

UNIVERZA V LJUBLJANI
PEDAGOŠKA FAKULTETA
FAKULTETA ZA MATEMATIKO IN FIZIKO

Študijski program: Fizika in tehnika

**Poučevanje vsebin o delovanju
brezkrtačnih enosmernih
elektromotorjev**

DIPLOMSKO DELO

Mentor:

dr. Slavko Kocijančič, izr. prof.

Kandidatka:

Aleksandra Čufar

Ljubljana, junij 2013

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju dr. Slavku Kocijančiču za zanimivo temo in pomoč pri nastajanju diplomskega dela. Zahvala gre tudi Gregorju Tarmanu in Davidu Rihtaršiču za vso asistenco pri izdelavi projekta. Zahvaljujem se tudi družini in prijateljem, ki so me spodbujali in podpirali.

POVZETEK

Brezkrtalni elektromotorji zamenjujejo krtalne na vseh področjih uporabe. Diplomsko delo je tako namenjeno predstavitvi brezkrtačnih elektromotorjev, njihovemu delovanju in splošni uporabi.

V prvem sklopu diplomskega dela so opisane različne vrste elektromotorjev in njihova področja uporabe. Poznamo več vrst elektromotorjev in več načinov delitve. Med zadnjimi dodanimi je brezkrtačni elektromotor. V drugem sklopu diplomskega dela podrobneje spoznamo vrste enosmernega brezkrtačnega elektromotorja, njihovo delovanje in način krmiljenja.

V tretjem sklopu izdelamo model enosmernega brezkrtačnega elektromotorja in ga preizkusimo. V tem delu analiziramo učne načrte in poskušamo približati brezkrtačni elektromotor osnovnim šolam in srednjim poklicno-tehničnim šolam.

KLJUČNE BESEDE

Električni motorji, brezkrtačni elektromotorji, Bascom, izdelava modela, učni načrt.

TEACHING ABOUT OPERATION OF BRUSHLESS DC MOTORS

ABSTRACT

Brush DC motor is being replaced by brushless DC motors on every area of application. My diploma thesis is a presentation of brushless DC motor, how it works and its application.

Within first part we describe various electric motors and their application. There are several types of electric motors division. Last to be added is a brushless motor. Within second part of thesis we look into a brushless DC motor, how it works, its application and control.

In the third part of thesis we construct a brushless model and test it. We also analyze primary and secondary school curricula and try to approach brushless DC motor to curriculum of technical subjects.

KEY WORDS:

Electric motors, brushless motors, Bascom, model construction, curricula.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD.....	1
2	RAZDELITEV IN PRIMERJAVA ELEKTROMOTORJEV	2
2.1	PRINCIP DELOVANJA ELEKTRIČNIH MOTORJEV	3
2.1.1	Magnetna privlačnost in odbojnost.....	3
2.1.2	Enosmerni motor po delih	5
2.1.3	Delovanje enosmernega stroja.....	7
2.2	OPIS IN PRIMERJAVA ELEKTRIČNIH MOTORJEV	9
2.2.1	Enosmerni motorji s ščetkami	9
2.2.2	Asinhronski motor.....	10
2.2.3	Sinhronski motor s permanentnimi magneti.....	13
2.2.4	Koračni motor.....	14
2.2.5	Reluktančni motor	16
2.2.6	Enosmerni motor brez ščetk	18
3	OPIS DELOVANJA ENOSMERNEGA BREZKRTAČNEGA MOTORJA	20
3.1	PRINCIP ZGRADBE ENOSMERNEGA BREZKRTAČNEGA MOTORJA.....	20
3.1.1	Zgradba statorja	20
3.1.2	Rotor s permanentnimi magneti	22
3.2	DELOVANJE MOTORJA	24
3.2.1	Pretok magnetnega polja	24
3.2.2	Navor.....	24
3.2.3	Nadzor lege in hitrosti.....	26
3.2.4	Komutacija.....	31
3.2.5	Trifazni enosmerni brezkrtačni elektromotor	32
3.3	KRMILJENJE ENOSMERNEGA BREZKRTAČNEGA MOTORJA	35
3.3.1	Dvofazni brezkrtačni motor.....	35
3.3.2	Postopki vodenja trifaznega motorja	38
3.3.3	Postopki vodenja brez senzorjev	40
3.4	PREPROSTI POSTOPKI KRMILJENJA	44
3.4.1	Oprema, potrebna pri krmiljenju	44
3.4.2	Pregled osnovnih ukazov v Bascomu	46
3.4.3	Ventilator v osebni računalniku	49
3.4.4	Krmiljenje dvofaznega enosmernega brezkrtačnega motorja (ventilator)	50
3.4.5	Enosmerni trifazni brezkrtačni elektromotor brez senzorjev položaja	54
3.4.6	Krmiljenje z elektronsko komutacijo.....	55
3.5	KOMPLEKSNEJŠI POSTOPKI VODENJA.....	57
4	MODEL ENOSMERNEGA ELEKTROMOTORJA BREZ ŠČETK	60
4.1	ELEKTRONSKI ELEMENTI IN OGRODJE MOTORJA	60
4.1.1	Uporabljeni elektronski elementi	60
4.1.2	Shema elektronskega vezja.....	62
4.1.3	Ogrodje modela.....	63
4.2	SESTAVA VSEH ELEMENTOV IN DELOVANJE.....	65
4.2.1	Sestava elementov.....	66
4.2.2	Delovanje modela enosmernega brezkrtačnega elektromotorja	67
4.2.3	Testiranje modela enosmernega brezkrtačnega elektromotorja	69

5	BREZKRTAČNI ELEKTROMOTOR V UČNEM NAČRTU.....	71
5.1	UČNI NAČRTI V OSNOVNI ŠOLI	71
5.1.1	<i>Tehnika in tehnologija</i>	71
5.1.2	<i>Izbirni predmeti v osnovni šoli.....</i>	72
5.2	UČNI NAČRT V SREDNJIH ŠOLAH	72
5.2.1	<i>Poklicno-tehnično izobraževanje elektrotehnik elektronik</i>	73
5.2.2	<i>Poklicno-tehnično izobraževanje elektrotehnik energetik</i>	74
5.2.1	<i>Poklicno-tehnično izobraževanje strojni tehnik.....</i>	76
6	ZAKLJUČKI	77
7	VIRI IN LITERATURA:	78
8	PRILOGE (NA ZGOŠČENKI)	82

KAZALO SLIK

Slika 2.1: Osnovna razdelitev elektromotorjev [1].	2
Slika 2.2: Razdelitev električnih motorjev glede na zasnovu [1].	3
Slika 2.3: Demonstracija, kako vpliva smer toka na magnetno iglo v kompasu [2].	4
Slika 2.4: Z levo roko lahko hitro ugotovimo, kako tečejo magnetnice okoli vodnika [2].	4
Slika 2.5: Inducirana napetost se pojavi, ko se z vodnikom premikamo po magnetnem polju [2].	5
Slika 2.6: Primer osnovnega DC-generatorja [2].	5
Slika 2.7: Deli armature [2].	6
Slika 2.8: Tipi krtačnih vzmeti [3].	7
Slika 2.9: Preprost generator z eno zanko in komutatorjem [2].	8
Slika 2.10: Izhod na generatorju z eno zanko [2].	8
Slika 2.11: Izhod na generatorju z dvema zankama [2].	9
Slika 2.12: Zgoraj: vezava Y v obliki zvezde, spodaj: vezava D v obliki trikotnika [5].	11
Slika 2.13: Skica kratkostične kletke na rotorju asinhronskega motorja [5].	12
Slika 2.14: Levo: rotor z drsnimi obroči, desno: trifazno rotorsko navitje v vezavi Y [5].	12
Slika 2.15: Levo: primer namestitve permanentnih magnetov v utore, desno: primer zunanje namestitve permanentnih magnetov [5].	14
Slika 2.16: Shematski prerez koračnega motorja [4].	15
Slika 2.17: Delovanje koračnega motorja [4].	16
Slika 2.18: Levo: lamelni rotor, desno: rotor z magnetnimi pregradami [5].	17
Slika 2.19: Brezkrtačni elektromotor in elektronska komutacija [4].	18
Slika 3.1: Prerez enosmernega brezkrtačnega motorja [3].	21
Slika 3.2: Različne oblike utorov na statorju: (a) razcepne reže, (b) prazne reže, (c) zaprte reže in (d) zobci z različno širino aktivne površine [7].	21
Slika 3.3: Diskasta izvedba enosmernega motorja brez ščetk in utorov [1].	22
Slika 3.4: Gostota magnetnega polja v zračni vrzeli 2-polnega valjastega rotorja [6].	22
Slika 3.5: Dve izvedbi 3-faznega brezkrtačnega motorja s štirimi trajnimi magneti. Levo: z magneti na površju in desno: z magneti pod površjem [8].	23
Slika 3.6: Magnetni pretok okoli rež na statorju [6].	24
Slika 3.7: Navor (M) na preprostem brezkrtačnem motorju [6].	25
Slika 3.8: Prikaz Hallovega efekta [9].	27
Slika 3.9: Prečni prerez BLDC-motorja [10].	28
Slika 3.10: (a) Shematska predstava trojejnega Hallovega senzorja. (b) Namestitev trojejnega Hallovega senzorja [10].	28
Slika 3.11: Magnetni senzor, ki zaznava gibanje zobatega kolesa [10].	29
Slika 3.12: Princip delovanja optičnega dajalnika: 1 – usmerjen snop svetlobe, 2 – rešetke, 3 – maska, 4 – svetlobno občutljivo tipalo [7].	30
Slika 3.13: Optični dajalnik s prirastom in absolutni: (a) disk optičnega dajalnika s prirastom, (b) kvadratni izhodni signal, (c) disk absolutnega optičnega dajalnika, (d) izhodni digitalni signal absolutnega optičnega dajalnika [7].	30
Slika 3.14: Shema motornega pogona [6].	31
Slika 3.15: Inverter za trifazni motor [10].	32
Slika 3.16: Dvopolni trifazni motor z dvema utoroma na fazo na pol (12 utorov) [6].	32
Slika 3.17: Navor (M) in gonilna napetost (U_g) za 'a'-fazo [6].	33
Slika 3.18: Prikaz vezja BLDC-motorja, levo sta tok in napetost v odvisnosti od položaja rotorja [8].	34

Slika 3.19: Temeljna oblika dvofaznega BLDC-motorja [11].	35
Slika 3.20: Nastala gonilna napetost pri kroženju magnetov na rotorju [11].	36
Slika 3.21: Aktivacijska napetost modulirana s PWM [11].	36
Slika 3.22: Krmilnik ventilatorja v osebni računalnik – LB 1661 [1].	38
Slika 3.23: Shema delovanja elektronsko komutiranega trifaznega motorja [12].	38
Slika 3.24: Trifazni tranzistorski most [13].	39
Slika 3.25: Prehod inducirane napetosti skozi ničlo in območja fazne komutacije [10].	42
Slika 3.26: Sistem za estimacijo hitrosti in pozicije na BLDC-motorju [10].	43
Slika 3.27: Vmesnik eProDas-Rob1 [14].	44
Slika 3.28: Ventilator v osebni računalnik.	49
Slika 3.29: Stator, kjer so vidna navitja, Hallova sonda in vezje krmilnika.	50
Slika 3.30: Zunanji rotor motorja, kjer so vidni ležaji, os motorja in permanentni magnet.	50
Slika 3.31: Priklop ventilatorja.	51
Slika 3.32: Priklop ventilatorja na Port D.	51
Slika 3.33: Napajanje ventilatorja priključimo na Port C0 in na GND.	52
Slika 3.34: Elektromotor ima tri izhodne priključke, torej tri faze.	55
Slika 3.35: Električna shema vodenja enosmernega motorja brez ščetk [1].	57
Slika 3.36: Levo: idealni tokovi in napetosti. Desno: dejanske inducirane napetosti [1].	58
Slika 3.37: Vodenje trifaznega BLDC z mostiščnim vezjem [1].	59
Slika 4.1: Zgradba pnp in npn tranzistorja in polarnost napetosti med priključki [19].	61
Slika 4.2: Simbol n-kanalnega MOSFET-a [19].	62
Slika 4.3: Shema vezja za krmiljenje modela.	63
Slika 4.4: Izbrana tuljava ima 1600 zank in induktivnost 50mH.	63
Slika 4.5: Primer izdelave rotorja z magneti.	64
Slika 4.6: Ogrodje iz aluminija z izvrtinami za tuljave in Hallovo stikalo.	64
Slika 4.7: Postavitev obeh tuljav, Hallovega stikala in osi za ležaj.	65
Slika 4.8: Napajalnik za računalnik je dober vir enosmerne napetosti in ima stikalo za vklop in izklop.	66
Slika 4.9: Elektronske elemente najlažje povežemo s pomočjo protoboarda.	66
Slika 4.10: Hallovo stikalo naj bo kar se da blizu rotirajočim magnetom.	67
Slika 4.11: Model enosmernega brezkrtačnega elektromotorja.	67
Slika 4.12: Osciloskop vezemo na sistem prek polomskega upornika.	68
Slika 4.13: Opazujemo Hallovo stikalo (rumeno-črno na dnu slike). Desna slika ima manjšo frekvenco in je Hallovo stikalo odmaknjeno od sredine. Leva slika ima večjo frekvenco in je Hallovo stikalo na sredini.	69
Slika 4.14: Desno vidimo sliko na osciloskopu v prostem teku in levo, ko je motor obremenjen.	70

KAZALO TABEL

Tabela 3.1: Komutacijska stikala za neprekinjeno delovanje [13].	40
--	----

PREGLED UPORABLJENIH SIMBOLOV IN KRATIC

Enote:

H – henri

Hz – herc

J – džul

N – njuton

Nm – njutonmeter

rad – radian

T – tesla

W – vat

Wb – veber

Ω – om

° – kotne stopinje

Simboli:

AC – (angl. *alternating current*) izmenični tok

B – gostota magnetnega pretoka [T]

DC – (angl. *direct current*) enosmerni tok

F – sila [N]

H – magnetna poljska jakost [A/m]

i – fazni tok [A]

I – tok [A]

J – vztrajnostni moment [kg m²]

L – induktivnost [H]

P – moč [W]

R – upornost [Ω]

M – navor [Nm]

U – vhodna napetost [V]

U_g – gonilna napetost [V]

v – hitrost [m/s]

Φ – magnetni pretok [Wb]

θ – kotni odmik [rad ali °]

ω – kotna hitrost [rad/s]

Kratice:

A/D – analogno-digitalni

ADC – analogno-digitalni pretvornik

BLDCM – (angl. *Brushless DC Motor*) enosmerni brezkrtačni motor

EMF – (angl. *Electromotive Force*) gonilna napetost

GND – (angl. *ground*) zemlja

N – (angl. *North*) severni

PWM – pulzno širinska modulacija

S – (angl. *South*) južni

ŠMI – šolski malonapetostni izvor

1 UVOD

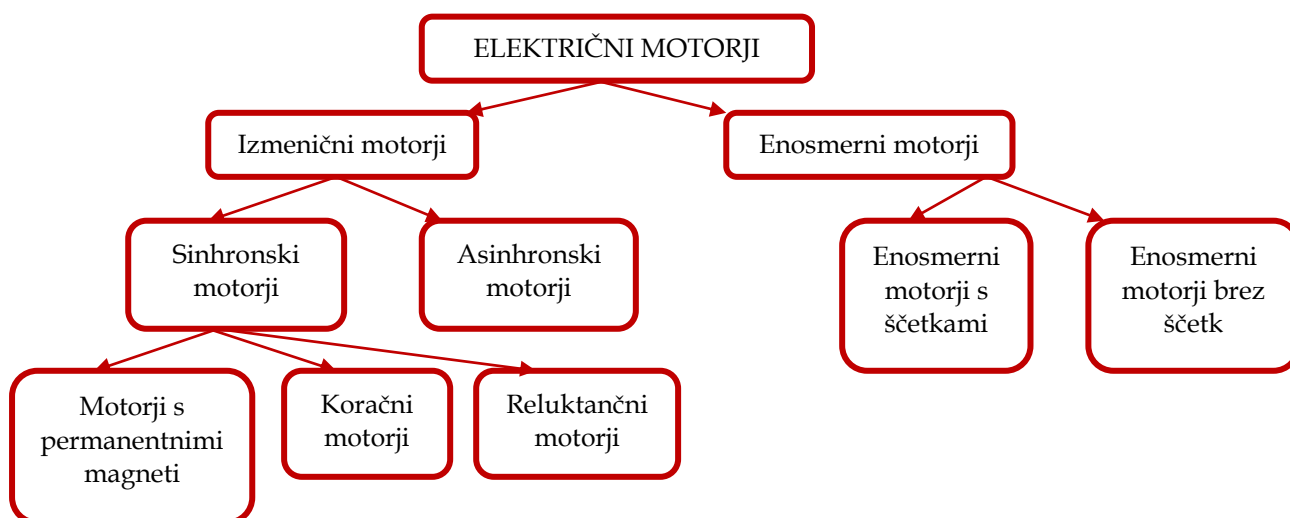
Elektromotorji se po obliki razdelijo na več skupin in podskupin. Skupina brezkrtačnih elektromotorjev je bila k ostalim dodana med zadnjimi in je priljubljena na več različnih področjih. Evolucija motorja iz motorja s ščetkami na takšnega brez ščetk je v industrijo prinesla vzdržljivejše, robustnejše in lažje elektromotorje, ki so poleg vsega tudi cenejši za vzdrževanje. Brezkrtačni elektromotor lahko nadomesti krtačnega na vseh področjih uporabe. Največ se pojavlja pri električnih vozilih, od električnih koles, motorjev do električnih avtomobilov. Zaradi povečane moči in zmanjšane mase je popularen tudi v modelarskem svetu.

Brezkrtačni motorji se tako pojavljajo na vseh področjih, a o njih vemo zelo malo. Sistem komutacije je za razliko od tistega s ščetkami veliko bolj zapleten. Prav tako obstaja več vrst brezkrtačnih elektromotorjev in s tem tudi več različnih načinov komutacije in krmilnih sistemov.

V osnovni šoli je v učnem načrtu naveden le klasični enosmerni elektromotor s ščetkami. Tako so učbeniki in delovni zvezki posvečeni le krtačnemu motorju, ki je vse manj prisoten v vsakdanjem življenju. Pri učnih načrtih za srednje tehnične šole pa o motorjih piše le v splošnem smislu. Največkrat se v srednjih šolah tako učitelji odločijo predstaviti brezkrtačni elektromotor v obliki projektne naloge.

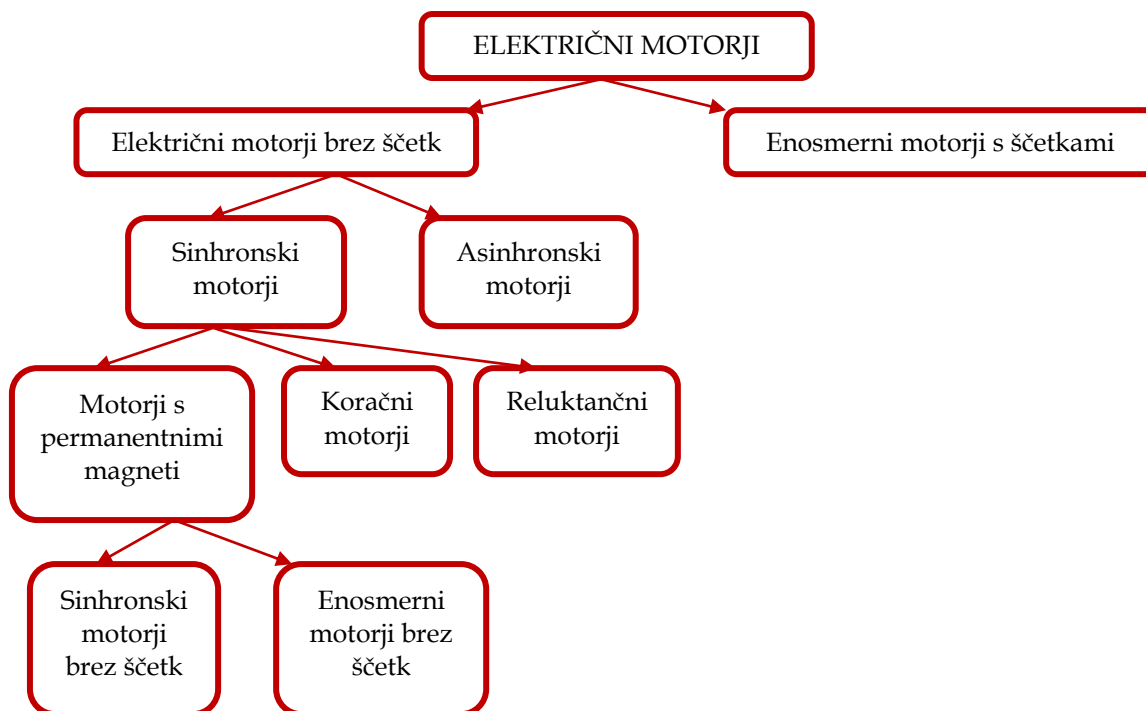
2 RAZDELITEV IN PRIMERJAVA ELEKTROMOTORJEV

Elektromotorje v osnovnem lahko razdelimo na enosmerne in izmenične motorje (Slika 2.1). Taka oblika razdelitve je najbolj pogosta in se jo tudi največkrat uporablja. Enosmerne motorje delimo na enosmerne motorje s ščetkami ali brez njih, izmenične pa na asinhronske in sinhronske. Te motorje delimo naprej na motorje s permanentnimi magneti, na koračne in reluktančne motorje.



Slika 2.1: Osnovna razdelitev elektromotorjev [1].

Druga razdelitev deli motorje glede na strukturo (Slika 2.2). V osnovi poznamo motorje s ščetkami ali motorje brez ščetk. Razdelitev se bolj kot na napajalno napetost nanaša na zasnovo motorja [1].



Slika 2.2: Razdelitev električnih motorjev glede na zasnovo [1].

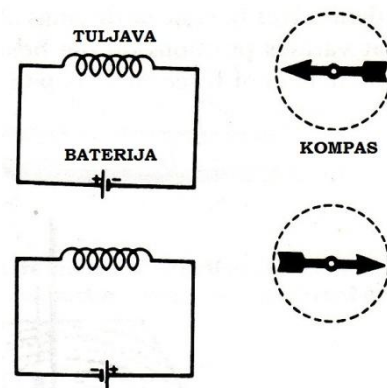
2.1 PRINCIP DELOVANJA ELEKTRIČNIH MOTORJEV

Da bi dobili jasno sliko, na kakšen princip deluje elektromotor, moramo najprej poznati osnove indukcije in magnetizma. Treba je poznati severni pol N (angl. *North*) in južni pol S (angl. *South*) pri magnetu, ter kako delujeta med seboj [2].

2.1.1 Magnetna privlačnost in odbojnost

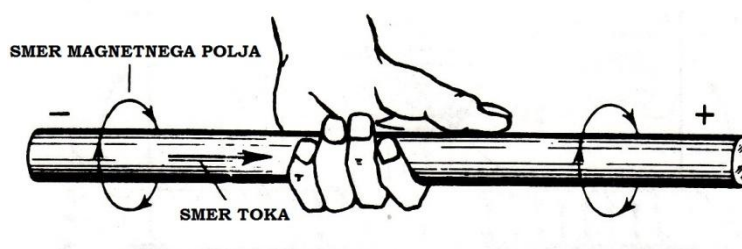
Predstavljajmo si, da imamo en magnet pritrjen tako, da se prosto obrača. Z drugim magnetom se s severnim polom (v nadaljevanju N) približamo N in ugotovimo, da se magneti odbijata. Ravno tako, ko se z južnim polom (v nadaljevanju S) približamo S. Če pa približamo S k N ali N k S, se privlačita. Z eksperimentom nato naprej ugotovimo, da privlačnost oziroma odbojnost med magneti pada kvadratno z razdaljo.

Na Sliki 2.3 je prikazan eksperiment s tuljavo in baterijo. Opazujemo magnetno iglo na kompasu. Najprej kaže v levo, in ko zamenjamo priključke na bateriji, se obrne v desno. Ugotovimo, da smer toka vpliva na magnetno iglo tako, kot trajni magnet v prejšnjem preizkusu.



Slika 2.3: Demonstracija, kako vpliva smer toka na magnetno iglo v kompasu [2].

Okoli žice, po kateri teče tok, se pojavi magnetna sila, ki deluje po pravilu leve roke. Na Sliki 2.4 je prikazano pravilo leve roke, ki pravi, da če postavimo palec v smeri toka, kažejo ostali prsti smer magnetnega polja.



Slika 2.4: Z levo roko lahko hitro ugotovimo, kako tečejo magnetnice okoli vodnika [2].

Pri poznavanju smeri magnetnega polja lahko hitro dobimo smer električnega toka po prevodniku [2].

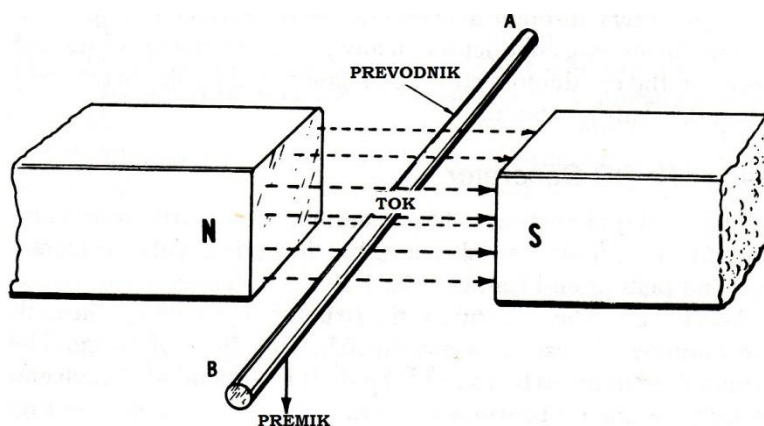
Elektromagneti

Elektromagnet je sestavljen iz navitja – tuljave in sredice iz železa. Kot magnet deluje le takrat, ko skozenj teče električni tok. Takoj, ko se električni tok prekine, ni več znakov magnetizma. Elektromotor najdemo v skoraj vseh električnih napravah, tudi v motorjih in generatorjih. Moč elektromagneta je odvisna od moči električnega toka in števila navitij v tuljavi [2].

Indukcijski tok

Tuljavo priklopimo na občutljiv galvanometer in vodnik premikamo dol in gor čez pol magneta. Na galvanometru zaznamo odmikavanja v nasprotni smeri, kot se giblje prevodnik. Če ta obmiruje, se kazalec na galvanometru vrne na nič. S tem eksperimentom dokažemo, da

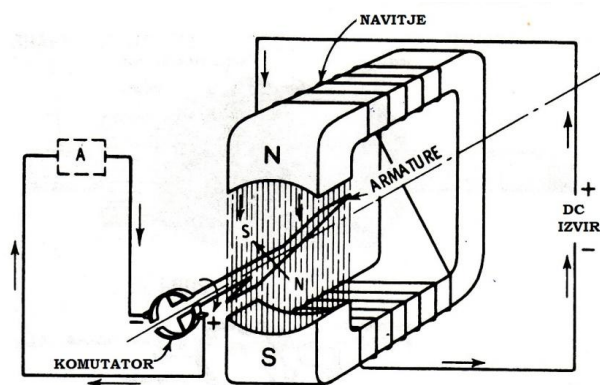
lahko iz nič ustvarimo električni tok. Imenujemo ga indukcijski tok. Z Lenzovim pravilom lahko določimo smer inducirane toka. Ta bo zmeraj imel takšno smer, da nasprotuje zunanjim spremembam magnetnega polja. Preprost način, kako razumeti delovanje generatorja, da si predstavljamo, kako se ustvari inducirana elektromagnetna sila v enem samem vodniku, ko se ta premika po magnetnem polju (Slika 2.5). Med točko A in točko B se pojavi razlika v potencialih, kar dokažemo, če na obe točki priklopimo voltmeter. Vendar pa se ta pojavi le, če se vodnik premika pravokotno na smer magnetnega polja, kot bi rezali navidezne magnetnice, in ne vzporedno z njim [2].



Slika 2.5: Inducirana napetost se pojavi, ko se z vodnikom premikamo po magnetnem polju [2].

2.1.2 Enosmerni motor po delih

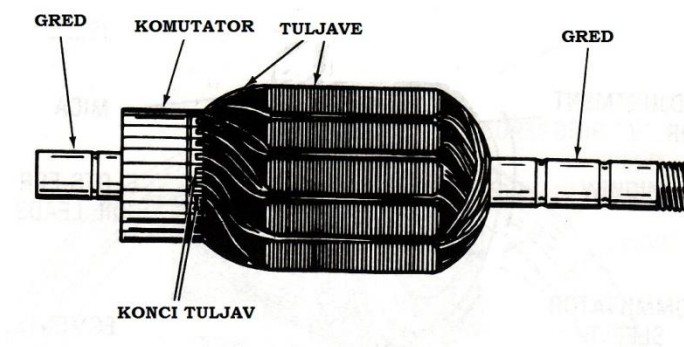
Motor pretvarja iz električne energije v mehansko energijo. Enosmerni generator je lahko uporaben tudi kot enosmerni motor in obratno. Strukturno sta oba stroja enako sestavljena iz elektromagneta, rotorja in komutatorja s ščetkami (Slika 2.6) [2].



Slika 2.6: Primer osnovnega DC-generatorja [2].

Rotor

Na rotorju so navitja, ki režejo magnetno polje. Rotor je pritrjen na gred, ki visi na dveh ležajih, kot je prikazano na Sliki 2.7. Jedro rotorja je sestavljeno iz več plasti mehkega železa. Rob laminiranega jedra ima utore, kamor je navita tuljava [2].



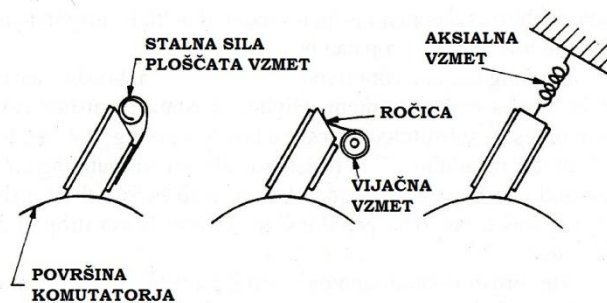
Slika 2.7: Deli armature [2].

Komutator

Komutator je del stroja, ki pretvarja izmenično napetost v enosmerno. Nameščen je na osi rotorja in povezuje izhodne sponke z vrtljivo armaturo [2]. Večina komutatorjev je sestavljena iz bakrenih palic, vrste izolacije med njimi in vpenjalom, ki preprečuje centrifugalnim silam, da bi premaknile komutatorske palice. Vpenjalna metoda mora zagotoviti, da palice ostanejo na mestu ne glede na radialne, aksialne ali termično povzročene sile pred sestavitvijo in po njej. Pri kovinskem vpenjalu je pomembno, da je dobro izoliran od komutatorja, da se prepreči prevajanje med dvema sosednjima palicama [3].

Krtačke in držala za krtačke

Krtačke prenesejo tok od komutatorja do zunanjega tokokroga. Po navadi so zmes grafitnega in kovinskega prahu. Narejene so, da prosto drsijo v držalu, saj je površina komutatorja navadno neenakomerna zaradi obrabe [2]. Vzmeti omogočajo konstanten kontakt s površino komutatorja tako, da tok teče enakomerno. Stabilen kontakt je dosežen, ko se krtačke ne premikajo naprej in nazaj ter se ne tresejo v držalu. Prav tako je pomembno, da se ne zatikajo. Na Sliki 2.8 vidimo, da obstaja več vrst vzmetenja držal [3].



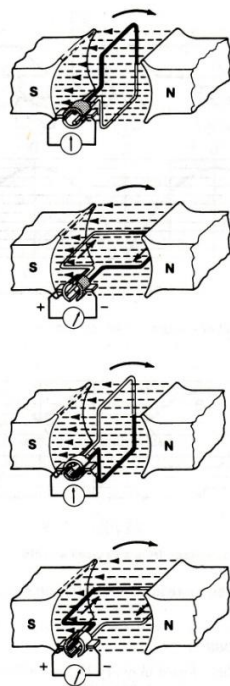
Slika 2.8: Tipi krtačnih vzmeti [3].

Stator

Okvir ali stator ima dva namena. Služi kot mehansko ogrodje in povezuje magnetni krog. Magnetnice, ki tečejo od severnega k južnemu polu skozi rotor, se vrnejo k severnemu polu skozi ogrodje. Po navadi so narejeni iz legiranega jekla [2].

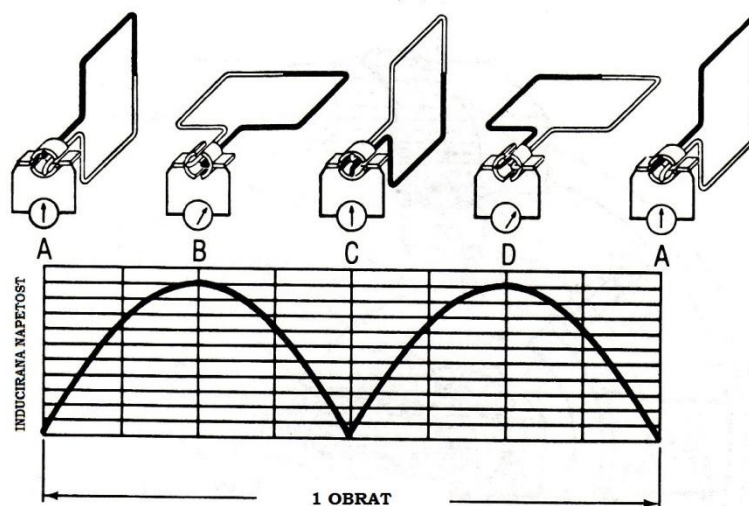
2.1.3 Delovanje enosmernega stroja

V najpreprostejšem si predstavljamo, da imamo le eno zanko v magnetnem polju (Slika 2.9). Kot smo ugotovili že v poglavju 2.1.1. Magnetna privlačnost in odbojnost, se s premikom zanke v polju inducira napetost. Sama veličina je odvisna od prevodnika in hitrosti premika. Kot je prikazano na Sliki 2.9, je vsak izmed koncev zanke pritrjen na dvodelni kovinski obroč. Oba dela obroča sta izolirana med seboj in gredjo. To predstavlja preprost komutator.



Slika 2.9: Preprost generator z eno zanko in komutatorjem [2].

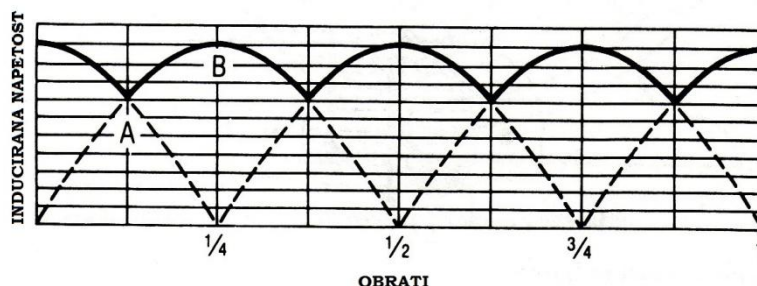
Komutator mehansko obrne priključka rotorja v tistem trenutku, ko se napetost zamenja, vendar pa ena zanka ni dovolj, saj, kot je vidno na Sliki 2.10, dobimo pulz. Taka napetost ni uporabna, zato dodamo več navitij.



Slika 2.10: Izhod na generatorju z eno zanko [2].

Na Sliki 2.11 vidimo, da se polje spremeni, ko dodamo še eno zanko. Z odebeljeno črno črto je prikazan izhod na generatorju z dvema zankama. Padec napetosti je tu skoraj

neopazen, saj so sedaj namesto dveh delov komutatorja štirje in dve krtački. Z dodajanjem zank je padec vse manjši [2].



Slika 2.11: Izhod na generatorju z dvema zankama [2].

2.2 OPIS IN PRIMERJAVA ELEKTRIČNIH MOTORJEV

Opisi motorjev bodo zajemali opis delovanja, področja uporabe ter dobre in slabe lastnosti motorja [1].

2.2.1 Enosmerni motorji s ščetkami

Enosmerni motorji s ščetkami ali enosmerni motorji z mehansko komutacijo so najpogostejše uporabljeni v pogonih s spremenljivo hitrostjo, na primer v robotiki, orodnih strojih, avtomobilski industriji, gospodinjskih aparatih in pri ročnem orodju [1]. Enosmerni motor za svoje delovanje izkorišča dejstvo, da na vodnik, po katerem teče električni tok, deluje sila v magnetnem polju, ki skuša vodnik premakniti. Jakost sile je odvisna od električnega toka v vodniku, gostote magnetnega pretoka, efektivne dolžine vodnika v magnetnem polju in števila ovojev. Enosmerni motor vsebuje vrtljivo uležajeno tuljavo, ki je nameščena med severni in južni pol trajnega magneta ali elektromagneta. Če na tuljavo priključimo električno napetost, steče po njej tok, ki v tuljavi ustvari njeno lastno magnetno polje. Silnice tega polja tečejo pravokotno na površino navitij. Na tuljavo deluje navor magnetne sile, ki jo skuša zasukati. Smer navora je odvisna od smeri toka [4].

Vzbujanje je pogostejše izvedeno z elektromagneti, ki jih predstavljajo navitja v statorju. Vzbujanje je lahko tuje, vzporedno (paralelno), zaporedno (serijsko) ali sestavljeno (kompavdno). Rotor predstavljajo navitja, ki so priključena na mehanski komutator. Nasprotna pola se privlačita in rotor se vrti, dokler se ne poravnata [1]. Da se lahko vrtenje

tuljave nadaljuje tudi prek nevtralne lege, mora tok v rotorjevi tuljavi spremeniti smer. To se mora zgoditi v trenutku, ko je rotor v nevtralni legi. Spremembo smeri toka opravi mehanski obračalnik toka, ki ga imenujemo komutator. Z njim so povezani začetki in konci posameznih navitij na rotorju. Komutator zagotovi, da tok skozi navitje rotorja teče vedno v isti smeri. Z mirujočega dela motorja (statorja) na vrteči se del motorja (rotor) teče tok prek grafitnih ploščic (krtačk), ki drsita po obodu komutatorja [4].

Dobre lastnosti enosmernega motorja s ščetkami so:

- enostavno vodenje,
- možno je vzporedno delovanje več pogonov in
- enostavno vezje za vodenje.

Slabe lastnosti so:

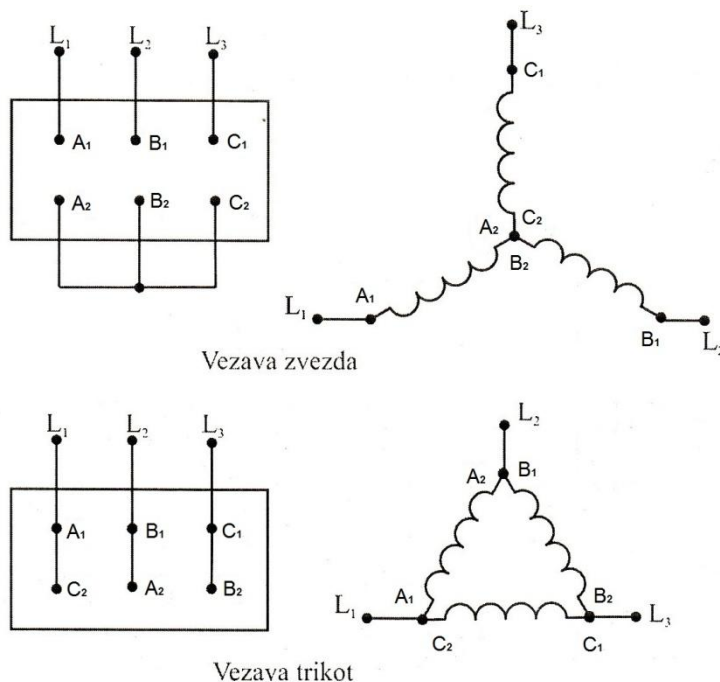
- uporaba ščetk za komutacijo (obraba in umazanija),
- težki in dragi magnetni materiali in komutator,
- nizke hitrosti (trenje),
- slab izkoristek in
- tudi pri izklopljenem pretvorniku lahko blokirajo (kratek stik) [1].

2.2.2 Asinhronski motor

Asinhronski motor je najpogostejše uporabljen v industriji za industrijski pogon, obdelovalne stroje, dvigala in električna vozila. Največja prednost pred enosmernim motorjem s ščetkami je, da nima mehanskega komutatorja, kar omogoča cenejše vzdrževanje, enostavnejšo strukturo in večjo robustnost [1].

Za delovanje asinhronskega stroja je bistvenega pomena vrtilno magnetno polje, ki ga vzbudimo s statorskim navitjem. Večinoma imamo trifazne stroje. Pri majhnih močeh imamo dvofazne stroje, ki jih priredimo za priključitev na dvo- ali enofazno napetost. Statorji nosijo navitja, ki so sestavljena iz posameznih tuljav. Tuljave so oblikovane tako, da leži ena stranica tuljave pod severnim polom in druga stranica pod južnim polom. Pri vrtenju se inducirani napetosti obeh stranic seštevata. Fazne veje vezemo v zvezdo Y ali v trikot D (Slika 2.12). Pri vezavi v zvezdo zvežemo skupaj priključke A_2 - B_2 - C_2 , in tako dobimo zvezdišče. Priključki A_1 , B_1 in C_1 so zunanji priključki za linijske fazne vodnike. Pri trikotni

vezavi zvežemo skupaj A_1-C_2 , B_1-A_2 in C_1-B_2 , da dobimo zaključeno trikotno navitje. Zunanji linijski vodniki so vezani na priključke A_1 , B_1 in B_2 [4].



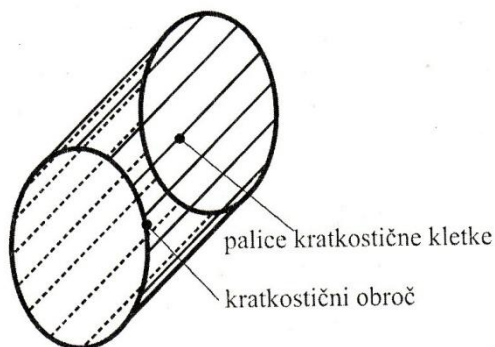
Slika 2.12: Zgoraj: vezava Y v obliki zvezde, spodaj: vezava D v obliki trikotnika [5].

Asinhronski motor deluje tako, da vrtilno magnetno polje inducira v rotorskem navitju gonilno napetost. Rotorsko navitje je zaključen tokokrog. Tako rotorska inducirana napetost požene po istem rotorskem navitju rotorski tok. Skupaj z vrtilnim magnetnim poljem daje rotorski tok silo na vodnik v magnetnem polju. Te sile tvorijo navor, ki deluje na rotor. Na rotorju asinhronskega motorja potrebujemo navitje, ki bo pri določeni inducirani napetosti dalo čim večji tok, zato so rotorska navitja asinhronskih motorjev navadno v kratkem stiku. Le v posebnih primerih uporabljamo navitja, ki omogočijo vključevanje dodatnih naprav v rotorski tokokrog [5].

Statorska navitja so porazdeljena po statorju s ciljem proizvodnje približno sinusno porazdeljenega polja. Ko nanje priključimo trifazno izmenično napetost, nastane vrtiljivo izmenično statorsko magnetno polje, ki zaradi medsebojnega delovanja z rotorskim magnetnim poljem zavrti rotor [1].

Rotor s kratkostično kletko

Pri asinhronskem motorju sta v uporabi dve tipični izvedbi rotorskega navitja: kratkostična kletka in trifazno navitje z drsnimi obroči. Pri kratkostični kletki (Slika 2.13) je odvisno od oblike palic, kakšne lastnosti ima asinhronski motor. Gole bakrene palice se navadno vložijo v utore brez izolacije. Na obeh koncih rotorja privarimo na palice obroča. Rotor s kratkostično kletko je najcenejši in najrobustnejši rotor z navitjem pri električnih strojih. Mehansko je zelo trden in odporen na sunke in tresljaje. Največja pomanjkljivost kratkostične kletke je, da ne omogoča vključevanja dodatnih naprav v rotorski tokokrog [5].



Slika 2.13: Skica kratkostične kletke na rotorju asinhronskega motorja [5].

Rotor z drsnimi obroči in trifaznim navitjem

Kadar potrebujemo električni priključek v rotorski tokokrog, izberemo asinhronski motor z rotorjem z drsnimi obroči, kot je na Sliki 2.14 levo. Rotor nosi trifazno navitje in je običajno v vezavi zvezde (Slika 2.14 desno). Začetki faznih vej so priključeni na tri drsne obroče, po katerih drsijo mirujoče ščetke. Prek ščetk lahko priključimo dodatne naprave v rotorski tokokrog [5].



Slika 2.14: Levo: rotor z drsnimi obroči, desno: trifazno rotorsko navitje v vezavi Y [5].

Dobre lastnosti asinhronskega motorja so naslednje:

- na razpolago so stroji z majhnim stresanjem in širokim območjem slabljenja polja,
- vektorsko vodenje ni potrebno,
- možno je delovanje pri zelo velikih hitrostih in
- dober izkoristek nad nazivno hitrostjo.

Slabe lastnosti so naslednje:

- potrebna je jalova moč,
- slab izkoristek pri majhnih in počasnih motorjih ter
- zahtevno vodenje v servopogonih [1].

2.2.3 Sinhronski motor s permanentnimi magneti

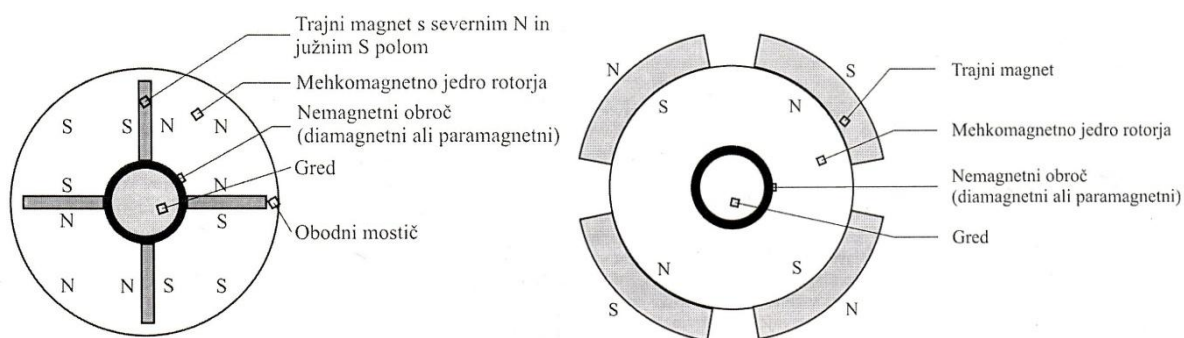
Sinhronski stroji so običajno trifazni vrteči se stroji. Svoje ime so dobili po rotorju, ki se običajno vrti točno v ritmu vrtilnega magnetnega polja, torej sinhrono s poljem. Sinhronskemu vrtenju se spreminja hitrost le, če se spreminja frekvenca omrežja [5].

Sinhronski motor s permanentnimi magneti spominja na motor s ščetkami, le da so tu magneti, pritrjeni na rotor. Obstajajo tudi izvedbe, kjer so uporabljeni rotorji z navitjem in jim enosmerni tok dovajamo prek drsnih obročev. Stator se od asinhronskega motorja ne razlikuje [1].

Sinhronski generatorji so danes glavni proizvajalci električne energije. Praktično vsi generatorji v termoelektrarnah, hidroelektrarnah, nuklearnih elektrarnah, dizelskih elektrarnah, plinskih elektrarnah in vetrnih elektrarnah so sinhroni stroji [5]. Proizvajajo jih v različnih velikostih in so v industrijskih pogonih učinkovito sredstvo za pretvarjanje električne energije v mehansko delo, saj imajo izmed vseh sinhronskih motorjev največji izkoristek. Uporabljeni so torej na področju industrije kot črpalke, ventilatorji, generatorji, servomotorji in v avtomobilski industriji [1].

Stator je mirujoči del, rotor pa je vrteči se del stroja. Sinhronsko vrtenje je zagotovljeno s statorskim trifaznim navitjem, ki spodbuja vrtilno magnetno polje. Statorju zato pravimo indukt. Rotor je magnet, ki ima ravno toliko polov, kot vrtilno polje. Rotorju tako pravimo magnetno kolo. Med rotorjem in vrtilnim poljem lahko nastane enakomerna sila oziroma navor samo, če se vrtita z enako hitrostjo. Magnet na rotorju je lahko enosmerni elektromagnet ali trajni magnet. Na Sliki 2.15 levo in desno sta prikazana primera namestitve

trajnih magnetov na rotor. Notranja namestitve permanentnih magnetov v utore, na Sliki 2.15 levo, je mehansko zelo trdna. Notranji utor, kjer je nameščen trajni magnet, zaradi magnetne nasičenosti obodnih mostičev učinkuje tako, kot bi bila v tej smeri povečana zračna reža. Zunanja namestitve trajnih magnetov, na Sliki 2.15 desno, je zelo pogosta pri majhnih večpolnih rotorjih. Trajne magnetne nalepimo na masiven rotor. Tak rotor je praktično cilindričen in ne kaže magnetno izraženih polov [5].



Slika 2.15: Levo: primer namestitve permanentnih magnetov v utore, desno: primer zunanje namestitve permanentnih magnetov [5].

Dobre lastnosti sinhronskega motorja s permanentnimi magneti so:

- majhna teža,
- visok izkoristek,
- majhen jalovi tok in
- enostavno vezje za vodenje.

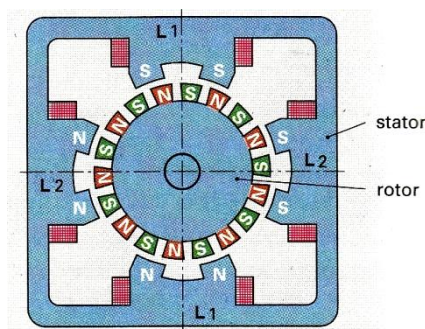
Slabe lastnosti so naslednje:

- na razpolago so v glavnem motorji moči do 6 kW,
- največja hitrost je do 10000 rpm,
- če kot komutacije ni določen z meritvijo toka, potrebuje senzor in
- tudi pri izklopljenem pretvorniku lahko blokirajo (kratek stik) [1].

2.2.4 Koračni motor

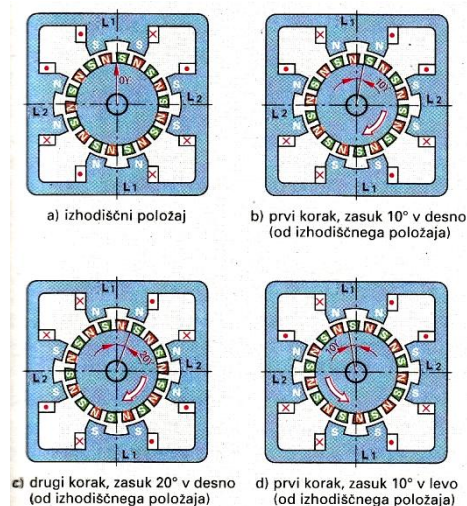
Ti motorji so dobili svoje ime zaradi načina obratovanja. Ne vrtijo se zvezno, temveč po delčkih obrata, tako imenovanih korakih. Napajajo se s pulzirajočimi enosmernimi tokovi. Vsak pulz premakne rotor koračnega motorja za en delček oboda, en korak naprej. Koračni motorji se uporabljajo v orodnih strojih in računalniških napravah ter drugih napravah, kjer je potrebno natančno nastavljanje položaja [5].

Rotor koračnega motorja ima na obodu zobce. Izdelan je iz trajnega magneta, zobci pa so izmenoma namagneteni v aksialni smeri z nasprotnim magnetnim polom (Slika 2.16). Med dvema zobcema je reža, ki je navadno široka za polovično širino zobca. Na statorju sta dve ali več vzbujevalni navitji L1 in L2 (fazi), sestavljeni iz dveh delov (Slika 2.16). Navitji v polovnih parih ustvarjata magnetno polje. Severni in južni pol posameznega polovnega para si ležita nasproti glede na središče rotorja. Velikost zobcev na statorju je prilagojena zobcem na rotorju [4].



Slika 2.16: Shematski prerez koračnega motorja [4].

Zobati rotor se vedno ustavi tako, da severni pol zobca na rotorju leži nasproti južnemu polu zobca na statorju (Slika 2.17 a). Če tok v navpično nameščenem navitju L1 spremeni svojo smer (Slika 17 b), v vodoravnem pa je ne spremeni, se rotor zavrti za polovično širino zobca. V naslednjem koraku se spremeni smer toka v navitju L2, in zato se spremeni polariteta v vodoravnem polovnem paru. Rotor se zavrti za nov korak (Slika 2.17 c). Vsaka nadaljnja sprememba polaritete v vrstnem redu L1, L2, L1 ... povzroči zasuk rotorja za en korak. Z ustreznim spreminjanjem smeri toka v statorskih navitjih L1 in L2 se lahko spremeni tudi smer vrtenja rotorja (Slika 2.17 d). Če skozi statorsko navitje tok ne teče, ostane rotor zaradi magnetne sile med njegovimi zobci in zobci na statorju v njegovem zadnjem položaju in se v njem zaskoči [4].



Slika 2.17: Delovanje koračnega motorja [4].

2.2.5 Reluktančni motor

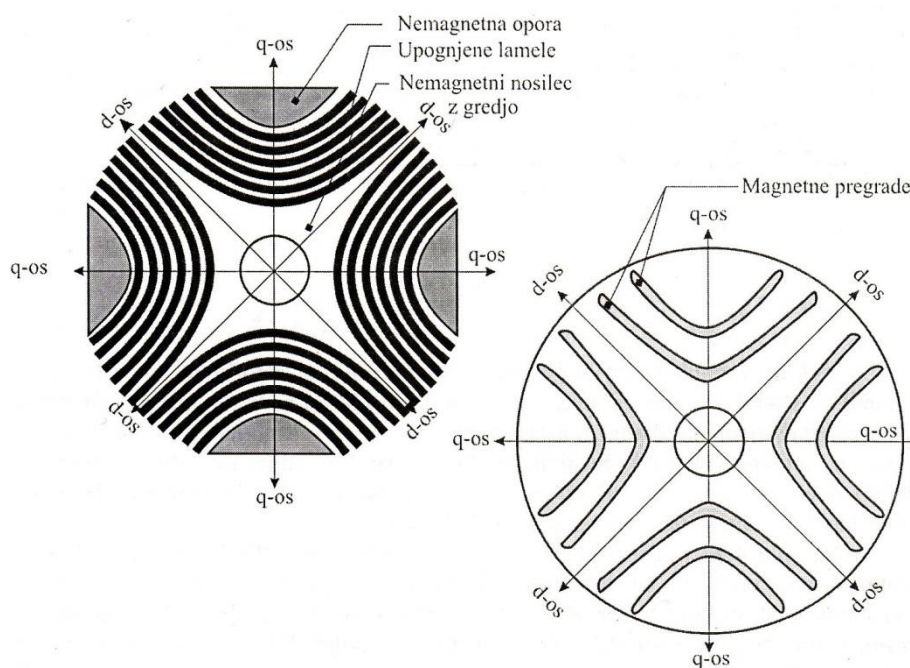
Reluktančni motor je dobil svoje ime po reluktančnem navoru, ki ga izrablja pri svojem obratovanju. Reluktančni navor izvira iz različne magnetne prevodnosti stroja v vzdolžni in prečni osi. Takšen motor na rotorju ne potrebuje niti vzbujačnega navitja niti trajnih magnetov za vzbujanje. Reluktančni navor bo tem večji, čim večja bo razlika v magnetnih prevodnostih obeh osi [5].

Ker nima permanentnih magnetov, je cena teh motorjev nižja in so bolj zanesljivi. Uveljavljajo se tam, kjer je pomembna nizka cena pogona in na področju nižjih moči. Uporabljajo se v električnih vozilih in na pogonih s stalnim bremenom. Poudariti je treba, da za delovanje potrebuje pretvornik in za kvalitetno delovanje senzor položaja.

Stator je podoben statorjem ostalih izmeničnih motorjev, rotor je izražen in sestavljen le iz železa. Ko sta rotor in stator poravnana, je zračna reža med njima zelo majhna in je s tem minimalna tudi reluktanca. Ko se rotor vrti, se spreminja tudi induktivnost napajanega statorskega navitja. Pri neporavnem rotorju je zelo majhna in tok strmo naraste, pri poravnem rotorju pa je induktivnost velika, kar se izrazi v majhni strmini toka. To predstavlja eno največjih težav pri vodenju reluktančnih motorjev [1].

Na Sliki 2.18 levo je tako imenovani lametni rotor. Za vodenje magnetnega polja v vzdolžni smeri se uporablja upognjeno pločevino, ki je ločena z nemagnetnimi vložki. Tak rotor se težko naredi, saj je problem s sestavljanjem in pritrdjevanjem pločevinastih lamel z

nemagnetnimi oporami. Prav tako se tak rotor ne more hitro vrteti, saj ga centrifugalne sile lahko raznesejo. Trdnejša dvopolna izvedba so lamelni rotorji, kjer so pločevinaste lamele ravne in se jih skupaj stisne, zlepi ter pritrdi na gred. Mehansko bolj odporni proti centrifugalnim silam so tudi izvedbe z magnetnimi pregradami (Slika 2.18 desno). Tu je rotor valjast in iz feromagnetnega materiala. Primerno oblikovane nemagnetne pregrade so vgrajene v telo rotorja. Primerni so za hitrotekoče motorje [5].



Slika 2.18: Levo: lamelni rotor, desno: rotor z magnetnimi pregradami [5].

Dobre lastnosti reluktančnega sinhronskega motorja so:

- robusten, visok faktor moč/masa,
- ni izgub v bakru na rotorju,
- dobro notranje hlajenje zaradi izraženih polov,
- poceni izdelava v velikih serijah,
- dolga življenjska doba in
- dobre dinamične lastnosti.

Slabe lastnosti so naslednje:

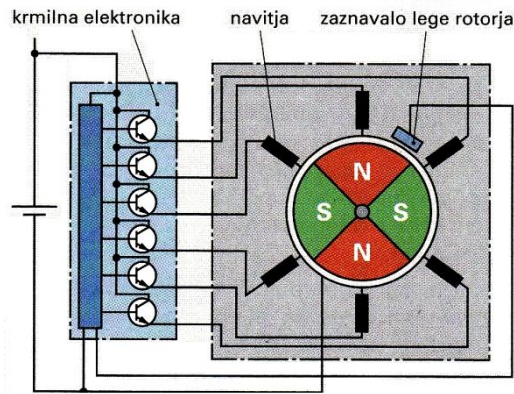
- hrup in pulzirajoč navor zahtevata kompleksno vodenje,
- za komutacijo je potreben senzor položaja,
- majhna razširjenost, malo industrijskih izkušenj, ni standardov,
- ne more obratovati v mreži in

- nelinearna karakteristika hitrost/navor [1].

2.2.6 Enosmerni motor brez ščetk

Ta vrsta elektromotorjev se močno razlikuje od običajnih motorjev z mehansko komutacijo. Pri brezkrtačnih motorjih so navitja nameščena na statorju, rotor pa ima na obodu trajne magnetne, ki se vrtijo skupaj z njim. Tok v navitja dovaja elektronsko komutacijsko vezje, ki spremlja kot zasuka rotorja in v pravem trenutku dovede tok v ustrezno navitje [4].

Po konstrukciji in materialih so podobni sinhronskim motorjem s permanentnim magneti, le da pri konstrukciji ni poudarek na oblikovanju sinusne porazdelitve napetosti, temveč je ta trapezna, kar omogoča tok skozi rotorska navitja. Njegovo delovanje v marsičem enako delovanju enosmerne motorja s ščetkami. Na zunaj je motor enosmeren, saj je enosmerna tudi napetost, s katero ga napajamo. Sama konstrukcija pomeni boljše odvajanje toplote in manjši vztrajnostni moment motorja. Na Sliki 2.19 vidimo pole rotorja s permanentnimi magneti (rdeča barva predstavlja severni, zelena pa južni magnetni pol), ki privlačijo nasprotni pol statorja, kar povzroči navor. Navitja so napajana po vzorcu, ki omogoča vrtenje polja okoli osi statorja. Statorski poli privlačijo pole rotorja, do preklopa pride v trenutku, ko se pola poravnata [1].



Slika 2.19: Brezkrtačni elektromotor in elektronska komutacija [4].

Za vklop in izklop toka skozi posamezna navitja skrbi krmilna elektronika (Slika 2.19). Ta zaznava lege motorja (Hallov senzor), prejema informacijo o položaju rotorja in vkloplja ali izkloplja tok skozi ustrezna navitja na statorju. Hitrost vrtenja motorja je odvisna od

frekvence preklopa komutacijske naprave. Elektronsko komutirajoči enosmerni motorji imajo praviloma tri ali več navitij [4].

Enosmerni motor brez ščetk se je najbolj uveljavil v osebnih računalnikih in modelarstvu. Pojavlja se povsod, kjer se je v preteklosti pojavljal motor z mehansko komutacijo. Glavna področja uporabe so v robotiki, orodnih strojih, avtomatizacije v tovarnah, pisarniški opremi, avtomobilski industriji, gospodinjskih aparatih in pri ročnem orodju. V prihodnosti bo zamenjal enosmerni motor s ščetkami na vseh področjih delovanja.

Dobre lastnosti enosmernega motorja brez ščetk so:

- majhna valovitost navora,
- čistejše delovanje,
- visoka hitrost delovanja,
- manj elektromagnetnega šuma,
- tiho delovanje,
- visoka zanesljivost,
- preprosto vodenje po hitrosti ter
- ščetke in komutator niso potrebni (ni obrabe).

Slabe lastnosti so naslednje:

- potrebujemo dodatno elektronsko opremo (cena) in
- pogon je kompleksnejši [1].

3 OPIS DELOVANJA ENOSMERNEGA BREZKRTAČNEGA MOTORJA

V kratkem opisu motorja je že bilo povedano, da je enosmerni motor brez ščetk izvedba sinhronskega motorja s permanentnimi magneti, od katerega se razlikuje le po razporeditvi magnetnega polja. Zaradi konstrukcije ima manjšo maso in vztrajnostni moment, kar pomeni boljšo dinamiko odzivanja na regulacijske signale.

Enosmerni motor brez ščetk bo v nadaljevanju podrobneje opisan, predstavljeni bodo magnetni materiali in Hallove sonde. Temu sledi opis preprostega vodenja 2- in 3-faznega motorja ter postopki vodenja brez senzorja položaja [1].

3.1 PRINCIP ZGRADBE ENOSMERNEGA BREZKRTAČNEGA MOTORJA

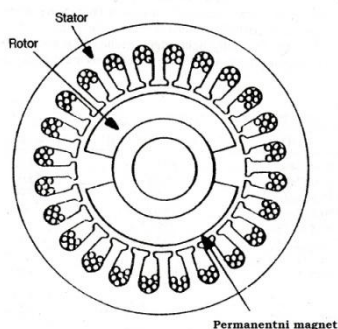
Oblika in karakteristika enosmerne motorja s ščerkami sta že bili predstavljeni. Krtačke in komutator skrbijo za to, da je električni tok skozi rotor vedno v isti smeri relativno na permanentno magnetno polje. Tako lahko rečemo, da imata eno izmed vlog pretvornika iz izmeničnega v enosmerni tok. Pri brezkrtačnem motorju vlogo komutatorja in krtačk prevzame elektronski pretvornik. Ta loči od elektromehanske naprave izmenično napajanje in ji zagotavlja zahtevano enosmerno napajanje.

Postavitev navadnega enosmerne motorja s ščerkami je fiksna zaradi same uporabe ščetk pri obračanju smeri toka motorja. Rotor nosi delovno in tokovno obremenitev, stator pa ima le magnetne. Taka konstrukcija ima kar nekaj slabosti, ne le v komutaciji bremena velikih tokov, temveč so izgube tudi pri pregrevanju, saj je ta del stroja najtežje hladiti. Pri brezkrtačnem enosmernem motorju se breme prevodnika prestavi na stator, trajne magnetne, ki ne potrebujejo zunanjih priklopov, pa postavimo na rotor. Izgube zaradi pregrevanja je tako lažje zmanjšati, saj stator lažje ohladimo [6].

3.1.1 Zgradba statorja

Jedro statorja je narejeno iz silicijevega jekla in ima utore za navitja. Za zmanjšanje pojava vrtilčnih tokov je jedro laminirano. Debelina ene lamele je od 0,3 do 0,5 mm. Na Sliki 3.1 je prikazan prerez, kjer vidimo obliko statorja in pozicijo magnetov. Utori odvzamejo velik del celotnega prostora in razbijajo enovito pot toka. Efekt se zmanjša, če so utori zamaknjeni v eno smer glede na os statorja. Zamik rež ustvari vzorec in manj naključno pot toka, ki

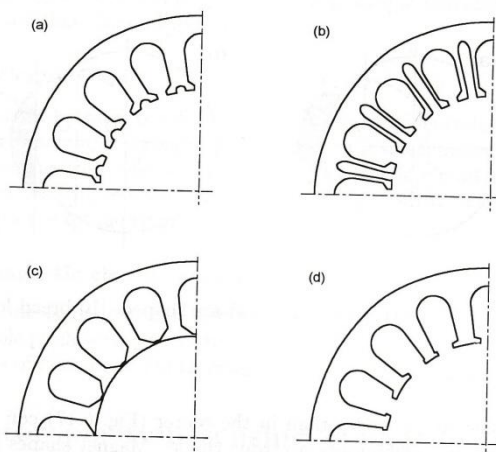
radialno vstopi in zapusti jedro. Navitja lahko zaradi vibriranja sil motorja proizvedejo glasen zvok, kar se zmanjša, če je stator toga vezan s smolo [6].



Slika 3.1: Prerez enosmernega brezkrtačnega motorja [3].

Oblika utorov

Na Sliki 3.2 vidimo najbolj tipične oblike utorov: razcepne reže (a), prazne reže (b), zaprte reže (c) in zobci z različno širino aktivne površine (d).



Slika 3.2: Različne oblike utorov na statorju: (a) razcepne reže, (b) prazne reže, (c) zaprte reže in (d) zobci z različno širino aktivne površine [7].

Razcepne reže (Slika 3.2 a) so lahko razcepljene na več kot dva dela. Pri načrtovanju zaprtih rež (Slika 3.2 c) je pomemben razmik med dvema mostičkoma. Prevelika debelina mostička (merjeno vzporedno) poveča izgubo v statorju, preozek razmik pa pripomore k nasičenju. V takem primeru je bolje, če nimamo odprtih rež in so navitja 'našita' v pločevino [7].

Stator brez utorov

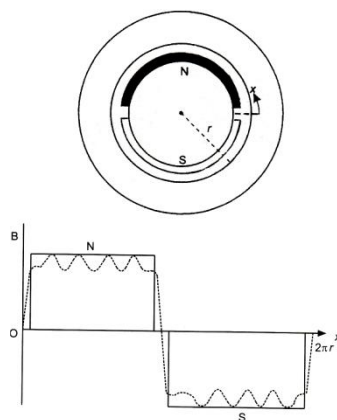
Pri statorju brez utorov potrebujemo veliko večji prostor med statorjem in rotorjem (poveča se zračna vrzel), kar posledično zmanjša polje magnetnega vzbujanja trajnega magneta. Če želimo obdržati manjšo zračno vrzel, je treba povečati višino trajnih magnetov. Tako potrebujemo veliko več magnetnega materiala, kot bi ga potrebovali pri statorju z utori, kar seveda poveča tudi ceno motorja [7]. Izvedbe s statorjem brez utorov (Slika 3.3) so najbolj uporabne, kjer so zahtevane velike hitrosti, visoke zmogljivosti in nizka poraba [8].



Slika 3.3: Diskasta izvedba enosmerne motorja brez ščetk in utorov [1].

3.1.2 Rotor s permanentnimi magneti

Pesto motorja je pritrjen na gredi in nosi trajne magnete. Lahko je izdelan iz trdnega jekla z nizko vsebnostjo ogljika ali pa sestavljen iz lamel istega materiala kot pri statorju. Magneti so lahko valjaste oblike ali navadni. Na spodnji Sliki 3.4 je prikazan 2-polni rotor z valjastim magnetom. Spodaj na sliki vidimo, kako se gostota magnetnega polja idealno nabere okoli vsakega pola in ustvari kvadratno obliko valovanja. V praksi se še vedno pojavljajo nepravilnosti med preklopom, tudi če so utori statorja zamaknjeni.



Slika 3.4: Gostota magnetnega polja v zračni vrzeli 2-polnega valjastega rotorja [6].

Magneti z visokim magnetnim pretokom so uporabljeni pri večjih modelih motorja, saj je tako navor še vedno maksimalen, tudi pri večjem prostem prostoru. Sama izdelava takega modela je pravi izziv, saj morajo biti magneti trdno pritrjena na pesto zaradi vlečne radialne in strižne sile, ki nastaneta pri pospešku in pojemku [6].

Uporabljeni magnetni materiali

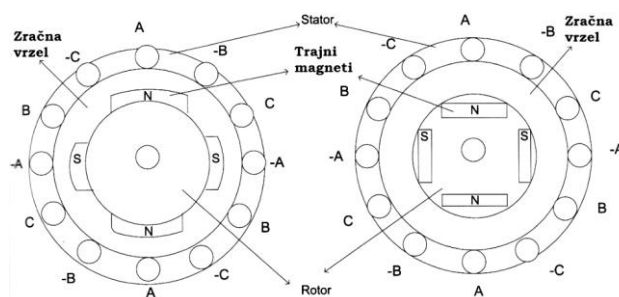
Najpogosteje uporabljeni magnetni materiali so:

- aluminij-nikelj-kobalt (AlNiCo),
- samarij kobalt (SmCo_5 , $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$),
- neodimium (NdFeB , Neo) in
- redke zemlje.

AlNiCo (aluminij-nikelj-kobalt) je bil do leta 1970 najboljši, kar je bilo na razpolago zaradi velike temperaturne stabilnosti. Višje energije so nato dosegali z uporabo samarij-kobalta, a so se pojavljale težave s stabilnostjo, visoke cene samarija in nestabilna oskrba tržišča s kobaltom. Zadnji napredek je bil dosežen z uporabo redkih zemelj, s katerimi se trenutno dosega najvišje energije, a je še vedno težava s temperaturno stabilnostjo. V proizvodnji enosmernih motorjev brez ščetk se uporabljajo segmenti magnetnega materiala v obliki kvadra in lokov, ki jih pritrdijo na rotor, kar je sorazmerno drago zaradi števila delovnih operacij [1].

Struktura rotorja

Enosmerni brezkrtačni motor ima lahko magnete na rotorju pritrjene na površini rotorja ali pa so ti neizpostavljeni v notranjosti. Na Sliki 3.5 vidimo obe izvedbi. Levo je prikazan rotor, ki ima pritrjene magnete na površini in je površina tako neenakomerna. Desno na Sliki 3.5 so magneti skriti v rotorju in je površina bolj enakomerna ter enotna [8].



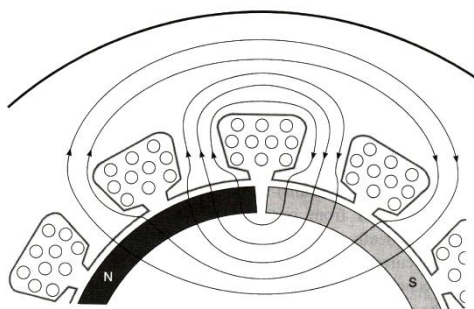
Slika 3.5: Dve izvedbi 3-faznega brezkrtačnega motorja s štirimi trajnimi magneti. Levo: z magneti na površju in desno: z magneti pod površjem [8].

3.2 DELOVANJE MOTORJA

Pri omembi delovanja enosmernega stroja s krtačkami smo omenili magnetni pretok in domnevali, da se magnetni pretok nadaljuje, tudi če tam ni feromagnetne snovi (vrzel). Ali se enako dogaja tudi pri brezkrtačnem motorju, si bomo podrobneje pogledali v nadaljevanju [6].

3.2.1 Pretok magnetnega polja

Na Sliki 3.6 vidimo magnetnice okoli prevodnika, ki leži v enem izmed utorov železnega statorja. Magnetnice potujejo okoli vrzeli skozi železo. Tako ne pride do prekinitve magnetnega pretoka. Do prekinitve naj ne bi prišlo, če upoštevamo, da je prevodnik na notranji površini statorja enak polovici premera zračne vrzeli [6].



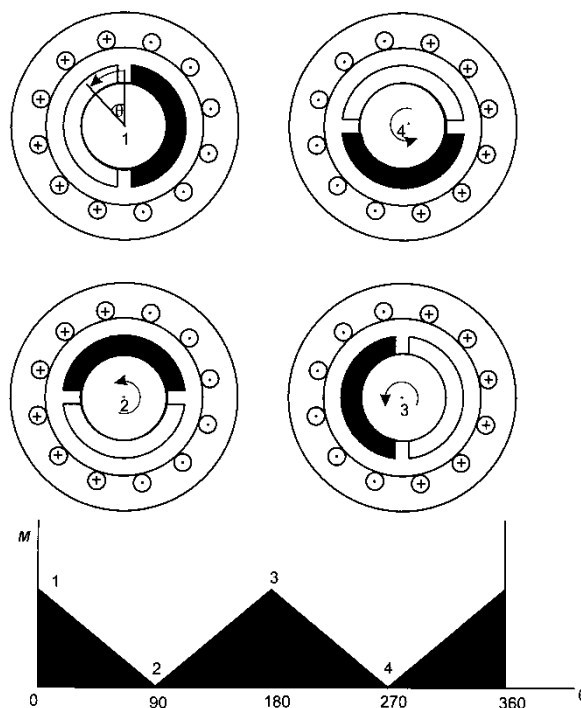
Slika 3.6: Magnetni pretok okoli rež na statorju [6].

3.2.2 Navor

Slika 3.7 prikazuje štiri pozicije rotorja, enostavnega 2-polnega brezkrtačnega motorja, relativno glede na stator. Smer statorskega toka je prikazana z obkroženim križem in piko v krogu, če tok teče v sliko ali iz nje. Za razlago vzamemo najenostavnejši stator z eno zanko. Stator ima navadno vsaj tri navitja, a je princip enak.

Na Sliki 3.7 vidimo, da se na poziciji 2 in 4 tok obrne, ko se center pola iz ene strani navitja obrne na drugo. Posledično je glede na kot rotorja tok povprečno enak, razen pri kotu 90 in 270°, kjer pade povprečna sila na nič. Navor ne more vplivati na premik statorja in je tako navor rotorja povezan z bremenom. Največji navor se pojavi v pozicijah 1 in 3 (Slika 3.7) ter je enakovreden izhodnemu navoru na motorju s krtačkami. Seveda bi bil tak motor neuporaben, saj bi polovico časa miroval oziroma bi bila izhodna napetost enaka nič.

Najmanjše število navojev mora biti vsaj tri, da dobimo teoretično konstantno izhodno napetost [6].



Slika 3.7: Navor (M) na preprostem brezkrtačnem motorju [6].

Krmiljenje navora

Krmiljenje navora je pri enosmernih brezkrtačnih motorjih najlažje doseženo z neposrednim krmiljenjem toka v statorskem navitju. Permanentni magneti na rotorju povzročajo konstanten pretok, ki jih povezuje z navitjem. Gostota pretoka v zračni vrzeli daje približno trapezoidno obliko. Elektronska regulacija toka uporablja 120°-prevajanje, ki je določena z neko časovno periodo za vsako fazo in je tako napetost na enosmernem vodilu povprečno konstantna. Tako predvidenje poenostavi analizo enosmerne brezkrtačnika. Po enačbi 3.1 lahko izračunamo navor površine rotorja:

$$M_{\text{rotor}} = K_{\text{stator}} \times \Phi_m \times I_{DC} \text{ [Nm]} \quad (3.1)$$

Kjer je:

- K_{stator} = konstanta navitja na statorju = $\text{poli} \times N_C I (2 \times \pi)$
- poli = število polov na motorju

- N_c = število vseh prevodnikov = $\frac{2}{3} \times \text{reže} \times \text{tuljave na režo} \times \text{zavojev na tuljavi/tokokrogov}$

$2/3$ sta tu le zato, ker naenkrat tok ustvarjala le dve izmed treh faz pri 120° -prevajanju (pri 180° -prevajanju ena faza dovaja polni tok, za 120° ena faza proizvaja polni tok in 60° pol toka, kar da večji navor na amper, a sta krmiljenje in komutacija veliko bolj zapletena).

- Φ_m = skupni magnetni pretok na en pol [Wb]
- I_{DC} = povprečen enosmerni tok [A]

Izhodni navor je skoraj sorazmeren s produktom pretoka in električnega toka (če ne upoštevamo izgub), in tako zadošča, če uporabimo električni tok v statorju kot primerljivo številko. V nadzornem sistemu merimo tok in krmilimo stikalne naprave. Povratna informacija o toku je prav tako uporabljena za omejitev temenskega toka, ki ga lahko pristrizemo na priključkih motorja. Ko potrebujemo negativni ali zaviralni navor, se obrne električni tok in upočasni motor. Tu potrebujemo krmilnik, ki dovoljuje motorju, da je tako generator kot motor [3].

3.2.3 Nadzor lege in hitrosti

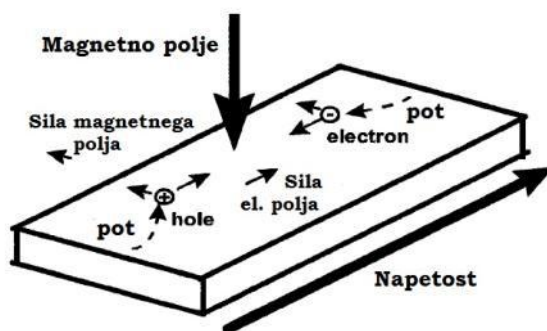
Če imamo v motorju tipala (Hallove sonde) za električno komutacijo, nam ti lahko posredujejo informacijo o sami legi rotorja. Za natančnejšo določitev lege se dodatno uporablja tudi tipalo za elektromagnetni upor, s katerim lahko spremljamo lego in hitrost.

Zaradi skoraj enakomernega pretoka v statorju je hitrost sorazmerna z vhodno napetostjo. Za aplikacije, ki le grobo zahtevajo nadzor hitrosti, je dovolj, če to nadzorujemo prek dohodne napetosti. Vseeno pa tudi pri takem nadzoru potrebujemo omejitev toka, saj lahko hitro presežemo temenski tok. Sama hitrost je odvisna tudi od bremena, saj se ob obremenitvi upornost krepko poveča. Za natančnejše merjenje hitrosti potrebujemo neke vrste tahometer, ki naj bo prav tako brezkrtačni, da se ohrani sistem brez kontakta [3].

Hallove sonde

Hallove sonde temeljijo na teoriji Hallovega efekta, ki ga je leta 1879 odkril Edwin Hall. Efekt temelji na Lorentzovi sili, ki deluje na gibajoče nosilce električnega naboja v vseh snoveh, ko so te izpostavljene zunanjemu magnetnemu polju.

Za zgled vzemimo trak iz polprevodniške snovi, na konce katerega je priključen generator enosmerne napetosti. Sila električnega polja prisili proste nosilce naboja h gibanju (Slika 3.8).

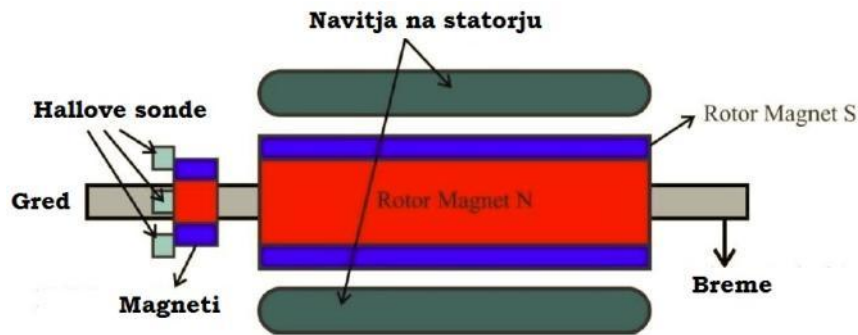


Slika 3.8: Prikaz Hallovega efekta [9].

V prisotnosti tujega magnetnega polja, ki je pravokotno na površino senzorja, se pot elektronov in vrzeli ukrivi k stranskima stranicama. Na stranicah se kopiči električni naboj, a le dokler sila električnega polja nakopičenega naboja ni enaka Lorentzovi sili, ki deluje na gibajoči naboj. Napetost nakopičenega naboja se imenuje Hallova napetost. Napetost je tem večja ter s tem tudi tehnično uporabna, čim večje je razmerje med dolžino in širino polprevodniškega traku [9].

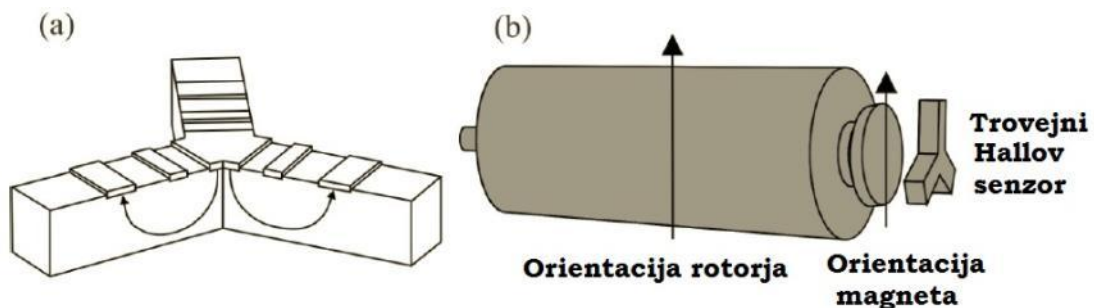
Za razliko od krtačnega motorja ima brezkrtačni elektronsko komutacijo. Da se rotor vrti, teče skozi navitja v statorju tok v sekvencah. Tako je pomembno poznavanje lege rotorja, da se navitja vklaplajo v pravem vrstnem redu in na pravem mestu. Pozicijo rotorja zaznavajo Hallove sonde, ki so vgrajene v stator (Slika 3.9).

V večini motorjev se nahajajo tri sonde na mirujočem delu motorja (kjer ni priključenega bremena). Ko se magneti na rotorju približajo sondi, ta naprej sporoči visok ali nizek signal, kar pomeni severni (N) ali južni (S) pol magneta. Na podlagi kombinacij signala treh Hallovih sond lahko ugotovimo točno zaporedje komutacije.



Slika 3.9: Prečni prerez BLDC-motorja [10].

Vgradnja Hallovih sond v stator je zapleten proces, saj je vsaka najmanjša nepravilnost z magneti lahko usodna za pravilno delovanje elektromotorja. Nekateri motorji imajo iz tega razloga dodatne magnetne namenjene samo za Hallove sonde (Slika 3.9) in je tako lažje vzporediti z večjimi magneti na rotorju. Napredek elektromotorjev zahteva vse manjše motorje in s tem omejuje prostor za namestitev Hallovih sond. S tem razlogom se sedaj vse bolj pojavlja trovejna Hallova sonda (Slika 3.10 a). Na Sliki 3.10 b vidimo, da je permanentni magnet pritrjen na konec gredi, kjer ustvarja magnetno polje vzporedno s površino senzorja. Tu se površina odziva na vsak najmanjši odmik magnetnega polja.

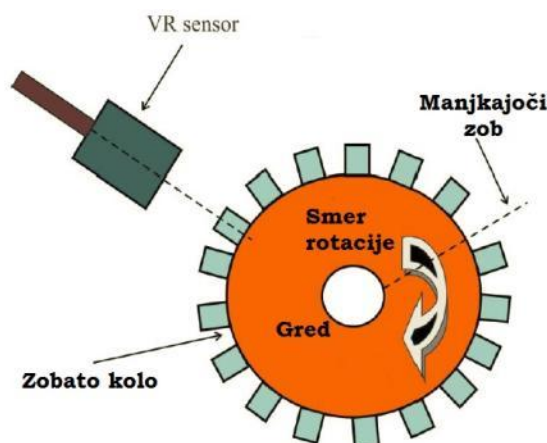


Slika 3.10: (a) Shematska predstava trovejnega Hallovega senzorja. (b) Namestitev trovejnega Hallovega senzorja [10].

Trifazni brezkrtačni motor potrebuje tri signale s faznim zamikom 120° za učinkovit nadzor motorja. Vsako vejo si zamislimo kot polovico vertikalnega Hallovega senzorja. Med seboj so oddaljene za 120° , in tako avtomatično oddajajo trifazni signal, ki je povezan z gonilnim signalom motorja [10].

Magnetni ali VR-senzor (Variable Reluctance)

S tem senzorjem lahko merimo hitrost in lego gibajočega se kovinskega delca. Poznan je tudi kot pasivni magnetni senzor, saj ga ni treba napajati. Sestavlja ga trajni magnet, feromagnetna os, tuljava in vrteče se zobato kolo brez enega zoba (Slika 3.11). Načeloma je to permanentni magnet, ki ima okoli navito žico s preprostim vezjem, ki vsebuje le dve žici, pri katerih ni pomembna niti polariteta.



Slika 3.11: Magnetni senzor, ki zaznava gibanje zobatega kolesa [10].

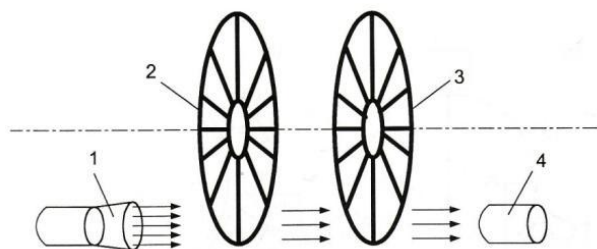
Ko se zobci premikajo skozi senzorjevo magnetno polje, ta zaznava različen magnetni pretok. Ko je zobec v magnetnem polju senzorja, je magnetni pretok maksimalen, ko pa se ta oddalji, pade tudi magnetni pretok. Zaradi gibanja magnetnega polja se v tuljavi pojavi napetost in dobimo električni analogni signal. Frekvenca in napetost analognega signala je sorazmerna s hitrostjo vrtenja zobatega kolesa.

Prednost VR-senzorja je v nizki ceni, robustnosti pri merjenju hitrosti in lege (deluje lahko do temperatur okoli 300 °C), samozadostnosti (ne potrebuje zunanje napajanja) in ima veliko manj napeljave, kot na primer Hallova sonda. Ti senzorji so zelo majhni in se jih lahko uporabi tudi v zelo tesnih prostorih, saj stabilno delujejo tudi pri visokih temperaturah [10].

Optični dajalnik (Optical Encoder)

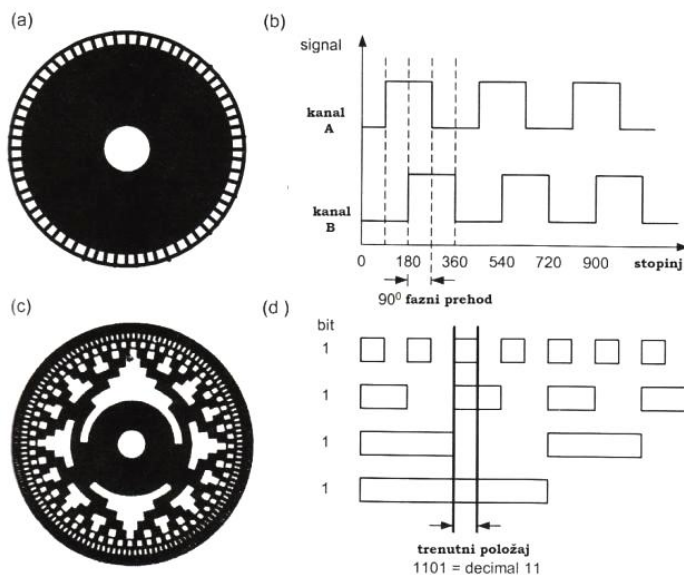
Poznamo dve vrsti optičnih dajalnikov: absolutnega (Slika 3.13 a) in s prirastom (Slika 3.13 c). Pri optičnih dajalnikih potuje svetloba skozi transparentne in netransparentne dele rešetk in jo na drugi strani zaznava svetlobno občutljiv senzor. Z namenom izboljšanja

resolucije je dodana še dodatna maska in uporabljen je usmerjen vir svetlobe. Tako svetloba potuje do detektorja le, ko je vse poravnano (Slika 3.12).



Slika 3.12: Princip delovanja optičnega dajalnika: 1 – usmerjen snop svetlobe, 2 – rešetke, 3 – maska, 4 – svetlobno občutljivo tipalo [7].

Pri optičnem dajalniku s prirastom se za vsak prirast generira pulz in določa položaj s štejetjem pulzov. Vrteča se plošča (rešetka) ima vdolan tir na robu (Slika 3.13 a). V primeru, da bi se napajanje prekinilo, se v dajalniku izgubi podatek o položaju, zato bi bila potrebna ponastavitev na poznano ničelno točko. Za določitev smeri vrtenja se uporablja dvokanalni dajalnik, kjer sta kanala zamaknjena za 90° , tako da dobimo kvadraturo (Slika 3.13 b). V enem obratu zaznamo štiri pulze na kanalu A in B. Maksimalna hitrost je določena z maksimalno frekvenco, če je ta prekoračena, se natančnost znatno zmanjša in je izhodni signal nezanesljiv.



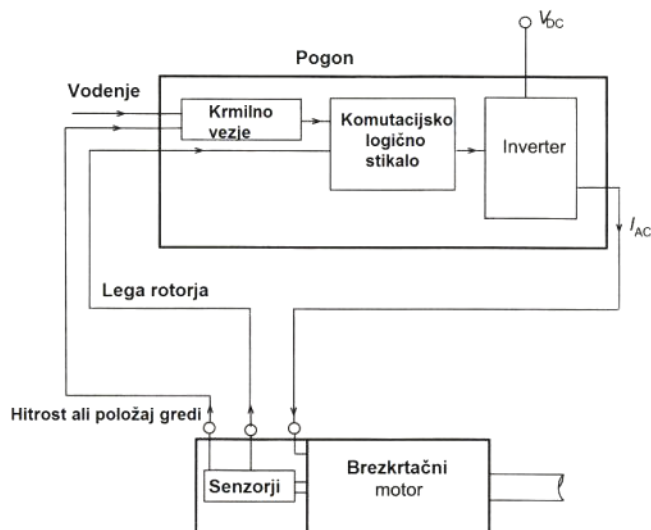
Slika 3.13: Optični dajalnik s prirastom in absolutni: (a) disk optičnega dajalnika s prirastom, (b) kvadratni izhodni signal, (c) disk absolutnega optičnega dajalnika, (d) izhodni digitalni signal absolutnega optičnega dajalnika [7].

Absolutni optični dajalnik je naprava za preverjanje kotne lege gredi (Slika 3.13 c). Število položajev je odvisno od želene resolucije. Vsak izmed položajev ima svojo unikatno kodo, ki je prikazana na izhodu. Za razliko od optičnega dajalnika s prirastom ta nima števca in se tako informacije o trenutni legi ne izgubijo pri prekinutvi napajanja.

Disk absolutnega optičnega dajalnika je lahko narejen iz stekla ali pločevine in ima več koncentričnih tirov, skozi katere lahko sveti neodvisni svetlobni vir (Slika 3.13 c). Ko gre svetloba skozi rezo, dobimo na izhodu visoko stanje '1'. Nizko stanje '0' se pokaže, kadar svetloba ne doseže svetlobnega tipala na drugem koncu. Vzorca '1' in '0' zagotovita informacijo o legi gredi. Število pozicij, ki jih lahko pridobimo iz absolutnega optičnega dajalnika, je odvisno od tirov na disku (na primer za 10 tirov dobimo resolucijo $2^{10} = 1024$ pozicij na obrat). Na Sliki 3.13 d vidimo preprost primer binarnega izhoda s 4 biti informacije. Trenutna pozicija kaže na položaj 11 (1101 binarno), naslednja pozicija na desno kaže položaj 10 (0101 binarno) in prejšnja pozicija na levo kaže položaj 12 (0011 binarno) [7].

3.2.4 Komutacija

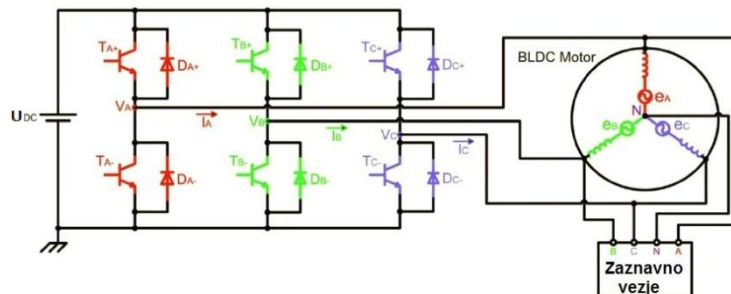
Slika 3.14 prikazuje glavne komponente pogona z enosmernim brezkrtačnim motorjem. Shema prav tako prikazuje senzorje hitrosti in lego v ohišju motorja. Pogon, kot je prikazan na tej sliki, ima digitalno komutacijo. Kakršni analogni signali, ki izhajajo iz senzorja, morajo najprej skozi analogno-digitalni pretvornik v pogonu ali motorju.



Slika 3.14: Shema motornega pogona [6].

Inverter

Splošna postavitev pretvornika, ki je največkrat v uporabi pri komutaciji, je prikazana na Sliki 3.15. Le dve fazi potrebujeta tok naenkrat [6].

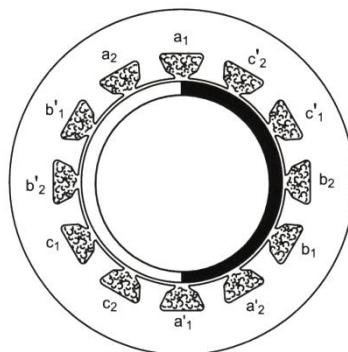


Slika 3.15: Inverter za trifazni motor [10].

Proces preklapljanja toka, da teče skozi dve fazi vsakih 60° obrata rotorja, imenujemo elektronska komutacija. Le dva stikala, eden na zgornjem delu in eden na spodnjem delu, prevajata tok v nekem trenutku. To diskretno preklapljanje zagotavlja, da se ohrani zaporedje parov [10].

3.2.5 Trifazni enosmerni brezkrtačni elektromotor

Med enosmernimi brezkrtačnimi elektromotorji bomo največkrat našli take s tremi navitji oziroma s tremi fazami. Idealno za tak motor bi bilo napajanje s pulzi kvadratne oblike in enakomernim magnetnim pretokom v zračni vrzeli. Na Sliki 3.16 je prikazan preprost dvopolni stroj, kjer je vsaka izmed treh tuljav razdeljena na dva združena navitja (na primer: naviti b_1 in b_2 sta združeni v navitje b , kjer sta začetek in konec tega navitja označena z b_1 in b_1').

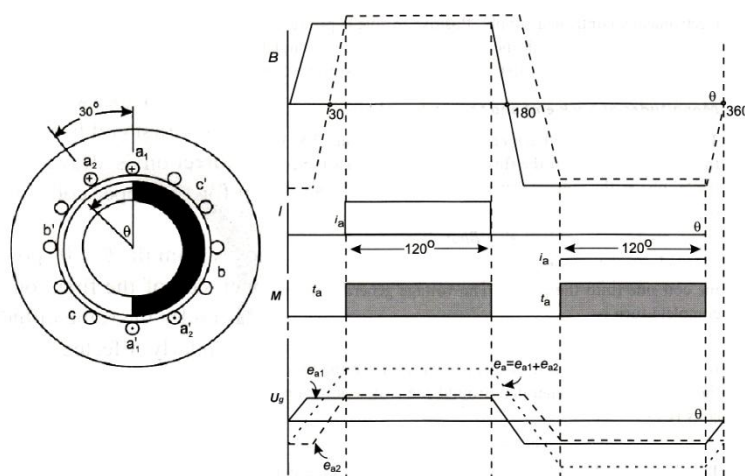


Slika 3.16: Dvopolni trifazni motor z dvema utoroma na fazo na pol (12 utorov) [6].

Vsak del tuljave ima enako število navojev, ki so med seboj oddaljeni za 30° okoli statorja. Posledica razdeljevanja tuljave v več kot en utor je razširitev loka tuljave, v katerem deluje magnetni pol, ki se vrti z rotorjem. Kar pomeni, da je pomembno število utorov glede na število polov in tuljav. Stator na Sliki 3.16 je simetričen in ima tri tuljave, 12 utorov in šest navitij, vsakega z enakim številom navojev. Tako vsaka faza zagotavlja enako jakost navora [6].

Navor glede na fazo

Slika 3.17 prikazuje, kako se ustvari navor na a-fazi, če imamo idealni pulzni tok (I). Magnetno polje (B) okoli trajnih magnetov ni prikazano v štirikotni obliki. Spremembe v magnetnem pretoku so počasnejše zaradi zamaknjenosti utorov na statorju. Začetek in konec magnetnega pretoka sta prikazana le v približku. Dejansko robovi niso ostro začrtani in se bolj povezujejo zaradi obrobnege učinka magnetnega pola. Vrtenje je v nasprotni smeri urinega kazalca. Smer pretoka velja za severni (N) pol in smer električnega toka za zgornji del tuljave v shemi.

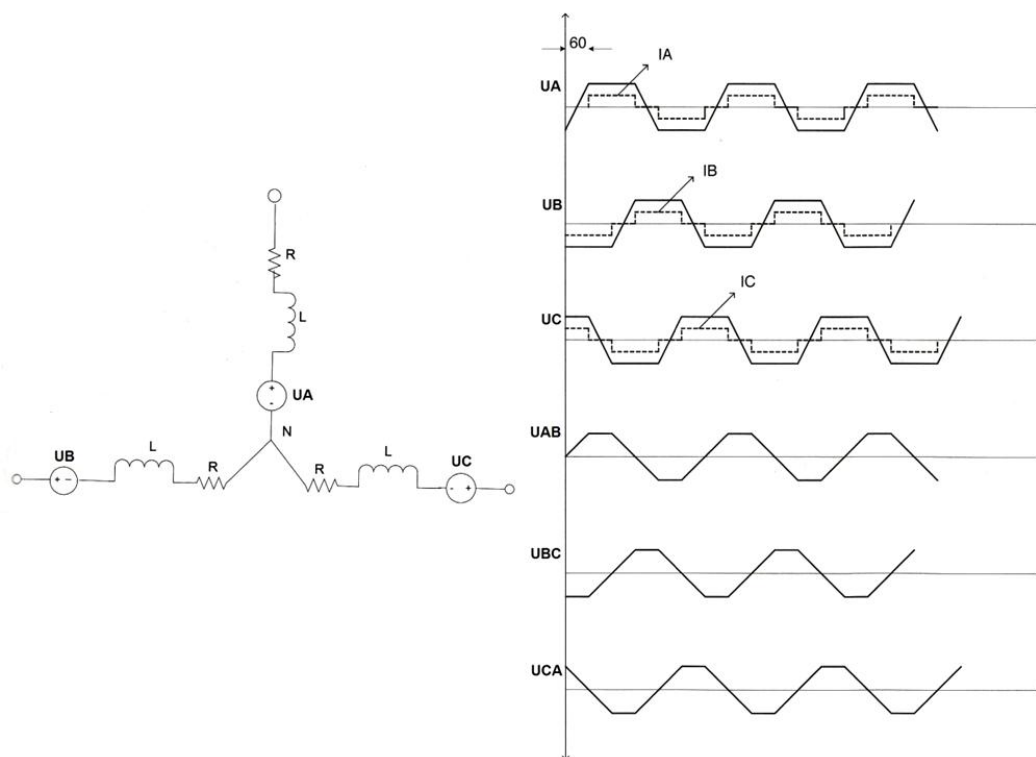


Slika 3.17: Navor (M) in gonilna napetost (U_g) za 'a'-fazo [6].

Ko se rotor premakne od začetne točke $\theta = 0^\circ$, se N-magnetno polje začne premikati po zgornjem delu prvega navitja, in ko je $\theta = 30^\circ$, še drugi del navitja pade pod isti vpliv polja. Spodnja stran a' pada podobno pod vpliv S-magnetnega polja. Ko se rotor zasuje za 180° , se ravni del valovanja premakne čez celotno tuljavo za 120° . V tem času skozi teče električni tok. Pozitivni navor se ustvari, medtem ko skozi tuljavo teče električni tok. Krog se zaključi, ko se zasujemo iz točke $\theta = 180^\circ$ do $\theta = 360^\circ$ in pri tem spet ustvarimo pozitivni navor [6].

Zvezdasta (Y) in trikotna (Δ) povezava

Trikotna ali delta (Δ) povezava je pri enosmernih brezkrtačnih elektromotorjih skoraj neuporabljena. Napetost v samem trikotniku ne more biti trapezne oblike in se zaradi tega fazne gonilne napetosti ne seštevajo pravilno. Rezultat tega so veliko pregrevanje in izgube zaradi nastalega upora. Veliko bolj je v praksi uporabljena povezava v obliki zvezde oziroma Y (Slika 3.18) [6].



Slika 3.18: Prikaz vezja BLDC-motorja, levo sta tok in napetost v odvisnosti od položaja rotorja [8].

Na zgornji Sliki 3.18 je desno prikazan model, kjer R predstavlja fazni upor, L predstavlja fazno tuljavo ter UA, UB in UC predstavljajo fazne gonilne napetosti. Levo so prikazane valovne oblike.

Trapezoidno obliko valovanja lahko dosežemo z MOSFET (angl. *metal-oxide-semiconductor field-effect transistor* oziroma tranzistor z učinkom polja) ali IGBT (angl. *insulated-gate bipolar transistor* oziroma bipolarni tranzistor z izoliranimi vrati), tako da so dvofazna navitja vezana zaporedno. Poleg tega sta pomembni magnetnost in oblika trajnih magnetov ter navitja v statorju [8].

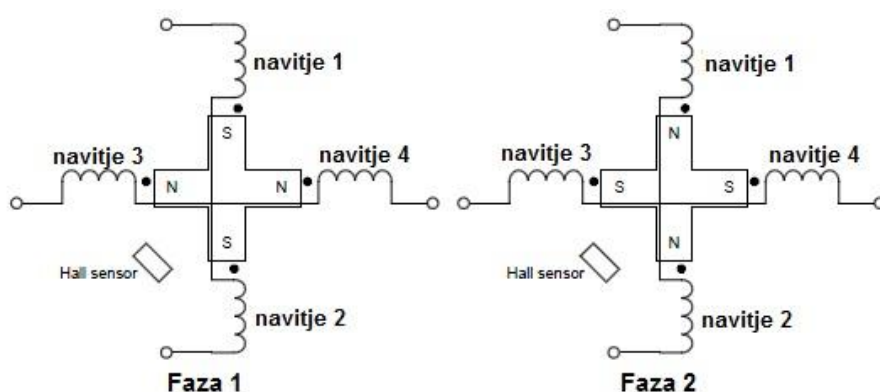
3.3 KRMILJENJE ENOSMERNEGA BREZKRTAČNEGA MOTORJA

V osnovi enosmerni motor brez ščetk vodimo kot enosmerni motor s ščetkami. Trapezna oblika porazdelitve napetosti v motorju je uporabljena, ker na ta način dobimo približno pravokotno obliko tokov v posameznih fazah in s tem enosmerno obliko skupnega toka ter navora [1].

3.3.1 Dvofazni brezkrtačni motor

Dvofazni brezkrtačni motorji so širše uporabljeni v ventilatorjih za ohlajanje računalniških komponent. Prednost pred krtačnimi imajo predvsem pri hitrejšem pospeševanju, so lažji, proizvedejo manj električnega in zvočnega šuma ter ne potrebujejo vzdrževanja.

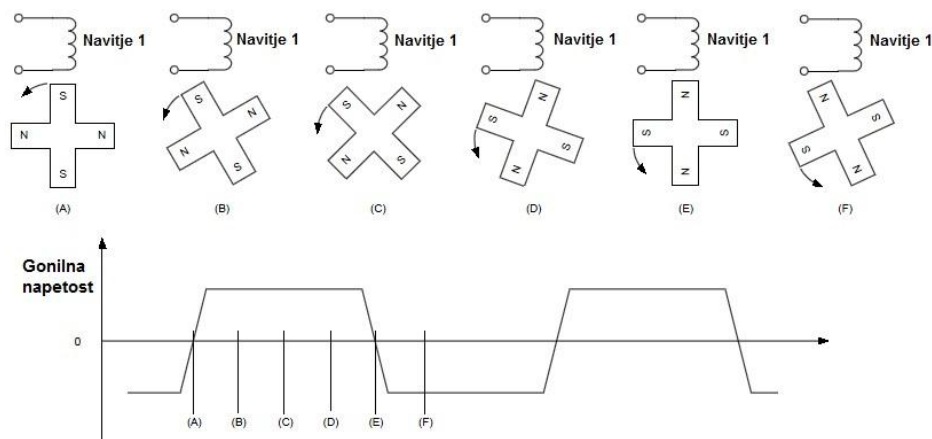
Osnoven model dvofaznega brezkrtačnega elektromotorja je prikazan na Sliki 3.19. Število polov permanentnega magneta in število navitij je odvisno od želenih karakteristik motorja. Na Sliki 3.19 vidimo motor s štirimi navitji in dvema sklopoma polov. Zgornje in spodnje navitje sta povezana z napajanjem, kot tudi levi in desni. Ko teče tok skozi navitje, se magneti rotorja odzivajo. V fazi 1 vidimo, da sta južna dela polov poravnana z navitjem 1 in 2. V fazi 2 sta se pola že premaknila k navitjema 3 in 4. Hall senzor je nameščen med navitjema 2 in 3 (Slika 3.19) in menja izhodni signal, ko se magneti rotorja poravnajo z navitji in se polariteta zamenja (Slika 3.20).



Slika 3.19: Temeljna oblika dvofaznega BLDC-motorja [11].

Inducirana napetost v izmeničnem magnetnem polju ustvari gonilno napetost na tuljavi (navitju). Oblika te napetosti je približno trapezna (Slika 3.20). Amplituda napetosti je

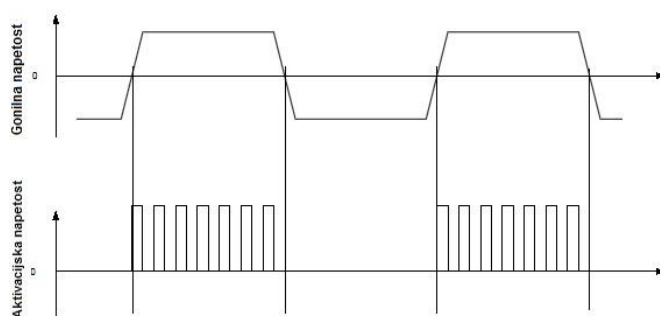
sorazmerno odvisna od hitrosti motorja. Ko rotor doseže neko hitrost, se amplituda ustavi. Na Sliki 3.20 vidimo, kako se spreminja amplituda napetosti med obračanjem rotorja [11].



Slika 3.20: Nastala gonilna napetost pri kroženju magnetov na rotorju [11].

Vodenje s pulzno širinsko modulacijo (PWM)

Eden izmed načinov nadzora hitrosti motorja je prek dovoda napetosti. Vendar pa zelo malo sistemov omogoča direktno ročno nastavljanje dovoda napetosti. Posledično imajo tako sistemi poleg motorja namenjeno strojno opremo samo za nadzor napetosti, kar pa ni brezplačno. Alternativno lahko vgradimo nadzor napetosti oziroma hitrosti že v elektronski del motorja. Če komutacijo nadzira mikrokontroler, ga lahko uporabimo za pulzno širinsko modulacijo (PWM) napetosti. Z uporabo pulzno širinske modulacije lahko nadzorujemo napetost in tok skozi tuljavo. Na Sliki 3.21 vidimo, da smo zmanjšali obratovalni cikel za 50 % in je tako povprečna napetost za 50 % manjša. S povečanjem obratovalnega cikla pulzno širinske modulacije povečamo hitrost oziroma navor.



Slika 3.21: Aktivacijska napetost modulirana s PWM [11].

Da lahko nadzorujemo hitrost s pulzno širinsko modulacijo, je vsekakor dobro, da že imamo v strojni opremi mikrokontroler. Ta nam zagotavlja pravilno in brez napak časovno usklajenost in s tem celotno napetostno območje od 0 do 100 %. Pulzno širinska modulacija v strojni opremi deluje bolj samostojno od preostale strojne opreme, in tako prepušča več časovnih ciklov pomembnejšim nalogam, kot je na primer komutacija.

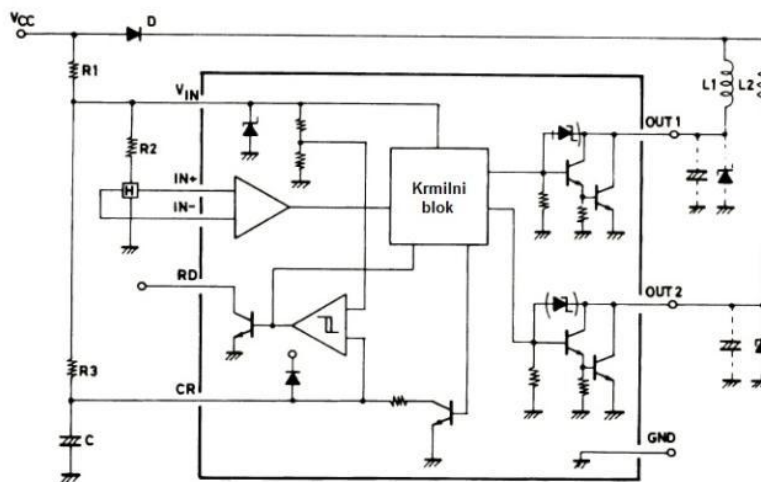
Ena osnovnih zahtev pri uporabi pulzno širinske modulacije je, da uporabljamo frekvence nad zvočnimi (od 20 do 20 kHz), kar pomeni, da mora delovati pri frekvencah nad 20 kHz, sicer bomo slišali visok piskajoč zvok [11].

Hitrost motorja

V večini naprav se hitrost motorja prilagaja neki zunanji referenci, kot je na primer analogni signal (temperaturnega tipala, potenciometra ali PWM-signal systemskega krmilnika). Mikrokontroler omogoča večjo prilagodljivost pri uporabi vhodnega referenčnega hitrostnega signala za nadzor hitrosti motorja, še posebej, če je na voljo notranji ADC (analogno digitalni pretvornik). Merimo lahko različne referenčne hitrosti in s spreminjanjem obratovalnega cikla PWM, ki nadzoruje aktivacijsko napetost, ustrezno nadzorujemo število vrtljajev motorja. Omogočen je nadzor hitrosti v zaprti zanki (angl. *closed loop*), kjer PWM vedno prilagaja in zmanjšuje razliko med referenčno hitrostjo in številom vrtljajev motorja [11].

Primer sheme

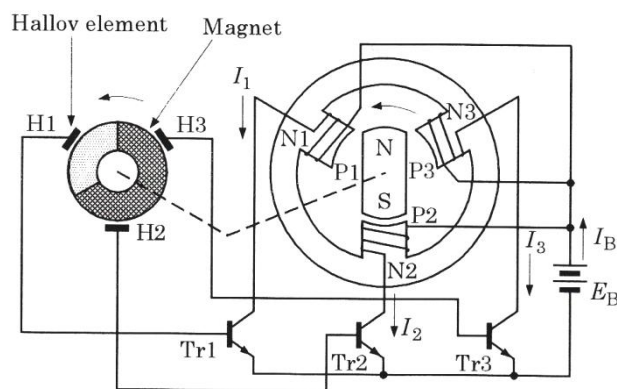
Notranjo shemo integriranega vezja krmilnika kaže Slika 3.22. Vezje ima poleg krmiljenja tudi funkcijo razpoznavanja blokade motorja, ki deluje tako, da meri čas, ki preteče od preklopa faze, in ga primerja z nastavljeno vrednostjo. Vrednost določimo z zunanjim uporom in kondenzatorjem (referenčni vir) [1].



Slika 3.22: Krmilnik ventilatorja v osebni računalniku – LB 1661 [1].

3.3.2 Postopki vodenja trifaznega motorja

Slabe lastnosti eno- in dvofaznega sistema so velike pulzacije vrtilnega momenta, o čemer smo že govorili pri opisu motorja. Za lažje razumevanje je na Sliki 3.23 prikazana shema trifaznega motorja s stalno polariteto in Hallovimi elementi za krmiljenje stikalnih tranzistorjev (Tr1, Tr2, Tr3) [12].



Slika 3.23: Shema delovanja elektronsko komutiranega trifaznega motorja [12].

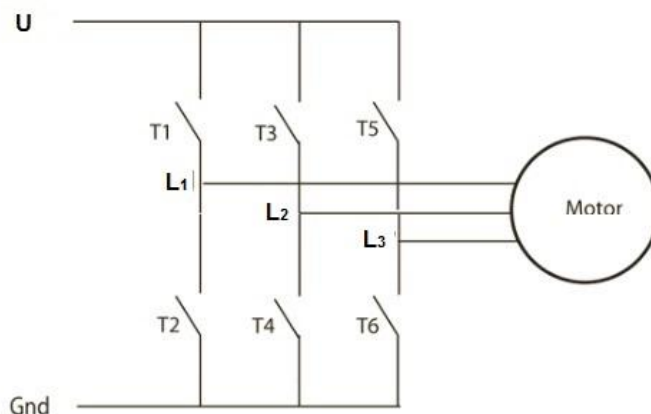
Na os motorja je pritrjen magnetni obroč, okoli katerega so nameščeni Hallovi elementi, ki zaznavajo njegov položaj in s tem tudi položaj rotorja. Hallove sonde so nameščene tako, da vsaka izmed njih vklopi ustrezen tranzistor, ki požene tok skozi ustrezno fazo. Trenutni aktivni tranzistor je Tr1 (Slika 3.23). Na zunaj gledano je motor enosmeren.

Hitrost mu lahko spreminjamo na dva načina. Prvi način je prek napajalne napetosti, kar zaradi nelinearnosti tranzistorjev ni primerno za delovanje pri nizkih napetostih in s tem pri nizkih hitrosti, drugi način pa uporablja pulzno širinsko modulacijo. Izveden je tako, da damo na krmilni vhod tranzistorja logična IN vrata ter priklopimo na en vhod ustrezno Hallovo sondo, na drugega pa izhod iz modulatorja. Na ta način se izognemo nelinearnosti tranzistorjev.

S tem postopkom ni mogoče spreminjati smeri vrtenja, je pa uporaben za enosmerno delovanje, najbolje s konstantno hitrostjo, kar zadošča za preproste aplikacije. Za kompleksnejše aplikacije je treba uporabiti tranzistorski pretvornik (most) z vsaj šestimi tranzistorji (za tri faze). Slabost je tudi pri toku, saj teče vedno le skozi eno fazo, s čimer se pokvari razmerje med maso in navorom motorja [1].

Tranzistorski most

Komutacija je nadzorovana s trifaznim mostom (Slika 3.24). Tripolovični mostovi imajo šest stikal (IGBT- ali MOSFET-tranzistorji), ki se preklapljajo po navedenem vzorcu. Motor je opremljen s tremi Hallovimi senzorji, ki so nameščeni na 120°. S temi senzorji je omogočenih šest različnih komutacij. Fazna komutacija bo odvisna od vrednosti Hallovega elementa.



Slika 3.24: Trifazni tranzistorski most [13].

Branje vrednosti Hallovega elementa nam pove, kateri sistem se bo vklopil (Tabela 3.1).

Tabela 3.1: Komutacijska stikala za neprekinjeno delovanje [13].

Vrednost na Hallovi sondi (H1, H2, H3)	Hallovo stanje	Predhodna faza	Predhoden sistem	Naslednja faza	Naslednji sistem
110	3	L ₂ -L ₃	T3 ; T6	L ₁ -L ₃	T1 ; T6
100	1	L ₁ -L ₃	T1 ; T6	L ₁ -L ₂	T1 ; T4
101	5	L ₁ -L ₂	T1 ; T4	L ₃ -L ₂	T5 ; T4
001	4	L ₃ -L ₂	T5 ; T4	L ₃ -L ₁	T5 ; T2
011	6	L ₃ -L ₁	T5 ; T2	L ₂ -L ₁	T3 ; T2
010	2	L ₂ -L ₁	T3 ; T2	L ₂ -L ₃	T3 ; T6

Pri motorjih, ki imajo več polov, se električna rotacija ne ujame z mehanskim vrtenjem. Motor z n parom polov uporablja n električnih ciklov rotacije, da ima eno mehansko vrtenje. Komutacija ustvarja vrtenje. Na primer, na stanju 5 (Tabela 3.1) je faza L₁ povezana na pozitivno vhodno napetost (U) prek T1 in faza L₂ je povezana na zemljo (Gnd) prek T4, faza L₃ ni vklopljena. Dva tokovna vektorja se ustvarita na fazah L₁ in L₂. Seštevek vektorjev nam da vektor statorskega toka. Rotor nato sledi statorskem vektorju. Takoj, ko rotor doseže določeno pozicijo, se vrednost na Hallovem elementu spremeni iz '101' na '001', in tako ustvari nov napetostni vzorec. Sedaj L₁-faza ni priklopljena in je faza L₃ priklopljena na pozitivno napetost, kar nam da statorski vektor 'stanja 4'. Če sledimo komutacijskemu vzorcu, na Tabeli 1 dobimo šest različnih statorskih tokovnih vektorjev, ki ustrezajo šestim komutacijskim korakom. Tih šest korakov zagotavlja električen krog [13].

3.3.3 Postopki vodenja brez senzorjev

Prednosti postopkov vodenj brez senzorjev položaja so:

- nižja cena in masa sistema,
- zmanjšano število povezav,
- povečana zanesljivost,
- zmanjšana občutljivost na temperaturo in zunanje elektromagnetne vplive ter
- manjša kompleksnost mehanskega dela.

Postopki imajo seveda tudi slabosti, ki so:

- višja cena elektronskih komponent,
- povečana kompleksnost algoritma vodenja,
- povečana občutljivost na motnje in spremembe parametrov ter
- težave pri nesinusni obliki inducirane napetosti.

Kot je že zapisano pri delovanju vodenja s tranzistorskim mostičem, sta pri vodenju enosmernega motorja brez ščetk vedno aktivni le dve veji pretvornika. Tretja veja ni aktivna in jo lahko uporabimo za meritev inducirane napetosti.

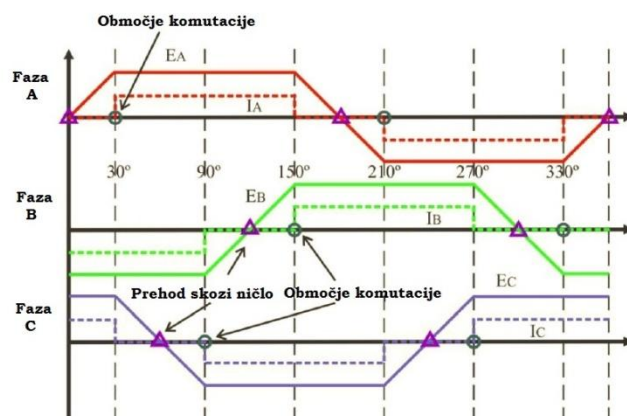
Za vodenje brez senzorja položaja se uporablja več postopkov:

- prehod inducirane napetosti skozi ničlo,
- meritev tokov in napetosti,
- uporaba estimatorjev,
- uporaba Kalmanovih filtrov in
- uporaba regulatorjev v drsnem režimu (*sliding mode*).

Vsi postopki delujejo na istem modelu, razlikujejo se le v uporabljenih orodjih [1].

Prehod inducirane napetosti skozi ničlo

Prehod inducirane napetosti skozi ničlo je eden izmed enostavnejših metod za vodenje brez senzorjev. Temelji na trenutku, ko inducirana napetost prečka ničlo. Ta dogodek sproži števec, ki je lahko enostaven RC-časovnik, tako da na koncu tega časovnega intervala naslednji zaporedni pretvornik sproži komutacijo. Za tipično delovanje motorja se fazni tok in gonilna napetost poravnata, da ustvarita vrtilni moment. Točka tokovne komutacije na Sliki 3.25 je približna glede na območje prehoda skozi ničlo in 30°-faznega zamika s pomočjo šeststopenjske komutacijske sheme na trifaznem pretvorniku. Le dve fazi prevajata tok naenkrat, tretja ne. Da dobimo maksimalen navor, se mora pretvornik komutirati vsakih 60°.



Slika 3.25: Prehod inducirane napetosti skozi ničlo in območja fazne komutacije [10].

Tehnika zamikanja za 30° od točke, kjer prečka ničlo, ne povzroči spremembe hitrosti. Da zaznamo območje, kjer tuljava prečka, moramo nadzorovati tiho fazo (kadar je tok skozi neko fazo 0) in napetost omejiti z nizkim prepustnim sitom. To sito je uporabljeno, da odpravi višje harmonske terminalne napetosti, ki jih ustvari pretvornik med preklapljanjem. Na mesto analognega sita lahko uporabimo tudi pulzno širinsko modulacijo [10].

Uporaba estimatorjev v drsnem režimu (SMO – Sliding-Mode Observer)

Poznavanje absolutne pozicije rotorja je ključno pri upravljanju motorja. V ta namen uporabimo različne senzorje, ki pa so dragi in zahtevajo poseben način vgradnje. Za izboljšanje mehanske trdnosti in zmanjšanje stroškov pogonskega sistema se uporablja več tehnik estimacije, ki odpravijo optični dajalnik ali kak drug senzor.

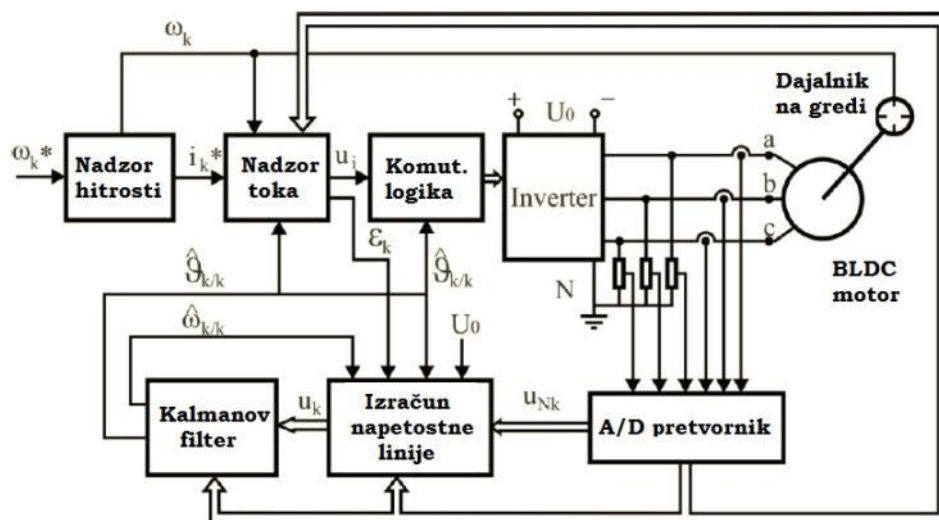
Pri metodi neposrednega navora se izkoristi enačba stanja motorja, tako da izkoristi najmanjše razmerje vektorjev med statorskim tokom in induciranim tokom, in zmanjšuje vrtilni navor pri komutaciji. Pri tej metodi se iz preglednice izbere ustrezen napetostni vektor z uporabo pozicijskega vektorja pretoka rotorja in kota navora, ki privede do v naprej določene histereze. Ta histerezna metoda ima kar nekaj slabosti, kot je visoko število pulzacij in spremenljiva stikalna frekvenca pretvornika [10].

Uporaba Kalmanovih filtrov (EKF – Extended Kalman Filter)

Kalmanov filter je rekurzivni algoritem, ki je optimalen za estimacijo nelinearnih sistemov, kot je enosmerni brezkrtačni motor. Obdeluje vse razpoložljive meritve ne glede na njihovo točnost, da zagotovi hitro in točno oceno spremenljivk, ki nas zanimajo. To naredi tako, da pozna dinamiko sistema, statističen opis sistemskih napak (motnje, šum itd.) in

informacijo o začetnem stanju spremenljivk. Algoritem je intenzivno računski, zato je učinkovita formulacija bolj potrebna, kot neposredno izvajanje. Poleg tega je treba obravnavati za praktično uporabo filtra v realnem času razne računske zahteve (čas obdelave filtrnega cikla, zahteve pomnilnika itd.) in računalniške omejitve (čas izvedbe cikla, nabor ukazov, uporaba računanja itd).

Metoda se lahko uporabi za oceno lege rotorja in njegove hitrosti. Na Sliki 3.26 vidimo sistem za določanje lege in hitrosti rotorja. Razdelimo ga lahko na dva osnovna dela: sistem za nadzor hitrosti in sistem za estimacijo. Prvi je sestavljen iz napajalnega vezja (DC-napajanje, pretvornik in motor) in kontrolnega vezja, ki ima tri funkcije: tokovna komutacija, nadzor toka in nadzor hitrosti. Izmerjena hitrost (ω_k), fazni tokovi (i_k) in ocena pozicije rotorja ($\theta^{\wedge}_{k/k}$) so uporabljeni kot povratni signali. Glavni del estimacijskega algoritma sta Kalmanov filter in blok za preračunavanje povprečne napetostne linije motorja. Vektor povprečne napetostne linije je definiran na podlagi povprečne napetostne linije v k-vzorčenju (u_k) in je preračunan na začetku vzorčenja s terminalno napetostjo na nevtralno točko vektorja (u_{Nk}), z obratovalnim ciklom pretvornega tranzistorja, DC-napetostjo na pretvorniku (U_0), predvideno hitrostjo ($\omega^{\wedge}_{k/k}$), pozicijo rotorja ($\theta^{\wedge}_{k/k}$) in izmerjenim vektorjem toka (i_k).



Slika 3.26: Sistem za estimacijo hitrosti in pozicije na BLDC-motorju [10].

3.4 PREPROSTI POSTOPKI KRMILJENJA

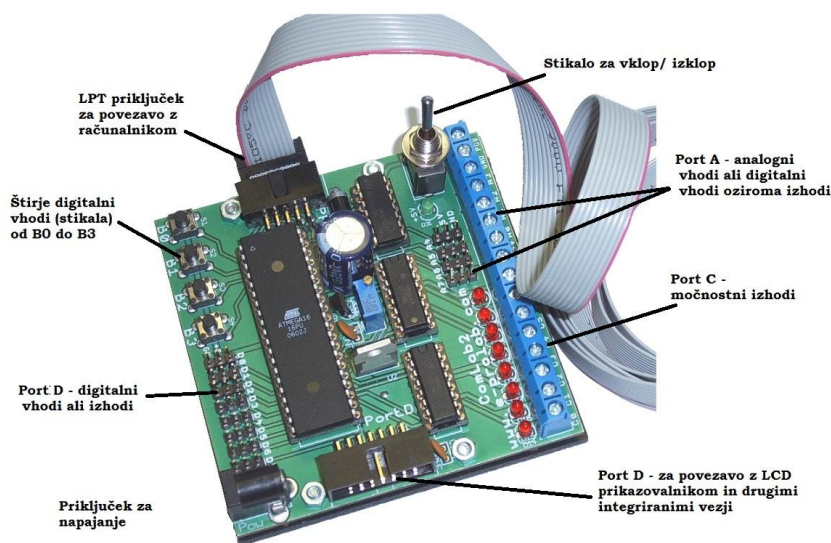
Enosmerni motor brez ščetk je v večini primerov uporabljen v aplikacijah nižjih in srednjih moči in navorov. Vodimo ga kot enosmerni motor s ščetkami, vendar mu moramo zagotoviti elektronsko komutacijo [1].

3.4.1 Oprema, potrebna pri krmiljenju

Za vodenje motorja je potreben osebni računalnik, vmesnik eProDas-Rob1 in programska oprema Bascom.

Vmesnik eProDas-Rob1

Vmesnik eProDas-Rob1 (Slika 3.27) povežimo z osebnim računalnikom prek LPT-priključka (tiskalniški priključek), kot prikazuje Slika 3.27, ali pa ga s ploščatim kablom povežemo z USB-modulom eproDas-FTDI. Pravilno moramo nastaviti tudi priloženi napajalni adapter. Predvsem je pomembna nastavev polaritete. Slednja je nastavljena tako, da je sredinski del priključka na adapterju GND oz. "-", zunanji del pa je +. Nastavljiva je tudi napajalna napetost, ki nikakor ne sme biti manjša od +6 V. Zaradi povečanih zagonskih tokov elektromotorčkov je priporočena nastavev napetosti na 7,5 V. Če so nastavitve pravilne, bo po vklopu na vmesniku zasvetila zelena svetleča dioda (LED), v nasprotnem primeru je nekaj narobe. Na vmesnik lahko priključimo tudi baterijsko napajanje, in sicer na priključka Pow (+) in GND (-) [14].



Slika 3.27: Vmesnik eProDas-Rob1 [14].

Programska oprema Bascom

Programsko orodje Bascom idealno služi programiranju vmesnika eProDas-Rob1, saj je namenjen programiranju mikrokrmilnikov družine AVR. Povezava z računalnikom je v tem primeru nujna le toliko časa, da program presnamemo v mikrokrmilnik, nato pa lahko povezavo z računalnikom odklopimo in program se izvaja na vmesniku oziroma točneje v mikrokrmilniku [14].

Programsko okolje Bascom

Povsem nov projekt odpremo s klikom na ikono Create a new file (ustvari novo datoteko) in jo takoj shranimo v izbrano mapo, saj bo lahko tako program shranjeval vse podprograme. Vsak nov projekt pričnemo z ukazoma:

```
$regfile = "m16def.dat"
```

```
$crystal = 8000000,
```

s katerima izberemo integrirano vezje in delovno frekvenco.

Vsak program na koncu vedno zaključimo z ukazom End.

```
End
```

Priključki vmesnika eProDas-Rob1 so lahko vhodni ali izhodni, razen priključka C, ki je lahko le izhoden, in B, ki je lahko le voden. Priključke moramo v programu definirati z začetnimi ukazi.

```
Config Porta = Input/Output
```

```
Config Portb = Input
```

```
Config Portc = Output
```

```
Config Portd = Input/Output
```

Jezik pisanja je BASIC in ga je treba prevesti v jezik HEX, ki ga razume mikrokrmilnik. To storimo s klikom na ikono program Compile (sestavi program) ali tipko F7 na tipkovnici, in če se je program uspešno prevedel, ga prenesemo na mikrokrmilnik s klikom na ikono

Program chip (programiranje čipa) oziroma pritisnemo na tipko F4 na tipkovnici. Obe ikoni najdemo v menijski vrstici [15].

3.4.2 Pregled osnovnih ukazov v Bascomu

Digitalni izhod

Port C smo definirali kot digitalni izhod (Output).

Za nastavljanje logičnih stanj na izhodu vmesnika uporabljamo posebne ukaze.

Prva možnost je ukaz `PORTC = stevilo`.

V parameter stevilo vpišemo desetiško število tipa byte, torej število med 0 in 255.

`PORTC = 125`

Druga možnost je ukaz `PORTC = &B11111111`.

Osem enic pomeni, da je vseh 8 bitov v logični enici. S tem ukazom lahko nastavljamo vsak bit posebej. Ukaz `PORTC = &B00001111` pomeni, da so prvi štirje izhodi v logičnem stanju 1, višje od tega pa v stanju 0.

Tretja možnost je ukaz `PORTC.0 = logično stanje`.

S tem ukazom spreminjamo logično stanje samo na enem izhodnem bitu. V parameter logično stanje vpišemo logično 1 ali logično 0. Ukaz `PORTC.5 = 1` bo na šestem izhodu Port C5 vklopil stanje logične 1 [15].

Deklariranje spremenljivk

Novo spremenljivko lahko deklariramo kot spremenljivko tipa Bit, Byte, Word, Integer, Double, String itd.

`Dim ime_spremenljivke As Byte`

- Bit ima lahko vrednost spremenljivke le 0 ali 1,
- Byte (je 8 bitov) ima lahko vrednosti od 0 do 255,
- Word (2 byta) ima vrednosti od 0 do 1023,
- Integer ima vrednost spremenljivke od -64000 do +64000,
- pri Double ni celih števil in je od -x,123... do +x,123...,

- String je spremenljivka za besedilo [15].

Programska zanka Do-Loop

Programska zanka Do-Loop je neskončna zanka. Ukazi, ki so vsebovani v tej zanki, se izvajajo v neskončnost.

Do

Ukaz 1

Ukaz 2

...

Loop

Do pomeni začetek zanke, kjer sledi ukaz, in Loop je konec zanke, kjer se vrne na začetek. Zanki lahko dodamo pogoj, ko želimo, da se zanka konča tako, da namesto Loop napišemo Loop Until pogoj. Zanka se bo tako končala, ko bo pogoj izpolnjen [15].

Do

Ukaz 1

Ukaz 2

...

Loop Until PinB.0 = 1

Programska zanka For-Next

For-Next zanka ponavlja ukaz, ki ga vsebuje. Določimo lahko začetno vrednost števca, ki jo vpišemo pod parameter zacetna_vrednost. Zanka se ponavlja, dokler števec ne doseže končne vrednosti, ki jo določimo s parametrom koncna_vrednost.

For I = zacetna_vrednost To koncna_vrednost

Ukaz1

Ukaz2

...

Next I

Zanki lahko dodamo ukaz step -število. S parametrom število določimo velikost koraka, bodisi navzgor ali navzdol. Če želimo odštevati, pripišemo znak -, v nasprotnem primeru pa napišemo samo vrednost [15].

For I = 32 To Step -2

Ukaz1

Ukaz2

...

Next I

Digitalni vhod in pogojni stavek If-Then

Stavek If ... Then se običajno uporabljajo v kombinaciji z digitalnim vhodom. Mikrokontroler najprej preveri, če je pogoj izpolnjen, in nato izvede ukaz do konca programa End If [15].

If pogoj Then

Ukaz 1

Ukaz 2

...

End If

Analogni vhod

Analogno-digitalni pretvornik najprej konfiguriramo. Z nastavitvijo Prescaler na vrednost Auto nastavimo na največjo frekvenco vzorčenja. Z nastavitvijo parametra Reference na off povemo, da imamo zunanjo napetostno referenco. Napetost na vhodu preberemo z ukazom Getadc, ki nam vrne vrednosti tipa Word. V oklepaj zapišemo oznako analognega vhoda, ki ga želimo spremljati (od 0 do 7) [15].

Config ADC = Single, Prescaler = Auto, Reference = Off

Start ADC

Ukaz = Getadc(0)

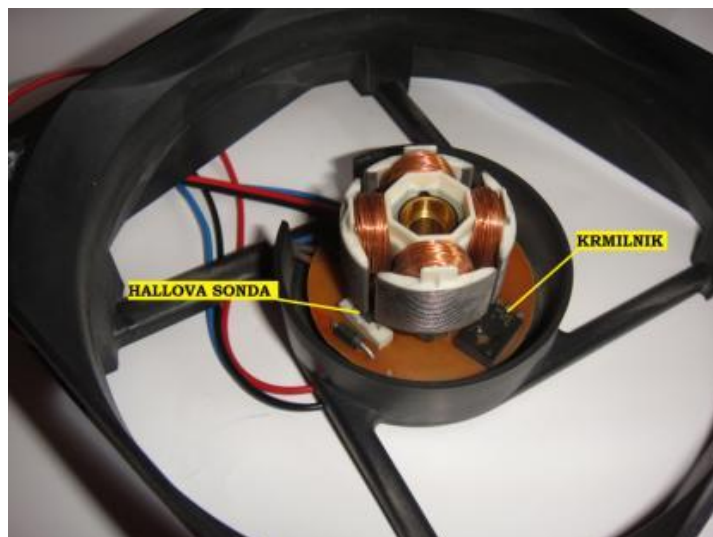
3.4.3 Ventilator v osebnem računalniku

Ventilator v osebnem računalniku (Slika 3.28) ima enosmerni motor brez ščetk z zunanjim rotorjem. Uporabljen je dvofazni motor, sistem pa omogoča vrtenje samo v eno smer.



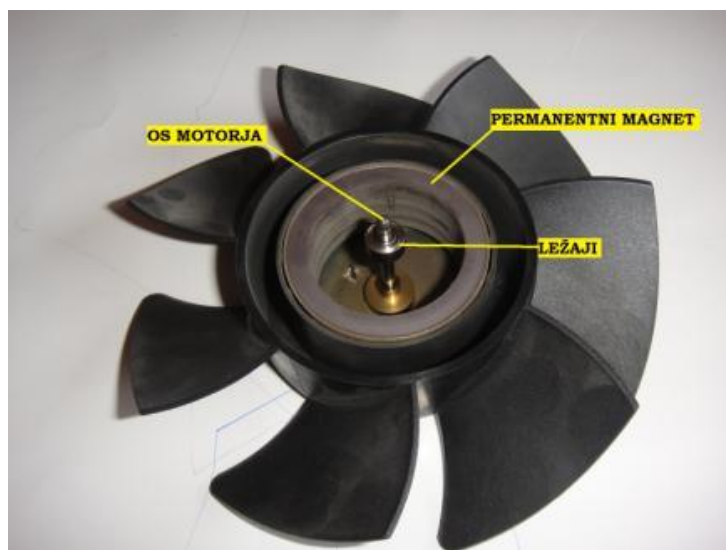
Slika 3.28: Ventilator v osebnem računalniku.

Na Sliki 3.29 imamo stator, kjer vidimo navitje dveh polovnih parov, ki sta eden na drugega pravokotna. Priključena sta na faze, ki jih krmilimo s tranzistorskim pretvornikom. Na Sliki 3.29 je označena tudi namestitev Hallove sonde, ki ima poleg tudi sistem za elektronsko komutacijo.



Slika 3.29: Stator, kjer so vidna navitja, Hallova sonda in vezje krmilnika.

Na Sliki 3.30 je prikazan rotor, ki ima pritrjene lopatice ventilatorja. Vidni so permanentni magnet, os motorja in ležaji.



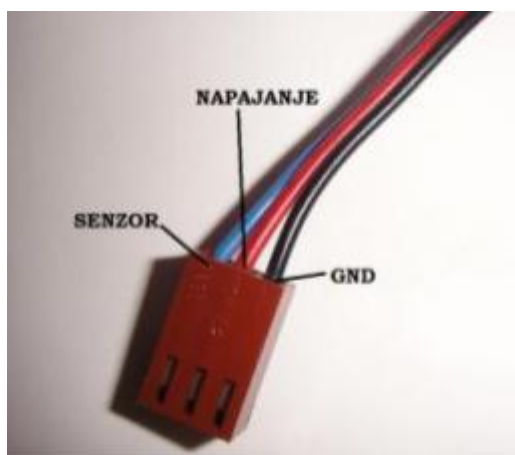
Slika 3.30: Zunanji rotor motorja, kjer so vidni ležaji, os motorja in permanentni magnet.

V poglavju 3.3.1 Dvofazni brezkrtačni motor je prikazano delovanje dvofaznega brezkrtačnika, kot ga imamo v ventilatorju osebnega računalnika.

3.4.4 Krmiljenje dvofaznega enosmernega brezkrtačnega motorja (ventilator)

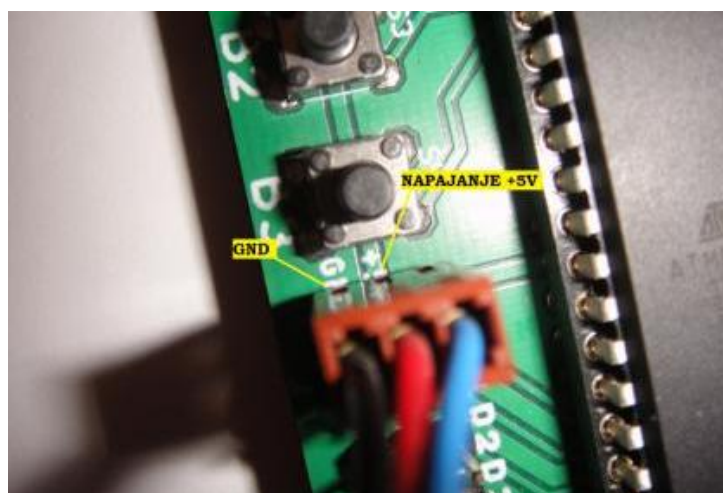
Pri ventilatorju, ki ga lahko kupimo ali si ga 'sposodimo' iz osebnega računalnika, je program delovanja že na samem krmilniku. Ventilatorji imajo lahko dva, tri ali štiri prikllope.

V najosnovnejši izvedbi sta dva, en za priklop na ničlo (oziroma GND) in drugi za napajanje. V našem primeru imamo tri priklope (Slika 3.31). Tretji ima povratno informacijo vgrajenega senzorja o hitrosti ventilatorja. Večji ventilatorji pa imajo lahko tudi štiri priklope. Četrty kabel služi za pulzno širinsko modulacijo (PWM) hitrosti [16].



Slika 3.31: Priklop ventilatorja.

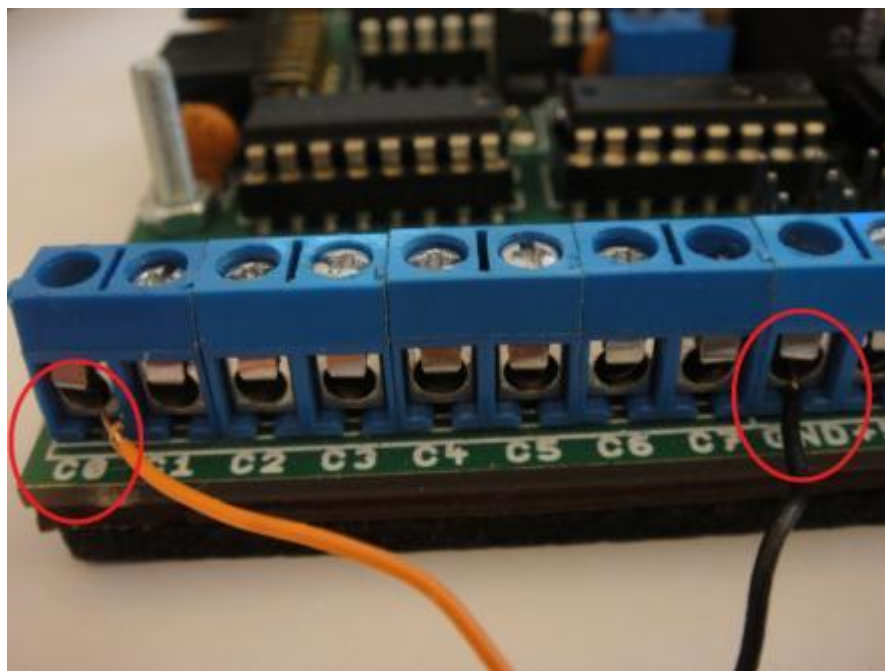
Na vmesniku eProDas-Rob1 imamo na Port D digitalne vhode in izhode (Slika 3.27). Če primerno priklopimo ventilator na enega izmed vhodov (Slika 3.32), opazimo, da se ventilator takoj vključi. Na takem digitalnem vhodu imam tri zobce (GND, napajanje in vhod) in dva izmed njih (GND in napajanje) poskrbita, da se ventilator začne obračati. Ob takem priklopu ventilator deluje s polnimi obrati in jih ne moremo nadzirati. Enako bi delovalo, če bi imeli ventilator le z dvema priklopoma. Ob priklopu na napajanje in zemljo se vrty s polnimi obrati.



Slika 3.32: Priklop ventilatorja na Port D.

Uporaba močnostnih izhodov (Port C) na vmesniku eProDas-Rob1

Čeprav ima ventilator tri prikllope, bomo uporabljali le dva, saj je to dovolj za pulzno širinsko krmiljenje. Potrebujemo prikllop za napajanje in zemljo (GND). Zemljo imamo na vmesniku eProDas-Rob1, kjer piše GND (Slika 3.33), drug priključek za napajanje pa namestimo na enega izmed močnostnih izhodov (Port C), najbolje na prvega, C0 (Slika 3.33).



Slika 3.33: Napajanje ventilatorja priključimo na Port C0 in na GND.

Za vrtenje ventilatorja s polno hitrostjo bo dovolj, če napišemo program, ki bo vklopil logično 1 na izhodu C0 (Program 1). Za počasnejše vrtenje uporabimo pulzno širinsko modulacijo in nastavimo, s kolikšnim deležem želimo, da se ventilator vrti (Program 2).

Program 1 – vrtenje s polnimo obrati

Program bo potekal tako, da se vrtenje prične, ko pritisnemo na tipko B0. Vrti se s polnimi obrati in konča, ko pritisnemo na tipko B1.

```
'VRTENJE VENTILATORJA NA POLNO
```

```
$regfile = "m16def.dat"
```

```
$crystal = 8000000
```

```
Config Porta = Input
```

```
Config Portb = Input
```

```
Config Portc = Output
```

```
Config Portd = Input
```

```
Do
```

```
  If Pinb.0 = 1 Then      'če pritisnemo tipko B0, potem
```

```
    Portc.0 = 1          'se vklopi Port C0
```

```
  End If
```

```
Loop Until Pinb.1 = 1    'ponavljaj, dokler ni pritisnjena tipka B1
```

```
  Portc.0 = 0            'nato se ugasne.
```

```
End
```

Zgornji program najdemo na priloženi zgoščenki v datoteki priloge pod Bascom_programi/ventilator/vrtenje.bas. Posnetek delovanja pa v datoteki priloge pod video/ventilator_vrtenje_pwm.avi.

Program 2 – Pulzno širinska modulacija vrtenja

Pulzno širinska modulacija je način krmiljenja, kjer namesto konstantnega signala pošljamo le kratke signale, in tako zmanjšamo hitrost vrtenja. Razmerje med vklopljenim signalom in izklopom lahko določimo sami. Program, ki je napisan spodaj, ima zmanjšano hitrost za polovico svoje polne hitrosti. Z vnašanjem časa vklopa in izklopa lahko reguliramo hitrost. V tem programu imamo čas vklopa 5 milisekund in čas, ko je izklopljen, prav tako 5 milisekund. Hitrost vrtenja bo tako zmanjšana za polovico (5 proti 5), skupni čas pa je 10 milisekund (tako najlažje razporejamo z razmerji, saj 10 milisekund predstavlja 100 %). Za počasnejše vrtenje povečamo čas izklopa, za hitrejša vrtenja pa povečamo čas vklopa. Razmerje med časom izklopa in vklopa naj ne bo večje od 10 (oziroma 100 %).

VRTENJE VENTILATORJA Z ZMANJŠANO MOČJO

```
$regfile = "m16def.dat"
```

```
$crystal = 8000000
```

```
Config Porta = Output
```

```
Config Portb = Input
```

```
Config Portc = Output
```

```
Config Portd = Input
```

```
Do
```

```
  If Pinb.0 = 1 Then                                'če pritiskamo na tipko B0,
```

```
    Portc = &B00000001                             'se ventilator vrti z zmanjšano močjo.
```

```
    Waitms 5                                           '5 milisekund je vklopljen
```

```
    Portc = &B00000000
```

```
    Waitms 5                                           '5 milisekund je izklopljen
```

```
  End If
```

```
Loop
```

```
End
```

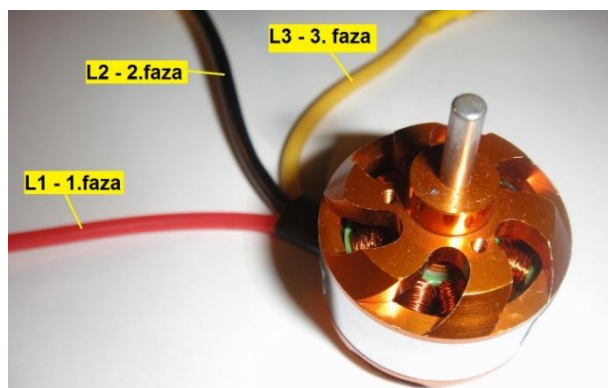
Napisan program je priložen na zgoščenki v datoteki Bascom_programi/ventilator/pwm vrtenje.bas. Posnetek vrtenja je v priloženi datoteki video/ventilator_vrtenje_pwm.avi.

3.4.5 Enosmerni trifazni brezkrtačni elektromotor brez senzorjev položaja

V modelarstvu se je trend enosmernih elektromotorjev brez ščetk najbolj razširil, saj so taki motorji lažji in cenejši. Najcenejše različice so brez senzorjev, kar pomeni, da potrebujemo krmilnik za pravilno in učinkovito delovanje elektromotorja. Krmilnik lahko dokupimo ali ga izdelamo sami, vendar je izdelava kompleksna in zahteva veliko časa. Na

spletu poleg ponudb že izdelanih krmilnikov najdemo tudi priporočila za izdelavo svojega [17, 18].

Enosmerni elektromotor brez ščetk in brez senzorja (Slika 3.34) potrebuje za delovanje komutacijski sistem, ki bo zagotovil pravilno delovanje motorja. Brez komutacije motor ne deluje.



Slika 3.34: Elektromotor ima tri izhodne priključke, torej tri faze.

3.4.6 Krmiljenje z elektronsko komutacijo

Podobno kot pri elektromotorju v ventilatorju tudi tu potrebujemo vmesnik eProDas-Rob1, s katerim bomo krmilili elektromotor. Tako potrebujemo še osebni računalnik in nameščeno programsko opremo Bascom. Več o programskem okolju Bascom je zapisano v poglavju 3.4.2. Pregled osnovnih ukazov v Bascomu.

Program sestavimo tako, da zagotovimo komutacijo. Pomemben je pravilni vrstni red vklopljenih faz in čas med predhodnim in naslednjim vklopom. Daljši kot je čas, ki ga med vklopi določimo, počasnejše bo vrtenje motorja. Ukaz za časovni postanek naj bo `waitms` (v milisekundah). Faze motorja povežemo na prve tri izhode C. Vmesnik eProDas-Rob1 ima omejitev toka 1 A, kar pomeni, da ga vsak tok, ki je večji od tega, poškoduje. Motor, ki ga imamo, deluje na 10 A. V ta namen, preden ga povežemo z vmesnikom, na vsako fazo najprej vezemo električni upor, da zmanjšamo tok.

Program za krmiljenje z elektronsko komutacijo:

```
$regfile = "m16def.dat"
```

```
$crystal = 8000000
```

Config Porta = Input

Config Portb = Input

Config Portc = Output

Config Portd = Input

If Pinb.0 = 1 Then 'ko pritisnemo na tipko B0,

Do 'se zažene program.

Portc = &B00000110 'preklapljanje med 3 fazami

Waitms 5

Portc = &B00000100

Waitms 5

Portc = &B00000101

Waitms 5

Portc = &B00000001

Waitms 5

Portc = &B00000011

Waitms 5

Portc = &B00000010

Waitms 5

Loop

End If

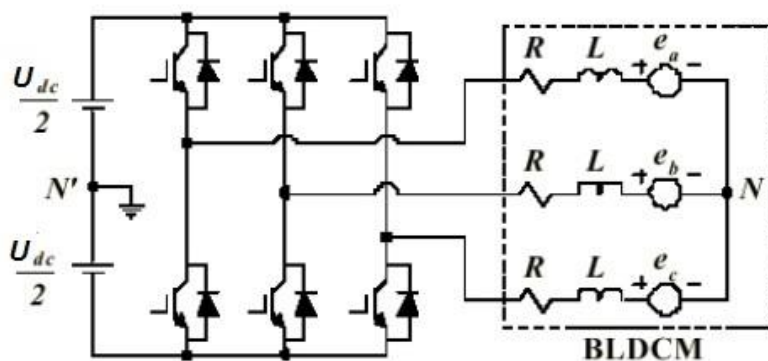
Portc = &B00000000 ' ko tipko spustimo, se ugasne.

End

Program je sestavljen tako, da se motorček vrti, dokler držimo tipko B.0. Ko tipko spustimo, se ustavi in ponovno zažene, ko jo ponovno pritisnemo. Napisan program najdemo na priloženi zgoščenki v prilogi Bascom_programi/motorcek/ele_komutacija.bas. Delovanje lahko vidimo na priloženem posnetku video/SBLDCM_delovanje.avi

3.5 KOMPLEKSNEJŠI POSTOPKI VODENJA

Enosmerni motor brez ščetk je podoben sinhronskemu motorju in se po osnovi loči le po obliki razporeditve polja in načinu vodenja. Električno shemo kompleksnejšega vodenja enosmernega motorja brez ščetk prikazuje Slika 3.35. Uporabljen je tranzistorski most, motor pa je prikazan z nadomestnim električnim vezjem. Od parametrov se spreminjajo predvsem inducirane napetosti e_a , e_b in e_c , ki so premosorazmerne hitrosti vrtenja motorja. Fazna navitja so vezana v zvezdo. Parameter R se spreminja zaradi segrevanja, induktivnost L pa zaradi nehomogenosti zračne reže.



Slika 3.35: Električna shema vodenja enosmernega motorja brez ščetk [1].

Za kompleksno vodenje potrebujemo matematični model motorja (enačba 3.2):

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \left(\begin{bmatrix} L_a & L_{ba} & L_{ca} \\ L_{ba} & L_b & L_{cb} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}, \quad (3.2),$$

efektivno vrednost inducirane gonilne napetosti (U_g) faze izračunamo po enačbi 3.3:

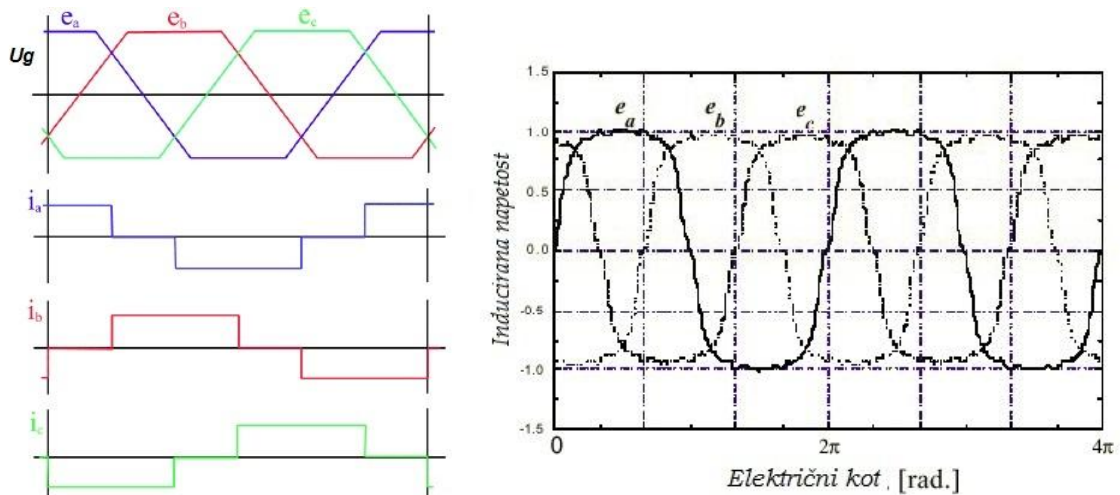
$$U_g = 2NlrB\omega. \quad (3.3)$$

Navor faze dobimo po spodnji enačbi 3.4:

$$M = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} - \frac{1}{2} B^2 \frac{dR}{d\theta} + (2NBrli), \quad (3.4),$$

kjer je N število navojev po fazi, l dolžina rotorja, r notranji polmer rotorja, B gostota magnetnega pretoka rotorja, ω kotna hitrost vrtenja rotorja, i fazni tok skozi navitje statorja in θ položaj (kot zasuka) rotorja. Motor obravnavamo kot popolnoma simetričen.

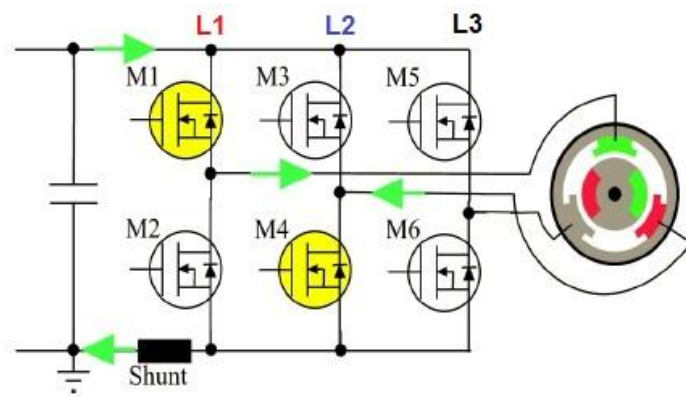
Idealne oblike induciranih napetosti in tokov so prikazane na Sliki 3.36 levo. V resnici so oblike nekoliko drugačne (Slika 3.36 desno). Trapezna oblika inducirane napetosti je posledica porazdelitve polja v motorju, njena amplituda pa je odvisna od hitrosti vrtenja. V resnici opazimo odstopanje od trapezne oblike, kar pomeni, da tok skozi statorsko navitje ne more biti popolnoma pravokoten. V veliki meri je to posledica induktivne narave navitja, vendar je vpliv inducirane napetosti neprimerno večji.



Slika 3.36: Levo: idealni tokovi in napetosti. Desno: dejanske inducirane napetosti [1].

Posledica je tudi oblika navora, kar bistveno vpliva na kvaliteto vodenja, še posebno v aplikacijah sledenja. Problem pogosto rešujejo s konstrukcijskimi prijemi in z večjim številom faz.

Na Sliki 3.37 je prikazana osnovna shema vezja. Aktivni tranzistorji so označeni z rumeno barvo, smeri tokov pa kažejo puščice zelene barve. Z rdečo barvo je označena faza, na kateri imamo pozitivno napetost, z modro pa faza z negativno napetostjo. Uporabljen upor (Shunt) služi za meritev toka in zaščito prek kratkim stikom.



Slika 3.37: Vodenje trifaznega BLDC z mostiščnim vezjem [1].

Za razliko od vektorskega vodenja izmeničnih motorjev so pri enosmernem motorju brez ščetk aktivni le osnovni vektorji, ki se jim spreminja iznos (dolžina). Spremenljivo napetost na izhodu tranzistorskega mostiča dosežemo z uporabo posebnega krmilja. Na vhode tranzistorjev poleg krmilnega signala prek logičnih vrat IN pripeljemo še signale iz pulzno širinskega modulatorja, s katerimi določamo iznos napetosti in tudi toka. Na ta način vodimo sistem s spremenljivo hitrostjo in navorom [1].

4 MODEL ENOSMERNEGA ELEKTROMOTORJA BREZ ŠČETK

O samem principu delovanja in načinih izdelave elektromotorjev brez ščetk je bilo povedanega že kar nekaj. V tem poglavju se bomo osredotočili na izdelavo preprostega modela. Model ima le peščico sestavnih delov in ga pri pouku z učenci lahko izdelamo v okviru rednega tehničnega predmeta, v okviru tehničnega dne ali pri katerem izmed izbirnih predmetov.

4.1 ELEKTRONSKI ELEMENTI IN OGRODJE MOTORJA

Pred začetkom izdelave ogrodja moramo vedeti, katere elemente bomo uporabili in kakšne so njihove dimenzije. Za sestavljanje vezja uporabimo protoboard, na katerem po želji elektronske elemente predstavljamo in zamenjujemo.

4.1.1 Uporabljeni elektronski elementi

Za izdelavo krmilnika bomo potrebovali več vrst električnih uporov, diodo, svetleče diode (LED), bipolarni tranzistor, mosfet tranzistor, dve večji tuljavi in Hallovo stikalo.

Električni upori

Električni upori so linearni sestavni deli in je amplituda toka skozi njih premo sorazmerna amplitudi napetosti. Med tokom in napetostjo ne povzročajo faznega premika. Lestvice uporov so različne, in sicer od nekaj $m\Omega$ do nekaj $M\Omega$ [19].

Diode

Diode so elektronski sestavni deli, ki so izrazito nelinearni. Priključka na diodi nista enakovredna. Označujemo ju z anodo (A) in katodo (K). Idealna dioda v eni smeri popolnoma prevaja (ima upornost nič), v drugi smeri pa ne prevaja (ima neskončno upornost). V smeri iz A na K prevaja, v smeri iz K proti A pa ne. Idealne diode ne obstajajo, tako so na obeh straneh omejitve [19].

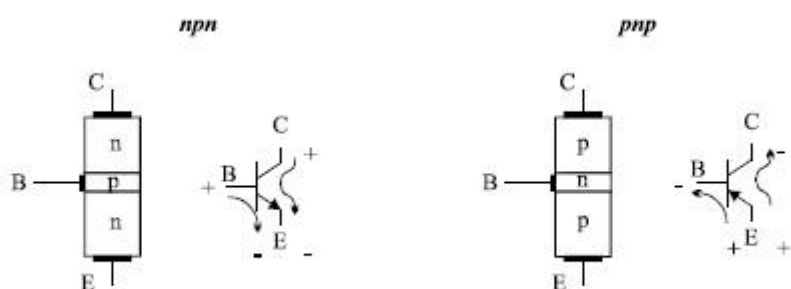
Svetleče diode (LED - Light Emitting Diode)

Svetleče diode imajo podobno karakteristiko kot navadne, polprevodniške diode, le da v prevodni smeri oddajajo enobarvno svetlobo, ki je sorazmerna električnemu toku skozi

diodo. Različne svetleče diode oddajajo svetlobo različnih barv – valovnih dolžin. Kolenska napetost je čim večja, čim krajša je valovna dolžina oddane svetlobe. Svetlečo diodo nikoli ne priključimo neposredno na vir napetosti. Z izbranim uporom, vezanim zaporedno, zanesljiveje dosežemo želen tok skozi diodo [19].

Bipolarni tranzistorji

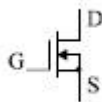
Tranzistorji so polprevodniški elektronski sestavni deli s tremi priključki. Na tok med dvema priključkoma (izhodni – krmiljen električni krog) vpliva napetost med priključkoma in napetost med tretjim in enim od obeh priključkov (vhodni – krmilni električni krog). Tranzistorje sestavljajo tri plasti polprevodnika. Delimo jih glede na razporeditev plasti polprevodnikov p in n, na npn ali n-kanalni (Slika 4.1 levo) in pnp ali p-kanalni (Slika 4.1 desno). Pri npn tranzistorju je vhodni krog med bazo (B) in emitorjem (E), izhodni pa med kolektorjem (C) in emitorjem. Med B in C prevaja, kadar je potencial na B večji od potenciala na C (spoj pn med bazo in emitorjem je polariziran v prevodni smeri). Za pnp tranzistor velja, da so glede primesi p in n ter polarnosti napetosti razmere natanko nasprotni [19].



Slika 4.1: Zgradba pnp in npn tranzistorja in polarnost napetosti med priključki [19].

MOSFET-tranzistorji

Tranzistorji s poljskim pojavom (angl. *FET – field effect transistors*) imajo tako kot bipolarni tranzistorji tri priključke, le da so oznake pri FET-ih drugačne: G (angl. *gate* – vrata), D (angl. *drain* – ponor) in S (angl. *source* – izvor), kot je vidno na Sliki 4.2. Prevajanje med dvema priključkoma (DS) je odvisno od napetosti med krmilno elektrodo (G) in enim od preostalih priključkov (S). Pri tranzistorjih s poljskim pojavom tok v ponoru krmilimo z električnim poljem med G in S, tok je torej odvisen od krmilne napetosti [19].



Slika 4.2: Simbol n-kanalnega MOSFET-a [19].

Tuljave

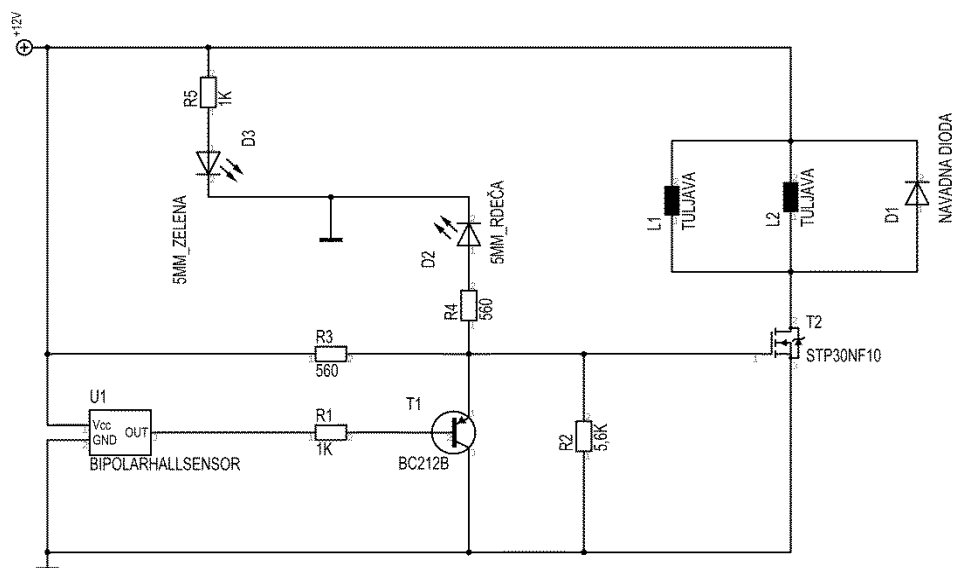
Osnovna lastnost je induktivnost tuljave. Idealna tuljava ima omsko upornost nič in predstavlja za enosmeren vir napetosti kratek stik. Zaradi spreminjanja električnega toka skozi tuljavo se spreminja električni pretok in se zaradi tega inducira napetost. Inducirana napetost ima nasprotno polariteto od gonilne napetosti. Pri konstantni frekvenci sta amplitudi toka in napetosti premo sorazmerni, zato tuljava spada med linearne sestavne dele [19].

Hallovo stikalo (Hall effect latch)

Visoko občutljiv bipolaren zaskoček je neke vrste stikalo, ki temelji na Hallovem senzorju. Zaradi svojih praktičnih lastnosti je uporaben na vseh področjih, kjer se uporablja permanentni magnet ali elektromagnet. Izdelani so na podlagi Hallovega tipala tako, da reagirajo, ko so v bližini severnega ali južnega pola magneta. Takrat se vklopijo ali izklopijo. V sistemu imajo integrirano Hallovo tipalo, regulator napetosti, Schmittov prožilnik in odprt krmilni sistem [20].

4.1.2 Shema elektronskega vezja

Na spletu najdemo več različnih primerov izdelave enosmernega brezkrtačnega elektromotorja. Po zgledu iz spleta [21] sestavimo shemo, kot je prikazana na Sliki 4.3. Za krmilnik sta nujno potrebna MOSFET in bipolarni Hallov senzor. Tuljavi sta nameščeni na ogrodju. Dodana dioda ni nujna, je pa priporočljiva. Svetleči diodi sta dodani bolj iz didaktičnega vidika, saj zelena sveti, ko skozi vezje teče tok. Tako vemo, da smo vklopili sistem. Rdeča je povezana tako, da se vklopi vsakič, ko se vklopi Hallov senzor. S pomočjo te rdeče diode tako vidimo vsak preklap med severnim in južnim polom magneta. Hitreje kot Hallovo stikalo preklaplja, hitreje dioda utripa. Bipolarni tranzistor smo uporabili za ojačanje signala, ki izhaja iz Hallovega stikala. V primeru, da smo uporabili visoko občutljivo stikalo, deluje vezje tudi brez ojačanega signala, torej brez dodanega tranzistorja.



Slika 4.3: Shema vezja za krmiljenje modela.

4.1.3 Ogradje modela

Pred izdelavo ogradja moramo vedeti, kakšne dimenzije imata obe tuljavi in katere magnete bomo uporabili. Tuljavo lahko na železno jedro navijemo sami ali uporabimo kupljeno. Mi smo uporabili tuljavo iz kompleta za elektrotehniko (Slika 4.4).



Slika 4.4: Izbrana tuljava ima 1600 zank in induktivnost 50mH.

Dimenzije magneta, ki ga bomo uporabili, so pomembne zaradi izdelave in centriranja osi med dve tuljavi. Os vrtenja mora biti postavljena na višino sredine tuljave in enakomerno oddaljena od obeh tuljav. Uporabili smo manjše neodimske magnete valjaste oblike s premerom 7 mm in višine 4 mm (Slika 4.5). Z jeklenimi palicami dolžine 55 mm in premerom

5 mm so pritrjeni na kroglični ležaj z notranjim premerom 10 mm in zunanjim premerom 23 mm (Slika 4.5). Delavniška in sestavna risba sta na priloženi zgoščenki v datoteki priloge/ogrodje pod Rotor_palcke.pdf in Rotor_sestav.pdf.



Slika 4.5: Primer izdelave rotorja z magneti.

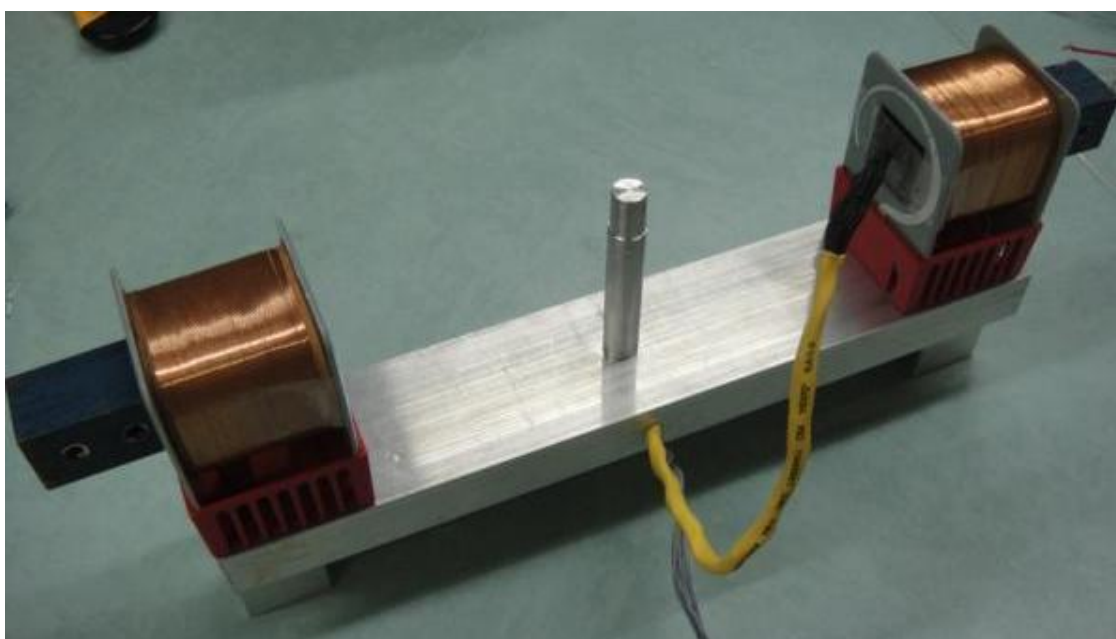
Ležaj skupaj z magneti pritrdimo na os, ki se nahaja v središču med obema tuljavama (Slika 4.6). Ko izmerimo dimenzije tuljave, lahko izračunamo dolžino osi, ki je v našem primeru 60 mm (priloge/ogrodje/Os.pdf). Pri izbiri debeline moramo upoštevati notranji premer izbranega ležaja. Pomembno je tudi, da ne izberemo feromagnetnega materiala, saj bi to lahko vplivalo na delovanje.



Slika 4.6: Ogrodje iz aluminija z izvrtinami za tuljave in Hallovo stikalo.

Ogrodje najlažje izdelamo iz aluminija. Seveda lahko izberemo tudi les ali plastiko. Izberemo material, ki nam je najbližji. Na Sliki 4.6 vidimo, da smo uporabili aluminijev U-profil širine 46 mm in dolžine 250 mm. Nanj smo izvrtali 6 lukenj; štiri premera 9 mm za pritrditev tuljav in dve premera 6 mm za pritrditev osi in Hallovega stikala (priloge/ogrodje/U_profil.pdf). Vse skupaj je postavljeno na noge, ki so izdelane iz manjšega aluminijevega U-profila širine 25 mm in dolžine 50 mm (priloge/ogrodje/Noga.pdf). Podrobnejši načrti za izdelavo posameznih elementov ogrodja so priloženi diplomskemu delu na zgoščenki v datoteki priloge/ogrodje.

Na Sliki 4.7 vidimo, kako je videti, ko povežemo vse elemente.



Slika 4.7: Postavitev obeh tuljav, Hallovega stikala in osi za ležaj.

4.2 SESTAVA VSEH ELEMENTOV IN DELOVANJE

Za optimalno delovanje moramo sistem napajati z enosmerno napetostjo $U = 12\text{ V}$. Za napajalnik lahko izberemo šolski malonapetostni izvor (ŠMI) ali pa odslužen napajalnik iz računalnika (Slika 4.8). Najpomembneje je, da pri izbiri napajalnika upoštevamo, da ima ta možnost izklopa in vklopa.

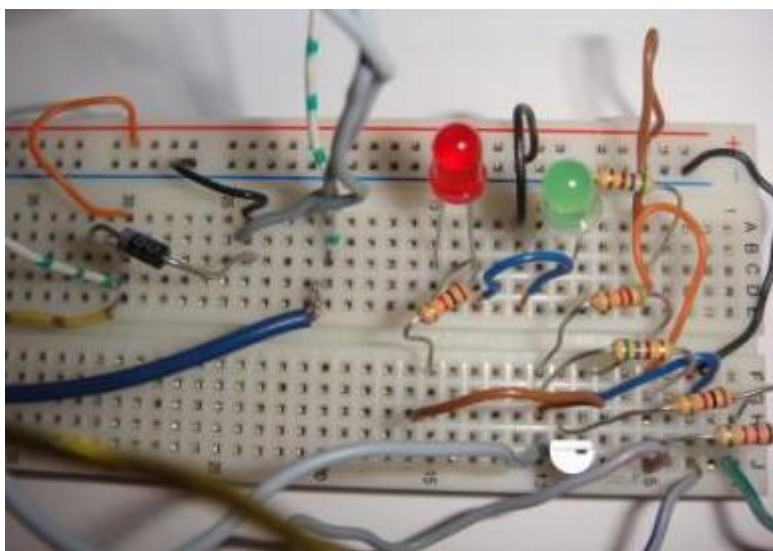


Slika 4.8: Napajalnik za računalnik je dober vir enosmerne napetosti in ima stikalo za vklop in izklop.

4.2.1 Sestava elementov

Ogrodje sestavimo po predlogi, ki je priložena na zgoščenki v podmapi priloge/ogrodje/Sestav.pdf. Os mora biti pritrjena trdno, da ne izgubljammo moči na račun premikov. Pozicija osi mora biti v središču zgornje ploskve ogrodja, pravokotno nanj in enakomerno oddaljena od obeh tuljav.

Elektronske elemente po shemi povežemo na protoboardu (Slika 4.9).



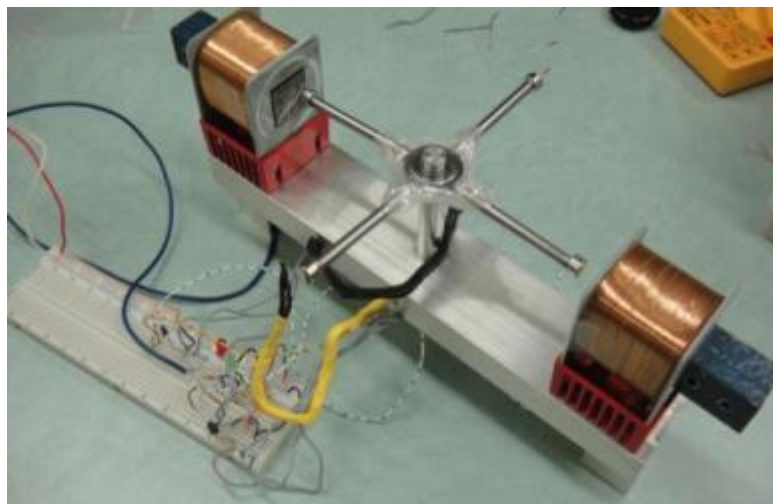
Slika 4.9: Elektronske elemente najlažje povežemo s pomočjo protoboarda.

Hallovo stikalo mora biti pritrjeno na ogrodju tako, da je čim bližje magnetom (Slika 4.10).



Slika 4.10: Hallovo stikalo naj bo kar se da blizu rotirajočim magnetom.

Slika 4.11 prikazuje model brezkrtačnega elektromotorja v celoti.

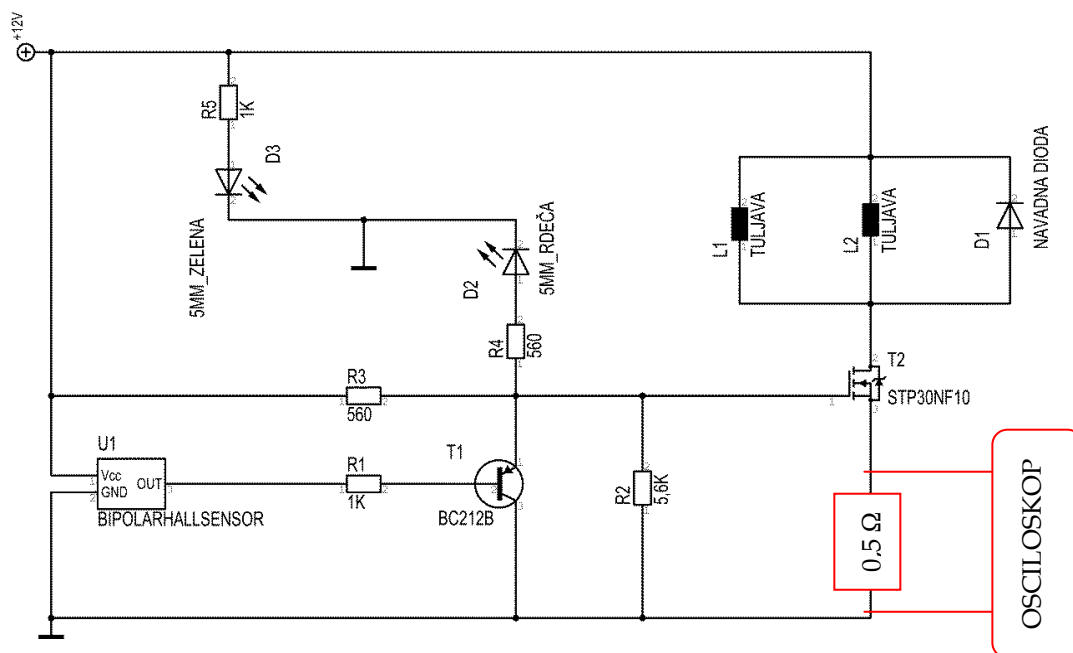


Slika 4.11: Model enosmernega brezkrtačnega elektromotorja.

4.2.2 Delovanje modela enosmernega brezkrtačnega elektromotorja

Na zgoščenki v podmapi priloge/video/BLDCM_delovanje.avi je priložen videoposnetek delovanja modela. Sistem moramo povezati z napajanjem in rotor malce spodbuditi, da se prične vrteti. Če pa smo Hallovo stikalo dobro namestili in imamo dovolj močne magnete, je velika verjetnost, da se bo po priklopu na napajanje rotor pričel vrteti sam od sebe in ne bo potreboval dodatnega zagona.

Elektromotor napajamo z VOLTcraft Plus PSP 1405 in nastavimo vhodno napetost (U) na 12 V. Elektromotor smo prav tako povezali z osciloskopom (Slika 4.12), da lahko opazujemo preklope med fazami. Hitreje kot se vrti, večja je frekvenca preklpov na osciloskopu. Osciloskop priklopimo tako, da dodamo upornik vrednosti $0,5\ \Omega$ ter pred in za njim povežemo na fazo in ničlo (Slika 4.12).



Slika 4.12: Osciloskop vezemo na sistem prek polomskega upornika.

Na osciloskopu smo pozorni frekvenco preklapljanja. Ta je večja, čim bolj se Hallovo stikalo približa središču. Na Sliki 4.13 vidimo na desni, da je Hallovo stikalo odmaknjeno od sredine, in na levi, ko je pozicioniran na sredini med magneti. Na Sliki 4.13 vidimo tudi, kako se spremeni frekvenca vrtenja.



Slika 4.13: Opazujemo Hallovo stikalo (rumeno-črno na dnu slike). Desna slika ima manjšo frekvenco in je Hallovo stikalo odmaknjeno od sredine. Leva slika ima večjo frekvenco in je Hallovo stikalo na sredini.

4.2.3 Testiranje modela enosmerne brezkrtačnega elektromotorja

Na priloženem videoposnetku na zgoščenki pod priloge/video/BLDCM_test.avi vidimo, kako elektromotor deluje v prostem teku in ko je obremenjen. Motor smo obremenili ročno in s koščkom lesa.

Elektromotor napajamo z VOLTcraft Plus PSP 1405 in povežemo na osciloskop, kjer opazujemo spremembo toka, ko motor obremenimo. Skozi sistem nam teče stalna napetost, ki je enaka vhodni $U = 12\text{ V}$. Predvidevamo, da bi se po obremenitvi morala povečati tok (I) in s tem tudi moč motorja (P).

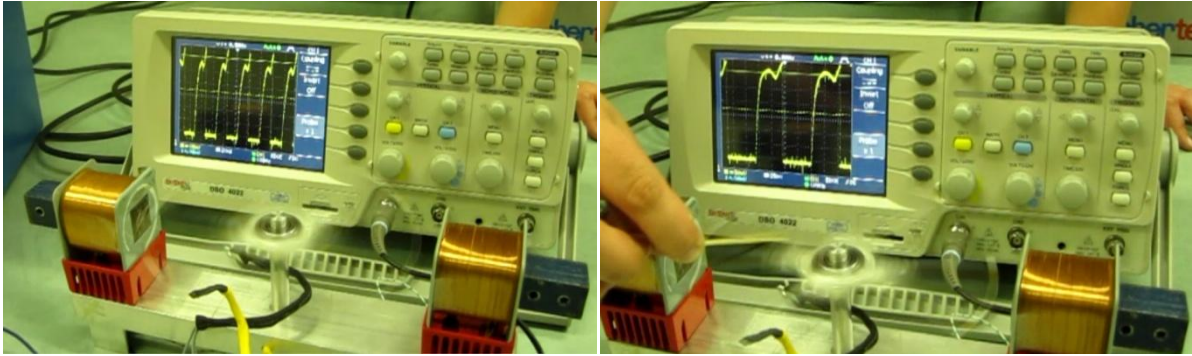
Ker imamo enosmerni električni tok (I), lahko moč motorja (P) izračunamo po enačbi 4.1:

$$P = U \cdot I, \quad (4.1),$$

kjer za napetost U vzamemo vhodno napetost 12 V in tok I izmerimo.

V prostem teku izmerimo tok $I_1 = 320\text{ mA}$, kar pomeni, da je moč motorja glede na enačbo 4.1 takrat $P_1 = 3,84\text{ W}$.

Po tem, ko motor obremenimo z leseno paličico, vrednosti toka narastejo na povprečje $I_2 = 350\text{ mA}$, kar pomeni, da se je moč motorja glede na enačbo 4.1 povečala na $P_2 = 4,2\text{ W}$. Na Sliki 4.14 vidimo razliko med obremenjenim in prostim tekom motorja.



Slika 4.14: Desno vidimo sliko na osciloskopu v prostem teku in levo, ko je motor obremenjen.

Model enosmernega brezkrtačnega elektromotorja deluje kot pravi motor, kar pomeni, da se pri obremenitvi poveča tok in s tem tudi moč motorja. Upoštevati je treba, da je model motorja namenjen le didaktičnemu prikazu delovanja elektromotorja brez ščetk in ne za večje obremenitve.

5 BREZKRTAČNI ELEKTROMOTOR V UČNEM NAČRTU

Enosmerni motor brez ščetk predstavlja močno konkurenco enosmernemu motorju s ščetkami na vseh področjih uporabe. Zamenja lahko najmanjše modelarske motorje, pogonske sisteme v industriji in medicini, v različnih električnih vozilih in robotiki.

5.1 UČNI NAČRTI V OSNOVNI ŠOLI

Že v osnovni šoli se učenec sreča z elektromotorji pri več predmetih. Pri Tehniki in tehnologiji v sedmem razredu pri spoznavanju električnega kroga, prenosa, pogona in krmiljenja ter v osmem razredu pri energetiki [22]. Pri izbirnem predmetu Robotika v tehniki se učenci srečujejo z motorji skozi celoten program krmiljenja [23]. Najbolj se samemu elektromotorju posvetijo pri izbirnem predmetu Elektrotehnika, kjer se poglobijo v delovanje elektromotorja [24]. Prav tako se lahko z omenjenimi motorji 'poigramo' pri izbirnem predmetu Elektronika z robotiko, kjer pri delovnih nalogah uporabimo različne sestavne elemente [25].

5.1.1 Tehnika in tehnologija

V sedmem razredu se učenci spoznajo z enosmernimi motorji, jih krmilijo in opazujejo, kako se z zamenjavo priključkov zamenja tudi smer vrtenja. Enako opazimo tudi pri enosmernih brezkrtačnih elektromotorjih. Pri zamenjavi faz na eno- ali dvofaznem elektromotorju se ta vrti v drugo smer, pri trifaznem elektromotorju pa zamenjamo prvo in zadnjo fazo. Z elektromotorji učenci spoznajo tudi vlogo stikal in računalniško krmiljene naprave. Trifazni brezkrtačni elektromotor je idealen za predstavitev logičnih stikal, saj brez njih ne deluje. Deluje le s pravilno napisanim zaporedjem.

V sedmem razredu je nekaj ur namenjenih prometni vzgoji, kjer se učenci spoznajo z opremo in električnim krogom na kolesu. Klasično kolo v zadnjem desetletju vse bolj zamenjuje električno kolo, saj je nizek porabnik energije in ne onesnažuje okolja z izpušnimi plini, kot na primer motorno kolo. Vsa električna kolesa poganja enosmerni brezkrtačni elektromotor, zato je kratka predstavitev tega neizbežna. Učenci se spoznajo s sodobno tehnologijo in se hkrati učijo o ekološkem in praktičnem električnem kolesu [22].

5.1.2 Izbirni predmeti v osnovni šoli

Pri učnem načrtu izbirnega predmeta Robotika v tehniki pri krmiljenju strojev in naprav uvedemo razne elektronsko vodene motorje. Tu predstavimo enosmerne brezkrtačne elektromotorje in podamo primere uporabe. Najdemo jih v raznih napravah in robotih, kjer so uporabljeni brezkrtačni servomotorji. Pri krmiljenju trifaznega brezkrtačnega motorja ugotovijo potrebo po računalniški regulaciji, saj elektromotor ne deluje brez zagotovitve nekakšne elektronske komutacije. Prav tako jih lahko vodimo prek raznih tipal, kot so svetlobni signali, Hallove sonde ali druge vrste tahografi [23].

Izbirni predmet Elektrotehnika se časovno najbolj posveti elektromotorjem. Predstavimo vrste elektromotorjev in razstavimo motor. Brezkrtačni elektromotor ima razen krtačk enake dele kot krtačni elektromotor. Tu se lahko odločimo za predstavitev brezkrtačnega elektromotorja in le omenimo krtačnega. Učenci spoznajo trajne magnetne, ki se nahajajo na rotorju, in podrobneje pogledajo navitje tuljave na statorju. Ugotovijo vpliv železnega jedra na statorju in jakost elektromagneta ter spoznajo, da je osnova za delovanje elektromotorjev magnetna sila. Enosmerni brezkrtačni elektromotor lahko deluje tudi kot generator, saj se na njem pojavlja inducirana napetost. Učenci tako lahko izvedejo razne poskuse s tuljavo na elektromotorju in spoznavajo elektromagnetne zakonitosti [24].

Učni načrt predmeta Elektronika z robotiko ima podobno kot izbirni predmet Elektrotehnika več časa namenjenega raziskovanju zakonitosti delovanja motorja. Učenci spoznajo motor, razstavljenega na sestavne dele in kot celoto. Pri tem predmetu se lahko bolj posvetijo krmilniku elektromotorja, saj ta vsebuje polno elektronskih elementov, ki imajo vsak svojo vlogo. Posamičen elektronski element jim predstavimo in preizkusimo njegovo delovanje ali učinke ter nato postopoma povežemo v krmilnik [25].

5.2 UČNI NAČRT V SREDNJIH ŠOLAH

Pri srednjih šolah se osredotočimo na poklicno-tehnično izobraževanje. Najprej za poklic elektrotehnik elektronik, kjer se z motorji podrobneje spoznajo pri predmetih Avtomatika, Elektrotehnika, vezja in naprave, Meritve in regulacije in Praktičnem pouku [26]. Pri poklicu elektrotehnik energetik se z motorji spoznavajo pri predmetih Električni stroji, Meritve in avtomatizacija, Osnove elektrotehnike in pri praktičnem pouku [27]. Pri poklicu strojni

tehnik se elektromotorjem posvetijo pri predmetu Merilna tehnika, povsod drugje pa je več govora o motorjih z notranjim izgorevanjem [28].

5.2.1 Poklicno-tehnično izobraževanje elektrotehnik elektronik

Izbirni predmet Avtomatika

Izbirni predmet Avtomatika je predviden v prvem in drugem letniku. V prvem letniku pri izbirnem predmetu Avtomatika dijaki postopoma spoznajo krmiljene tehnike, senzorski del krmilja in izvršni člen (na primer motor). Spoznajo delovanje elektronskih vezij, elemente in tehnologije različnih procesov avtomatizacije. Veliko vlogo pri avtomatizaciji imajo razni motorji, med njimi brezkrtačni elektromotor. Dijaki bi krmilno tehniko spoznali s krmiljenjem eno-, dvo- in trifaznega brezkrtačnega elektromotorja s pomočjo elektronskega vezja in računalnika. Tako spoznajo različnosti krmiljenj, lastnosti in način uporabe elektronskih senzorjev za zaznavanje fizikalnih veličin, naučijo se povezati krmilni del z izvršnimi členi različnih izvedb in priklopiti ter vključevati motorje in elektromagnete [26].

Elektrotehnika, vezja in naprave

Izbirni predmet Elektrotehnika, vezja in naprave je predviden v prvem in drugem letniku. Dijaki pri tem predmetu spoznajo in razumejo osnovne zakone elektrotehnike za praktične aplikacije v enosmernih tokokrogih, kot je brezkrtačni elektromotor. Spoznajo zakonitosti tokovnega, električnega in magnetnega polja, spoznavajo vlogo materialov ter fizikalnih lastnosti za dogajanje v tokovnem, električnem in magnetnem polju.

V prvem letniku se dijaki postopoma spoznajo z električnim krogom in znajo izračunati veličine v sestavljenih električnih krogih. Učijo se o električnem delu in moči, o električnem in magnetnem polju, kjer ponovijo osnovne pojme, veličine električnega polja in magnetnega kroga, spoznajo razliko med magnetnimi materiali in znajo razložiti tuljavo kot energijski akumulator ter odvisnost nakopičene energije v tuljavi. Z brezkrtačnim motorjem se lahko bolj podrobno srečajo pri trifaznih sistemih, kjer spoznajo vezavo tega sistema v povezavi z vrsto obremenitve in osnovni princip delovanja trifaznega motorja ter generatorja [26].

Meritve in regulacije

Predmet Meritve in regulacije je predviden v tretjem in četrtem letniku. Dijaki pri tem predmetu utrdijo in razširijo znanje o osnovnih merilnih metodah merjenja električnih in

neelektričnih veličin in se usposobijo za pravilno ter optimalno izbiro merilnih instrumentov in sistemov, metod in postopkov za merjenje na področju elektronike, avtomatike, digitalnih, krmilnih in regulacijskih sistemov.

Z brezkrtačnim elektromotorjem se podrobneje spoznajo v četrtem letniku pri izvršilnih sistemih, kjer spoznajo principe delovanja in uporabe izvršilnih členov, spoznajo pogone izvršilnih členov (na primer enosmerne elektromotorje), krmiljenje zagonov enosmernih motorjev in varčevanje z energijo [26].

Praktični pouk

V srednjih poklicno-tehničnih šolah je praktični pouk za dijake nujen, saj se tu osvajajo znanja, ki tesno povezujejo teorijo in prakso ter razširijo znanje in spretnosti. Dijaki se naučijo iskati, urejati, razumeti in kritično ovrednotiti informacije z uporabo razpoložljive tehnologije, spoznajo in znajo opredeliti ter uporabiti materiale, elemente in instrumente, ki se uporabljajo v elektrotehniki, povezujejo teoretična znanja o električnih in elektronskih komponentah ter vezjih in realno sklepajo o delovanju praktične aplikacije.

Pri krmilju je način spoznavanja brezkrtačnega elektromotorja v obliki projektne naloge, kjer dijaki izdelajo krmilno vezje za krmiljenje elektromotorja s polprevodniškimi krmilnimi elementi in po predlogi realizirajo osnovno krmilno vezje s stikali, diodami in tranzistorji ter znajo razložiti delovanje in ugotoviti ter odpraviti manj zahtevne napake. Pri senzorjih in merilnih pretvornikih spoznajo elektronske elemente in principe delovanja ter odvisnost fizikalnih veličin, spoznajo uporabo prilagojenih elementov za zaznavanje vpliva fizikalnih veličin in za izvedbo merilnega pretvornika [26].

5.2.2 Poklicno-tehnično izobraževanje elektrotehnik energetik

Električni stroji

Predmet Električni stroji obsega prvi in drugi letnik srednje šole. Dijaki pri tem predmetu spoznajo logične in vzročne povezave med fizikalnimi veličinami in konstrukcijskimi izvedbami, usposobijo se za opravljanje osnovnih meritev in preizkusov na električnih strojih, razumejo pomen nazivnih podatkov električnih strojev in se naučijo uporabljati električni motor za pogon različnih bremen.

V drugem letniku dijaki pri učenju elektromotorskega pogona spoznajo različna obratovalna stanja elektromotorjev, znajo priključiti stroj in ga ustrezno zaščititi pred kratkim stikom in preobremenitvijo, analizirajo vpliv bremena na delovanje motorja, spoznajo, kako razbrati nazivne podatke električnih motorjev in mehanskih bremen, in znajo izbrati ustrezen električni motor za pogon danega mehanskega bremena. Dijaki se v obliki seminarskih nalog ali v obliki projektov učijo o elektromotorjih, med katere spada tudi brezkrtačni elektromotor [27].

Meritve in avtomatizacija

Predmet Meritev in avtomatizacija je razdeljen na dva letnika. Pri tem predmetu dijaki utrdijo in razširijo znanje o osnovnih merilnih metodah merjenja električnih in neelektričnih veličin, se usposobijo za pravilno in optimalno izbiro merilnih instrumentov in sistemov, metod in postopkov za merjenje na področju elektronike, avtomatike, digitalnih, krmilnih in regulacijskih sistemov ter se seznanijo z nastavljanjem in optimizacijo parametrov regulacijskih sistemov.

V drugem letniku se pri izvršilnih sistemih učijo o enosmernih elektromotorjih in spoznajo krmiljenje zagonov enosmerne motorja. Tu je izbira brezkrtačnega elektromotorja dobra izbira, saj spoznajo značilnosti krmilnega medija in principe delovanja ter uporabe. Pri vajah z motorjem se navadijo prenašati znanje iz teorije v prakso [27].

Osnove elektrotehnike

Predmet Osnove elektrotehnike obsega le en letnik in tu dijaki spoznajo osnovne zakone elektrotehnike za praktične aplikacije v enosmernih tokokrogih, zakonitosti tokovnega, električnega in magnetnega polja, vlogo materialov in fizikalne lastnosti, razumejo, kako uporabiti osnovne fizikalne zakone pri uporabi električnih instrumentov, strojev in naprav, in povezujejo nova teoretična znanja z osebnimi izkušnjami.

Dijaki se tu o brezkrtačnem elektromotorju učijo bolj posredno prek zakonitosti indukcije tuljave, magnetnega polja, magnetilne karakteristike in električnega polja. Pri govoru o vsakem izmed teh tem lahko brezkrtačni elektromotor povežemo s primerom in na primeru pojasnimo zakonitost. Bolj neposredno se o brezkrtačnem motorju lahko pogovarjajo pri trifaznih sistemih, kjer spoznajo osnovni princip delovanja trifaznega motorja in generatorja [27].

5.2.1 Poklicno-tehnično izobraževanje strojni tehnik

Merilna tehnika

Predmet merilna tehnika obsega le en letnik in nastopi v prvem ali drugem letniku izobraževanja. Dijaki pri tem predmetu spoznajo osnovne principe delovanja merilnih naprav, strojev in sistemov, skladno s tehnološkim razvojem, samostojno izvajajo meritve ter vrednotijo rezultate meritev in izračunov, ustvarjalno povezujejo različna teoretična znanja med seboj in s prakso za reševanje problemov na različnih področjih tehnike in uporabljajo strokovno literaturo ter elektronske medije za pridobivanje novih znanj.

Z električnimi motorji se dijaki srečajo, ko preizkušajo pogonske in delovne stroje, takrat spoznajo pretvorbo posameznih merilnih veličin in različne merilne metode. Brezkrtačni elektromotor lahko nadomesti navadnega krtačnega pri meritvah [28].

6 ZAKLJUČKI

Prednosti enosmernih brezkrtačnih elektromotorjev pred krtačnimi elektromotorji so številne, od manjše mase do stabilnejšega delovanja in cenejše izdelave. Učni načrti za osnovne šole ne omenjajo brezkrtačnih elektromotorjev pri nobenem izmed tehničnih predmetov. Učni načrti za srednje šole predvidevajo poznavanje sodobnejše tehnologije, a je od profesorjev odvisno, ali pri svojem predmetu podajajo snov o brezkrtačnem elektromotorju.

V diplomskem delu je podano veliko teoretičnih osnov o električnih motorjih, kot tudi o samem brezkrtačnem elektromotorju. Podani so primeri krmiljenja dvo- in trifaznega brezkrtačnega elektromotorja. Primeri krmiljenja so primerni za uporabo v osnovnih šolah pri izbirnih predmetih Robotika v tehniki, Elektrotehnika in Elektronika z robotiko. Učencem tako prek načinov krmiljenja približamo brezkrtačni elektromotor.

Model enofaznega brezkrtačnega elektromotorja lahko izdelamo po priloženi tehnični dokumentaciji. Model je možno nadgraditi še z eno fazo in ojačati ohišje. Kot možnost nadaljnjega dela bi bila izpopolnitev modela taka, da bi z motorjem fizično premikali breme in ga dejansko uporabili kot motor za poganjanje.

7 VIRI IN LITERATURA:

- [1] Jezernik, K., 2005. *Razdelitev in primerjava različnih tipov električnih motorjev*. [online]. [Datum zadnjega popravljanja 7. 11. 2002], [citirano dne 15. 6. 2012]. Dostopno na spletnem naslovu: <<http://www.ro.feri.uni-mb.si/predmeti/servosi/gradivo/motorji.pdf>>
- [2] Anderson, E. in Miler, R. 1991. *Electric motors*. 5th edition. New York: Macmillan Publishing Company.
- [3] Toliyat, H. A. in Kliman G. B. 2004. *Handbook of electric motors*. 2nd edition. New York: Marcel Dekker Inc.
- [4] Fisher, R. et al. 2011. *Motorno vozilo*. 29. prenovljena izdaja. Ljubljana: Tehniška založba Slovenije.
- [5] Miljavec, D. in Jereb, P. 2005. *Električni stroji, temeljna znanja*. 1. izdaja. Ljubljana: samozaložba.
- [6] Moreton, P. 2000. *Industrial Brushless Servomotors*. 1st edition. London: Reed Educational and Professional Publishing Ltd.
- [7] Gieras, J. F. in Wing, M. 2002. *Permanent Magnet Motor Technology, Design and Applications*. 2nd edition, Revised and Expanded. New York: Marcel Dekker Inc.
- [8] Emadi, A. 2005. *Energy-Efficient Electric Motors*. 3rd edition, Revised and Expanded. New York: Marcel Dekker Inc.
- [9] Zajec, P. 2006. *Merilniki gostote magnetnega polja na osnovi Lorentzove sile, zapiski s predavanj*. [online]. [Datum zadnjega popravljanja 2. 3. 2006], [citirano dne 6. 11. 2012]. Dostopno na spletnem naslovu: <http://lrt2.fe.uni-lj.si/lrtme/meri_pret/PREDAVANJE_2_Lorentz2.pdf>
- [10] Gamazo-Real, J.C. et al. 2010. *Position and Speed Control of Brushless DC Motors Using Sensorless Techniques and Application Trends*. [online]. [Datum zadnjega popravljanja 19. 7. 2010], [citirano dne 6. 11. 2012]. Dostopno na spletnem naslovu: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/10/7/6901/pdf>>

- [11] ATMEL. 2005. *AVR440: Sensorless Control of Two-Phase Brushless DC Motor*. [online]. [Datum zadnjega popravljajanja 5. 9. 2005], [citirano dne 17. 11. 2012]. Dostopno na spletnem naslovu: < <http://www.gaw.ru/pdf/Atmel/app/avr/AVR440.pdf> >
- [12] Zagradišnik, I. in Slemnik, B. 2001. *Električni rotacijski stroji*. 1. izdaja. Maribor: FER Maribor.
- [13] ATMEL. 2010. *AVR1607: Brushless DC motor (BLDC) Control in Sensor mode using Atxmega128A1 and ATAVRMC323*. [online]. [Datum zadnjega popravljajanja 10. 7. 2010], [citirano dne 19. 11. 2012]. Dostopno na spletnem naslovu: <<http://www.atmel.com/Images/doc8311.pdf>>
- [14] ComLab. 2004. *Robotika v tehniki*. [online]. [Datum zadnjega popravljajanja 10. 10. 2004], [citirano dne 27. 2. 2013]. Dostopno na spletnem naslovu:< <http://www.pef.uni-lj.si/narteh/robteh/robotics.html> >
- [15] Vučko Lidija. 2009. *Hodeči roboti, diplomsko delo*. [online]. [Datum zadnjega popravljajanja avgust 2009], [citirano dne 4. 3. 2013]. Dostopno na spletnem naslovu: <http://www.pef.uni-lj.si/slavkok/diplome/vucko_l/diplomaLidijaVucko.pdf >
- [16] Giorgos Lazaridis. 2010. *How PC fans Work*. [online]. [Datum zadnjega popravljajanja avgust 2009], [citirano dne 27. 2. 2013]. Dostopno na spletnem naslovu: <http://www.pcbheaven.com/wikipages/How_PC_Fans_Work/>
- [17] YouTube : luvocean. 2012. *Brushless DC Motor (BLDC) - How to Part 1*. [online]. [Datum zadnjega popravljajanja 12. 2. 2012], [citirano dne 5. 3. 2013]. Dostopno na spletnem naslovu: < [http://www.youtube.com/watch?v=4XXB_7k\]wbl](http://www.youtube.com/watch?v=4XXB_7k]wbl) >
- [18] YouTube : luvocean1. 2012. *Brushless DC Motor (BLDC) - How to Part 2*. [online]. [Datum zadnjega popravljajanja 13. 2. 2012], [citirano dne 5. 3. 2013]. Dostopno na spletnem naslovu: < <http://www.youtube.com/watch?v=iBd52-LqRe4> >
- [19] Kocijančič, S. 2010. *Elektronika 1, študijsko gradivo za študente Pedagoške fakultete v Ljubljani*. [online]. [Datum zadnjega popravljajanja neznan], [citirano dne 8. 3. 2013]. Dostopno na spletnem naslovu: <http://www.pef.uni-lj.si/slavkok/studgrad/Elektronika1_2010.pdf >

- [20] Melexis: Microelectronic Integrated Systems. 2006. *US1881 Hall Latch – High Sensitivity*. [online]. [Datum zadnjega popraviljanja januar 2006], [citirano dne 12. 4. 2013]. Dostopno na spletnem naslovu: <<https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/General/Hall-US1881EUA.pdf>>
- [21] YouTube: Jon Proce. 2013. *DC Brushless Motor Project*. [online]. [Datum zadnjega popraviljanja 27. 3. 2013], [citirano dne 12. 4. 2013]. Dostopno na spletnem naslovu: <<http://www.youtube.com/watch?v=Kudzft19coo>>
- [22] Papotnik, A. et al. 2002. *Učni načrt – Tehnika in tehnologija*. Ljubljana: Ministrstvo za šolstvo, znanost in šport, Zavod RS za šolstvo.
- [23] Kocijančič, S. et al. 2002. *Učni načrt – Robotika v tehniki*. Ljubljana: Ministrstvo za šolstvo, znanost in šport, Zavod RS za šolstvo.
- [24] Kocijančič, S. et al. 2005. *Učni načrt – Elektrotehnika*. Ljubljana: Ministrstvo za šolstvo, znanost in šport, Zavod RS za šolstvo.
- [25] Pahor, J. et al. 2005. *Učni načrt – Elektronika z robotiko*. Ljubljana: Ministrstvo za šolstvo, znanost in šport, Zavod RS za šolstvo.
- [26] Slanc, A. et al. 2005. *Katalog znanja – Poklicno-tehniško izobraževanje, Izobraževalni program: elektrotehnik elektronik*. [online]. [Datum zadnjega popraviljanja neznan], [citirano dne 18. 4. 2013]. Dostopno na spletnem naslovu: <http://portal.mss.edus.si/msswww/programi2005/programi/Pti/elektroteh_elektr/elektroteh_elektr.htm>
- [27] Slanc, A. et al. 2005. *Katalog znanja – Poklicno-tehniško izobraževanje, Izobraževalni program: elektrotehnik energetik*. [online]. [Datum zadnjega popraviljanja neznan], [citirano dne 18. 4. 2013]. Dostopno na spletnem naslovu: <http://portal.mss.edus.si/msswww/programi2005/programi/Pti/elektroteh_energ/elektroteh_energ.htm>
- [28] Slanc, A. et al. 2005. *Katalog znanja – Poklicno-tehniško izobraževanje, Izobraževalni program: strojni tehnik*. [online]. [Datum zadnjega popraviljanja neznan], [citirano dne 18. 4. 2013].

Dostopno na spletnem naslovu:

<http://portal.mss.edus.si/msswww/programi2005/programi/Pti/strojni_teh/strojni_teh.htm>

8 PRILOGE (NA ZGOŠČENKI)

Videoposnetki:

- ventilator_vrtenje_pwm.avi,
- SBLDCM_delovanje.avi,
- BLDCM_delovanje.avi,
- BLDCM_test.avi.

Programi Bascom:

- vrtenje.bas,
- pwm_vrtenje.bas,
- ele_komutacija.bas.

Tehnična dokumentacija:

- U-profil.pdf,
- Noga.pdf,
- Os.pdf,
- Sestav.pdf,
- Rotor_palcka.pdf,
- Sestav_rotor.pdf.

