog velikog broja promenljivih postoji velik broj mogućih primena modela motora, od jednostavne procene uslova u kojima motor radi do modela koji su kompleksni i veoma precizni. Na slici 4.5 prikazani su strujni vektori asinhronog motora u slucaju malog i velikog opterećenja.



**Slika 4.5** Strujni vektori na asinhronom motoru

U slučaju kada motor nije opterećen, skoro sva struja statora sačinjava struju magnetovanja. Moment koji proizvodi struju zahteva samo da se prevaziđu gubici usled trenja u motoru. Struja statora zaostaje za naponom za  $90^\circ$ , pa je faktor snage blizu nule ( $\cos \varphi=0$ ).

Pri malim opterećenjima motora, struja statora predstavlja vektorski zbir struje magnetovanja (koja je nepromenjena) i struje koju proizvodi moment koja je neznatno povećana. Struja statora zaostaje za naponom za ugao  $\varphi$  koji je i dalje veliki, pa je faktor snage slab ( $\cos \varphi \ll 1$ ).

U slučaju kada je motor pod velikim opterećenjem, struja statora se povećava pri čemu je struja magnetovanja nepromenjena, a struja koju proizvodi moment znatno povećana srazmerno sa povećanjem opterećenja. Faktor snage je poboljšán tako da bude blizu faktora snage punog opterećenja ( $\cos \varphi=0.85$ ).

Prednosti vektorskog upravljanja su:

- brz i precizan odziv
- optimalno iskorišćenje motora
- precizna regulacija brzine i pozicije

Mane vektorskog upravljanja predstavljaju:

- Cena
- Složenost sistema
- Opravdanost primene

Princip vektorskog upravljanja sinhronim motorima sa permanentnim magnetima isti je kao i kod asinhronih motora, s tim što je upravljanje PMSM jednostavnije jer nema gubitaka na rotoru i ne postoji struja magnećenja.

### 4.3 Značaj strujne povratne sprege

Primarna potreba strujne povratne sprege je zaštita VSD sistema isključivanjem invertora. Ukoliko dođe do kratkog spoja, struja će značajno porasti i ako se poluprovodničke prekidačke komponente ne isključe dovoljno brzo doći će do oštećenja. Pouzdanost sistema zavisi od brzog i tačnog očitavanja u uslovima prekoračenja struje.

Sekundarna potreba je ograničenje struje. Raniji uređaji nisu imali funkciju ograničenja struje i jednostavno bi se isključili ukoliko struja distigne veliku vrednost, zahtevajući manuelni reset od strane korisnika. Ovakav način rada je usporavao aplikacije u industrijskim sistemima gde su preopterećenja bila uobičajena. Savremeni VSD sistemi koriste strujnu povratnu spregu da ograniče izlaznu struju kada naiđe na veliko opterećenje.

Limitovanje struje nije isto što i kontrola struje. Kontrola struje znači da se struja kontroliše u svakom momentu, bez obzira da li ima veliku ili malu vrednost. Ograničenje struje označava da je preduzet neki korak da se zaustavi porast struje iznad željene vrednosti. Ovaj korak se može samo indirektno odnositi na struju, kao što je promena frekvencije ili napona.

Treća potreba strujne povratne sprege je da obezbedi strujni signal koji je proporcionalan opterećenju. Signal se može interno koristiti za optimizaciju odnosa  $V/f$  ili za kompenzaciju klizanja, pri čemu se frekvencija blago povećava sa povećanjem opterećenja radi poboljšanja regulacije brzine. Strujni signal se može koristiti za eksternu upotrebu, za korisnika, kao signal indikacije opterećenja [7].

## 5. Tehnike merenja napona i struje

U cilju ostvarivanja kvalitetnijeg upravljanja i kontrole sistema potrebne su što tačnije informacije o vrednosti napona i struja. Tačna informacija o vrednosti struje je mnogo značajnija, jer direktno utiče na zaštitu sistema od prekoračenja struje, kao i na moment koji se stvara na motoru.

Instrumenti kojima se vrši merenje električnih veličina nazivaju se električni merni instrumenti. Prema načinu na koji primaju mernu veličinu kao ulazni podatak, obrađuju ga i vrše prikazivanje, instrumenti za električna merenja mogu se podeliti na:

- Analogne
- Digitalne

Analogni merni instrumenti pretvaraju energiju, koja potiče od električnog ili magnetnog polja, u najčešće mehaničko dejstvo. Dejstva električnih signala koja se mogu meriti, pored mehaničkog, mogu biti još termičko i hemijsko. Mehaničko dejstvo merenog električnog signala prenosi se na kretni sistem. Kretni sistemi koji se koriste kod analognih mernih instrumenata su:

- Mehanički sa kazaljkom ili optičkim pokazivačem na skali
- Elektrooptički sa pokretnim elektronskim zrakom - svetlom tačkom na ekranu katodne cevi

U savremenim tehnikama merenja, dominantnu grupu instrumenata i merne opreme, čine digitalni merni instrumenti. Oni ne samo da premašuju performanse odgovarajućih analognih instrumenata ( brzina, propusni opseg, pouzdanost, otpornost na smetnje itd.), već imaju i znatno nižu cenu, a omogućuju veoma jednostavnu automatizaciju procesa merenja. Principi digitalnih mernih instrumenata zasnivaju se na primeni osnovnih električnih kola kao što su:

- Logička (prekidačka) elektronska kola – digitalni brojači, registri, memorije
- Naponski ili strujni komparatori
- ADC (analogno digitalni konvertor) i DAC (digitalno analogni konvertor)
- Digitalni indikator

U narednim poglavljima predstavljene su osnovne tehnike merenja napona i struje, pri čemu je merenju struje posvećeno više pažnje.

## 5.1 Tehnike merenja napona

Merenje napona najčešće se vrši neposredno, instrumentima koji se nazivaju voltmetri [8]. Voltmetar se uvek vezuje paralelno sa elementom ili granom mreže na čijem se krajevima meri napon. Idealan voltmetar meri stvarnu vrednost napona, a u merno kolo ne unosi nikakve promene niti greške. Da ne bi unosio promene u merno kolo, kroz idealan voltmetar ne sme da teče struja, što znači da njegova unutrašnja otpornost mora da bude beskonačno velika. Pošto idealan voltmetar nije moguće ostvariti, uvek će u manjoj ili većoj meri uticati na kolo u kome se vrši merenje napona.

Realan voltmetar se može dosta približiti idealnom ako mu se otpornost što više poveća uz što veću osetljivost. U pogledu veličine unutrašnje otpornosti idealnom voltmetru se naročito mogu približiti digitalni elektronski voltmetri, kod kojih se bez problema mogu ostvariti unutrašnje otpornosti reda  $10^{11} \div 10^{12} \Omega$ , pa i više. Ovakve veličine otpornosti se u većini slučajeva mogu smatrati praktično beskonačnim.

Postoje različiti principi koji se koriste za merenja napona. U tabeli 5.1 izvršena je gruba klasifikacija voltmetra na osnovu načina rada i tipičnog polja primene.

**Tabela 5.1** Klasifikacija voltmetra

Vrsta	Princip rada	Podklasa	Primena
Elektromagnetni	Interakcija između struje i magnetnog polja	Instrument sa pokretnim kalemom	Dc
		Instrument sa pokretnim gvoždem	Dc
			Dc i ac
Elektrodinamički	Interakcija između struja	-	Dc i ac
Elektrostatički	Elektrostatička interferencija	-	Dc i ac
Termoelektrični	Termičko dejstvo struje	Direktno dejstvo	Dc i ac
		Indirektno dejstvo	
Indukcioni	Magnetna indukcija	-	Ac
Elektronski	Obrada signala	Analogni	Dc i ac
		Digitalni	

U slučaju kada nam je od značaja oblik napona koristimo osciloskop. Osciloskop ne spada u najpreciznije merne instrumente, ali zbog svog grafičkog prikaza predstavlja neophodan instrument koji se koristi za merenje. Najčešće se koristi za prikazivanje vremenskih oblika periodičnih naponskih signala, ali se može koristiti za prikazivanje međusobne zavisnosti dva naponska signala. Ukoliko imamo složeniji oblik napona potrebne su nam dodatne informacije kao što su: učestanost, odnos amplitude od vrha do vrha (*peak to peak*), vreme porasta, vreme opadanja i ostali parametri da bi signal bio u potpunosti opisan.

Za prilagođenje mernog opsega napona koji se meri mernim kolima koriste se kapacitivni i induktivni senzori, kao i naponski razdelnik. Senzori imaju veliki opseg merenja od  $10^{-10}$  do  $10^7$  V i koriste se pri merenju napona niskih učestanosti. Signal može biti

kontinualnog, periodičnog ili impulsivnog oblika. Na tačnost kapacitivnih senzora veliki uticaj imaju temperatura i frekvencija pa se zbog toga malo koriste.

Kao induktivni senzori koriste se naponski merni transformatori. Pomoću njih vrši se transformacija merenih napona na vrednosti koje odgovaraju opsezima upotrebljenih instrumenata. Pored smanjenja vrednosti merenog napona, postiže se galvansko odvajanje instrumenta od visokog napona. Primarni namotaj transformatora vezuje se na mrežu merenog visokog napona, a na sekundar se priključuje merni instrument, pa se na osnovu poznatog odnosa transformacije vrši indirektno merenje.

## 5.2 Tehnike merenja struje

Postoji više načina na kojima možemo vršiti merenje struje [9]. Ukoliko nam treba uopštena informacija o vrednosti struje koja protiče kroz neko električno kolo koristimo ampermetar, koji se u kolo vezuje na red. Ako nam je potrebna informacija o vrednosti struje u automatizovanim sistemima koriste se strujni senzori.

Strujni senzori služe za obavljanje dve osnovne funkcije. U prvom slučaju koriste se da izmere struju koja protiče kroz kolo i na osnovu njene vrednosti donose se odluke u vezi sa isključivanjem perifernih jedinica radi uštede energije ili vraćanja sistema u nominalan rad. Druga funkcija je da utvrdi da li je došlo do prekoračenja struje u sistemu. Ukoliko vrednost struje prelazi nominalnu vrednost potrebno je obezbediti isključivanje sistema. U zavisnosti od mesta gde se koriste, potrebno je izabrati senzor koji ima neophodnu robusnost da izdrži zahtevane uslove rada.

Svaki metod merenja ima svoje prednosti i mane, a sam izbor je presudan za pouzdanost aplikacije. Merne metode mogu se svrstati u dve osnovne kategorije:

- Direktna metoda, kod koje je strujni senzor je direktno povezan u kolo i izložen linijskom naponu
- Indirektna metoda, koja omogućuje izolaciju, a može biti neophodna za bezbednost celokupnog sistema

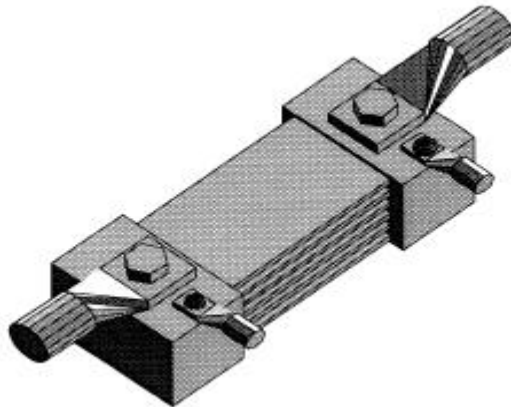
U narednim poglavljima predstavljeni su neki od najčešće korišćenih strujnih senzora sa svojim osnovnim prednostima i manama.

### 5.2.1 Šant

Najjednostavniji strujno-naponski pretvarač je otpronik. U strujnom mernom okruženju naziva se šant i tipično se vezuje na red sa opterećenjem. Šant proizvodi napon koji je srazmeran struji koja protiče kroz njega. Odlikuje se dobrim frekvenzijskim odzivom i lenearnošću, međutim ne postoji galvanska izolacija između merene struje i mernog uređaja, zbog čega se stvara nepoželjan efekat na struji koja se meri. Osim što se koristi kao strujni



senzor šant se upotrebljava i za proširenje mernog opsega ampermetra. Na slici 5.1 prikazan je izgled šanta.



**Slika 5.1** Tipična realizacija šanta

Osnovni nedostatak je disipacija snage, koja se povećava porastom temperature. Rastom temperature menja se otpornost, zbog čega treba voditi računa pri projektovanju šanta. Tipična promena napona je 50mV po jednom stepenu celzijusa. Merenje naimenične struje praćeno je pojavom površinskog efekta i induktivnosti samog šanta. Površinski efekat se može minimizovati pravilnim dizajniranjem šanta korišćenjem nekoliko tankih limova, čime se dodatno omogućuje njegovo hlađenje i smanjuje disipacija. Na induktivnost može se uticati smanjenjem veličine šanta. Pri merenju jednosmerne struje imaju visoku preciznost. Otpornost šanta je mala (tipično reda 1Ω i manja). Zbog toga se koriste otpornici velike snage koji zbog toga imaju i velike dimenzije.

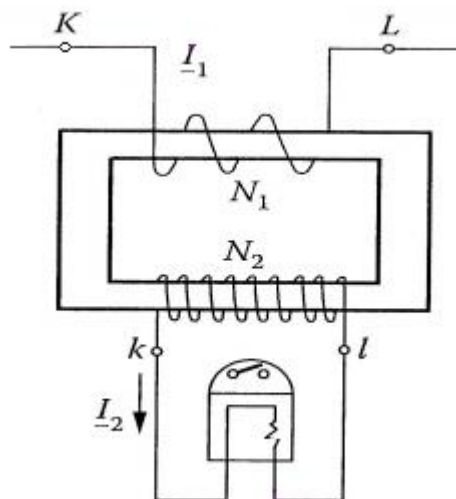
### 5.2.3 Strujni transformator

Strujni transformator se upotrebljava pri merenju struja velikih vrednosti koje bi inače bilo teško meriti nekom direktnom metodom. Sastoji se od primarnih i sekundarnih namotaja i jezgra koje se izrađuje od laminata gvožđa u obliku diskova ili koncentričnih krugova, radi smanjenja vrtožnih struja. Nominalna vrednost struje primara zavisi od mesta primene strujnog transformatora i može biti u opsegu od jednog do par hiljada ampera, za razliku od nominalne vrednosti struje sekundara koja je standardizovana na 5A. Klase tačnosti su takođe standardizovane na vrednosti od: 0.1, 0.2, 0.5, 1 i 3%. Zbog rasipanja magnetnog fluksa i činjenice da otpornost sekundara ne može biti nula, odnos struje primara i struje sekundara približno je obrnuto srazmeran odnosu broja primarnih i sekundarnih namotaja. Struja sekundara je u fazi sa strujom primara.

Potrebno je napomenuti da pri proticanju struje kroz primarni namotaj nije dozvoljeno ostaviti sekundarni namotaj otvoren, tj. da radi u praznom hodu. Razlog ovome je što se tada sva struja primara magnetiše u jazgru transformatora. To dovodi do ulaska transformatora duboko u zasićenje, do maksimalne vrednosti fluksa. Usled nagle promene fluksa prilikom

promene smeru struje kroz primarni namotaj dolazi do indukovanja visoke vrednosti napona. Ovaj napon ima impulsni oblik usled izrazite nelinearnosti gvožđa koja se dobija pri ovako dubokim zasićenjima. Njegova maksimalna trenutna vrednost može postati tako velika (nekoliko hiljada volti) da ugrozi izolaciju strujnog transformatora i niskonaponskih mernih i zaštitnih uređaja priključenih na njega, kao život ljudi koji bi eventualno došli u kontakt sa sekundarnim priključcima. Osim toga dolazi do velikog zagrevanja jezgra i topljenja izolacije između limova, a samim tim i do gubljenja magnetnih osobina jezra, čime strujni transformator postaje neupotrebljiv. Osnovna mana strujnih mernih transformatora je problem transformacije. Naime, prekidačke komponente koje se koriste u energetskoj elektronici stvaraju signale sa višim harmonijskim izobličenjima, pa se uvode transformatori bez jezgra, tzv. „kalem Rogovskog”.

Na slici 5.2 prikazana šema transformatora.



Slika 5.2 Principijalna šema transformatora

### 5.2.3 Holov senzor

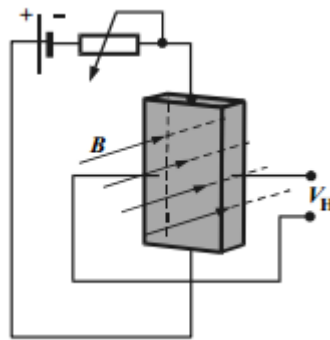
Senzori na bazi Holovog efekta spadaju u red elektromagnetnih senzora. Holov efekat nastaje kada se poluprovodnik kroz koji teče struja unese u magnetno polje. Ako se poluprovodnička komponenta nalazi u fiksiranom položaju, normalno u odnosu na magnetno polje indukcije  $\mathbf{B}$ , i ako kroz pločicu protiče struja  $\mathbf{I}$ , tada se normalno na smer struje javlja tzv. Holov napon.

Holov napon definisan je izrazom:

$$V_H = kIB/d$$

gde su  $d$  - debljina ploče i  $k$  - Holova konstanta, koja zavisi od karakteristika poluprovodnika i temperature. Tipična vrednost Holovog napona je reda mV. Treba napomenuti da je

povećanje Holovog napona pomoću povećanja struje  $I$  ili smanjenja debljine  $d$  ograničeno zbog zagrevanja pločice. Na slici 4. prikazan je ilustracija Holovog efekta.



**Slika 5.3** Ilustracija Holovog efekta

Najčešći način izrade senzora na bazi Holovog efekta je u integrisanoj tehnologiji. Senzor se sastoji od Holove pločice i elektronskih kola koja služe za pojačanje i prilagođavanje izlaznog signala. U kolu je izvršena i temperaturna regulacija. Senzor je osjetljiv na vrlo male promene magnetnog polja od svega 0.1mT, ali zbog nekompenziranog drifta nule od 10mT prag komparatora se postavlja na vrednost 20÷50mT.

#### 5.2.4 Optički senzori

Princip rada optičkih senzora zasniva se na promeni optičkog signala sa promenom neke fizičke veličine. Optički senzori se sastoje od 3 dela: izvora svetlosti, prenosnog medijuma i prijemnika. Kao predajnik koriste se LED diode ili laseri. U zavisnosti od izvedbe optičkih senzora prenosni medijum se može izraditi u vidu električnih ili optičkih veza. Kao predajnik koriste se fotodiode, fototranzistori, fotootpornici itd.

Kod optičkih senzora postignuto je: galvansko odvajanje, zaštita od šumova, mogućnost merenja fizičkih veličina, kako u oblasti malih tako i u oblasti velikih vrednosti, visok kvalitet statičkih i dinamičkih karakteristika. Mogu se upotrebiti u zahtevnim uslovima, kao što su delovanje jakog magnetnog polja, visoke temperature, električnih šumova, pa su mnogo fleksibilniji i pouzdaniji od klasničnih senzora. Loše osobine su složenost izrade, zahtevanje optičke vidljivosti između prijemnika i predajnika, osjetljivost na mehaničke vibracije i relativno visoka cena [9].

## 6. Projektovanje štampanih ploča

U procesu projektovanja fizičke arhitekture uključen je tim od nekoliko inženjera, koji imaju zadatak da na osnovu zahteva i idejnog rešenja razviju kompletnu električnu šemu. Osim električne šeme, potrebno je voditi računa o veličini štampane ploče, rasporedu konektora i pozicioniranju električnih komponenti kroz koje protiče velika struja.

U poglavlju 6.1 opisani su postavljeni zahtevi za izradu električne šeme. Prikazan je izbor rešenja za merenje napona i struje radi dobijanja što preciznijih vrednosti. Takođe, opisan je odabir električnih komponenti u skladu sa zahtevima i u cilju minimizacije troškova same izrade.

U poglavlju 6.2 opširnije su opisani blokovi od značaja, sa prikazanim principskim blok šemama, odnosno minimalnim celinama od kojih se sastoji sistem. Blok za napajanje nije predstavljen kao zasebna celina, ali je veoma važno voditi računa o projektovanju napajanja, jer je podloga ispravnog funkcionisanja svakog uređaja kvalitetno izvedeno napajanje. Štampana ploča se napaja preko baterije napona 48V, kapaciteta 9Ah. Dalja potrebna napajanja, 15V i 5V, realizovana su korišćenjem DC/DC pretvarača, s tim što je ostavljena mogućnost da se napon od 15V može dovesti preko zasebne baterije.

Poglavlje 6.3 govori o dizajnu štampane ploče, gde je cilj da se predoče najvažniji i najzahtevniji koraci tokom projektovanja.

### 6.1 Postavljeni zahtevi

Potrebno je projektovati energetska štampanu ploču koja će biti deo platforme za upravljanje AC motorom. Na ovaj način razdvojićemo energetska deo, odnosno PWM inverter i pogonske elektronske komponente koje služe za regulisanje komutacije prekidačkih komponenti, od upravljačkog dela platforme. Štampana ploča treba da ima zasebno napajanje sa baterije koje će se koristiti za napajanje PWM Invertora, ali i za kreiranje napona potrebnih za napajanje elektronskih kola. DC/DC pretvarač koji se koristi za kreiranje napona od 5V treba da obezbedi dovoljnu izlaznu struju da se mogu napajati i elektronski čipovi koji se nalaze na ADC štampanoj ploči. Signale koji dolaze sa kontrolne štampane ploče potrebno je galvanski izolovati, radi smanjenja smetnji, i dovesti ih na odgovarajuće ulaze pogonskih kola.

Za prekidačke komponente invertora definisano je da budu u kućištu TO-220. Jedna od karakteristika pomenutog kućišta TO-220, je metalna površina sa rupom koja služi za montiranje hladnjaka. Poluprovodnički elementi se montiraju sa donje strane štampane ploče i na njih je potrebno postaviti hladnjak za odvođenje toplote.

Na energetskoj štampanoj ploči potrebno je postaviti strujne senzore koji će nam davati informaciju o vrednosti struje na svakoj od faza. Takođe, ukupna vrednost struje koja

protiče kroz motor, odnosno zbir struja sve tri faze, davaće nam informaciju da li je došlo do prekoračenja struje.

Kao konekciju sa upravljačkom štampanom pločom i ADC štampanom pločom koristiti konektore IDC20. Ovim se omogućava lako povezivanje između štampanih ploča pomoću flet kabla. Konektor za napajanje i konektor kojim se štampana ploča povezuje sa motorom treba izabrati tako da mogu da izdrže velike vrednosti struje.

Za indicaciju da je štampana ploča priključena na napajanje i indicaciju da li je ispravnom modu koristi LED diode. U cilju praćenja signala od značaja potrebno je staviti ispitne tačke (*test points*) na vodove, čime se omogućava lakši pristup za merenje osciloskopom. Takođe, kontrolne tačke potrebno je postaviti na izlaz svakog DC/DC konvertora radi lakšeg utvrđivanja da li je ostvarena odgovarajuća vrednost napona.

Pošto je u pitanju štampana ploča koja će služiti za razvoj, dodato je nekoliko opcionih rešenja u cilju testiranja i odabiranja elektronskih komponenti koji bi se u budućnosti koristile u masovnoj proizvodnji. Takođe, veličina štampane ploče nije unapred definisana, ali zbog cene same izrade treba biti što manja.

### 6.1.1 Izbor mernih rešenja

Sagledavanjem osnovnih prednosti i mana predstavljenih strujnih senzora, kao i cene, izdržljivosti, veličine koju zauzima na štampanoj ploči i poznate najveće vrednosti struje koja će kroz njega proticati izabrana je odgovarajuća tehnika za merenje struje. Upoređivanjem rezultata ranije korišćenih strujni senzora u sličnim aplikacijama kao tehnika merenja struje izabran je šant. U konkretnoj izvedbi izabran je šant WSL27265L000FEB proizvođača Vishay Dale, a neke od njegovih glavnih karakteristika su:

- Otpornost  $5\text{m}\Omega$
- Maximalna snaga  $3\text{W}$
- Temperaturni opseg  $-65^{\circ}\text{C} \div 170^{\circ}\text{C}$
- Mala induktivnost  $0.5\text{nH} \div 5\text{nH}$

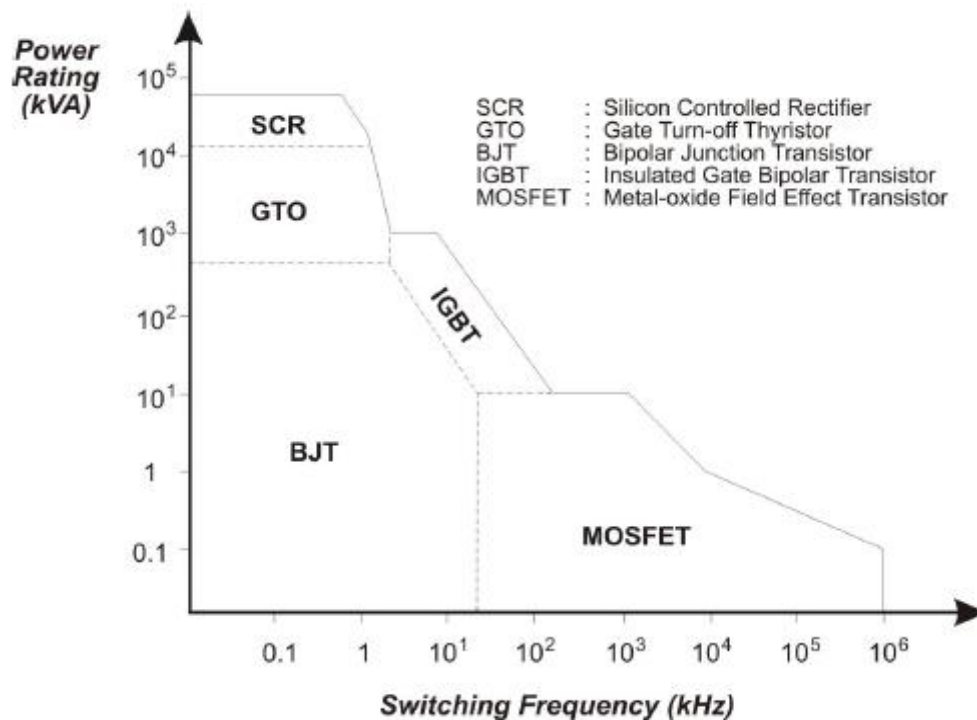
Za prilagođenje napona mernim kolima iskorišćen je naponski razdelnik. Princip merenja i kondicioniranje napona detaljnije je objašnjeno u poglavlju merenje napona i struje.

### 6.1.2 Izbor MOSFET-ova i kontrolnih kola

Već je napomenuto da se kao invertorski prekidači koriste poluprovodničke komponente koje imaju dva stabilna prekidačka stanja. Na osnovu tehnologije izrade poluprovodničke komponente se mogu podeliti u dve osnovne grupe:

- One koje su zasnovane na tehnologiji tiristora, kao što su puno-upravljivi tiristori (GTO), kod kojih je moguće inicirati procese uključivanja i isključivanja i tiristori upravljivi poljem (FCT)
- One koje su zasnovane na tehnologiji tranzistora, kao što su bipolarni tranzistor (BJT), tranzistor sa efektom polja (FET) i bipolarni tranzistor sa izolovanom upravljačkom elektrodom (IGBT)

Izbor odgovarajuće prekidačke komponente zavisi od područja primene odnosno snage i brzine prekidačkih komutacija. Na slici 6.1 prikazana je oblast primene poluprovodničkih prekidačkih elemenata.



**Slika 6.1** Oblasti primene poluprovodničkih prekidačkih elemenata

U konkretnoj aplikaciji, pošto se PWM inverter napaja se baterije, izabrali smo MOSFET kao prekidački poluprovodnički element. MOSFET predstavlja najbolje rešenje zbog brzih prekidačkih sposobnosti i malih gubitaka prilikom komutacije.

Glavne prednosti MOSFET-ova:

- Brza komutacija (od 10ns do 100ns)
- Relativno jednostavna strujna zaštita
- Relativno jednostavan napon kojim se kontroliše gejst sa malom strujom

Osnovni nedostaci MOSFET-ova su:

- Relativno male mogućnosti snage
- Relativno veliki pad napona  $V_{DS}$ , koji rezultira većim gubicima i ograničenju korišćenja u aplikacijama gde je potrebna veća snaga

Ograničenje prilikom izbora MOSFET-a predstavlja zahtev da budu u kućištu TO-220. Istraživanjem tržišta izabran je MOSFET STB75NF75 proizvođača STMicroelectronics.

Neke od njegovih glavnih karakteristika su:

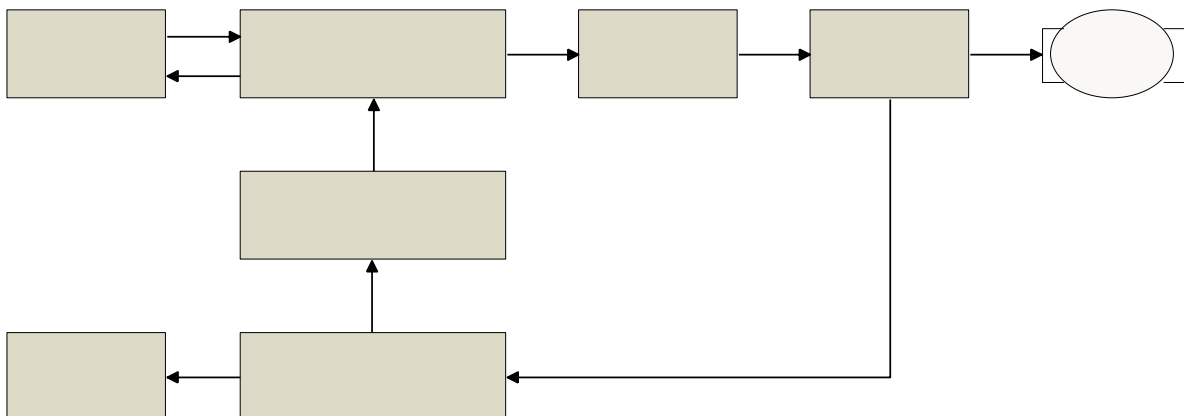
- Drejn-Sors probojni napon 75V
- Gejt-Sors probojni napon  $\pm 20V$
- Kontinualna struja Drejna 80A
- Vreme porasta 100ns

Za upravljačka kola koristi se FAN7842 proizvođača Fairchild Semiconductor. Upravljačko kolo predstavlja modifikaciju u odnosu na prethodno korišćeno upravljačko kolo, u smislu poboljšanih performansi, a detaljnije je objašnjeno u jednom od narednih poglavlja.

## 6.2 Razvijanje šeme po blokovima

Savremeni alati za projektovanje štampanih ploča pružaju mogućnost za izradu veoma složenog dizajna, dobru preglednost i orijentaciju tokom projektovanja kompleksnih elektronskih sklopova. Projektovanje se zasniva na hijerarhiji, pri čemu se kompleksni blokovi dele na jednostavnije celine, koje se potom zasebno uređuju.

Na slici 6.2 prikazana je blok šema štampane ploče.

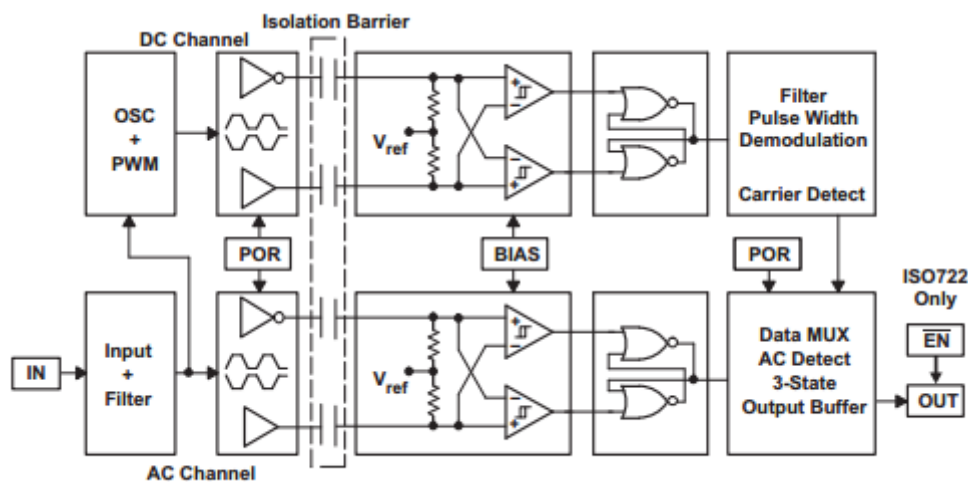


**Slika 6.2** Blok šema štampane ploče

Blokovi ADC konekcija i FPGA konekcija nisu predstavljeni u narednim blokovima, a sastoje se od konektora IDC20. Takođe, blok sa PWM invertorom je detaljno je objašnjen u poglavlju br.3. Energetska štampana ploča je sa ostale dve štampane ploče povezana flet kablom, a sa motorom povezana je kablovima koji mogu su predviđeni da izdrže velika opterećenja.

### 6.2.1 ISO722

Galvanska izolacija izvršena je preko digitalnog izolatora ISO722. Logički izlaz je baferovan u odnosu na logički ulaz i razdvojen silicijum dioksidom ( $\text{SiO}_2$ ), koji predstavlja izolacionu barijeru. Ova barijera omogućava galvansku izolaciju do 4000V. Na slici 6.3 prikazan je funkcijski dijagram digitalnog izolatora.



**Slika 6.3** Funkcijski dijagram integriranog kola ISO722

ISO722 poseduje *enable* pin, aktivan na logičkoj nuli, koji određuje aktivno stanje izlaza. Ova sposobnost je iskorišćena kao način prekidanja upravljanja motorom ukoliko dođe do prekoračenja struje.

### 6.2.2 FAN7842

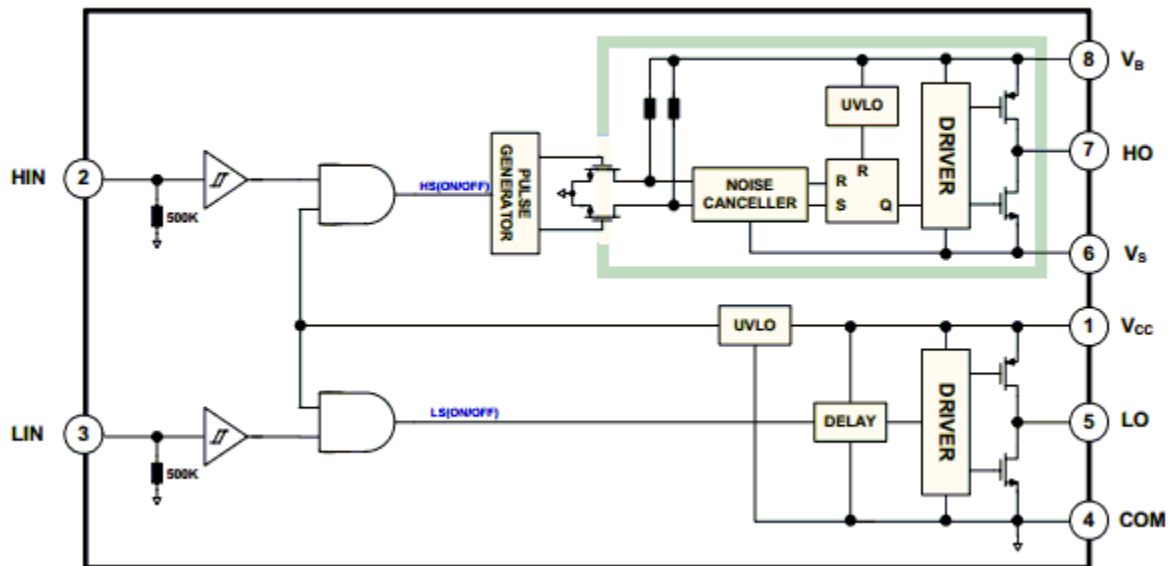
Za upravljanje MOSFET-ovima koristi se gejt drajver FAN7842. Jednostavna tehnika poništavanja šuma omogućuje stabilnost u radu i prilikom veoma brzih promena napona. Kompatibilni su sa TTL logičkim ulazima i mogu se koristiti za upravljanje MOSFET-ovima i IGBT tranzistorima koji rade na naponima do 200V. Posедуje UVLO (*Undervoltage-Lockout*), elektronsko kolo koje isključuje napajanje samog čipa u slučaju da napon opadne ispod operativne vrednosti.



Neke od ostalih karakteristika gejt drajvera FAN7842 su:

- Izlazni signal je fazi sa ulaznim signalom
- upareno kašnjenje za oba kanala ispod 50ns
- napajanje u opsegu 10V ÷ 20V

Slika 6.4 prikazuje arhitekturu gejt drajvera.



**Slika 6.4** Arhitektura gejt drajvera FAN7842

### 6.2.3 Merenje napona i struje

Kao što je navedeno, radi kvalitetne kontrole potrebne su nam što tačnije informacije o vrednosti napona a prevashodno o vrednosti struje.

Izlazne vrednosti napona dobijenih iz šanta potrebno je kondicionirati na vrednosti koje su kompatibilne logičkim nivoima digitalnog prijemnika. Funkcija koju kondicioner obavlja proizilaze od prirode kako samog signala tako i digitalnog prijemnika. Prijemnik najčešće zahteva signale sa amplitudom bliskom njegovom naponu napajanja i dovoljno strmih ivica da bi se sprečila lažna okidanja. U konkretnom slučaju kondicioniranje signala izvršeno je korišćenjem odgovarajućih otpornika i operacionih pojačavača.

Napon na svakoj od faza dostiže vrednosti od 56V. Za kondicioniranje napona iskorišćen je naponski razdelnik pri čemu su vrednosti otpornika proračunate tako da ukoliko napon pređe 10% nominalne vrednosti, izlaz sa naponskog razdelnika bude tačno 5V. Dobijeni signal se zatim baferuje radi dobijanja strmijih ivica i prosleđuje odgovarajućem digitalnom prijemniku.

## 6.2.4 Detekcija prekoračenja struje

Blok za detekciju prekoračenja struje vrši sumiranje struja sa sve tri faze. Dobijeni signal potrebno je kondicionirati da se prilagodi logičkim nivoima kontrolne logike. Ukoliko dođe do prekoračenja struje, kontrolna logika projektovana je tako da se onemoguće izlazni upravljački signali sa digitalnog izolatora. Ukupna struja je ograničena, da ne bi došlo do oštećenja ostalih elektronskih čipova, i dovedena je na D flip flop. Na invertovan i neinvertovan izlaz flip flopa postavljene su LED diode, kao indikacija, koje omogućavaju uvid u ispravnost rada.

## 6.3 Projektovanje štampane ploče

Projektovanju štampane ploče, odnosno horizontalne projekcije vodova (*layout-a*), prethodi crtanje električne šeme gde je neophodno uneti sve parametre preporučene od strane proizvođača komponenata, kako bi tokom izrade štampane ploče bila zadovoljena pravila povezivanja i pozicioniranja komponenata. Prebacivanje ograničenja iz dokumentacija komponenata u skup pravila (*design rules*) u okviru alata za projektovanje obezbeđuje smanjenje ili čak eliminisanje mogućnosti pojave neželjenih efekata. Kreiranje horizontalne projekcije vodova predstavlja jedan od poslednjih koraka u procesu projektovanja i često je najkritičniji u celokupnom procesu. Definisana pravila direktno utiču na:

- Kašnjenje i smicanje ivica
- Integritet signala
- Preslušavanje signala
- Parametre i integritet napajanja
- Elektromagnetsku interferenciju (EMI)

Električna šema treba da bude što preglednija i lako čitljiva, zbog čega se ulazni signali, koji ulaze u integrisane čipove ili konektore, postavljaju sa jedne strane a izlazni sa druge strane. Veze na PCB-u treba da budu identične sa odgovarajućim dijagramima kola, a raspored komponenata funkcionalan, pa retko postoji vidljiva korelacija između električne šeme i PCB-a. Širina voda na PCB-u predstavlja kompromis zasnovan na toku struje, slobodnog prostora i elektromagnetnih smetnji. Ukoliko je vod širi smanjuje se njegova otpornost, zbog čega se vodovi koji služe za napajanje kreiraju da budu što širi ili se modifikuju u obliku poligona.

Pravilno raspoređivanje komponenti na PCB-u je od velike važnosti, jer dobar raspored u velikoj meri olakšava povezivanje i daje najbolje električne performanse. Takođe, treba voditi računa o postavljanju komponenti kao što su: kratkospojnici, ispitne tačke, prekidači i potencijometri, na mesta kojima je lako prići i izvršiti određena merenja prilikom testa.

Osim navedenih pravila koje treba uzeti u obzir prilikom projektovanja, od velikog značaja je kreiranje nultog potencijala (*GND-a*) kroz koji će proticati celokupna struja. Nulti

potencijal se u najvećem broju slučajeva kreira u obliku poligona ili ravni ukoliko je u pitanju višeslojna štampana ploča. Pravilno kreiranje obezbeđuje:

- Zajednički referentni potencijal
- Zaštitu
- Smanjenje šuma
- Smanjenje otpornosti
- Smanjenje impedanse
- Hlađenje

### 6.3.1 Savremeni alati za projektovanje i simulaciju štampanih ploča

Savremeni alati za projektovanje štampanih ploča omogućavaju detaljno definisanje i proveru pravila koje ograničavaju fizičke mere štampanih kola. Na tržištu su dostupna brojna programska okruženja, čiji kvalitet i mogućnosti diktiraju cenu samog programskog paketa. Neki od najčešće korišćenih alata za projektovanje sa kojima se srećemo su “Altium designer”, “Cadence allegro”, “EAGLE”, “OrCAD” i drugi. Navedeni alati obuhvataju biblioteke komponentata različitih proizvođača, alatke za planiranje projekta, simuliranje rada PCB-a, izrada 3D modela komponentata i slično.

Osim navedenih programskih paketa, od velikog značaja su i razni pomoćni alati, koji nam omogućavaju precizno sračunavanje različitih parametara koje treba ugraditi u projekat. Ovde spadaju alati za sračunavanje parametara vodova kontrolisane impedanse, parametara i vrednosti različitih elektronskih komponentata, napajanja, odvođenja toplote, simuliranja rada pojedinih blokova i slično.

Štampana ploča izrađena je u programskom paketu “Altium designer”, čiji je korisnički interfejs jednostavan za korišćenje tokom celog razvoja, a deo za projektovanje PCB-a ima čitav niz mogućnosti posebno usmeren na električna i fizička ograničenja.

### 6.3.2 Informacije potrebne za početak procesa projektovanja

Postoji nekoliko dostupnih izvora informacija koji olakšavaju izradu PCB sistema. Literatura koja je dostupna u većini slučajeva vezana je za jednostavnije projekte, ali može biti od velike koristi u vidu sagledavanja osnovnih pravila, dok je za projektovanje kompleksnijih struktura neophodno iskustvo. Za svaku od električnih komponenti postoji dokumentacija, najčešće izrađena u vidu dokumenata u PDF formatu, iz koje se izvlače naophodni podaci. Većina dokumentacije se može pronaći pristupom internetu, dok je za specifične komponente dokumentacija dostupna kod proizvođača i dobija se slanjem zahteva. Vrlo je važno pažljivo pročitati dokumentaciju i uzeti obzir sva preporučena uputstva od

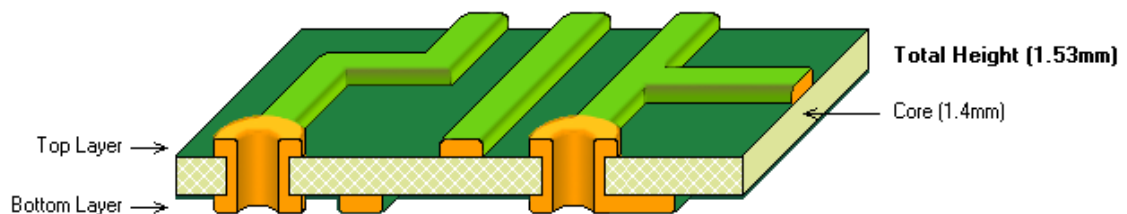
strane proizvođača vezana za način povezivanja, dovođenja napajanja, odvođenja toplote i drugo.

Početak procesa projektovanja predstavlja kreiranje šematskog simbola komponenti. Većina simbola je standardizovana i već postoji u bibliotekama alata za dizajniranje PCB-a, dok je simbole za novija integrisana kola potrebno posebno kreirati. Kompleksnija integrisana kola, koja se sastoje iz više namenskih blokova i imaju veliki broj pinova, kreiraju se iz više delova i postavljaju na zasebne strane električne šeme, čime se sama električna šema značajno pojednostavljuje. Pravilnim kreiranjem simbola, u smislu dodele električnog tipa pinovima, postavljanja ulaznih pinova sa jedne a izlaznih sa druge strane, ili označavanjem drugačijom bojom pinova za napajanje, omogaćavamo preglednost električne šeme i smanjenje greške prilikom povezivanja.

Nakon ovoga potrebno je kreirati odgovarajući otisak električne komponente na štampanoj ploči (*footprint*) koji mora biti u skladu sa IPC (*Interconnecting and Packaging electronic Circuits*) standardima. IPC standardi objedinjuju pravila po kojima se vode proizvođači elektronskih komponentata, i u skladu sa navedenim standardom izrađujemo modele komponentata. Na ovaj način model svake komponente objedinjuje dimenzije kućišta, dimenzije i raspored pinova, razmak između pinova, veličinu kontakata na PCB-u, dimenzije termalnog kontakta (ako to komponenta zahteva), ukupnu oblast koju zauzima komponenta, orijentaciju na PCB-u i 3D model. Dodeljivanje 3D modela električnoj komponenti, omogućava nam stvarni uvid u izgled komponente i predstavlja dodatnu mogućnost provere da li je otisak električne komponente na štampanoj ploči pravilno kreiran.

Slojevitost, odnosno poprečni presek štampane ploče zavisi od najkompleksnijih komponenti, a usvaja se od na osnovu propisa koje daje proizvođač komponente. U našem slučaju, pošto ne postoje komponente koje zahtevaju pridržavanje posebnih propisa, štampana ploča je izrađena u dva sloja.

Na slici 6.5 prikazan je poprečni presek štampane ploče.



**Slika 6.5** Poprečni presek štampane ploče

Nakon što se odredi položaj konektora preostaje pozicioniranje integrisanih čipova i pasivnih komponenti. Pravilnim rasporedom smanjuje se dužina vodova između komponenti i omogućava lakše povezivanje. Izvesni integrisani čipovi zahtevaju postavljanje dekapling kondenzatora koji imaju svrhu smanjenja uticaja smetnji prilikom impulsnog režima rada. Ove kondenzatore potrebno je postaviti što je moguće bliže pedu na koji se dovodi napajanje da bi kondenzator bio efikasan.

Radi lakšeg pozivanja i sigurnosti da su čvorovi na komponentama pravilno spojeni, potrebno je izvršiti podešavanje rezolucije (*grid-a*). Izbor rezolucije zavisi od najkompleksnije električne komponente. U slučaju da je rastojanje između pinova (*pitch*) integrisanih čipova u milskom rasteru rezoluciju je potrebno podesiti na milski raster. Analogno tome, ukoliko je rastojanje između pinova integrisanih čipova u milimetarskom rasteru onda je rezoluciju potrebno podesiti na odgovarajući milimetarski raster.

Veoma je važno voditi računa o dimenzioniranju vodova kroz koje protiče velika struja. Njihova dužina treba biti što kraća, a širina što veća radi smanjenja otpornosti samog voda i uticaja smetnji, pri čemu treba ostaviti dovoljno praznog prostora na štampanoj ploči između vodova različitih faza.

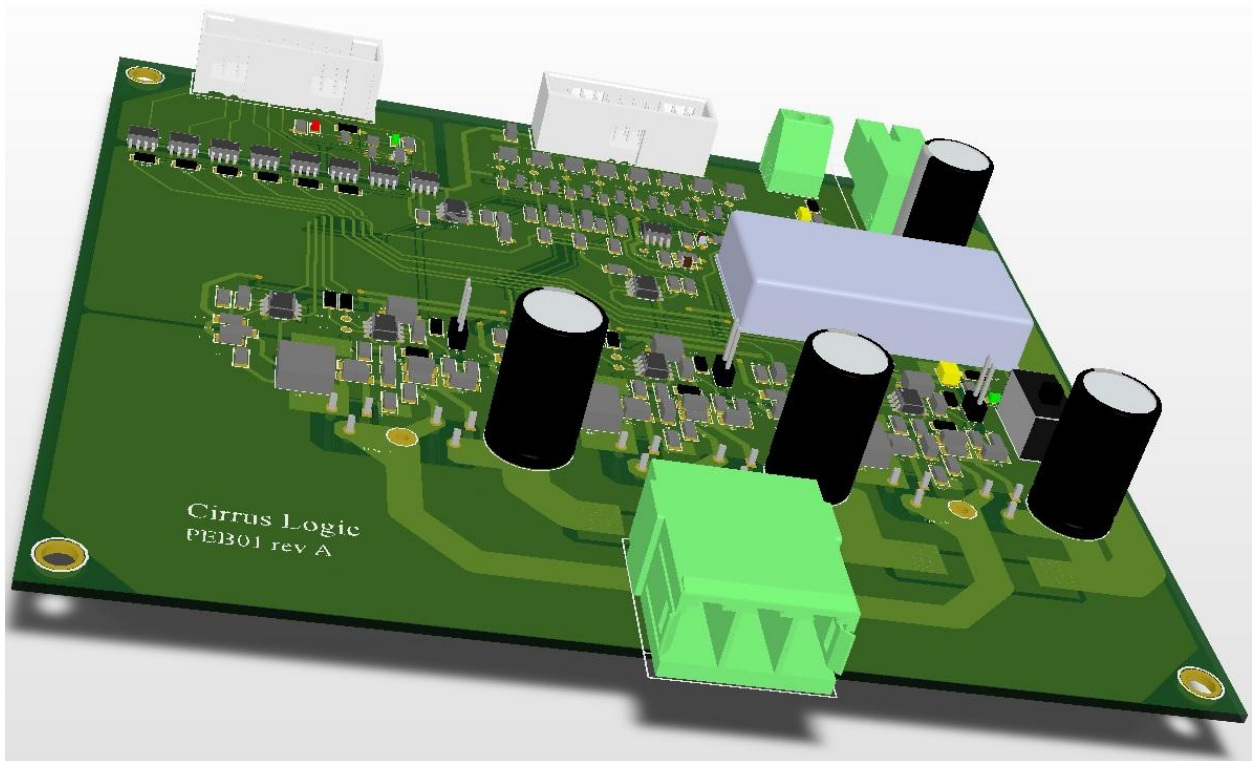
Mogućnost provere projekta omogućena je svakom trenutku, kako na nivou kreiranja električne šeme, u smislu provere da li se oznake šematskog simbola komponente ponavljaju, da li ima nepovezanih vodova i slično, tako i na nivou kreiranja PCB-a. Kao konačnu proveru da li su ispoštovana sva definisana pravila uneta u projekat koristi se naredba *Design Rule Check* (DRC). DRC predstavlja automatizovanu funkciju koja proverava logički i fizički integritet kreiranog projekta. Na ovaj način proveravamo da li su svi vodovi spojeni, da li je ispoštovan zahtevani razmak između vodova, da li se oznaka električne komponente ne nalazi na nekom od pedova gde se treba zalemiti, da li je ispoštovan dovoljan razmak prilikom pozicioniranja komponenti na PCB-u i slično. Provere je potrebno izvršavati sve dok se ne zadovolje sva definisana pravila.

### 6.3.3 Izrada štampane ploče

Nakon završenog projektovanja štampane ploče, neophodno je kreirati datoteke, potrebne za izradu PCB-a, kao i za montažu komponenti. Dokumenti vezani za izradu PCB-a izrađuju se u vidu gerber datoteka koji u sebi sadrže sve električne i neelektrične slojeve od kojih je štampana ploča izrađena i NC Drill datoteka koji sadrže poziciju rupa na štampanoj ploči. Proizvođaču PCB-a potrebno je dostaviti gerber i NC Drill datoteke, kao i informaciju o završnici PCB-a, koja može biti u vidu zlatne, kalajisane ili osnovna. Ukoliko se radi o kompleksnijim štampanim pločama, osim navedenih datoteka, proizvođaču PCB-a potrebno je dostaviti i poprečni presek štampane ploče i podatke o vodovima kontrolisane impedanse. Osim navedenih datoteka potrebno je kreirati step datoteku kompletnog PCB-a radi izrade mehaničkog kućišta u koje bi štampana ploča bila postavljena.

U sam proces izrade štampane ploče spada i kreiranje sastavnice komponenti. Alat u kome se električna šema i PCB izrađuju omogućavaju dodeljivanje određenih parametara električnim komponentama. Osim osnovnih parametara kao što su: designator, vrednost i *footprint*, moguće je dodati parametre kao što su: distributer, porudžbeni broj, implementacija itd. Alat poseduje mogućnost izlistavanja komponenti, a pravilnim upisivanjem parametara, kreiranje sastavnice je vrlo jednostavno i postupak poručivanja komponenti značajno se ubrzava.

Kao mogućnost viđenja konačnog izgleda štampane ploče sa komponentama na sebi, Altium poseduje mogućnost trodimenzijalnog prikaza dizajna. Na slici 6.6 prikazan je 3D model štampane ploče.



**Slika 6.6** 3D model štampane ploče

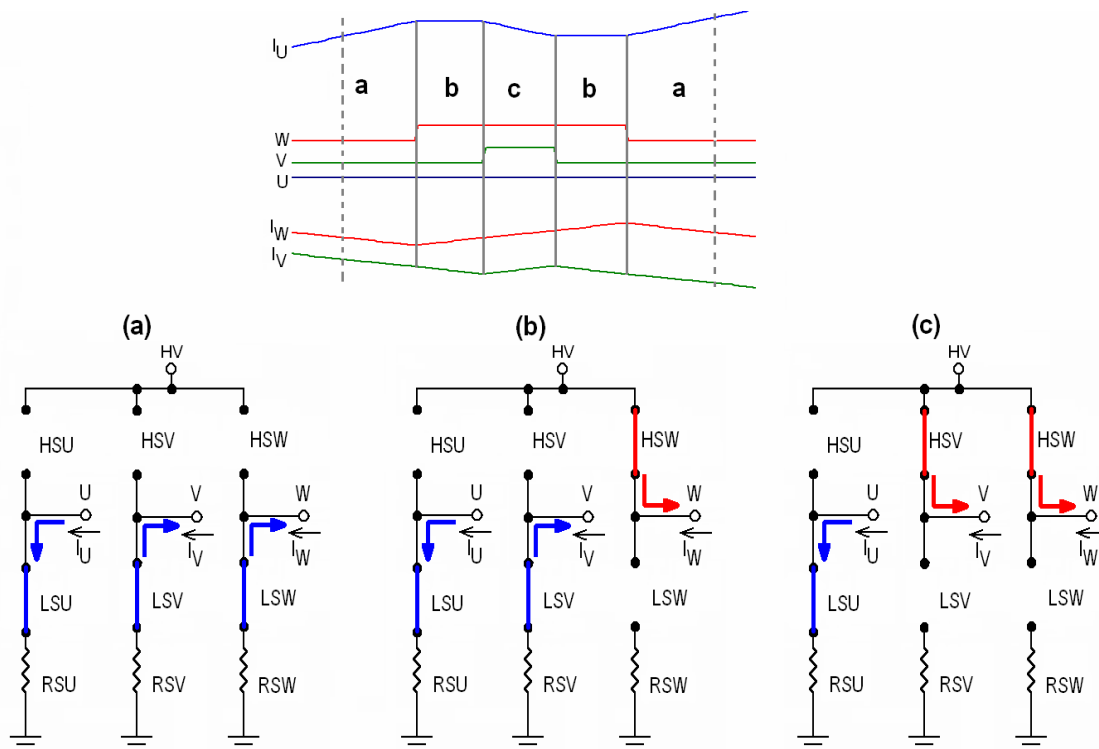
Montaža komponenata zahteva uvid u slojeve PCB-a koji definišu površinu na koju se nanosi lemna pasta i poziciju komponenti na odgovarajućem sloju. Na osnovu sloja za nanošenje lemne paste formira se lemna maska, koja omogućava precizno nanošenje lemne paste na za to predviđena mesta.

## 6.4 Verifikacija štampane ploče

U cilju verifikacije štampane ploče izvršeno je merenje naponskog signala koji dobijamo sa strujnog senzora tj. šanta. Problem koji se javlja je merenje struje u trenucima kada struja ne prolazi kroz šant. Formirani trofazni PWM signal uvek ima jednu komponentu čija je vrednost jednaka nuli, koja kratko spaja jedan od donjih prekidača na masu, dok su ostala dva prekidača otvoreni ili ne u zavisnosti od nivoa amplitude i vremena. Kao primer na kome će se ukazati na ovu problematiku uzeto je da je napon na terminalu U jednak nuli.

Tokom svakog PWM ciklusa neophodne su nam informacije o vrednosti struje na sva tri terminala, ali je samo struja  $I_U$  pozitivne vrednosti i usklađena sa referentnim smerom, dok su struje ostala dva terminala negativne vrednosti. Kada je HSV prekidač uključen, smer

struje  $I_V$  je suprotan (struja teče ka terminalu V) i slično kada je HSW prekidač uključen struja  $I_W$  će imati suprotan smer i teći ka terminalu W. Dominantno induktivna priroda motora pomaže u ovoj situaciji, jer i kada je HSW isključen struja  $I_W$  ne može brzo da se promeni već se menja samo njen nagib. Na slici 6.7 prikazan segment PWM ciklusa i topologija protoka struje.



**Slika 6.7** Segment PWM ciklusa i topologija protoka struje

Vezano za menjanje stanja prekidača, tipičan PWM ciklus ima tri stanja:

- Sva tri donja prekidača su uključena. Omogućeno je direktno merenje korišćenjem ADC-a, a sve tri struje prolaze kroz šantove.
- Jedan gornji prekidač je uključen (HSW); dva donja prekidača su uključena (LSU i LSV). Samo dve od tri struje prolaze kroz šant i one se mogu direktno meriti korišćenjem ADC-a. Vrednost treće struje se može izračunati kao  $I_W = -I_U + I_V$ .
- Dva gornja prekidača su uključena (HSV i HSW); jedan donji prekidač je uključen (LSU). Kroz šant teče samo struja jednog terminala i jedino nju je moguće meriti direktno korišćenjem ADC-a. Nije moguće obaviti merenje struje sva tri terminala.

#### 6.4.1 Kvalitet merenja signala sa šanta

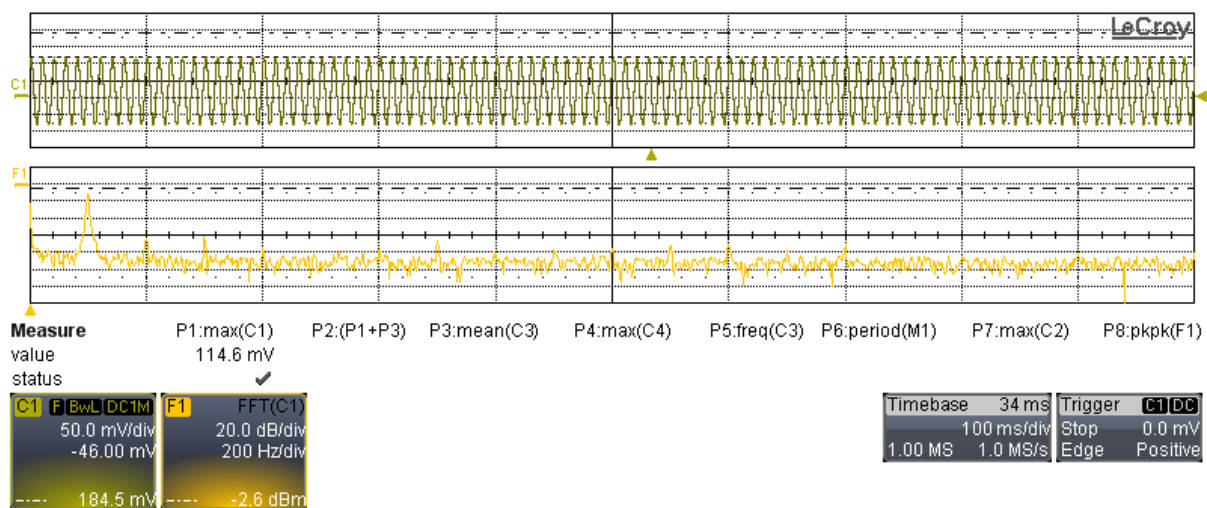
Zbog predstavljenog problema merenja struje sa terminala motora kao simulacija signala sa šanta korišćen je referentni sinusni signal iz signal generatora, amplitude 100mV i frekvencije 100Hz koji odgovara očekivanom obliku signala sa šanta.

Korišćena laboratorijska oprema:

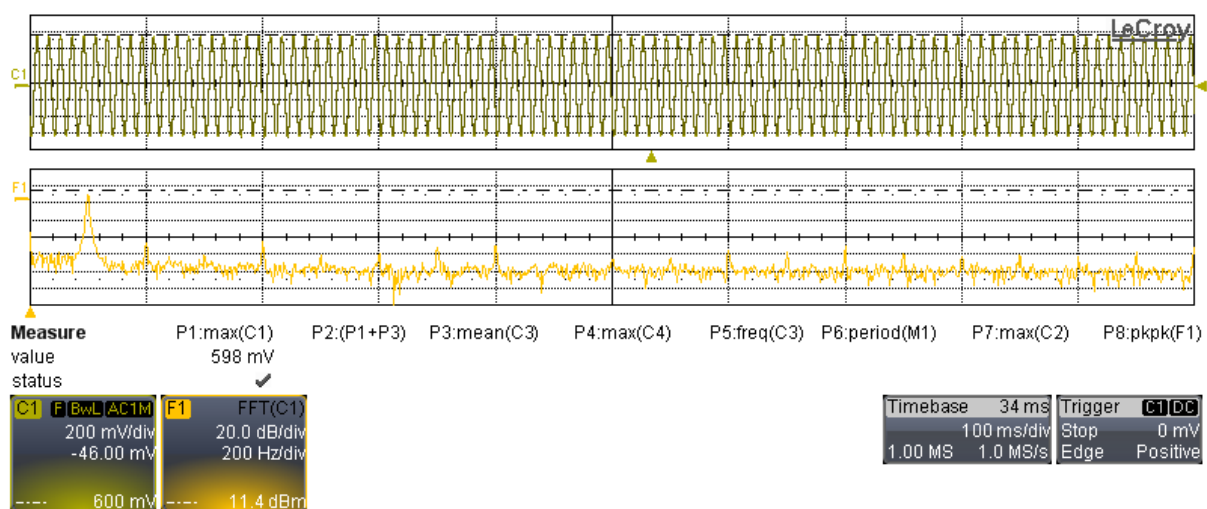
1. Izvor napona. DC ispravljač Hewlett Packard 6012B opsega 0÷60V snage 1200W
2. Signal generator. AWG 2040 proizvođača TEKTRONIX koji generiše signale naponskog opsega do 2V i frekvencijskog do 1GHz
3. Osciloskop. VBA104Xi-A firme LeCroy frekvencijskog opsega 1GHz koji poseduje veliki broj funkcija za praćenje signala

Funkcija koja je korišćena pri analizi signala je FFT (*Fast Fourier Transform*) funkcija u  $2^N$  tačaka sa Von Hann (Hanning) prozorskom funkcijom. Hanning-ov prozor predstavlja najčešće korišćenu prozorsku funkciju jer obezbeđuje dobru frekvencijsku rezoluciju i zaštitu od curenja sa visokom tačnošću vrednosti amplitude.

Na slici 6.7 prikazan je signal koji je doveden na ulaz diferencijalnog pojačavača (emulacija signala koji dolazi sa šanta) i izlazni signal iz diferencijalnog pojačavača.



(a)



(b)

**Slika 6.8** (a) Signal doveden na ulaz diferencijalnog pojačavača  
(b) Signal na izlazu diferencijalnog pojačavača

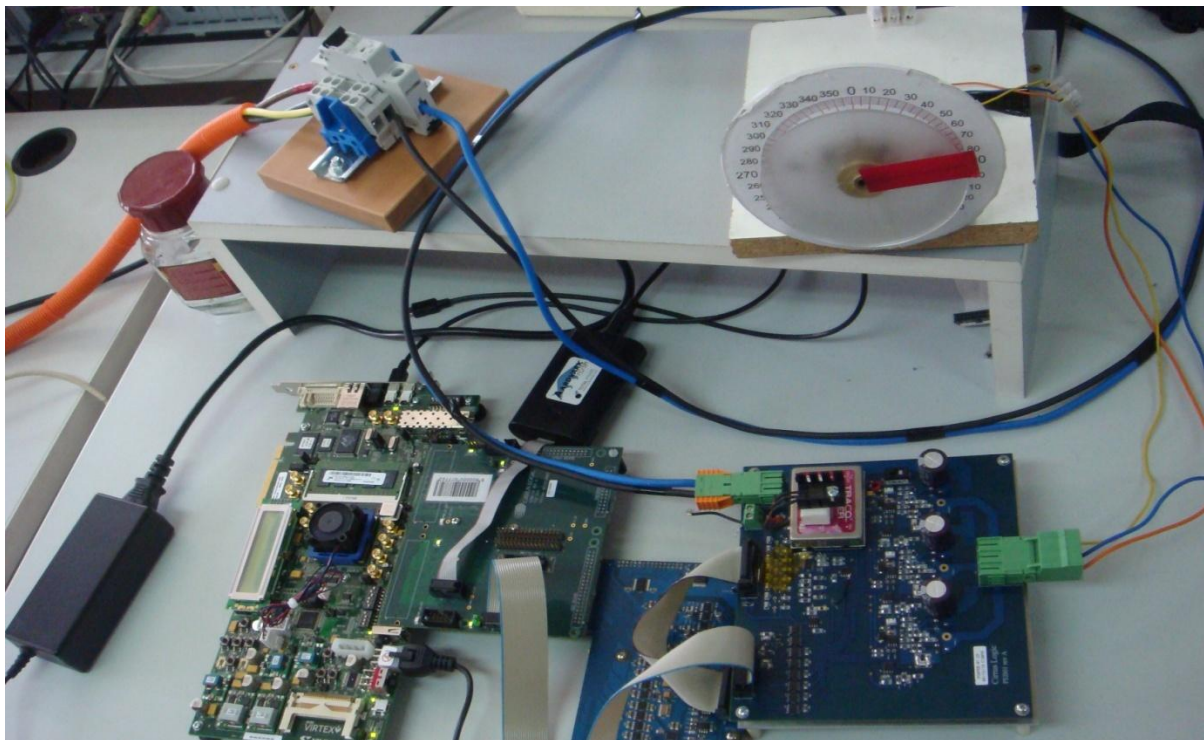


Frekventna analiza signala pokazuje da odnos signal šum na ulazu (uz napomenu da u plato šuma uračunavamo i harmonijsku nečistoću generatora – vidljive su komponente drugog, trećeg i ostalih harmonika) iznosi oko 50dB. Značajno je da isti nivo kvaliteta ostaje i na izlazu pojačavača, što potvrđuje kvalitet pojačavačkog rešenja. Ovo je ujedno najkritičnija tačka u akvizicionom lancu, jer kvalitet signala koji se u analognom domenu izgubi, generalno nije moguće povratiti kasnijom digitalnom obradom. Informacija o strujama u sistemu je esencijalna za kompletnu kontrolu, jer se svaka greška koja tu nastane propagira kroz algoritam i može dovesti do velikih problema u upravljanju.

#### 6.4.2 Funkcionalna verifikacija

Nakon verifikacije mernog lanca, tj. potvrde o kvalitetno dobijenim signalima sa šanta i diferencijalnih pojačavača u lanac je uključen i ADC (koji nije deo ovog rada) kao i celokupni upravljački algoritam. Setovani sistem prikazan je na slici 6.9 a sastoji se:

- ML605 (kontrolna upravljačka ploča)
- EDBM-06 (štampana ploča na kojoj su prilagodna kola za spregu različitih ulazno-izlaznih naponskih standarda 2V5 na 5V i obratno)
- EDBM-03 (štampana ploča na kojoj se vrši AD konverzija)
- PEB01 (štampana ploča opisana u ovom radu)
- MOTOR



**Slika 6.9** Celokupni upravljački sistem

Ovako formiran sistem verifikovan je na motorima:

- Nidec 27h (3 para polova, 24V, 2.5A)
- Anaheim BLY342D - 24V - 3000 - 2500SI (4 para polova, 24V, 8A)

## 7. Zaključak

Formirana je univerzalna platforma sa PWM inverterom koja omogućuje upravljanje trofaznim naizmeničnim motorima. Kao motori nad kojima se vršilo upravljanje korišćeni su sinhroni motori sa permanentni magnetima snage do 500W, tipično za pogon električnih skutera i ručnog alata. Opterećenje je pored inercije samog rotora (koje je u slučaju motora električnih skutera veliko, a u ostalim slučajevima vrlo malo) simulirano dodavanjem kočnice, tako da je dodati kočioni momenat mogao proizvoljno da se menja.

Kao simulacija baterije korišćen je DC ispravljač tipa Hewlett Packard 6012B opsega 0÷60V snage 1200W. Za napajanje korišćeni su naponi od 24V.

U praktičnoj primeni, od predstavljenih tehnika Impulsno širinske modulacije, koristila se Impulsno širinska modulacija prostornim vektorom koja se na izrađenoj energetskejštampanoj ploči pokazala vrlo pouzdanom. Izbor MOSFET-ova i elektronskih kola za upravljanje MOSFET-ovima pokazao se kao kvalitetan i u potpunosti je odgovorio postavljenim zahtevima.

Činjenica je da svaki sistem nosi sa sobom određene nedostatke, pa je cilj da se kroz buduće izmene i dorade uklone ili minimizuju nedostaci. Jedan od nedostataka je mala vrednost otpornosti šanta, a samim tim i mali opseg promene napona pri merenju struje motora malih snaga. Takođe, određene električne komponente koje su postavljene radi sigurnosti, a nisu montirane na štampanu ploču, mogu se ukloniti čime bi se doprinelo smanjenju veličine štampane ploče.

Jedno od mogućih rešenja postojećeg nedostatka može da predstavlja korišćenje šantova različitih vrednosti koji imaju isti otisak na štampanoj ploči. U tom slučaju bi se, u zavisnosti od snage motora kojim se upravlja, montirali šantovi odgovarajućih vrednosti.

## 8. Literatura

- [1] Slobodan N. Vukosavić, „Električne mašine”, Академска мисао 2010.
- [2] B. Mitraković, „ Sinhrona mašine”, 7. izdanje, Naučna knjiga, Beograd, 1991.
- [3] „Invertori” <http://tnt.etf.bg.ac.rs/~oe3ee/invpdf.pdf> [pristupljeno: maj 2013.]
- [4] Bimal K. Bose, „Modern Power Electronics and AC Drives”, 2002.
- [5] Bimal K. Bose, „Power Electronics and Motor Drives Advanced and Trends”, 2006.
- [6] Boris P. Dumnić, „Upravljanje pogonom sa asinhronim generatorom i dvostrukim pretvaračem povezanim na mrežu”, 2012.
- [7] Malcolm Barnes, „Practical variable Speed Drivers and Power Electronics”, 2003.
- [8] [http://telekomunikacije.etf.bg.ac.rs/predmeti/ef2em/4\\_ANALOGNI\\_INSTRUMENTI.pdf](http://telekomunikacije.etf.bg.ac.rs/predmeti/ef2em/4_ANALOGNI_INSTRUMENTI.pdf), [pristupljeno: maj 2013]
- [9] John G. Webster, „Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook”, 1999.