

VSEBINA

1. RAZDELITEV IN PRIMERJAVA TIPOV ELEKTRIČNIH MOTORJEV	2
1.1. RAZDELITEV ELEKTRIČNIH MOTORJEV	2
1.2. OPISI MOTORJEV	3
1.2.1. Enosmerni motor s ščetkami	4
1.2.2. Asinhronski motor	5
1.2.3. Sinhronski motor s permanentnimi magneti	7
1.2.4. Enosmerni motor brez ščetk	8
1.2.5. Reluktančni motor	9
1.3. PRIMERJAVA ELEKTRIČNIH MOTORJEV	11
1.3.1. Študija EMPACT 1998 [5]	11
1.3.2. Primerjava pogonskih sistemov (Gloor Engineering) [6]	14
1.3.3. Primerjava podjetja HILTech Development Ltd. [7]	17
2. OPIS DELOVANJA ENOSMERNEGA MOTORJA BREZ ŠČETK	19
2.1. OPIS ENOSMERNEGA MOTORJA BREZ ŠČETK	19
2.1.1. Uporabljeni magnetni materiali	22
2.1.2. Hallove sonde	23
2.2. PREPROSTI POSTOPKI VODENJA ENOSMERNEGA MOTORJA BREZ ŠČETK	25
2.2.1. Ventilator v osebni računalniku	25
2.2.2. Preprosto vodenje trifaznega enosmerne motorja brez ščetk	28
2.3. KOMPLEKSNEJŠI POSTOPKI VODENJA ENOSMERNEGA MOTORJA BREZ ŠČETK	29
2.3.1. Primer aplikacije vodenja BLDC	33
2.3.2. Primer aplikacije vodenja BLAC	34
2.3.3. Analiza aplikacij BLAC in BLDC	34
2.4. VODENJE ENOSMERNEGA MOTORJA BREZ ŠČETK BREZ SENZORJA POLOŽAJA	34
3. LITERATURA	36

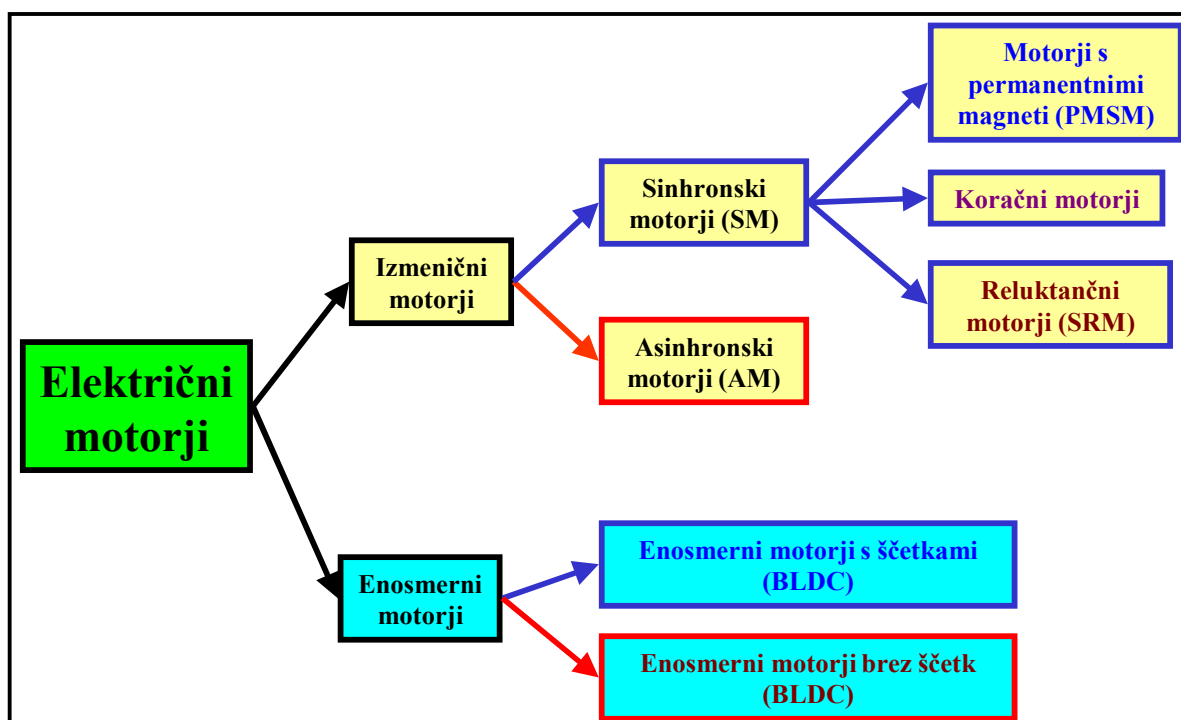
1. RAZDELITEV IN PRIMERJAVA TIPOV ELEKTRIČNIH MOTORJEV

1.1. Razdelitev električnih motorjev

Električne motorje lahko v splošnem delimo na več načinov. Osnovna razdelitev (Slika 1) je razdelitev na:

- enosmerne motorje in
- izmenične motorje.

Ta razdelitev je najbolj splošna in jo avtorji v strokovni literaturi tudi najpogosteje podajajo. Podaja razdelitev glede na napajalno napetost, ki jo priključimo na sponke električnega motorja. Enosmerne motorje naprej delimo na enosmerne motorje s in brez ščetk, izmenične pa na asinhronske in sinhronske motorje, ki jih delimo na motorje s permanentnimi magneti, koračne motorje in reluktančne motorje.



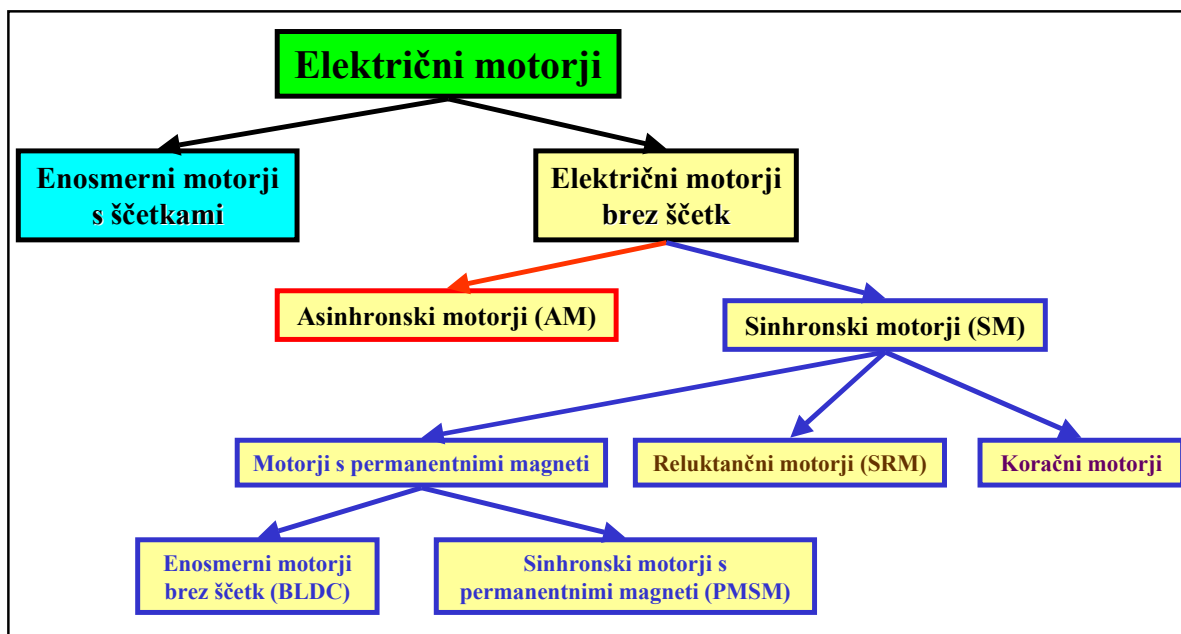
Slika 1: Razdelitev električnih motorjev glede napajalno napetost

Druga razdelitev (Slika 2) deli motorje glede na strukturo. V osnovi imamo tako motorje s ščerkami in motorje brez ščetk. Motorji s ščerkami so enosmerni motorji, motorji brez ščetk pa se naprej delijo na asinhronske in sinhronske motorje, ki se naprej delijo na motorje s permanentnimi magneti, koračne motorje in reluktančne motorje. Motorje s permanentnimi magneti delimo na enosmerne motorje brez ščetk in sinhronske motorje s permanentnimi magneti.

Ta razdelitev se bolj kot na samo napajalno napetost nanaša na zasnovo motorja, upošteva pa tudi uporabljene materiale in princip vodenja.

Seveda poleg teh dveh obstajajo tudi druge delitve, ki pa jih ne bomo navajali.

Kot je razvidno iz podanih primerov, je mogoče nek tip motorja postaviti v dve precej različni družini, kar se v podanih primerih zgodi z enosmernim motorjem brez ščetk. Le-ta je namreč v osnovi enak sinhronskemu motorju s permanentnimi magneti, razlikujeta se le v obliki magnetnega polja in postopku vodenja. Podrobnosti bodo navedene ob opisu posameznih motorjev.



Slika 2: Razdelitev električnih motorjev glede na zgradbo

1.2. Opisi motorjev

Opis motorjev bo zajemal naslednje podatke:

- opis delovanja,
- dobre in slabe lastnosti motorja ter
- področja uporabe.

Pri samem opisu delovanja se ne bomo spuščali v podrobnosti, motor bo opisan le do te mere, da bo princip delovanja omogočal njegovo nadaljnjo obravnavo in bo v oporo pri izbiri motorja za neko aplikacijo. Podana predstavitev bo vključevala osnovni princip delovanja, ki mu bo zaradi lažjega razumevanja dodana računalniška animacija. Za podrobnejše informacije je podana ustrezna kvalitetna literatura, ki bralcu omogoči zelo natančno fizikalno spoznavanje sistema vključno z matematičnimi in fizikalnimi modeli.

K opisu sodijo tudi predstavitve dobrih in slabih lastnosti posameznih tipov motorjev, na podlagi katerih je mogoče soditi o njihovi uporabnosti in ceni. Predstavljajo tudi temelj ocene posameznega motorja v določeni aplikaciji.

V podanih področjih uporabe prav gotovo niso zajete vse aplikacije posameznega tipa motorja, saj se področja uporabe spreminjajo v odvisnosti od nižanja cen materialov in elektronskih komponent, ki jih uporabljamo v sistemu za vodenje. Tako se npr. cene procesorjev vztrajno nižajo, zmogljivost pa je vse večja. Tudi sama cena polprevodnikov vztrajno pada. Tako je v prihodnosti mogoče pričakovati znižanje cen pretvornikov in s tem tudi povečanje števila vodenih izmeničnih motorjev, kar se dejansko dogaja že nekaj let. Prav gotovo bodo izmenični motorji prevladali v aplikacijah, kjer je pomemben izkoristek. Podobno sliko imamo pri magnetnih materialih, katerih cena se niža, kar omogoča izdelavo vedno cenejših motorjev s permanentnimi magneti.

Kakor področja uporabe so tudi lastnosti motorjev podane za trenutno stanje, ki pa se lahko v prihodnosti spremeni. Tako bo znižana cena elektronskih komponent pomembno vplivala na gospodarnost uvajanja vodenih izmeničnih pogonov, poostriale pa se bodo tudi z elektromagnetnimi motnjami povezane zahteve. Tudi v tem primeru bo šel razvoj po vsej verjetnosti v korist izmeničnih motorjev.

1.2.1. Enosmerni motor s ščetkami

Enosmerni motorji s ščetkami ali enosmerni motorji z mehansko komutacijo so še vedno najpogostejše uporabljani motorji v pogonih s spremenljivo hitrostjo. Razlog za to je v prvi vrsti preprost opis dinamičnega modela motorja in s tem povezan sorazmerno enostaven in cenen sistem vodenja. Mehanski komutator dejansko predstavlja preprost razsmernik (dc-ac pretvornik), ki omogoča izmenične tokove v rotorju, medtem ko je tok pretvornika enosmeren. S tem se ustvarja izmenično vrtilno polje, ki omogoča vrtenje rotorja.

V standardnih izvedbah je stator mirujoč zunanji del motorja, rotor pa je notranji del, ki se vrti. Obstajajo tudi izvedbe, kjer je stator notranji, rotor pa zunanji vrteči se del.

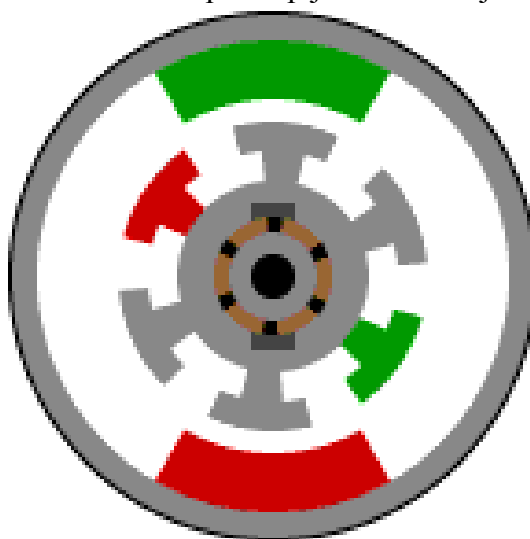
Osnovno sliko kaže Slika 3. Rdeča barva predstavlja severni, zelena pa južni magnetni pol navitja. Kot je splošno znano, se nasprotna pola privlačita, enaka pa odbijata.

Sator je sestavljen iz dveh ali več polov magneta, ki je lahko elektromagnet ali permanentni magnet. V splošnem je vzbujanje pogostejše izvedeno z elektromagneti, ki jih predstavljajo navitja v statorju. Obstajajo različne izvedbe vzbujanja:

- Tuje vzbujanje - vzbuhalno navitje je neposredno priključeno na zunanji vir napetosti in je neodvisno od dogajanja v motorju.
- Vzporedno (paralelno) vzbujanje - vzbuhalno navitje je vezano paralelno k rotorskemu tokrogu.
- Zaporedno (serijsko) vzbujanje - vzbuhalno navitje je vezano zaporedno z rotorskim tokrogom.
- Sestavljeno (kompakudno) vzbujanje - kombinacija serijskega in paralelnega vzbujanja glede na rotorski tokokrog.

Rotor predstavljajo navitja, ki so priključena na mehanski komutator. V računalniški animaciji prikazani rotor ima tri polove pare.

Nasprotna pola se privlačita in rotor se vrti, dokler se ne poravnata. Ravno v tem položaju pa se ščetke pomaknejo na naslednji kontakt kolektorja in tok steče skozi navitja naslednjega pola rotorja. V animaciji so kontakti komutatorja rjavi, ščetke pa so temno sive barve. Rumene iskre označijo čas in položaj v katerem se ščetke preklapijo na naslednje navitje.



Slika 3: Prikaz enosmerne motorja s ščetkami

Za opis motorja je nujno podati nekatere osnovne dobre in slabe lastnosti, ki bodo našteje v nadaljevanju.

Dobre lastnosti enosmerne motorja s ščetkami so predvsem:

- enostavno vodenje,

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

Slabe lastnosti pa:

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

Enosmerni motor z mehansko komutacijo je uporabljen v mnogih industrijskih aplikacijah, ki zahtevajo spremenljive hitrosti. Kjer je potrebno hitro zaustavljanje, lahko zmanjša velikost potrebne mehanske zavore ali jo celo odpravi. Njegovo hitrost je mogoče gladko voditi do vrednosti nič, čemur lahko takoj sledi pospeševanje v nasprotno smer. Časovne konstante gibanja so sorazmerno majhne, tako da se motor lahko zelo hitro odziva na spremembe regulacijskega signala. Hitrost vrtenja motorja je omejena z mehanskim komutatorjem, ki ga omejujejo ščetke. Težave se pojavijo tudi zaradi potrebe po vzdrževanju in elektromagnetnih motenj, ki jih povzročajo prehodi ščetk med lamelami komutatorja. Sorazmerno slab je tudi izkoristek. Kljub temu je še vedno najboljša izbira za mnoge aplikacije, kjer zadostuje dvokvadrantno vodenje pri majhnih močeh in hitrostih.

Tipični primeri uporabe so:

- avtomatizacija v tovarnah,
- robotika,
- orodni stroji,
- pisarniška oprema,
- avtomobilska industrija,
- gospodinjski aparati in
- ročna orodja.

V nevedenih pogonih se redko uporablja, pa tudi na opisanih področjih uporabe ga vedno bolj pogosto izpodrivajo izmenični motorji. Verjetno se bo dolgoročno ohranil le v cenениh pogonih majhnih moči, ki imajo predvideno sorazmerno kratko življenjsko dobo. Prav mogoče pa je, da ga bo tudi tukaj izpodrinil enosmerni motor z elektronsko komutacijo (brez ščetk).

1.2.2. Asinhronski motor

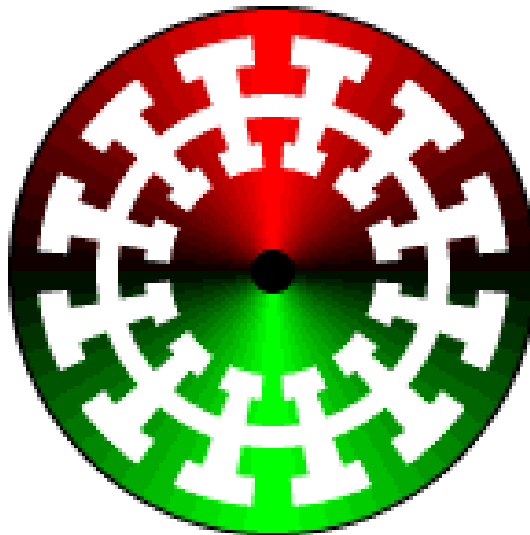
Asinhronski motor je najpogosteje uporabljan motor v industriji in po pravici nosi naziv "delovne živali" med električnimi motorji. Njegova glavna prednost pred enosmernimi motorji s ščetkami je odsotnost mehanskega komutatorja, kar bistveno zmanjša ceno in stroške vzdrževanja, poleg tega pa omogoči enostavnejšo strukturo in poveča robustnost. V primerjavi z enosmernim motorjem ima asinhronski motor tudi bistveno večji izkoristek.

Teorija delovanja asinhronskega motorja je kompleksnejša kot je to primer pri enosmernem motorju, zato bo na tem mestu opisana zelo poenostavljeno. Bistveno je razumevanje osnovnega principa delovanja, podrobnejše opise pa je mogoče najti v literaturi, ki se z asinhronskim motorjem veliko ukvarja.

Grobo gledano je asinhronski motor transformator z vrtljivim sekundarjem (rotorjem). Primarno navitje (stator) je priključeno na vir napajanja, skozi kratko sklenjeno rotorsko navitje pa teče inducirani sekundarni tok. Vrtilni navor je rezultat delovanja sekundarnih (rotorskih) tokov na magnetni pretok (fluks) v zračni reži.

Na tem mestu je smiselno dodati, da imamo dve glavni vrsti asinhronskih motorjev, ki se razlikujeta glede na izvedbo rotorja, motorje s kratkostično kletko in motorje z navitim rotorjem.

Statorska navitja so porazdeljena po statorju s ciljem proizvodnje približno sinusno porazdeljenega polja. Ko na njih priključimo tri fazno izmenično napetost, nastane vrtiljivo izmenično statorsko magnetno polje, ki zaradi medsebojnega delovanja z rotorskim magnetnim poljem zavrti rotor. Vendar pa se rotor ne vrti natančno s frekvenco statorskega polja, temveč za njim zaostaja za t.i. slipno frekvenco. Osnovo podaja Slika 4.



Slika 4: Prikaz asinhronskega motorja

Tudi asinhronski motor bo opisan s pomočjo navedbe nekaterih dobrih in slabih lastnosti.

Dobre lastnosti asinhronskega motorja so:

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

Slabe lastnosti asinhronskega motorja pa:

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

Asinhronski motor je v praksi zelo razširjen. Največ ga uporabljajo v pogonih s konstantno hitrostjo, zadnje čase pa vedno bolj prodira tudi na področje vodenja servopogonov. Izdelujejo ga v zelo širokem področju moči, omogoča pa tudi delovanje v širokem področju vrtiljajev. Njegova največja težava je, da za vodeno delovanje potrebujemo sorazmerno kompleksen pretvornik. Osnovna področja uporabe asinhronskega motorja so:

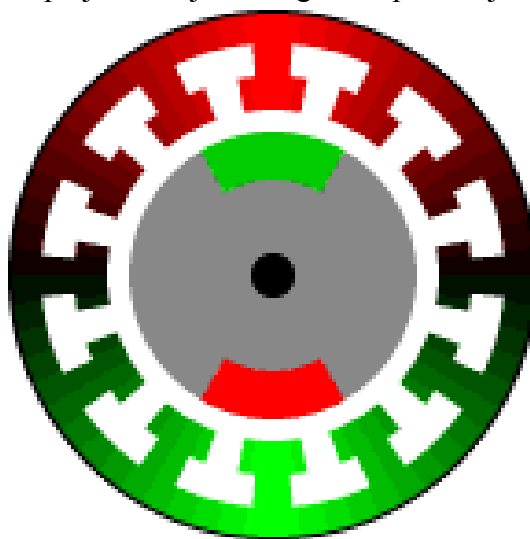
- industrijski pogoni,
- obdelovalni stroji,
- dvigala in
- električna vozila.

V prihodnosti je mogoče pričakovati povečanje števila aplikacij pogonov vozil različnih velikosti, saj ga kot pogonski motor električnega vozila vidita nemška in ameriška industrija. Ni verjetno, da bi se uveljavil pri manjših pogonih, ob nadaljnjem nižanju cen in izboljševanju lastnosti magnetnih materialov pa ga lahko z mnogih področij uporabe izrinejo sinhronski motorji s permanentnimi magneti.

1.2.3. Sinhronski motor s permanentnimi magneti

Sinhronski motor s permanentnimi magneti spominja na enosmerni motor s ščetkami, razlika je v tem, da so permanentni magneti pritrjeni na rotor. Obstajajo tudi izvedbe, kjer so uporabljeni naviti rotorji, ki jim enosmerni tok dovajamo preko drsnih obročev.

Stator sinhronskega motorja se ne razlikuje od statorja asinhronskega motorja. Tudi tukaj s priključitvijo tri fazne izmenične napetosti nastane vrtiljivo magnetno polje, ki vrti rotor, le da se ta vrti s frekvenco ki je enaka frekvenci statorskega polja. Vrtilno polje ima v splošnem sinusno porazdelitev. Hitrost vrtenja je tako odvisna od frekvence napajalne napetosti in števila polovih parov. Osnovno sliko kaže Slika 5, ki predstavlja preprost opis delovanja sinhronskega motorja s permanentnimi magneti. Kot pri enosmernem motorju z mehansko komutacijo tudi tukaj rdeča barva predstavlja severni, zelena pa južni magnetni pol. Rotor se vrti sinhrono z vrtilnim poljem statorja. V praksi so magnetna polja motorjev mnogo kompleksnejša.



Slika 5: Prikaz sinhronskega motorja s permanentnimi magneti

Dobre lastnosti sinhronskega motorja s permanentnimi magneti so:

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

Slabe lastnosti sinhronskega motorja s permanentnimi magneti pa so:

- 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).

Sinhronske motorje proizvajajo v zelo različnih velikostih - od zelo majhnih do zelo velikih motorjev. Motorji v industrijskih pogonih so zelo učinkovito sredstvo za pretvorbo električne energije v mehansko delo (izkoristek sinhronskih motorjev s permanentnimi magneti je od vseh električnih motorjev največji), poleg tega pa lahko zagotavljajo tudi korekcijo faktorja moči.

Področja uporabe sinhronskega motorja s permanentnimi magneti so:

- industrijske aplikacije,
- črpalke, ventilatorji, ... velikih moči,
- generatorji,
- servomotorji in

- avtomobilska industrija.

Zadnje čase je opazno, da se sinhronski motorji s permanentnimi magneti uveljavljajo na področju servopogonov srednjih moči, kjer bodo po vsej verjetnosti v kratkem izpodrinili enosmerne motorje s ščetkami. Velike možnosti se pojavljajo tudi pri izdelavi zelo majhnih motorjev. V avtomobilski industriji bodo verjetno prevladali v alternatorjih in zaganjačih, japonska industrija pa jih v veliki meri uvaja tudi v pogone električnih avtomobilov.

Še posebno se uveljavlja podvrsta motorjev s permanentnimi magneti - enosmerni motorji brez ščetk.

1.2.4. Enosmerni motor brez ščetk

Enosmerne motorje brez ščetk najpogosteje zasledimo pod imenom "brushless DC motorji" - BLDC. Po konstrukciji in materialih so podobni sinhronskim motorjem s permanentnimi magneti, le da pri konstrukciji poudarek ni na oblikovanju sinusne porazdelitve polja, temveč je le-ta pretežno trapezna, kar omogoča enosmerni tok skozi statorska navitja. Motor pogosto imenujejo tudi motor z elektronsko komutacijo.

Dejansko gre tukaj za obrnjeni enosmerni motor s ščetkami, čigar delovanje je v marsičem enako delovanju enosmernega motorja s ščetkami. Na rotor so pritrjeni permanentni magneti, na statorju pa imamo večfazna navitja, skozi katera teče tok, ki povzroča vrtljivo magnetno polje. Statorska navitja so priključena na krmilno elektroniko, ki izvaja elektronsko komutacijo. Na zunaj je motor enosmeren, saj je enosmerna tudi napetost, s katero ga napajamo. Takšna konstrukcija v primerjavi z enosmernimi motorji s ščetkami pomeni boljše odvajanje toplote (hlajenje) in manjši vztrajnostni moment motorja. Pole rotorja s permanentnimi magneti (rdeča barva predstavlja severni, zelena pa južni magnetni pol) privlačijo nasprotni poli statorja, kar povzroči navor. Osnovno sliko kaže Slika 6. 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.

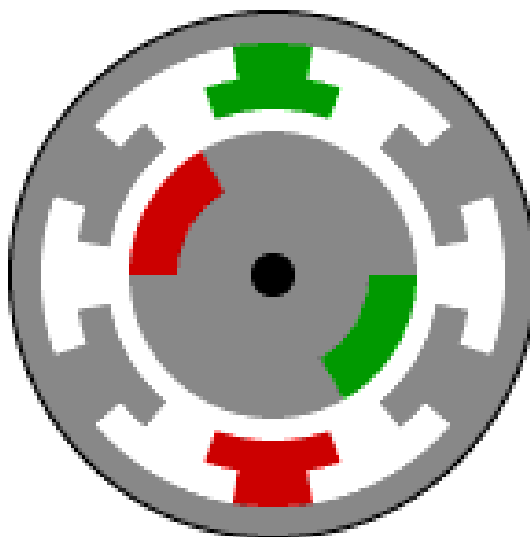
Pri komutaciji ne pride do iskrenja, kar pa je le ena od prednosti tega motorja pred motorjem s ščetkami.

Dobre lastnosti enosmernega motorja brez ščetk so:

- majhna valovitost navora,
- čistejše delovanje (ni praha),
- visoka hitrost delovanja,
- manj elektromagnetnega šuma,
- tiho delovanje,
- visoka zanesljivost,
- preprosto vodenje po hitrosti (vodljiv v širokem področju hitrosti, možno obratovanje v obe smeri, nadzor navora, sunka, toka in hitrosti, hitro pospeševanje in zaviranje) ter
- ščetke in komutator nista potrebna, ni obrabe.

Slabe lastnosti enosmernega motorja brez ščetk pa:

- potrebna je dodatna elektronska oprema in
- pogon je kompleksnejši.



Slika 6: Prikaz enosmernega motorja brez ščetk

Še posebno se je enosmerni motor brez ščetk uveljavil v osebnih računalnikih pa tudi v modelarstvu. Na splošno se pojavlja povsod, kjer se je v preteklosti uporabljal motor z mehansko komutacijo, ki mu predstavlja največjo konkurenco.

Glavna področja uporabe enosmernega motorja brez ščetk:

- avtomatizacija v tovarnah,
- robotika,
- orodni stroji,
- pisarniška oprema,
- avtomobilska industrija,
- gospodinjski aparati in
- ročna orodja.

V prihodnosti bo motor verjetno zamenjal enosmerni motor s ščetkami na skoraj vseh področjih delovanja. Pri tem bo ena od pomembnejših točk elektromagnetni vpliv na okolje. Razvoj je pričakovati v integraciji senzorjev in velikoserijskih proizvodnji krmilne elektronike.

Motor in njegovo delovanje bosta podrobneje opisana v nadaljevanju, kjer bodo podrobneje predstavljeni tudi uporabljeni materiali, senzorji in postopki vodenja, ki bodo prikazani na nekaterih posebnih primerih.

1.2.5. Reluktančni motor

Tudi reluktančni motorji sodijo med sinhronske električne motorje. Njihova posebnost je, da nimajo permanentnih magnetov, kar znižuje njihovo ceno in povečuje zanesljivost delovanja. Stator je podoben statorjem ostalih izmeničnih motorjev, rotor pa je izražen in sestavljen le iz železa. Železni rotor privlačijo napajani poli statorja (rdeča barva predstavlja severni, zelena pa južni magnetni pol). Polariteta statorskega polja tukaj ni pomembna, navor pa se pojavi zato, ker se najbližji pol rotorja poskuša poravnati s tistim polom statorja, skozi katerega navitje teče električni tok. V takem položaju je namreč reluktanca (od tod tudi izvira ime motorja) magnetnega kroga najmanjša (induktivnost vzbujačnega statorskega navitja pa največja). Osnovno sliko kaže Slika 7.

Rotor z napajanim statorskim polom tvori magnetni krog, čigar reluktanca je ekvivalent upornosti v električnem krogu. Ko sta rotor in statorski pol poravnana, je zračna reža med njima zelo majhna in na tej točki je tudi reluktanca minimalna.

Ko se rotor vrti, se spreminja tudi induktivnost napajanega statorskega navitja. Pri

1.3. Primerjava električnih motorjev

Cilj medsebojnih primerjav je ugotoviti, kakšen motor je smiselno uporabiti v posameznih aplikacijah. Seveda je vpliv posameznih dejavnikov pri motorjih večjih moči čisto drugačen kot pri motorjih nižjih moči. Tako je npr. popolnoma nesmisleno razmišljati o uporabi asinhronskih motorjev za dvigovanje in spuščanje šip avtomobila, po drugi strani pa bi si enosmerni motor z mehansko komutacijo težko predstavljali v eksplozijsko nevarnem okolju.

Prav tako ne bi bilo pošteno ocenjevati motorjev s stališča samo enega vira, zato smo za primerjavo izbrali tri vire:

- študija EMPACT 1998[5],
- primerjava pogonskih sistemov (GLOOR ENGINEERING)[6] in
- primerjava podjetja HILTech Development Ltd.[7].

Dodatne primerjave so podane v literaturi [8],[9],[10].

Primerjava bo izvedena glede na:

- ceno,
- maso,
- prostornino,
- izkoristek in
- nekaj drugih dejavnikov.

Pri tem bo nekaterim dejavnikom včasih pripisan večji, drugič pa manjši pomen.

Na tem mestu je potrebno povedati, da je vsaka tovrstna primerjava na nek način pristranska [9] in pri neki drugi aplikaciji daje drugačne rezultate. Vendar vse tri primerjave skupaj dajejo po našem mnenju dokaj pošteno in objektivno sliko.

1.3.1. Študija EMPACT 1998 [5]

Študija EMPACT (Study of the European Market Potential and Performance Requirements of Hybrid, Electric and Alternatively Fuelled Light Commercial Vehicles) predstavlja rezultat raziskav, ki jih je sponzoriralo Ministrstvo za trgovino in industrijo Velike Britanije (UK Department of Trade and Industry). Ukvarja se s pogoni v vozilih in izvaja primerjavo štirih tipov motorjev:

- enosmernega motorja s ščetkami (DCM),
- sinhronskega motorja s permanentnimi magneti (podobno bi veljalo tudi za enosmerni motor brez ščetk) (PMSM),
- asinhronskega motorja (AM) in
- reluktančnega motorja (SRM).

Primerjava je tukaj izvedena glede na:

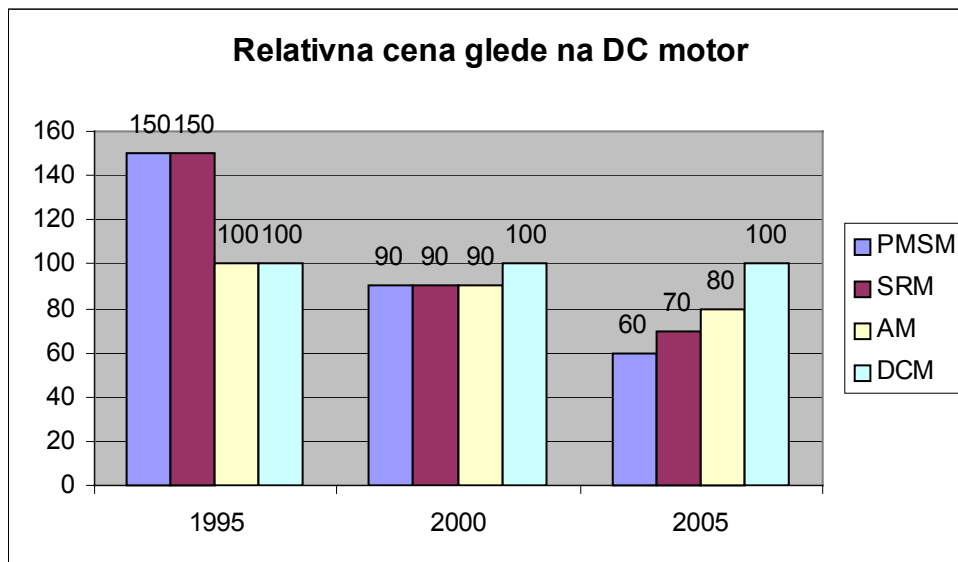
- ceno,
- maso,
- prostornino in
- izkoristek.

Prva primerjava (Slika 8) se nanaša na relativno ceno, kjer je za osnovo (100%) cena enosmernega motorja s ščetkami. Obravnavano je časovno obdobje med letoma 1995 in 2005. Leta 1995 je bila cena enosmernega motorja približno enaka ceni asinhronskega motorja, sinhronski motor s permanentnimi magneti in reluktančni motor pa sta bila za približno polovico dražja.

Trenutno stanje, ki ga še vedno dovolj dobro opisuje leto 2000, je bistveno drugačno, saj je

predvsem zaradi razvoja tehnologije prišlo do znižanja cen izmeničnih motorjev, ki so se v ceni približno poenotili in so za 10% cenejši od enosmernih.

V prihodnosti je pričakovati izdelavo večjih serij, pa tudi bistveno večjo konkurenco na trgu. To bo prav gotovo povzročilo veliko padanje cen sinhronskih motorjev s permanentnimi magneti (pri čemer bo pomembno vlogo igral razvoj magnetnih materialov), manjše nižanje cen bo opazno pri reluktančnih motorjih, asinhronskim motorjem pa bo cena še naprej enakomerno padala. Seveda je potrebno poudariti, da se bo nižala tudi cena enosmernih motorjev s ščetkami, vendar to takrat ne bo toliko pomembno kot primerjava s "konkurenčnimi" motorji.



Slika 8: Študija EMPACT 1998 - primerjava motorjev glede na ceno

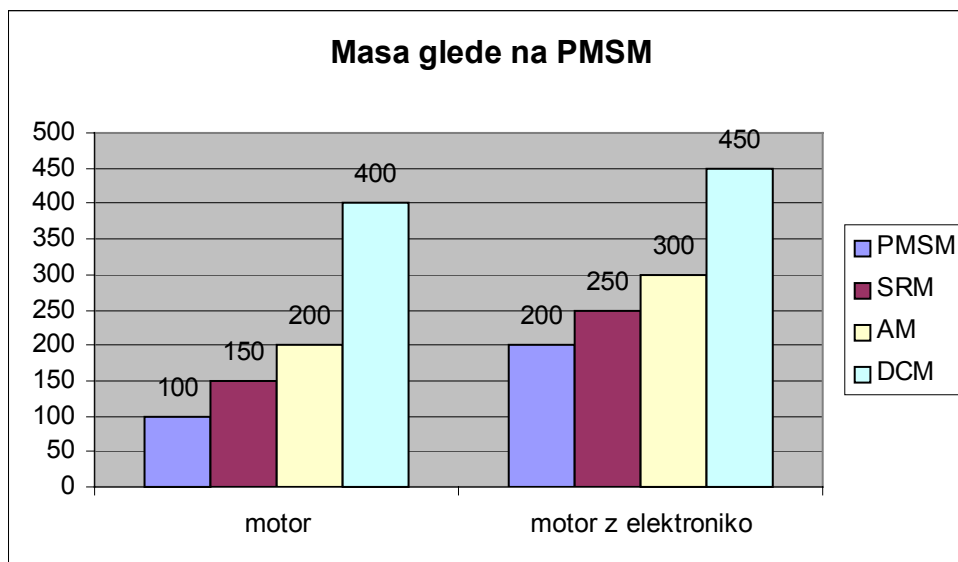
Pri drugi primerjavi se avtorji študije omejijo na trenutno stanje in obravnavajo maso samega motorja ter motorja z elektroniko za vodenje (Slika 9). Za osnovo je masa sinhronskega motorja s permanentnimi magneti, ki je relativno najnižja.

Masa reluktančnega motorja je pri isti moči približno za polovico, masa asinhronskega pa dvakrat večja. Enosmerni motor s ščetkami je štirikrat težji od sinhronskega motorja s permanentnimi magneti.

Razmerje se nekoliko spremeni z uporabo krmilnika (elektronike za vodenje). Masa sinhronskega motorja s permanentnimi magneti se približno podvoji, povečanje za enak delež, ki pa relativno predstavlja manjši delež celotnega sistema, lahko zaznamo tudi pri asinhronskem in reluktančnem motorju. Relativno se najmanj poveča masa enosmernega motorja s ščetkami, absolutno celo za polovico manj kot ostalim motorjem, kar je posledica preprostega vodenja in samega napajalnega sistema.

Motor s permanentnimi magneti tako za vodenje potrebuje pretvornik z enako maso, kot jo ima sam motor, razmerje pa je le nekoliko boljše pri reluktančnem in asinhronskem motorju.

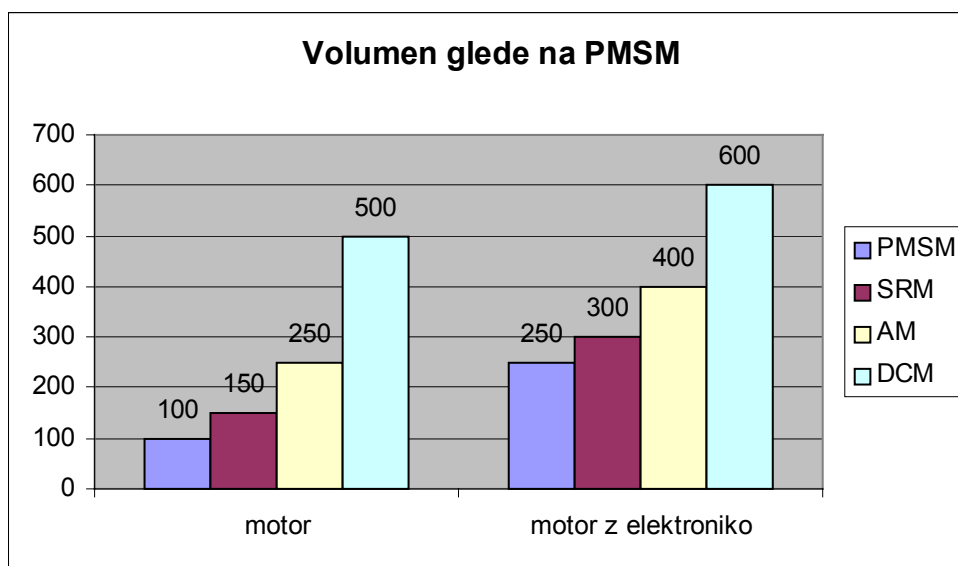
V prihodnosti se bo stanje seveda precej spremenilo. Masa pretvornika za izmenične motorje bo verjetno še nekaj časa dvakrat večja kot masa pretvornika za enosmerne motorje, vendar bo predstavljala bistveno manjši delež v celotni masi sistema.



Slika 9: Študija EMPACT 1998 - primerjava motorjev glede na maso

Podobno kot pri masi je tudi stanje pri prostornini motorjev (Slika 10), ki pa se pri asinhronskih motorjih in enosmernih motorjih s ščetkami poveča za nekoliko večji delež. Tudi v tem primeru je za osnovo (100%) uporabljen sinhronski motor s permanentnimi magneti.

Na splošno je vidno, da se prostornina z uporabo vodenja poveča nekoliko bolj kot masa. Tako kot masa se tudi prostornina pri izmeničnih motorjih poveča za enak delež.



Slika 10: Študija EMPACT 1998 - primerjava motorjev glede na prostornino

Nazadnje je izvedena še primerjava izkoristkov posameznih tipov motorjev (Tabela 1). Izkoristki so podani v odstotkih, primerjava pa je izvedena za sam motor, elektroniko in reduktor.

Najboljši izkoristek ima sinhronski motor s permanentnimi magneti, sledi mu reluktančni motor, tretje mesto zaseda asinhronski motor, najslabši pa je enosmerni motor s ščetkami.

Pri obravnavi elektronike je slika nekoliko drugačna. Zaradi relativne preprostosti je izkoristek največji pri enosmernem motorju, sledita mu asinhronski in sinhronski motor s permanentnimi magneti. Najslabše se odreže elektronika reluktančnega motorja.

Ker je reduktor v vseh primerih enak, je tudi njegov izkoristek vedno enak.

Na koncu je podan še skupni izkoristek, ki je največji pri sinhronskem motorju s permanentnimi magneti. Precej manjši izkoristek ima sistem z reluktančnim motorjem, ki je v tem smislu za

malenkost boljši od asinhronskega motorja. Najslabše se spet odreže enosmerni motor s ščetkami.

Tip motorja	Pogonski motor	Elektronika	Reduktor	Skupaj
PMSM	97	93	97	87
SRM	94	90	97	82
AM	90	93	97	81
DCM	80	98	97	76

Tabela 1: Študija EMPACT 1998 - primerjava motorjev glede na izkoristek

V skupnem seštevku je najboljši rezultat dosegel motor s permanentnimi magneti, ki mu s visokim rezultatom sledita reluktančni in asinhronski motor. Najslabši rezultat je v tej primerjavi dosegel enosmerni motor s ščetkami.

1.3.2. Primerjava pogonskih sistemov (Gloor Engineering) [6]

Primerjava švicarskega podjetja Gloor Engineering je izvedena na nekoliko drugačen način. Tudi tukaj so obravnavani pogoni v električnih vozilih, vendar so motorji ocenjeni z relativnimi ocenami, tako da so posamezne lastnosti različno obtežene.

Primerjava je tudi tukaj izvedena za:

- enosmerne motorje s ščetkami (DC),
- sinhronske motorje s permanentnimi magneti (SM),
- asinhronske motorje in
- reluktančne motorje.

Ocena je podana glede na:

- robustnost,
- ceno,
- lastnosti in
- udobje.

V prvem stolpcu je podan dejavnik, ki ga ocenjujemo, v drugem pa najvišje število točk, ki jih lahko doseže.

Prvi ocenjeni dejavnik je robustnost (Tabela 2). V oceni so zajeti trije dejavniki:

- ščetke,
- senzorji in
- magneti.

Od obravnavanih dejavnikov so najbolj obtežene ščetke, ki so tudi najpomembnejši vir težav v električnih motorjih. Senzorji in magneti so obteženi pol manj, saj v sistem prinesejo manj problemov. Seveda pa niso zanemarljivi.

Glede na ščetke je najslabše ocenjen enosmerni motor s ščetkami, ki je edini med obravnavanimi motorji, ki jih dejansko ima. Tako pri tem ocenjevanju ne dobi nobenih točk, drugi trije motorji pa dobijo najvišjo možno oceno, saj s ščetkami, ki jih nimajo, ne morejo imeti nobenih težav.

Pri oceni glede na senzorje sta dobro ocenjena enosmerni motor s ščetkami in asinhronski motor, ker ju lahko uporabljamo brez senzorjev, kar tudi pogosto počnemo, ko pogoni niso vodeni. Tudi

sicer lahko za višje hitrosti brez posebnih težav uporabimo algoritme za ocenitev hitrosti.

Po drugi strani sinhronskega motorja s permanentnimi magneti in reluktančnega motorja ne moremo uporabiti brez senzorjev.

Zadnji dejavnik pri oceni robustnosti so magneti. Le-teh pri asinhronskem in reluktančnem motorju ni, zato ta dva tipa motorjev dosežeta najvišjo možno oceno, medtem ko sinhronski motor s permanentnimi magneti in enosmerni motor brez ščetk tukaj ne dosežeta točk, ker potrebujeta permanentne magnetne ali pa ustrezno delujoče elektromagnete.

sistem	max.	DCM	PMSM	AM	SRM
ščetke	20	0	20	20	20
senzorji	10	10	5	10	5
magneti	10	0	0	10	10
robustnost	40	10	25	40	35

Tabela 2: Študija Gloor Engineering - primerjava motorjev glede na robustnost

Skupno doseže glede na robustnost največje število točk asinhronski motor, za katerim zaradi potrebe po uporabi senzorjev za malenkost zaostaja reluktančni motor. Sinhronski motor s permanentnimi magneti doseže le nekaj več kot polovico možnih točk. Na oceno kvarno vplivata potreba po senzorjih in uporaba magnetov. Najslabše se odreže enosmerni motor s ščerkami, ki doseže le četrtno možnih točk. Najpomembnejši razlog za to je uporaba ščetk, pomembna pa je tudi potreba po uporabi magnetov.

Drugi ocenjeni dejavnik je cena (Tabela 3). V oceni so zajeti trije dejavniki:

- motor,
- elektronika in
- mehanizem.

Od obravnavanih dejavnikov je najbolj obtežena elektronika, ki v veliki večini primerov presega samo ceno motorja. Dodan je tudi uporabljen mehanizem motorja, ki pa je najmanj obtežen, saj ga je potrebno gledati v kombinaciji z dejavnikom motor, tako da skupaj tvorita celoto in se po obteženosti izenačita z elektroniko.

Od motorjev je najcenejši reluktančni motor, ki tako doseže največje število točk. sledi mu asinhronski motor, medtem ko sta enosmerni motor s ščerkami in sinhronski motor s permanentnimi magneti na zadnjem mestu s polovico možnih točk.

Slika je nekoliko drugačna pri elektroniki, ki je najcenejša pri enosmernem motorju s ščerkami. Le-ta tako tukaj doseže vse možne točke. Po vrsti mu nato z majhnimi medsebojnimi razlikami sledijo reluktančni motor, sinhronski motor s permanentnimi magneti in asinhronski motor.

Zadnja postavka je potrebni mehanizem, ki najbolj vpliva na ceno enosmernega motorja s ščerkami in sinhronskega motorja s permanentnimi magneti. Asinhronski motor in reluktančni motor tukaj dosežeta vse možne točke.

sistem	max.	DCM	PMSM	AM	SRM
motor	10	5	5	8	10
elektronika	15	15	9	8	10
mehanizem	5	0	0	5	5
cena	30	20	13	21	25

Tabela 3: Študija Gloor Engineering - primerjava motorjev glede na ceno

Skupno gledano je najcenejši reluktančni motor, sledi mu asinhronski motor, ki je le malo cenejši od enosmernega motorja. Najdražji je v tem primeru sinhronski motor s permanentnimi magneti.

Naslednji ocenjeni dejavnik so lastnosti motorja (Tabela 4). V oceni sta zajeta dva dejavnika:

- masa in
- izkoristek.

Oba sta enako obtežena, saj tudi približno enako vplivata na lastnosti delovanja.

Po masi je najbolje ocenjen sinhronski motor s permanentnimi magneti, sledi mu reluktančni motor. Na tretjem mestu je asinhronski motor, zadnjega pa z nekaj več kot polovico možnih točk zaseda enosmerni motor s ščetkami.

Popolnoma isto sliko dobimo pri obravnavi izkoristka.

sistem	max.	DCM	PMSM	AM	SRM
masa	10	6	10	8	9
izkoristek	10	6	10	8	9
lastnosti	20	12	20	16	18

Tabela 4: Študija Gloor Engineering - primerjava motorjev glede na lastnosti

Tudi skupno gledano ima najboljše lastnosti (in vse možne točke) sinhronski motor s permanentnimi magneti, ki mu sledi reluktančni motor. Na tretjem mestu je asinhronski motor. Najslabše se z nekaj več kot polovico možnih točk odreže enosmerni motor s ščetkami.

Zadnji obravnavani dejavnik je udobje delovanja (Tabela 5). V oceni sta zajeta dva dejavnika:

- hrup in
- preobremenitev,

ki sta enako obtežena.

Glede hrupa se dobro odrežeta sinhronski motor s permanentnimi magneti in asinhronski motor, nekoliko slabše pa reluktančni motor. Najslabši je spet enosmerni motor s permanentnimi magneti, ki povzroča hrup s ščetkami.

sistem	max.	DCM	PMSM	AM	SRM
hrup	5	3	5	5	4
preobremenitev	5	2	4	5	5
udobje	10	5	9	10	9

Tabela 5: Študija Gloor Engineering - primerjava motorjev glede na udobje

Od obravnavanih motorjev je mogoče najbolj obremeniti asinhronski in reluktančni motor,

nekoliko manj sinhronskega s permanentnimi magneti, najmanj pa enosmernega s ščetkami.

Skupno gledano je za delo najbolj prijeten asinhronski motor, ki mu sledita sinhronski motor s permanentnimi magneti in reluktančni motor. Najslabši je enosmerni motor, ki zbere le polovico možnih točk.

V skupni oceni ima najvišjo obtežitev robustnost, sledijo pa ji cena, lastnosti in udobje. Nobeden od obravnavanih motorjev ne doseže maksimalnega možnega števila točk, najbolje pa se odrežeta asinhronski in reluktančni motor. Bistveno slabši rezultat doseže sinhronski motor s permanentnimi magneti, kar je predvsem posledica vpliva robustnosti in cene. Najslabši je enosmerni motor s permanentnimi magneti.

sistem	max.	DCM	PMSM	AM	SRM
robustnost	40	10	25	40	35
cena	30	20	13	21	25
lastnosti	20	12	20	16	18
udobje	10	5	9	10	9
skupaj	100	47	67	87	87

Tabela 6: Študija Gloor Engineering - primerjava motorjev - skupno

V primerjavi s prej opisano študijo EMPACT se podatki razlikujejo predvsem v ceni. Če si ogledamo le podatke za leto 2000, so po študiji EMPACT cene izmeničnih motorjev približno enake, enosmerni motorji s ščetkami pa je za približno 10% dražji. Po drugi strani podjetje Gloor Engineering kaže višjo ceno sinhronskih motorjev s permanentnimi magneti, cenejši pa so enosmerni motorji s ščetkam, asinhronski motorji in reluktančni motorji. Pomemben vpliv ima postavka mehanizem, ki je v študiji EMPACT očitno niso upoštevali. V tem primeru se podatki obeh raziskav ne razlikujejo več toliko

1.3.3. Primerjava podjetja HILTech Development Ltd. [7]

Zadnjo primerjavo je na svojih spletnih straneh predstavilo podjetje HILTech Ltd. Motorji tukaj niso obdelani tako natančno kot v prejšnjih dveh raziskavah, pa tudi obravnava ne zajema popolnoma istih tipov. Obdelani so:

- enosmerni motor s ščetkami,
- asinhronski motor,
- reluktančni motor in
- enosmerni motor brez ščetk (ki ga lahko enačimo z sinhronskimi motorji s permanentnimi magneti).

Prvo odstopanje se pojavi že pri prvi postavki, saj za razliko od Gloor Engineering vse tipe motorjev obravnavajo kot zelo robustne motorje. V neki meri to tudi drži, vsekakor pa je res, da so izmenični motorji bolj robustni od enosmernih s ščetkami. Nejasnost se popravi takoj pri drugi postavki, kjer je enosmerni motor edini, ki potrebuje redno vzdrževanje. Tudi cena se ujema s postavkami podjetja Gloor Engineering.

Slabost enosmernega motorja s ščetkami in reluktančnega motorja je specifična tehnologija za posamezne aplikacije, medtem ko so enosmerni motorji brez ščetk in asinhronski motorji že v veliki meri standardizirani.

Tudi specifična energija je pri enosmernih motorjih s ščetkami najnižja, kar z drugimi besedami pomeni, da je razmerje moč/masa pri tem motorju najslabše.

Za vse tipe motorjev obstajajo robustni sistemi vodena, ki jim omogočajo delovanje v vseh štirih

kvadrantih.

Kot pomemben dejavnik je izpostavljen akustični šum oz. hrupnost motorja. Medtem ko je za asinhronski motor in enosmerni motor brez ščetk značilno tiho delovanje, sta ensomerni motor s ščetkami (zaradi ščetk) in reluktančni motor (zaradi valovitosti navora) precej hrupna.

	DCM	AM	SRM	BLDC
Zelo robusten motor	✓	✓	✓	✓
Motor brez potrebe po vzdrževanju	✗	✓	✓	✓
Cenen motor	✗	✓	✓	✗
Univerzalna tehnologija	✓	✓	✗	✗
Visoka specifična energija	✗	✓	✓	✓
Lahek motor	✗	✗	✗	✓
Robusten sistem vodenja	✓	✓	✓	✓
Vodenje v štirih kvadrantih	✓	✓	✓	✓
Akustični šum	✓	✗	✓	✗

Tabela 7: Primerjava *HILTech*

2. OPIS DELOVANJA ENOSMERNEGA MOTORJA BREZ ŠČETK

Jedro raziskave je bila obdelava in predstavitev enosmerne motorja brez ščetk. Kot smo povedali že ob kratkem opisu motorja, je enosmerni motor brez ščetk izvedba sinhronskega motorja s permanentnimi magneti, od katerega se razlikuje predvsem po obliki razporeditve magnetnega polja.

Enosmerni motor brez ščetk predstavlja konkurenco in alternativo enosmernemu motorju s ščerkami, od katerega je bistveno boljši v smislu vzdrževanja, povečanega izkoristka, zmanjšane velikosti ter manjšega elektromagnetnega in akustičnega šuma, zaradi konstrukcije pa ima tudi manjšo maso in vztrajnostni moment, kar pomeni boljšo dinamiko odzivanja na regulacijske signale.

V preteklosti je imel za motorje v razredu nekaj 10W enosmerni motor s ščerkami bistveno prednost v nižji ceni, kar pa se z razvojem elektronike in magnetnih materialov spreminja. Rezultat tega je uporaba enosmerne motorjev brez ščetk tudi v tako cenovno občutljivih aplikacijah, kot so avtomobilska industrija, instrumentacija, tiskalniki, računalniška periferija in šivalni stroji.

V poglavju bo enosmerni motor brez ščetk najprej opisan, predstavljeni bodo uporabljeni magnetni materiali in osnovni senzorji (Hallove sonde).

Sledil bo kratek opis preprostih sistemov vodenja enosmerne motorjev brez ščetk, kjer bosta opisana preprosta postopka vodenja 2-faznega (na primeru ventilatorja v osebne računalniku) in 3-faznega motorja.

Po preprostih bodo predstavljeni še kompleksnejši postopki vodenja, kjer bodo uporabljena mostična vezja. V ta namen bo predstavljen tudi matematični model motorja.

Nazadnje bo predstavljenih še nekaj postopkov vodenja brez senzorja položaja, ki se zadnje čase vedno bolj uveljavlja.

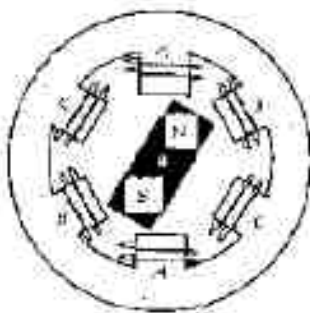
Za nazornejšo predstavitev bo uporabljenih nekaj animacij.

2.1. Opis enosmerne motorja brez ščetk

Enosmerni motor brez ščetk si lahko v osnovi predstavljamo kot navzven obrnjeni enosmerni motor s ščerkami. Namesto rotorskih navitij napajamo statorska, permanentni magneti pa se namesto na statorju pojavijo na rotorju.

Takšna izvedba ima več prednosti. Prva je ta, da ne potrebuje mehanskega prenosa energije na rotor. Ščetke, ki jih v ta namen uporablja enosmerni motor s ščerkami, so pogosti vir okvar, predstavljajo pa tudi vir elektromagnetnih in akustičnih motenj ter prahu.

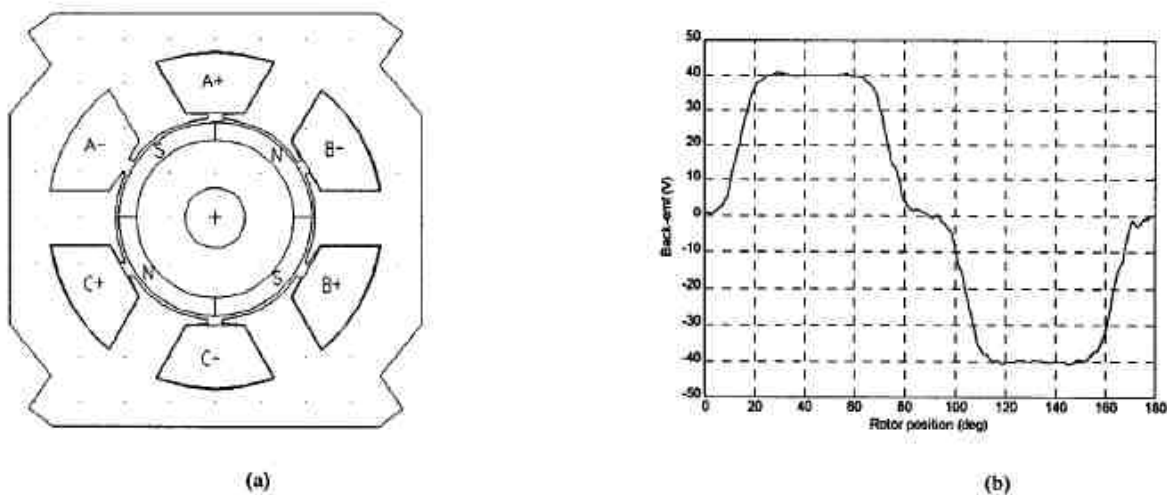
Že v uvodu poglavja smo zapisali, da preprostejša struktura omogoča tudi višje hitrosti delovanja in boljšo dinamiko.



Slika 11: Princip zgradbe enosmerne motorja brez ščetk

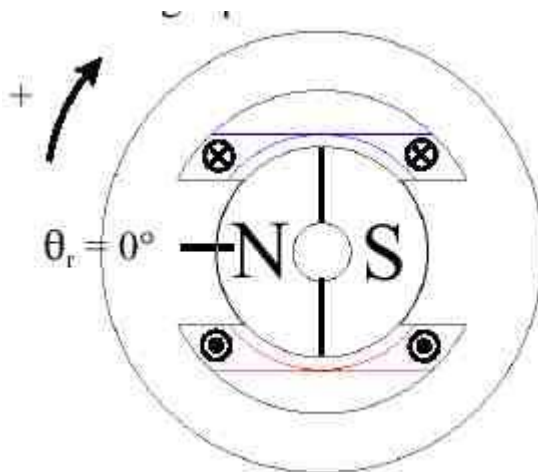
Princip zgradbe trifaznega enosmerne motorja brez ščetk kaže Slika 11. Rotor predstavlja permanentni magnet, ki se vrti v elektromagnetnem polju, ki ga tvorijo tri fazna navitja statorja. Po zgradbi je enak sinhronskemu motorju s permanentnimi magneti. Vendar pa takšen motor še ni enosmeren, saj mora biti priključen na trifazno napetost. Enosmerno obnašanje motorja navzven dosežemo z uporabo ustreznega elektronskega vezja.

Od sinhronskega motorja se enosmerni motor brez ščetk razlikuje tudi po obliki porazdelitve magnetnega polja, ki je v tem primeru trapezna. Slika 12 kaže strukturo motorja (a) in obliko njegove inducirane napetosti (b), ki je tako kot magnetno polje trapezne oblike. Sinhronski motor s permanentnimi magneti ima sinusno obliko polja in inducirane napetosti.



Slika 12: Struktura (a) in inducirana napetost (b) enosmerne motorja brez ščetk

Nazadnje prikazan še primer enofaznega enosmerne motorja brez ščetk (Slika 13). Poudariti je potrebno, da se takšen motor ne bi sam zagnal, saj bi za to potreboval vsaj tri pole. vseeno pa je mogoče s sliko prikazati princip delovanja.



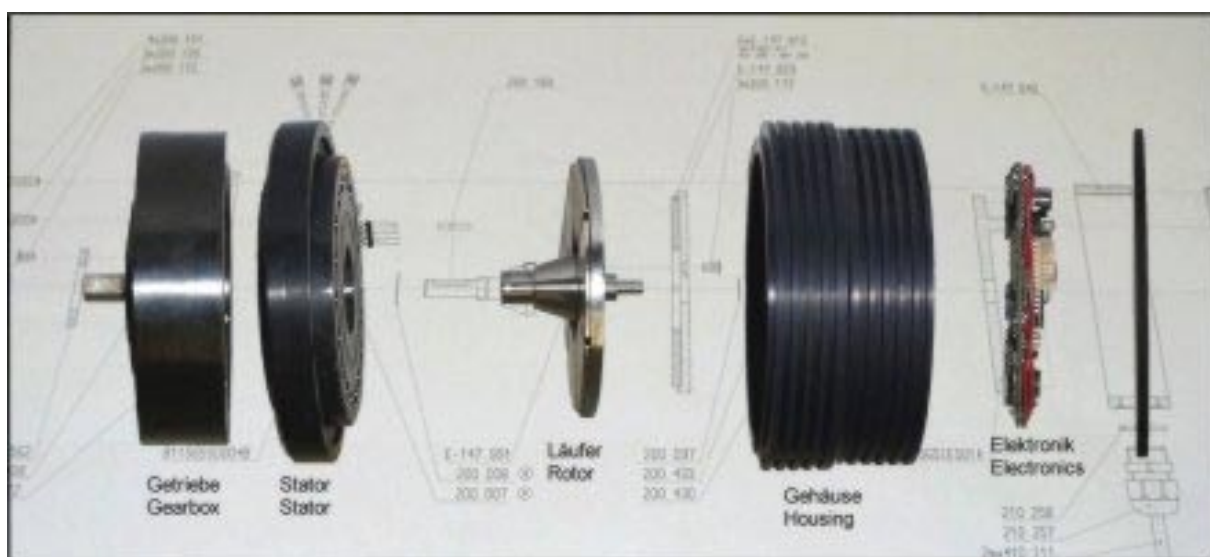
Slika 13: Princip delovanja enofaznega enosmerne motorja brez ščetk

Enosmerne motorje brez ščetk izdelujejo v raznih izvedbah, dve od njih kažejo Slika 14, Slika 15 in Slika 16. Obe prikazani izvedbi sta diskasti, prva od njiju je tudi brez utorov (Slika 14 in Slika 15). Pri izvedbi brez utorov je lepo vidna pripadajoča elektronika, izvedba z utori pa je prikazana samo s statorjem in rotorjem.

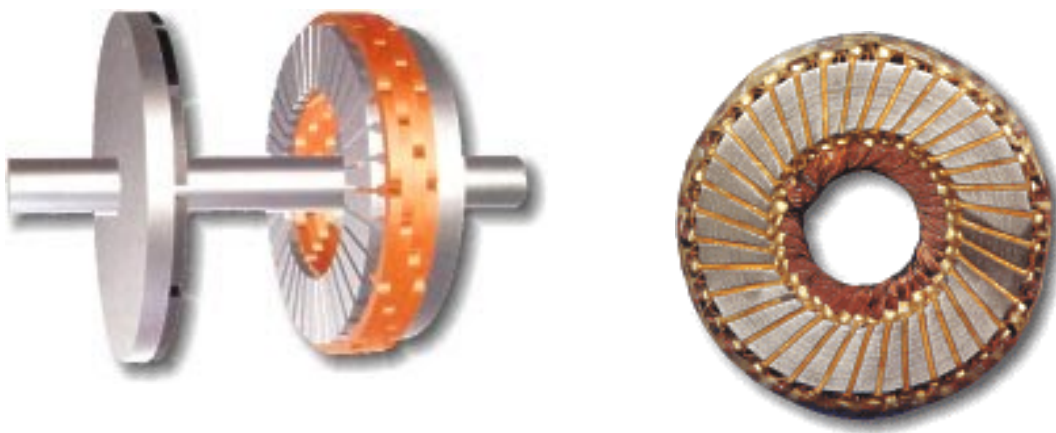
V nadaljevanju bodo opisani še magnetni materiali in senzorji polja (Hallove sonde).



Slika 14: Izvedba enosmernega motorja brez ščetk brez utorov



Slika 15: Izvedba enosmernega motorja brez ščetk brez utorov (sestava)



Slika 16: Diskasta izvedba enosmernega motorja brez ščetk

2.1.1. Uporabljeni magnetni materiali

najpogosteje uporabljeni magnetni materiali so :

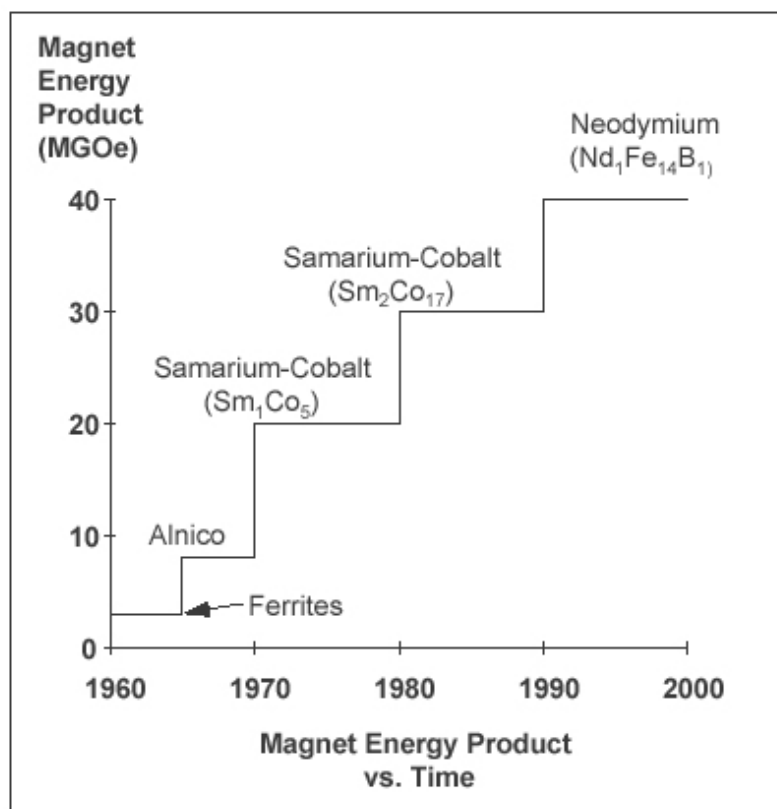
- aluminij-nikelj-kobalt - AlNiCo,
- samarij kobalt (SmCo_5 , $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$) in
- redke zemlje.
- - Neodymium (NdFeB , Neo)

AlNiCo (aluminij-nikelj-kobalt) je bil najboljši, kar je bilo na razpolago do začetka sedemdesetih let prejšnjega stoletja. Njegova pomembna dobra lastnost je bila velika temperaturna stabilnost.

Višje energije polja so pozneje uspeli doseči z uporabo samarij-kobalta. V prvem obdobju so se pojavljale težave s stabilnostjo, ki pa so jih pozneje uspeli odpraviti. Problem predstavlja še vedno nestabilna oskrba tržišča s kobaltom in visoka cena samarija.

Zadnji napredek je bil dosežen z uporabo redkih zemelj, ki trenutno omogočajo doseganje najvišjih magnetnih energij, vendar imajo še vedno težave s temperaturno stabilnostjo.

Napredek grafično prikazuje Slika 17.



Slika 17: Napredek v tehnologiji magnetnih materialov

Cena redkih zemelj je glede na maso še vedno višja od feritnih materialov, vendar se cena glede na proizvedeno energijo vztrajno niža. Poleg tega je mogoče z uporabo redkih zemelj doseči pomembne prihranke železa in bakra, kar nekoliko poveča gospodarnost njihove uporabe.

V proizvodnji enosmernih magnetov brez ščetk se uporabljajo segmenti magnetnega materiala v obliki kvadrov in lokov, ki jih individualno pritrdijo na rotor, kar je sorazmerno drago zaradi velikega števila delovnih operacij. Izboljšanje bi se dalo doseči z uporabo magnetov v obliki prstanov.

Med največje proizvajalce takih magnetov sodijo:

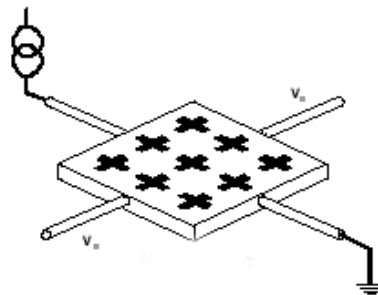
- Hitachi (Edmore, Michigan, ZDA),

- Crucible (Elizabethtown, Kentucky, ZDA),
- Diado (Nagoya, Japonska)
- Magnet Application, Ltd. (uradno Cookson, Berkhamsted, Velika Britanija),
- TDK (Tokio, Japonska),
- Magnequench (Anderson, Indiana, ZDA) in
- Sumitomo (Osaka-Shi, Japonska).

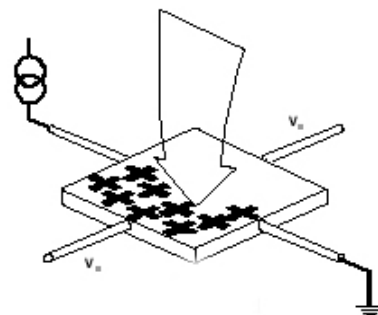
2.1.2. Hallove sonde

Hallov efekt je dobil ime po fiziku Edwinu Hallu, ki je leta 1879 odkril, da je na prevodniku ali polprevodniku skozi katerega teče enosmerni tok, pravokotno nanj pa deluje magnetno polje, mogoče izmeriti napetost pravokotno glede na smer toka.

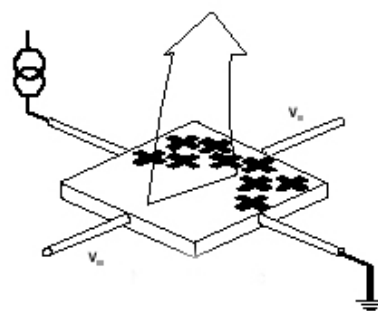
Delovanje kažejo Slika 18, Slika 19 in Slika 20. Senzorji lahko merijo samo prisotnost polja ali pa tudi njegovo jakost.



Slika 18: Hallova sonda - obnašanje brez polja

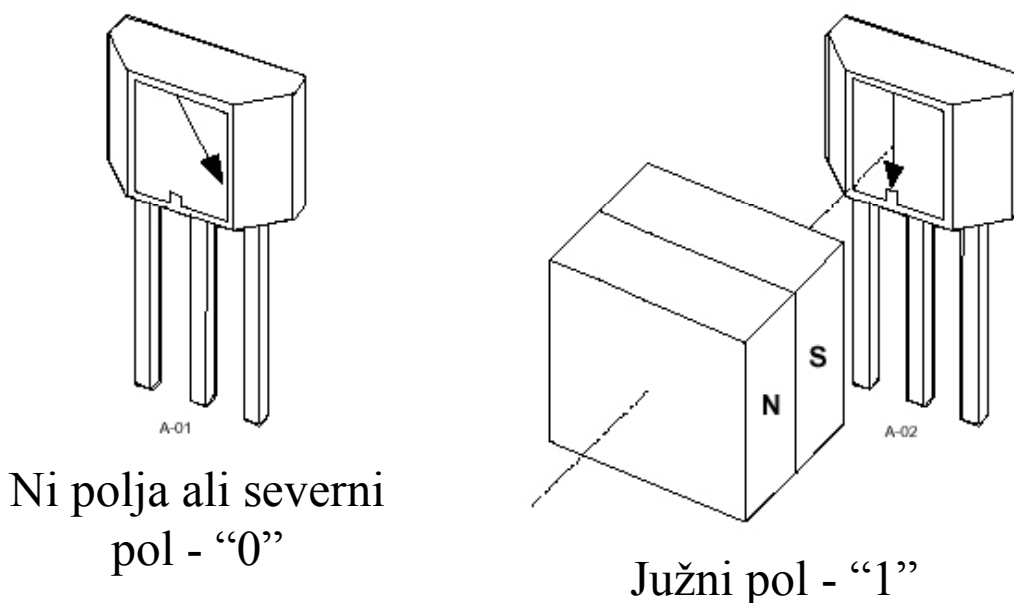


Slika 19: Hallova sonda - obnašanje pod vplivom severnega pola



Slika 20: Hallova sonda - obnašanje pod vplivom južnega pola

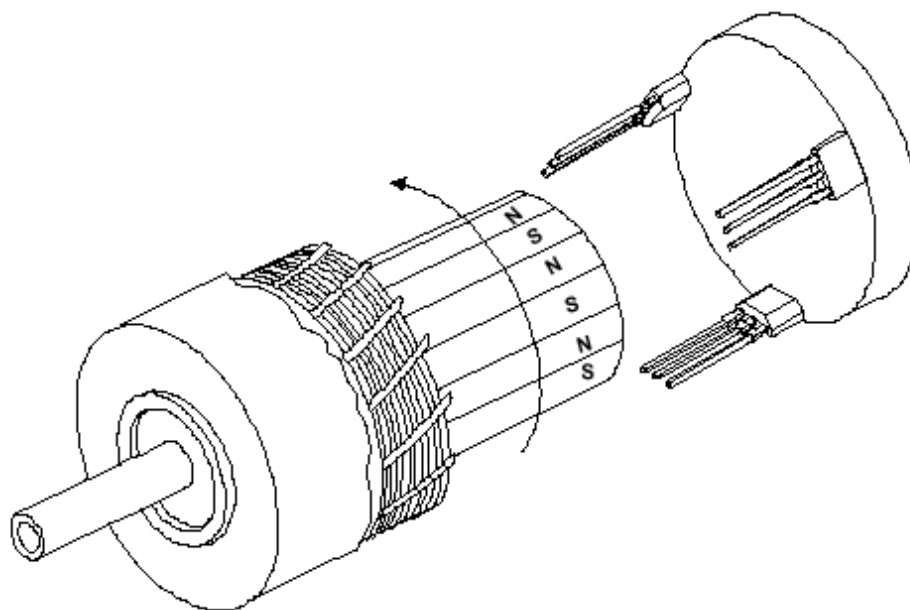
Delovanje senzorjev polja, ki uporabljajo Hallove sonde, kaže Slika 21.



Slika 21: Delovanje senzorjev polja

Cena Hallovih senzorjev je odvisna od aplikacije. Senzorji v vozilih lahko dosegajo ceno od 0.35USD do 1.50USD, če pa gre za senzorje v industrijski tehniki, telekomunikacijah, računalnikih in zabavni tehniki, lahko pade tudi na 0.20USD. Stroški v vozilih so višji zaradi bistveno višjih zahtev, kot so npr. delovanje pri višjih temperaturah (do 200°), razbremenitve, dvojna prenapetost, kratki stiki in obrnjeni poli napetosti.

V enosmernih motorjih brez ščetk se Hallovi senzorji uporabljajo v kombinaciji z drugimi elektronskimi elementi namesto ščetk v motorjih z mehanskim komutatorjem. Namestitev kaže Slika 22.



Slika 22: Postavitev senzorjev polja

Senzorji zaznajo južni pol magneta in na ta način pošiljajo krmilne signale elektronskim stikalom, ki ustrezno položaju rotorja izvajajo preklope med fazami. Postopki bodo prikazani v

nadaljevanju.

Nekateri proizvajalci Hallovih sond so:

- Melexis,
- Allegro,
- FW Bell,
- Micronas,
- Samsung in
- Texas Instruments.

2.2. Preprosti postopki vodenja enosmernega motorja brez ščetak

Enosmerni motor brez ščetak je v večini primerov uporabljen v aplikacijah nižjih in srednjih moči in navorov. V osnovi ga je mogoče voditi kot enosmerni motor s ščetskami, ki pa mu moramo namesto mehanske zagotoviti elektronsko komutacijo.

Trapezna oblika porazdelitve polja v motorju je uporabljena, ker je na ta način mogoče dobiti približno pravokotno obliko tokov v posameznih fazah in s tem enosmerno obliko skupnega toka ter navora. Na zunaj se tako takšen motor gledano s stališča vodenja obnaša kot enosmerni motor s ščetskami.

V nadaljevanju bosta opisana dva preprosta postopka, ki ju srečamo v manj zahtevnih aplikacijah.

2.2.1. Ventilator v osebnem računalniku

Ventilator v osebnem računalniku (Slika 23) je zgrajen z uporabo enosmernega motorja brez ščetak z zunanjim rotorjem. Uporabljen je dvofazni motor, sistem pa omogoča vrtenje samo v eno smer. Tudi sicer je vodenje zelo preprosto.

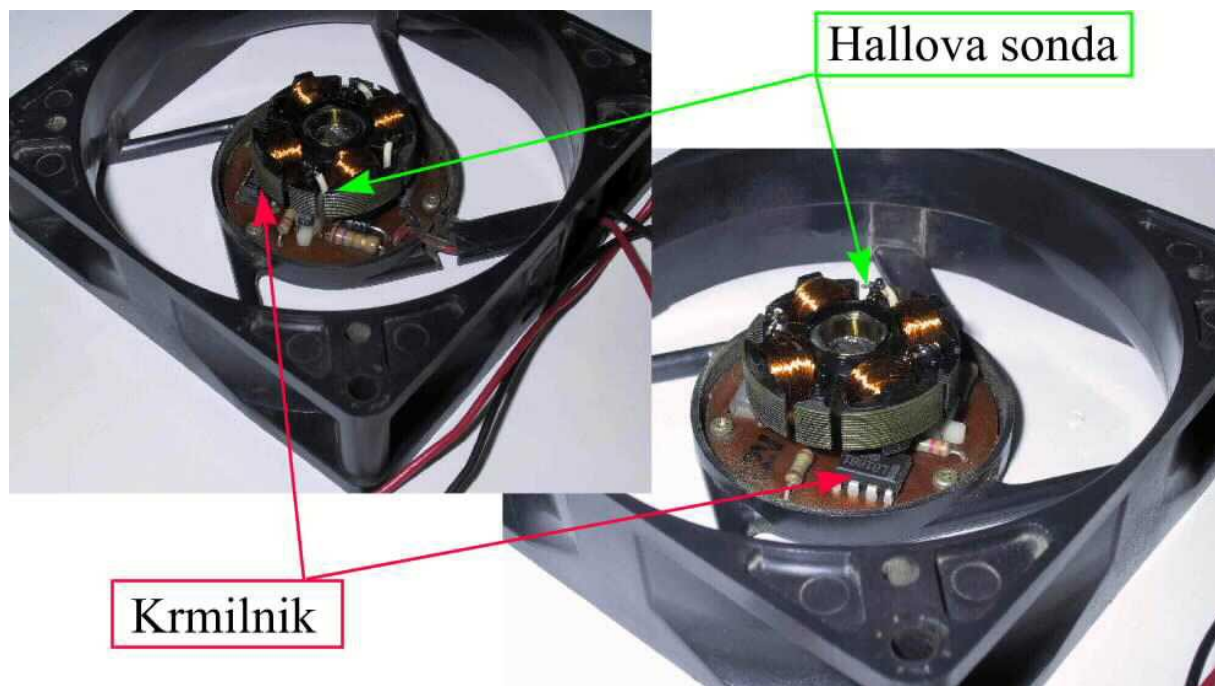


Slika 23: Ventilator v osebnem računalniku

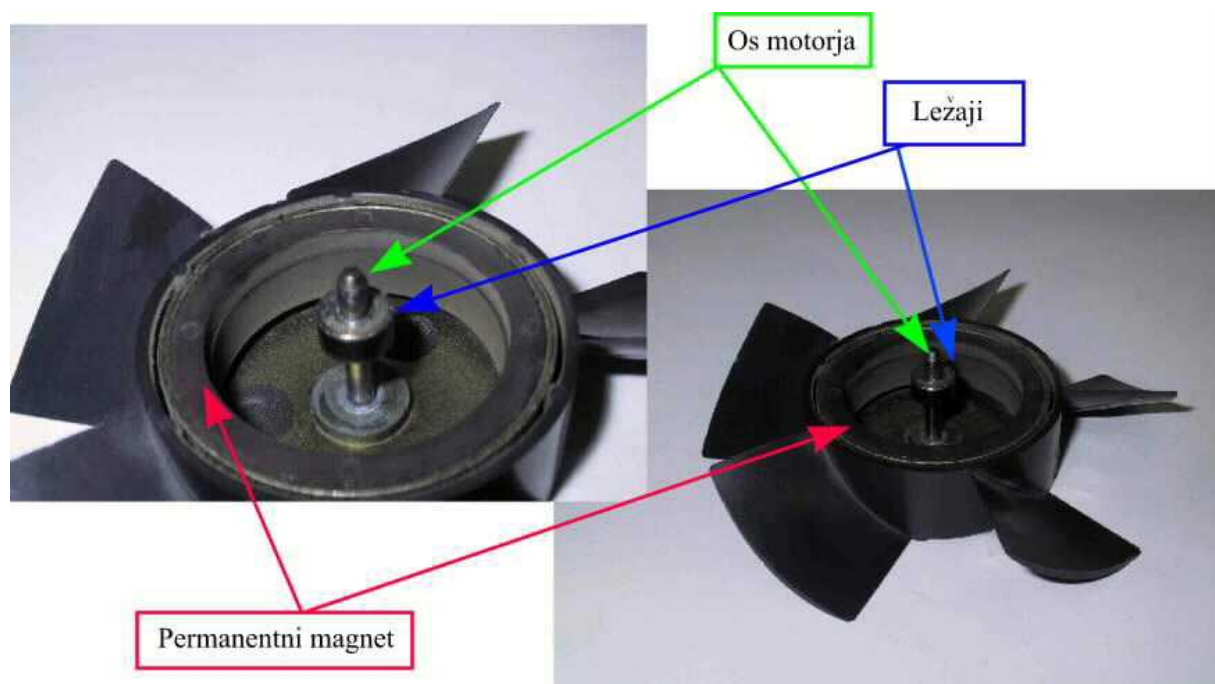
Stator (Slika 24) ima dva polova para, ki sta postavljena pravokotno eden na drugega. Vsak od njiju je priključen na eno od faz, ki ju krmilimo s tranzistorskim pretvornikom. Na sliki je vidna tudi namestitev Hallove sonde, poleg tega pa tudi sistem za elektronsko komutacijo. Krmilnik je izveden z integriranim vezjem LB 1661 proizvajalca Sanyo.

Rotor (Slika 25) predstavlja cilindrični permanentni magnet. Neposredno nanj so pritrjene

lopaticice ventilatorja. Zgradba je preprosta in omogoča enostavno in ceneno izdelavo.



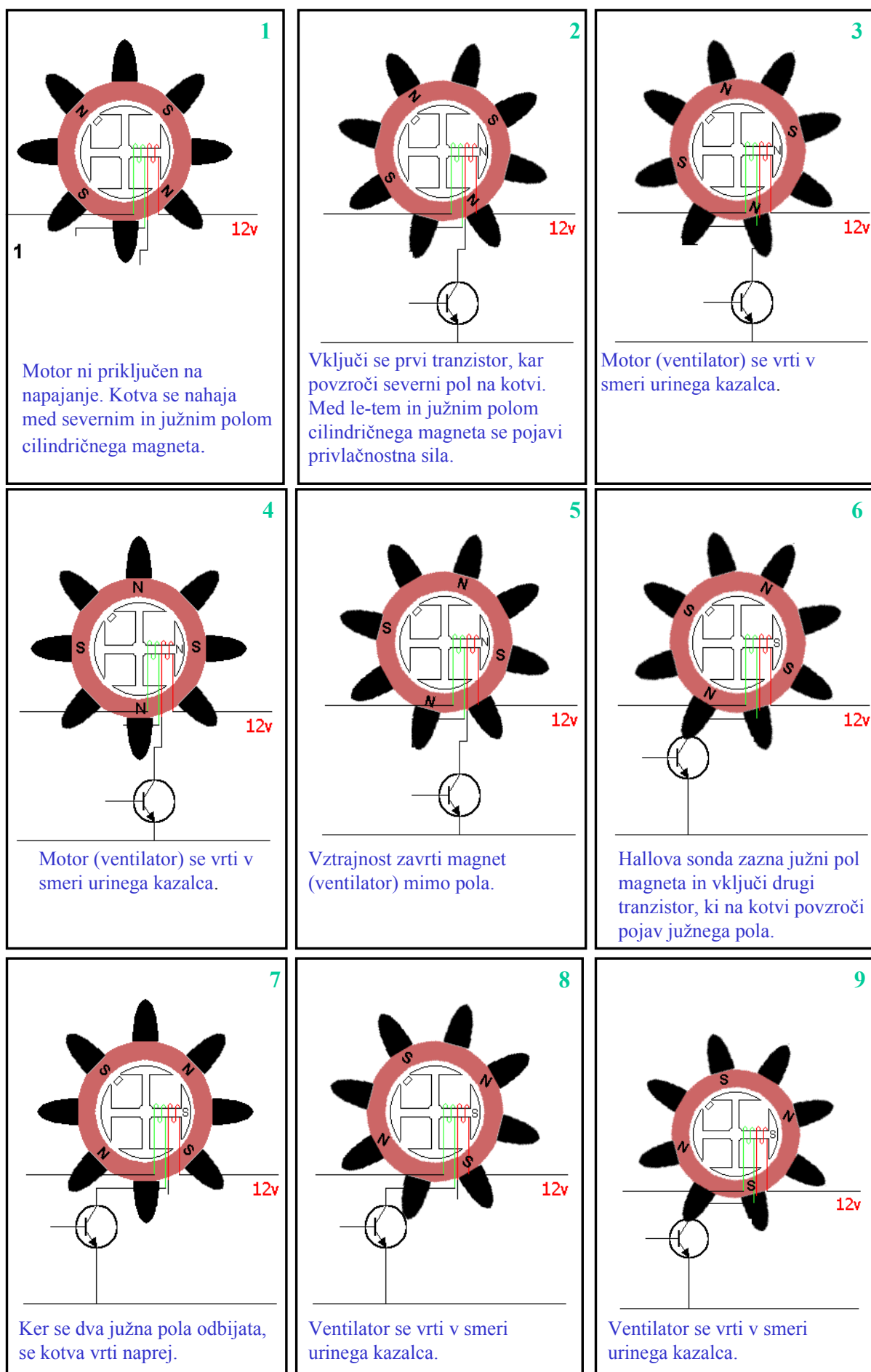
Slika 24: Stator ventilatorja v osebni računalniku



Slika 25: Rotor ventilatorja v osebni računalniku

Princip delovanja podrobno podaja Slika 26, kjer je postopek preklapov faz podan po korakih. Začetni položaj je vedno takšen, da se pola (severni in južni) trajnega magneta postavita približno na sredino med poloma statorja - kotve (korak 1).

S pomočjo Hallove sonde sistem zazna orientacijo rotorja in vključi ustrezeni tranzistor, ki skozi navitje statorja požene tok v ustrezni smeri. V podanem primeru Hallova sonda zazna severni pol in vključi se tranzistor, ki povzroči na kotvi pojav severnega pola (korak 2). Med le-tem in južnim polom trajnega magneta se pojavi privlačnostna sila, ki zavrti motor v smeri urinega kazalca (korak 3).



Slika 26: Prikaz delovanja ventilatorja v osebnem računalniku

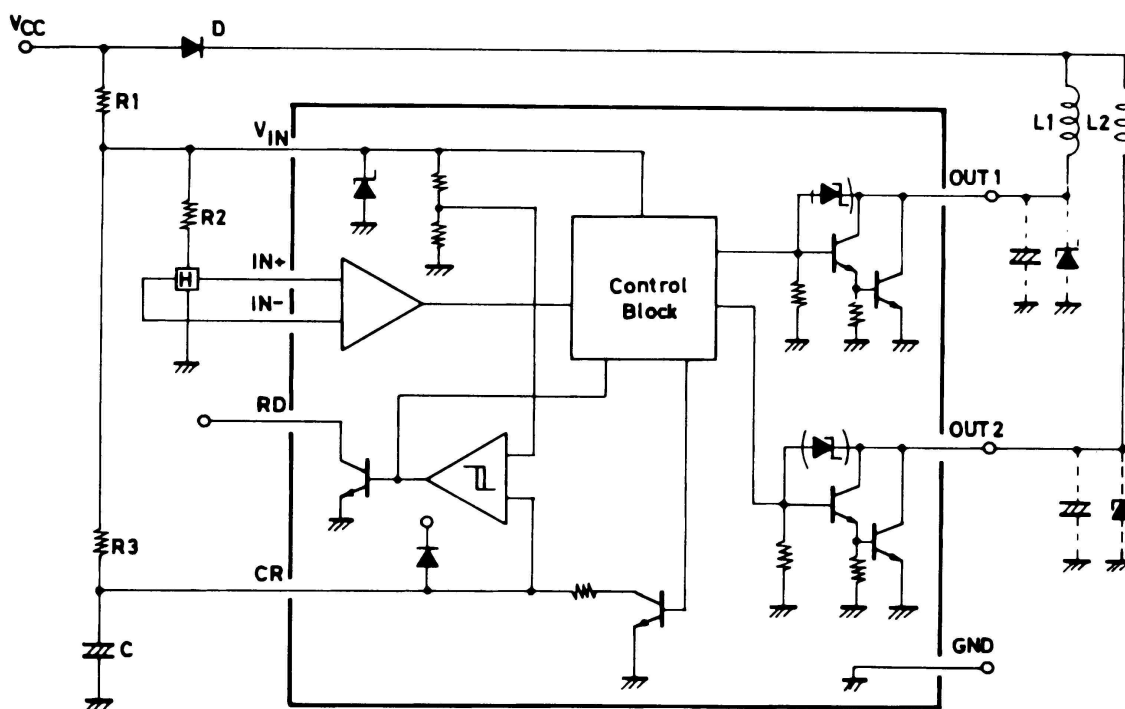
Ko se pola poravnata (korak 4) se motor ne zaustavi, temveč se zaradi vztrajnosti zavrti mimo pola (korak 5). Hallova sonda zazna južni pol magneta in vključi drugi tranzistor, ki v kotvi povzroči pojav južnega pola (korak 6).

Ker se južna pola odbijata, se motor vrti naprej v smeri urinega kazalca (korak 7, korak 8, korak 9).

Notranjo shemo integriranega vezja krmilnika kaže Slika 27. Poleg samega krmiljenja ima vezje tudi funkcijo razpoznavanja blokiranja motorja, ki deluje tako, da meri čas, ki preteče od preklopa faze in ga primerja z nastavljeno vrednostjo. Največji dovoljen čas med dvema preklopoma faz določimo z zunanjim vezjem upora in kondenzatorja.

Zenerjevi diodi v podani izvedbi nista uporabljeni (shema je podana za več tipov krmilnikov).

Podrobnejši podatki so podani v [24].



Slika 27: Krmilnik ventilatorja v osebem računalniku - LB 1661

Prikazani postopek vodenja ni primeren za kompleksnejše sisteme, saj se sistem v primeru preobremenitve na mehanski strani zaustavi in se ne požene več. Tudi sam zagon ni zagotovljen, ker motor nima dovolj polov, potreboval bi namreč vsaj tri. Zaradi tega tudi navor ni konstanten, temveč precej niha. Hitrost vrtenja ventilatorja je mogoče spreminjati s spreminjanjem napajalne napetosti v območju med 5V in 12Vkar je delovno področje integriranega vezja krmilnika.

Sistem vodenja zadošča potrebam, ker se kljub vsemu zgoraj napisanemu zavrti v več kot 99% primerov, kar za tovrstne aplikacije zadošča.

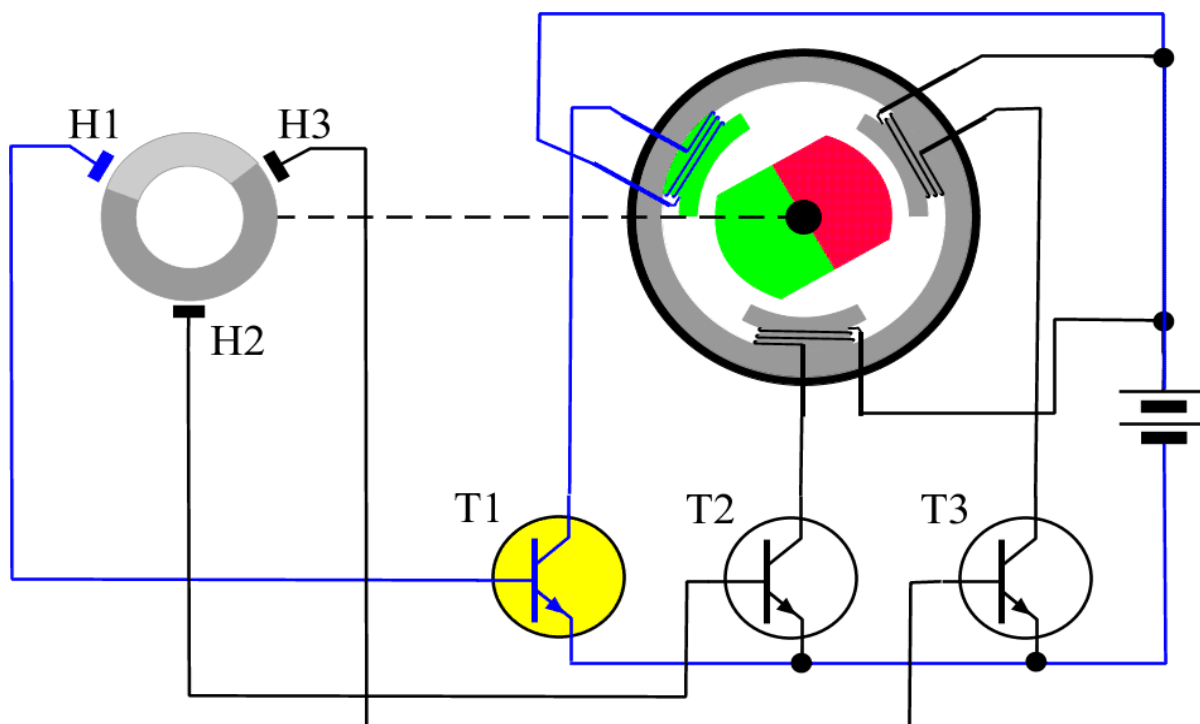
2.2.2. Preprosto vodenje trifaznega enosmernega motorja brez ščetk

Drugi primer preprostega vodenja je podan v literaturi [2] (Slika 28). Uporabljen je trifazni motor, pri čemer je vedno aktivna le ena od treh faz, medtem ko skozi drugi dve ne teče noben tok.

Na os motorja je pritrjen tudi magnetni obroč, okoli katerega so nameščeni Hallovi senzorji, ki zaznavajo njegov položaj in s tem tudi položaj rotorja.

Hallove sonde so nameščene tako, da vsaka od njih vklopi ustrezen tranzistor, ki požene tok skozi ustrezno fazo. Aktivni tranzistor je označen z rumeno barvo, označen pa je tudi aktivni

tokokrog - z modro barvo.



Slika 28: Preprosto vodenje trifaznega BLDC motorja

Na zunaj gledano je motor enosmeren, hitrost pa mu je mogoče spreminjati na dva načina. Prvi je spreminjanje napajalne napetosti celotnega vezja, kar pa zaradi nelinearnosti tranzistorjev ni primerno za delovanje pri nizkih napetostih in s tem pri nizkih hitrostih.

Drugi način uporablja pulzno širinsko modulacijo. Izveden je tako, da na krmilni vhod tranzistorja damo logična IN vrata ter priklopimo na en vhod ustrezno Hallovo sondo, na drugega pa izhod iz modulatorja. Na ta način se izognemo nelinearnostim tranzistorjev.

Tudi 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 potrebno uporabiti tranzistorski pretvornik (most) z vsaj šestimi tranzistorji (za tri faze).

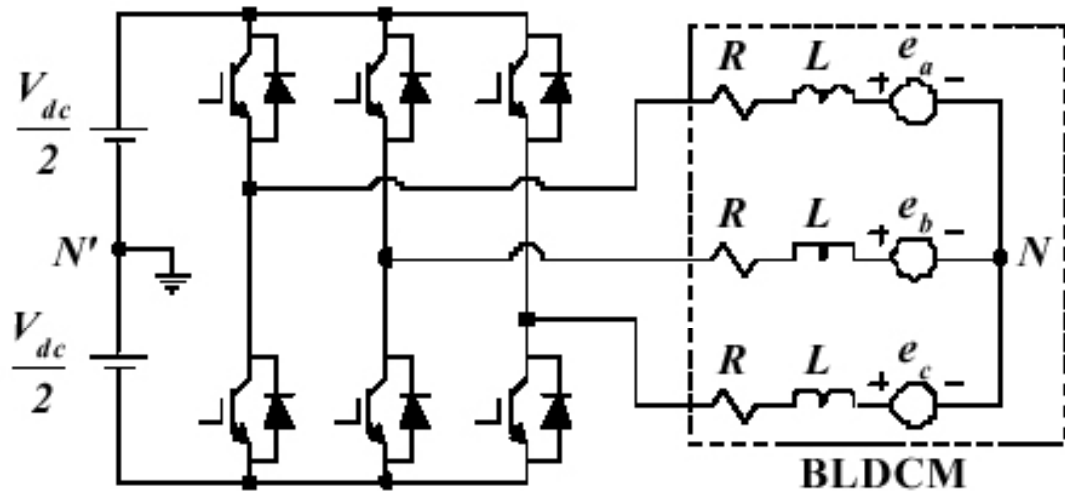
Pomembna slabost je tudi, da tok vedno teče le skozi eno fazo, s čimer se precej pokvari razmerje med maso in močjo oz. navorom motorja.

2.3. Kompleksnejši postopki vodenja enosmernega motorja brez ščetk

Kot smo že zapisali, je enosmerni motor brez krtačk v bistvu enak sinhronskemu motorju s permanentnimi magneti, od katerega se v osnovi loči le po obliki razporeditve polja in načinu vodenja. Električno shemo kompleksnejšega vodenja enosmernega motorja brez ščetk kaže Slika 29.

Uporabljen je tranzistorski most, motor pa je prikazan s svojim nadomestnim električnim vezjem. Od parametrov tega vezja se spreminjajo predvsem inducirane napetosti e_a , e_b in e_c , ki so premo sorazmerne hitrosti vrtenja motorja. Fazna navitja so vezana v zvezdo.

Nekoliko se spreminjata tudi parametra R in L . Upornost R se spreminja zaradi segrevanja, induktivnost L pa zaradi nehomogenosti zračne reže.



Slika 29: Električna shema vodenja enosmerne motorja brez ščetk

Za kompleksno vodenje potrebujemo matematični model motorja:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \left(\begin{bmatrix} L_a & L_{ba} & L_{ca} \\ L_{ba} & L_b & L_{cb} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}, \quad (1)$$

kjer je efektivna vrednost inducirane napetosti faze:

$$E = 2NlrB\omega. \quad (2)$$

Navor faze je:

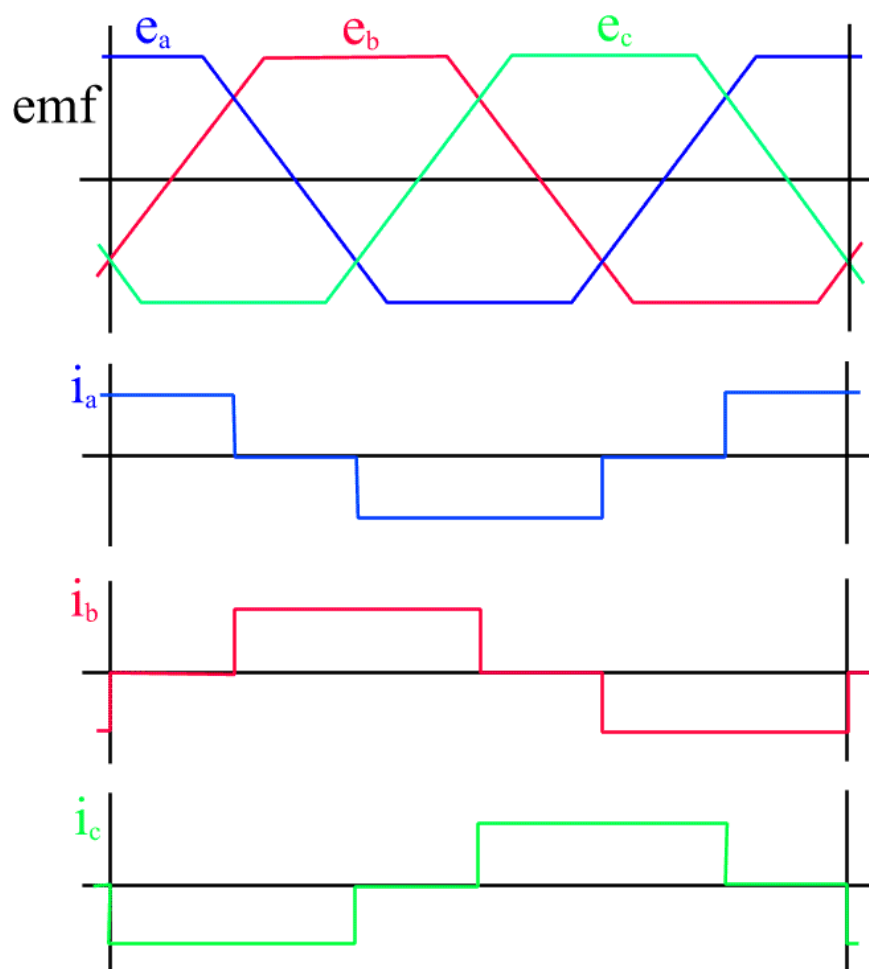
$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\Theta} - \frac{1}{2} B^2 \frac{dR}{d\Theta} + (2NBrli), \quad (3)$$

kjer je N število ovojev 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.

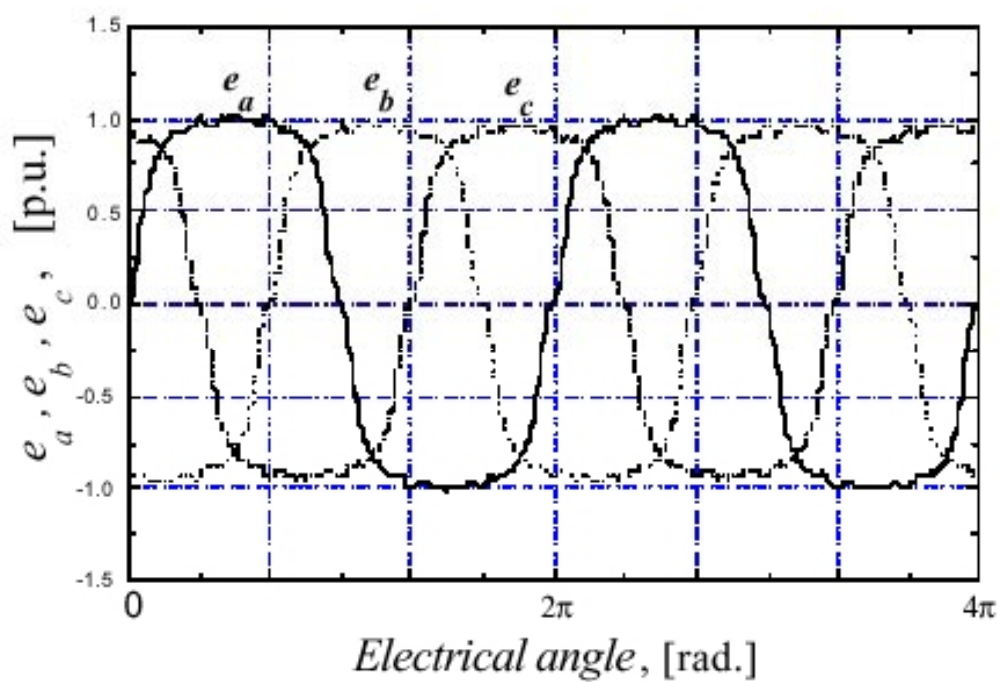
Podani model obravnava motor kot popolnoma simetričen.

Idealne oblike induciranih napetosti in tokov podaja Slika 30. Trapezna oblika inducirane napetosti je posledica trapezne porazdelitve polja v motorju, njena amplituda pa je odvisna od hitrosti vrtenja. Podani toki so pravokotni, vedno pa sta od nič različna le dva od njih.

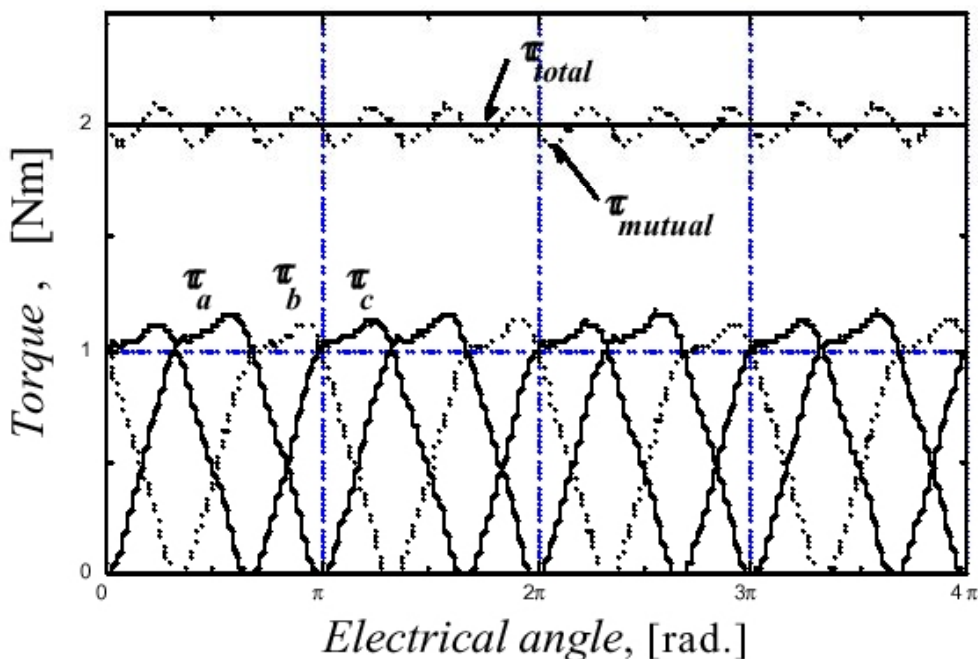
V resnici so oblike teh veličin nekoliko drugačne. Obliko inducirane napetosti kaže Slika 31. Opazimo lahko odstopanje od trapezne oblike, ki pomeni, da tudi tok skozi statorsko navitje ne more biti popolnoma pravokoten. Seveda je to v veliki meri že posledica induktivne narave navitja, vendar je vpliv inducirane napetosti neprimerno večji. Posledica je tudi oblika navora, kot jo kaže Slika 32.



Slika 30: Tokovi in napetosti enosmernega motorja brez ščetk



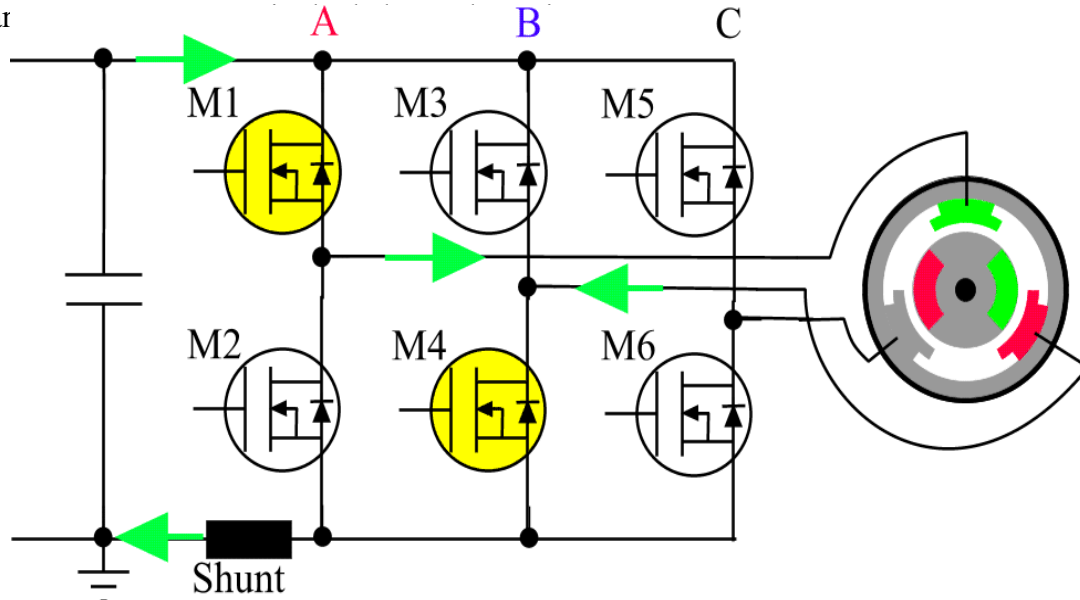
Slika 31: Dejanske inducirane napetosti enosmernega motorja brez ščetk



Slika 32: Dejanski navor enosmernega motorja brez ščetk

Takšna oblika navora lahko v sistemu vzbudi resonančne frekvence, kar bistveno vpliva na kvaliteto vodenja. še posebno v aplikacijah sledenja trajektorijam. Problem pogosto rešujejo s konstrukcijskimi prijemi, pogosto pa tudi z večjim številom faz.

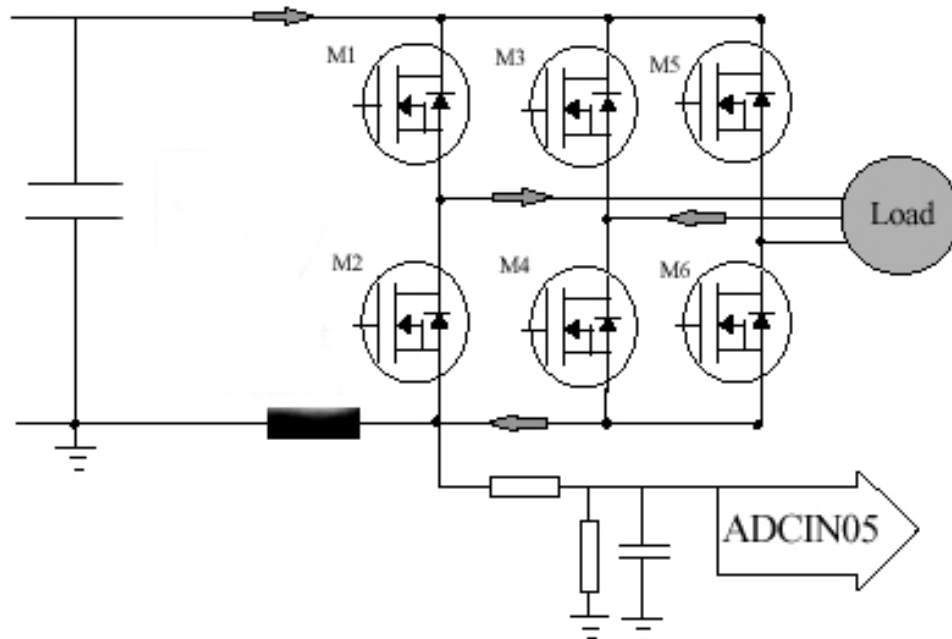
Osnovno sliko vezja kaže Slika 33. Za razliko od postopkov, uporabljenih v vodenju izmeničnih motorjev sta vedno aktivni le dve fazi, kar sicer poveča razmerje med maso in močjo motorja, vendar



Slika 33: Vodenje trifaznega BLDC z mostičnim vezjem

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. Uporabljeni upor (Shunt) služi za meritev toka (Slika 34) in zaščito pred kratkim stikom.

Ker sta vedno aktivni natančno dve fazi, je za meritev toka dovolj le en senzor, ki meri tok skozi mostič.



Slika 34: Meritev toka trifaznega BLDC motorja, vodenega z mostičnim vezjem

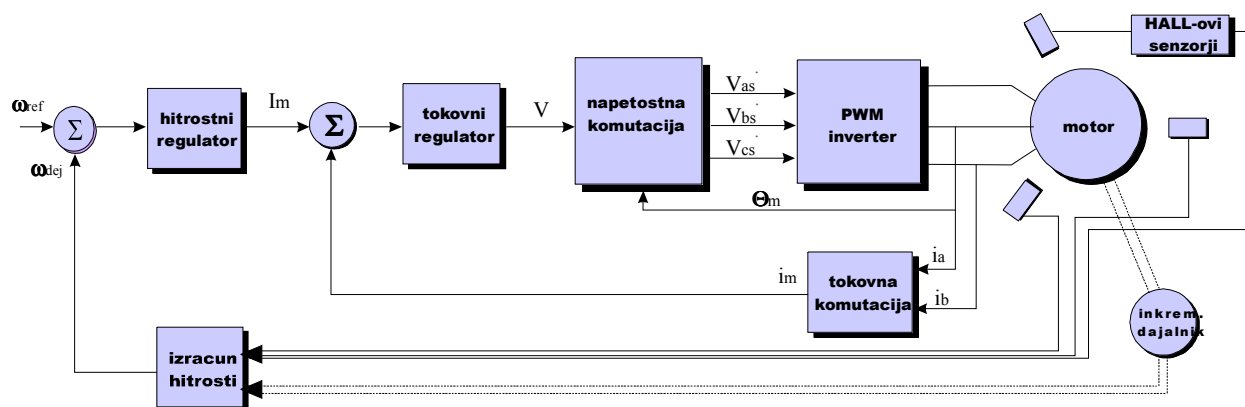
Za razliko od vektorskega vodenja izmeničnih motorjev so pri enosmernem motorju brez ščetk aktivni le osnovni vektorji, ki se jim spreminja iznos (dolžina). Spremenljivo napetost na izhodu tranzistorskega mostiča dosežemo z uporabo posebnega krmilja. Na vhode tranzistorjev poleg krmilnega signala preko logičnih vrat IN pripeljemo še signale iz pulzno širinskega modulatorja, s katerimi določamo iznos napetosti in tudi toka. Na ta način lahko sistem vodimo s spremenljivo hitrostjo in navorom. V nadaljevanju bosta prikazani dve aplikaciji vodenja enosmernega motorja brez ščetk in sicer aplikacija vodenja BLDC in BLAC.

2.3.1. Primer aplikacije vodenja BLDC

Izmerjena fazna toka se na osnovi informacije o položaju preračuna v ekvivalentni enosmerni tok i_m . Kot regulatorja hitrosti in toka sta uporabljena diskretna PI regulatorja.

Napetostni komutator izvede izračun faznih napetostnih referenc V_{as}^* , V_{bs}^* in V_{cs}^* . Na ta način PWM generira 6 izhodnih signalov za krmiljenje tranzistorjev trifaznega inverterja.

V aplikaciji BLDC (Slika 35) so uporabljeni samo štirje tranzistorji trifaznega inverterja.

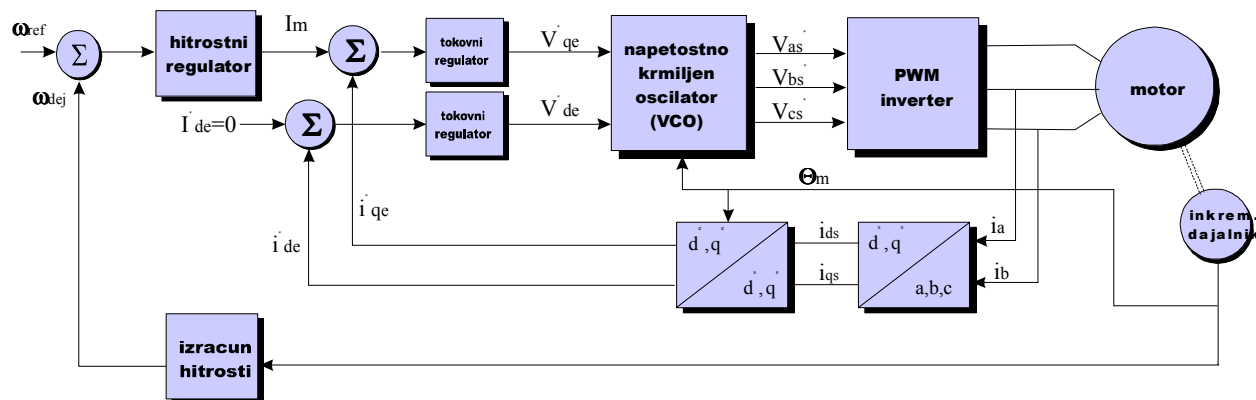


Slika 35: Blokovna shema hitrostne regulacije BLDC

2.3.2. Primer aplikacije vodenja BLAC

Aplikacija vodenja BLAC (Slika 36) temelji na vektorski metodi vodenja in uporabi inkrementalnega dajalnika za meritev položaja motorja. Za regulatorje hitrosti in tokov so uporabljeni diskretni PI regulatorji.

Izhoda tokovnih regulatorjev sta napetosti V_{qe}^* in V_{de}^* v koordinatnem sistemu rotorskega polja.



Slika 36: Blokovna shema hitrostne regulacije BLAC

2.3.3. Analiza aplikacij BLAC in BLDC

Obe aplikaciji imata nekaj skupnih značilnosti:

- Fazni tokovi se merijo s pomočjo padca napetosti na uporih v spodnji vejah trifaznega inverterja.
- Za meritev hitrosti motorja uporabljata inkrementalni dajalnik. Hitrost vrtenja motorja se izračuna iz spremembe položaja v časovnem intervalu.
- Uporabljata PI regulatorje in sicer: hitrejšo tokovno regulacijsko zanko (čas tipanja 100 μ s) ter počasnejšo hitrostno regulacijsko zanko (čas tipanja 1 ms).

Aplikaciji lahko analiziramo z definiranjem ustreznih referenčnih trajektorij, nastavljanjem parametrov regulatorjev ter opazovanjem rezultatov.

2.4. Vodenje enosmerne motorja brez ščetk brez senzorja položaja

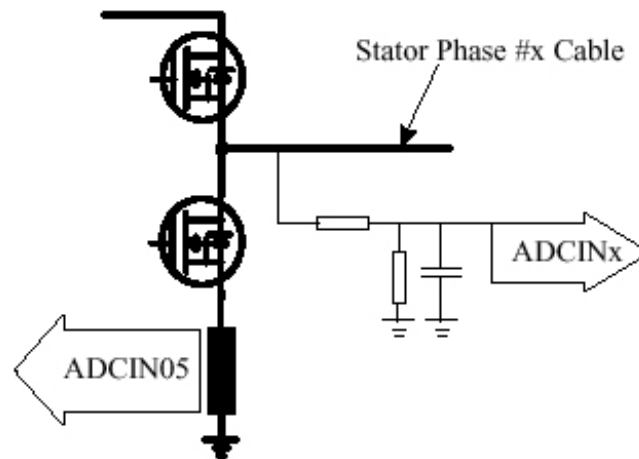
Na koncu opisov postopkov vodenja so na kratko podani še postopki vodenja brez uporabe senzorja položaja. Prednosti teh postopkov so:

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

Seveda imajo takšni postopki tudi nekaj slabosti, ki so predvsem:

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

Kot je zapisano že ob opisu delovanja vodenja s tranzistorskim mostičem, sta pri vodenju enosmerne motorja brez ščetk vedno aktivni le dve veji pretvornika. Tretja veja ni aktivna in jo lahko uporabimo za meritev inducirane napetosti, kot to kaže Slika 37.



Slika 37: Dodatna oprema za vodenje enosmerne motorja brez ščetk brez senzorja položaja

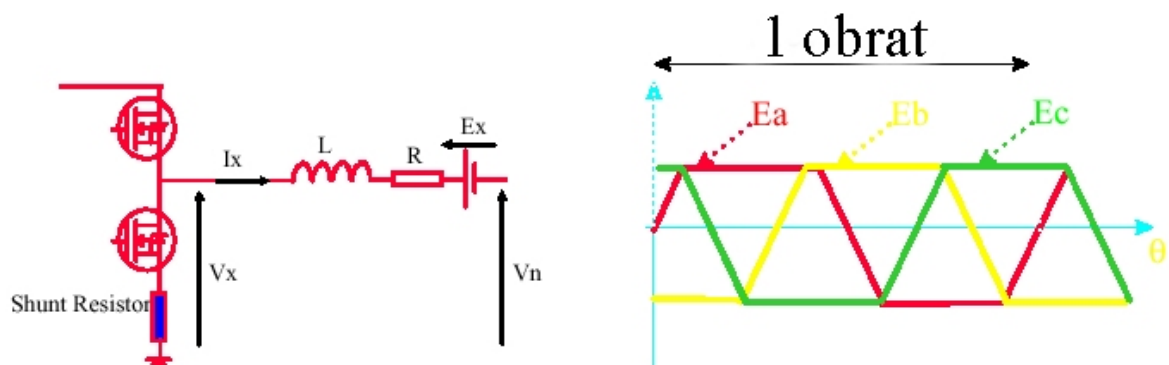
V ta namen potrebujemo matematični model faze:

$$V_x = RI_x + L \frac{dI_x}{dt} + E_x + V_n, \quad (4)$$

kjer je V_n napetost na nevtralnem priključku:

$$V_n = \frac{1}{3} \sum_{x=1}^3 V_x. \quad (5)$$

Grafični prikaz podaja Slika 38.



Slika 38: Model faze s priključki statorskega navitja BLDC motorja

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.

3. LITERATURA

- [1] CEI/IEC 27-1. Letter symbols to be used in electrical technology. Part 1, General, 6. izd., CEI/IEC, Ženeva, 1992.
- [2] I. Zagradišnik, B. Slemnik, Električni rotacijski stroji, FERi Maribor, ISBN 86-435-0382-7, 2001
- [3] I. Boldea, S.A. Nasar, *Electric drives*, CRC Press LLC, ISBN 0-8493-2521-8, 1999
- [4] W. Leonhard, *Control of Electrical Drives*, Springer-Verlag, ISBN 3-540-59380-2, 1997
- [5] EMPACT (Study of the European Market Potential and Performance Requirements of Hybrid, Electric and Alternatively Fuelled Light Commercial Vehicles), (empact.pdf), 1998
- [6] <http://www.energie.ch/themen/industrie/auto/index-eng.htm>, Primerjava pogonskih sistemov (GLOOR ENGINEERING)
- [7] <http://www.hiltechdevelopments.com/drives2.htm>, Primerjava podjetja HILTech Development Ltd.
- [8] E.C. Lee, Efficiency Comparison of Modern Variable Speed Drive Technologies, (aeffe3.pdf), 1993
- [9] Control of brushless machines, prosojnice predavanj, *Aalborg University, Institute of Energy Technology*, (mm5.pdf), 2001
- [10] J.F. Gieras, I.A. Gieras, Electric Motors - the Future, *EPE-PEMC 2000*, Košice, Slovaška, (pemc1.pdf), 2000
- [11] <http://www.siemens.de>
- [12] P. Jüttner, U.Schweikl, Software Development in Automotive Business, *Siemens*, (AT_SW_1_Introduction.pdf), 2000
- [13] H.-P. Schöner, P. Hille, Automotive Power Electronics – New Challenges for Power Electronics, *PESC'2000*, Galway, Irska, (01_2.pdf)
- [14] 42 Volts - enabling a technological revolution, auto briefing, *Special Edition, Knib Gormezano & Partners*, (42vWeb.pdf), Maj 2001
- [15] <http://auto.mit.edu/consortium/>, MIT-Consortium on advanced Automotive Electrical/Electronic Components and Systems
- [16] New Generator for High Power, 42-Volt Starter-Alternator, High Efficiency in all Speed Ranges, Siemens Automotive Systems, *Viewpoint IAA '99*, Frankfurt am Main, (at19990901e.doc), September 1999
- [17] C. Williams and J. Coles, 42V Electrical Actuation Systems for Steering and Suspension, *DIACS Conference, University of Bristol, 2001*, (Coles.pdf)

- [18] C. P. Cho, Permanent Magnet Motors/Generators for Automotive Applications, (cpcho_keynote_address.pdf), 2000
- [19] <http://www.domel.si>, Domel d.o.o., Slovenija
- [20] Power Semiconductor Applications, *Philips Semiconductors*, (APPCHP5.pdf), 1998
- [21] A. Murray, DSP Motor Control In Domestic Appliance Applications, *ECN*, www.ecnmag.com, (ECN-5-00.pdf), maj 2000
- [22] Hall Applications, (hallaps.pdf), 2000
- [23] G. Ellis, Advances in Brushless DC Motor Technology, Control, and Manufacture, *PCIM-Europe*, (PCIM 1996 Brush vs Brushless.pdf), 1996
- [24] LB 1660N, 1661, 1664N, 1665, 2-Phase Unipolar Brushless Motor Drivers, *Data-sheet*, Sanyo, 1996