



B&B  
VIŠJA STROKOVNA ŠOLA

Diplomsko delo višješolskega strokovnega študija

Program: Elektroenergetika

Modul: Elementi elektroenergetskih sistemov

**OPTIMIZACIJA IZVEDBE  
DISTRIBUIRANEGA NAVITJA PRI  
ROČNEM VLAGANJU V STATORSKE  
UTORE**

Mentor/-ica: mag. Georgi Zlatarev, univ. dipl. inž. Kandidat/-ka: Žiga Porenta  
el.

Lektor/ica: mag. Tadej Ian

Kranj, maj 2026

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se mentorju g. mag. Georgiju Zlatarevu, univ. dipl. inž. el.

Hvala g. Danijelu Rodiću iz podjetja Domel za pomoč in nasvete pri izdelavi diplomskega dela.

Zahvaljujem se tudi lektorju g. Tadeju Ianu, ki je mojo diplomsko nalogo jezikovno in slovnično pregledal.

## IZJAVA

Študent Žiga Porenta izjavljam, da sem avtor tega diplomskega dela, ki sem ga napisal pod mentorstvom mag. Georgija Zlatareva, univ. dipl. inž. el.

Skladno s 1. odstavkom 21. člena Zakona o avtorski in sorodnih pravicah dovoljujem objavo tega diplomskega dela na spletni strani šole in v institucionalnem oz. nacionalnem repozitoriju (COBISS).

Dne: 6. 5. 2026

Podpis: \_\_\_\_\_

## **POVZETEK**

V elektroindustriji zlasti pri proizvodnji elektromotorjev igrata kakovost in učinkovitost izdelave statorjev ključno vlogo pri delovanju končnega izdelka. Eden od ključnih korakov v tem procesu je vlaganje navitij v statorske utore, kjer se zahtevajo visoka stopnja natančnosti, ponovljivosti in ustrezne mehanske izvedbe. Poseben izziv predstavlja distribuirano navitje, ki zahteva večje število navitij, enakomerno porazdeljenih po različnih utorih, s čimer se izboljšata simetrija magnetnega polja in učinkovitost motorja.

Kljub razvoju avtomatiziranih rešitev ostaja ročni postopek vlaganja še vedno široko uporabljen predvsem pri manjših serijah, prototipih ali specifičnih izvedbah, kjer avtomatizacija ni ekonomsko upravičena. Ročno vlaganje pa pogosto pomeni večjo izpostavljenost napakam, daljši čas izdelave in povečano obremenitev delavcev. Zato se pojavlja potreba po optimizaciji obstoječih postopkov, pri čemer je cilj zmanjšati čas izdelave, izboljšati ergonomijo dela in zagotoviti dosledno kakovost končnega izdelka.

## **KLJUČNE BESEDE**

- distribuirano navitje,
- elektromotor,
- rotor,
- stator,
- navitje,
- magnetno polje

## **SUMMARY**

In the electrical industry, especially in the production of electric motors, the quality and efficiency of stator manufacturing play a key role in the performance of the final product. One of the key steps in this process is the winding of the windings into the stator slots, which requires a high level of precision, repeatability, and appropriate mechanical performance. A particular challenge is distributed winding, which requires a larger number of windings evenly distributed across different slots, thereby improving the symmetry of the magnetic field and the efficiency of the motor.

Despite the development of automated solutions, the manual winding process is still widely used, especially in smaller series, prototypes, or specific designs where automation is not economically justified. However, manual winding often means greater exposure to errors, longer production times, and increased worker workload. This creates a need to optimize existing processes, with the aim of reducing production time, improving work ergonomics, and ensuring consistent quality of the final product.

## **KEYWORDS**

- distributed winding,
- electric motor,
- rotor,
- stator,
- winding,
- magnetic field.

## KAZALO

<b>1</b>	<b>UVOD</b> .....	<b>1</b>
1.1	Predstavitev teme .....	1
1.2	Cilji naloge.....	1
1.3	Predstavitev okolja .....	1
1.4	Predpostavke in omejitve .....	1
1.5	Metode dela .....	2
<b>2</b>	<b>ZGRADBA IN PRINCIP DELOVANJA</b> .....	<b>3</b>
2.1	Splošno.....	3
2.2	<b>Stator</b> .....	<b>3</b>
2.2.1	Konstrukcija statorja .....	4
2.3	<b>Rotor</b> .....	<b>4</b>
2.3.1	SPM.....	5
2.3.2	IPM .....	6
2.4	$L_d$ – vzdolžna reaktanca in $L_q$ – prečna reaktanca .....	7
2.5	Elektronika in krmiljenje .....	8
2.6	Prednosti in slabosti .....	8
2.6.1	Prednosti .....	8
2.6.2	Slabosti.....	9
<b>3</b>	<b>BAKRENI VODNIK ZA NAVIJANJE STATORJEV</b> .....	<b>10</b>
3.1	Lakirani bakren vodnik.....	10
3.2	Dvopremazni lakirani vodnik .....	11
3.3	Alternativni materiali za navijanje .....	11
<b>4</b>	<b>PRAKTIČNI DEL NAVIJANJA STATORJA</b> .....	<b>13</b>
4.1	Navijalna shema.....	13
4.2	Izdelava in vstavljanje izolacije .....	15
4.3	Navijanje .....	18
4.4	Postopki električne in mehanske stabilizacije navitja statorja .....	19
<b>5</b>	<b>Merjenje izolacijske prebojnosti in upornosti navitja</b> .....	<b>20</b>
5.1	Priprava na meritev in meritev prebojnosti.....	20
5.2	Meritev električne upornosti.....	21
<b>6</b>	<b>SESTAVA MOTORJA</b> .....	<b>22</b>
6.1	Vstavljanje ohišja.....	22
6.2	Predelava prirobnice .....	23
6.3	Montaža mehanskih komponent in električnih priključkov .....	24
<b>7</b>	<b>MERITEV</b> .....	<b>25</b>
7.1	Priprava na meritev .....	25
7.2	Rezultati meritev upornosti .....	26
7.3	Rezultati meritve induktivnosti.....	27
7.4	Merjenje inducirane napetosti (BEMF) .....	28
7.5	Meritve zmogljivosti motorja .....	29
<b>8</b>	<b>ZAKLJUČKI</b> .....	<b>33</b>
<b>9</b>	<b>LITERATURA IN VIRI</b> .....	<b>34</b>

## KAZALO SLIK

Slika 1: Skica prečne in vzdolžne reaktance.....	8
Slika 2: Ponazoritev lakiranega bakrenega vodnika .....	11
Slika 3: Ponazoritev dvojnega lakiranega bakrenega vodnika.....	11
Slika 4: Primer dvojnega navitja.....	13
Slika 5: Navijalna shema.....	14
Slika 6: Rezanje izolacije .....	15
Slika 7: Žlebilnik izolacije .....	16
Slika 8: Prepogibanje izolacije .....	17
Slika 9: Vstavljanje izolacije v stator .....	17
Slika 10: Navijanje tuljav in vstavljanje v stator.....	18
Slika 11: Izoliranje med fazami .....	19
Slika 12: Povijanje z vrvjo .....	19
Slika 13: Test prebojnosti.....	20
Slika 14: Vstavljanje aluminijastega ohišja na paket.....	22
Slika 15: Predelava prirobnice .....	23
Slika 16: Prirobnica po končani obdelavi .....	24
Slika 17: Merilna naprava.....	25
Slika 18: Meritve v grafu prototipnega motorja.....	31
Slika 19: Meritve v grafu serijskega motorja .....	32

## KAZALO TABEL

Tabela 1: Možni preseki vodnikov za navijanje.....	14
Tabela 2: Meritve upornosti prototipnega motorja.....	26
Tabela 3: Meritev upornosti serijskih motorjev .....	27
Tabela 4: Merjenje induktivnosti prototipnega motorja.....	27
Tabela 5: Merjenje induktivnosti serijskih motorjev.....	28
Tabela 6: Meritev inducirane napetosti prototipnega motorja .....	28
Tabela 7: Meritev inducirane napetosti serijskih motorjev .....	29
Tabela 8: Meritve prototipnega motorja .....	30
Tabela 9: Meritve serijskega motorja .....	31

## KRATICE IN AKRONIMI

BEMF:	Inducirana protinapetost [V]
Eta a:	Skupni izkoristek [%]
Eta cont:	Izkoristek krmilne elektronike [%]
Eta m:	Izkoristek motorja [%]
f:	Frekvenca [Hz] (kolikokrat se periodični pojav ponovi v eni sekundi)
I <sub>a</sub> :	Skupni napajalni tok [A]
I <sub>m</sub> :	Motorski tok [A]
K <sub>e</sub> :	Napetostna konstanta motorja [Vs/rad]
L:	Induktivnost [H]
M:	Vrtilni moment [Nm]
n:	Število vrtljajev (rpm)
P:	Delovna moč [W]
P <sub>1a</sub> :	Skupna vhodna moč [W]
P <sub>1m</sub> :	Vhodna moč motorja [W]
P <sub>2</sub> :	Izhodna mehanska moč [W]
Pk-Pk:	Razlika med največjo in najmanjšo vrednostjo signala
R:	Upornost [Ω]
RMS:	Efektivna vrednost izmenične veličine (Root Mean Square)
T:	Temperatura [°C]
α:	Temperaturni koeficient upornosti materiala (za baker α=0,0039K <sup>-1</sup> )
ω:	Kotna hitrost motorja [rad/s]

# 1 UVOD

## 1.1 Predstavitev teme

Namen te diplomske naloge je analizirati obstoječi postopek ročnega vlaganja distribuiranega navitja v statorske utore sinhronskega motorja, identificirati ključne izzive in omejitve ter predlagati izboljšave, ki bi prispevale k bolj učinkoviti, ergonomski in zanesljivi izvedbi. V okviru naloge bo izvedena tudi primerjalna analiza pred in po implementaciji optimizacijskih ukrepov s ciljem kvantitativno ovrednotiti dosežene izboljšave.

## 1.2 Cilji naloge

Cilj diplomske naloge je analizirati obstoječi postopek ročnega vlaganja distribuiranega navitja v statorske utore ter predlagati in uvesti rešitve za optimizacijo. Z optimizacijo želimo skrajšati čas izdelave, zmanjšati možnost napak in izboljšati delovne pogoje. Uspešnost predlaganih izboljšav bo ovrednotena s kvantitativno primerjavo rezultatov pred in po uvedbi sprememb.

## 1.3 Predstavitev okolja

Domel d.o.o. je mednarodno uveljavljeno podjetje s sedežem v Sloveniji, specializirano za razvoj in proizvodnjo visoko učinkovitih elektromotorjev, puhal in komponent za različne industrijske in gospodinjne naprave. Proizvodne obrate ima v Sloveniji, Srbiji in na Kitajskem, kar mu omogoča učinkovito pokrivanje globalnega trga in tesno sodelovanje z vodilnimi svetovnimi proizvajalci. Domelovi motorji poganjajo več kot 300 milijonov naprav po vsem svetu, pri čemer izstopajo po dolgi življenjski dobi, nizki stopnji hrupa in izjemni energetski učinkovitosti, ki prispeva k nižji porabi električne energije.

Z več kot 1.300 zaposlenimi, močno razvojno usmerjenostjo in poudarkom na trajnostnem delovanju je Domel sinonim za zanesljivost, tehnološko odličnost in odgovorno poslovanje. S stalnim vlaganjem v inovacije in izboljšave proizvodnih procesov podjetje utrjuje svoj položaj kot eden vodilnih evropskih ponudnikov rešitev na področju elektromotorjev.

## 1.4 Predpostavke in omejitve

Navijanje statorja je eden ključnih korakov pri izdelavi elektromotorjev, saj neposredno vpliva na njegovo delovanje, učinkovitost in zanesljivost. Distribuirano navitje, ki je enakomerno razporejeno po statorskih utorih, omogoča boljše magnetno polje, nižje izgube in tišje delovanje motorja. Pri ročnem vlaganju navitja pa se

pogosto srečujemo z izzivi, kot so dolgotrajna izvedba, možnost napak in ergonomska obremenitev delavcev. V okviru diplomske naloge bomo preverili dve hipotezi.

S spremembo obstoječega postopka ročnega vlaganja lahko dosežemo krajši čas izdelave ob enaki ali boljši kakovosti navitja. Vprašanja, na katera bomo odgovorili, so kako optimizacija vpliva na čas izdelave, ali se zmanjša število napak in kakšna je kakovost izvedbe po spremembi. Odgovore bomo pridobili z opazovanjem in beleženjem časa vlaganja, analizo napak ter oceno kakovosti končnega izdelka.

## **1.5 Metode dela**

Za doseganje ciljev diplomske naloge bomo uporabili metode, kot so analitična metoda, primerjalna metoda ter opisna metoda v povezavi z metodo združevanja.

V teoretičnem delu smo uporabili opisno metodo in metodo združevanja. Opisna metoda je namenjena predstavitvi ključnih pojmov, postopkov in značilnosti obravnavane teme. S pomočjo teh metod smo predstavili princip delovanja elektromotorja, pomen distribuiranega navitja, značilnosti ročnega vlaganja navitja v statorske utore ter ergonomske in tehnološke zahteve. Te informacije smo podkrepili s primerjavami ugotovitev različnih avtorjev in virov.

V raziskovalnem delu smo uporabili analitično metodo, kjer smo proces ročnega vlaganja razdelili na posamezne faze: pripravo delovnega mesta, potek vlaganja navitja, uporabo orodij in pripomočkov ter končno preverjanje kakovosti izdelave. Prav tako smo analitično obravnavali obstoječe težave, časovne izgube in ponavljajoče se napake. Z enako metodo smo analizirali tudi časovno učinkovitost in stroške izvedbe pred in po uvedbi optimizacijskih ukrepov.

Na koncu smo uporabili še primerjalno metodo v povezavi z metodo združevanja, kjer smo rezultate lastne raziskave primerjali s podatki iz literature, preteklih študij primerov in izkušnjami iz industrije. Tako smo lahko celostno ocenili učinkovitost predlaganihboljšav ter njihovo uporabnost v praksi.

## 2 ZGRADBA IN PRINCIP DELOVANJA

### 2.1 Splošno

Permanentno-magnetni sinhronski motor (PMSM – Permanent Magnet Synchronous Motor) je sinhronski izmenični električni motor, pri katerem magnetno vzbujanje rotorja zagotavljajo trajni magneti. Motor je najpogosteje trifazni, lahko pa je tudi večfazni, odvisno od zahtevanih zmogljivosti in aplikacije.

(Chapman, 2011; Hughes in Drury, 2019).

Osnovno načelo delovanja temelji na ustvarjanju vrtilnega magnetnega polja v statorju, ki nastane zaradi trifaznega izmeničnega toka. Rotor, ki vsebuje trajne magnetne, se zaradi elektromagnetne interakcije vrti popolnoma sinhrono s tem poljem. Sinhronska vrtilna hitrost je določena s frekvenco napajanja in številom polov:

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p}$$

$n_s$  = sinhronska vrtilna hitrost ( $\text{min}^{-1}$  ali rpm.),

$f$  = frekvenca napajanja ( $\text{Hz}=\text{s}^{-1}$ ),

$p$  = število polovih parov (število rotorskih polov deljeno z 2).

Faktor 60 v enačbi predstavlja pretvorbo iz sekund v minute, saj je frekvenca podana v Hz (cikli na sekundo), vrtilna hitrost pa v obratih na minuto (Fitzgerald idr., 2013).

Ker pri PMSM motorju ni zdrsa (kot pri asinhronskem motorju), je hitrost rotorja enaka hitrosti vrtilnega magnetnega polja statorja. Zaradi odsotnosti rotornih bakrenih izgub dosegajo ti motorji visoke izkoristke in veliko gostoto moči (Wildi, 2006; Mohanraj idr., 2022).

### 2.2 Stator

Stator permanentno-magnetnega sinhronskega motorja (PMSM) je konstrukcijsko enak statorju klasičnega trifaznega sinhronskega ali asinhronskega motorja. Njegova osnovna naloga je ustvarjanje vrtilnega magnetnega polja, ki omogoča nastanek elektromagnetnega navora.

### 2.2.1 Konstrukcija statorja

Stator je sestavljen iz

- **laminiranega Fe-Si paketa (elektropločevine)** jedro statorja je izdelano iz tankih pločevin iz silicijevega železa (Fe-Si), ki so med seboj električno izolirane. Laminacija zmanjšuje vrtilčne tokove in s tem izgube ter segrevanje.
- **Izolacija** v statorju električno ločuje paket statorskih lamel od navitja.
- **Trifaznega porazdeljenega navitja** je razporejeno po utorih tako, da tvori tri faze, med katerimi je električni fazni zamik  $120^\circ$ . Takšna razporeditev omogoča tvorbo skoraj sinusne porazdelitve magnetnega polja v zračni reži.

Ko trifazno navitje napajamo z izmeničnim tokom, se zaradi faznega zamika med tokovi ustvari vrtilno magnetno polje. To polje se vrti s sinhronsko kotno hitrostjo, ki je podana z enačbo:

$$\omega_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p}$$

$\omega_s$  = sinhronska krožna frekvenca / kotna hitrost (rad/s),

f = frekvenca napajanja (Hz),

p = število polovih parov (število rotorskih polov deljeno z 2).

Iz enačbe je razvidno, da je kotna hitrost sorazmerna frekvenci napajanja in obratno sorazmerna številu parov polov. Pri PMSM motorju se rotor vrti z enako kotno hitrostjo kot vrtilno magnetno polje statorja.

V statorju nastajajo izgube:

- bakrene izgube ( $I^2R$  izgube) v navitju,
- histerezne in vrtilčne izgube v laminiranem paketu.

Ker je pri PMSM motorju rotor brez vzbujevalnega navitja, predstavlja stator glavni vir električnih izgub, zato je optimizacija navitja ključnega pomena za izboljšanje izkoristka motorja (Bakshi in Bakshi, 2020).

### 2.3 Rotor

**Rotor permanentno-magnetnega sinhronskega motorja** je vrteči se del stroja, katerega osnovna naloga je ustvarjanje stalnega magnetnega polja. Za razliko od klasičnega sinhronskega motorja z vzbujevalnim navitjem je pri PMSM (ang. Permanent Magnet Synchronous Machine) magnetno vzbujanje realizirano s trajnimi magneti (Zagradišnik in Slemnik; 2023; Hanselman, 2003).

Vzbujanje rotorja ustvarjajo trajni magneti, najpogosteje:

- **NdFeB** (neodim–železo–bor) – zelo visoka energijska gostota (najvišji produkt energije  $BH_{max}$ ), visoka remanenca, vendar omejena temperaturna stabilnost brez dodatkov (npr. Dy, Tb – težke redke zemlje).
- **SmCo** (samarij–kobalt) – odlična temperaturna stabilnost in visoka koercitivnost, nekoliko nižji  $BH_{max}$  v primerjavi z NdFeB, bistveno bolj odporen na korozijo.
- **Feritni magneti (Ba/Sr feriti)** – cenovno ugodni in kemično stabilni, vendar z bistveno nižjo energijsko gostoto in remanenco.

Ker magnetno polje ustvarjajo trajni magneti:

- ni potrebe po rotorskem vzbujevalnem toku,
- ni drsnih obročev ali ščetk,
- ni bakrenih izgub v rotorju,
- zmanjšano je segrevanje rotorja,
- dosežen je višji skupni izkoristek motorja.

Glede na razporeditev trajnih magnetov na rotorju ločimo dve osnovni izvedbi permanentno-magnetnih sinhronskih motorjev: SPM (Surface Permanent Magnet) oziroma motor z neizraženimi poli in IPM (Interior Permanent Magnet) oziroma motor z izraženimi poli (Zagradišnik in Ritonja, 2025).

V tej nalogi obravnavam SPM izvedbo motorja, pri kateri so trajni magneti nameščeni neposredno na površini rotorja.

### 2.3.1 SPM

Surface Mounted Permanent Magnet. Pri tej izvedbi so magneti pritrjeni na zunanjo površino rotorja. Takšna konstrukcija je razmeroma enostavna in magnetna struktura rotorja je približno simetrična.

Značilnosti SPM motorja so:

- enostavna konstrukcija,
- skoraj brez magnetne izraženosti (saliency),
- približno enaki vzdolžna in prečna reaktanca:

$$L_d \approx L_q,$$

$L_d$ = vzdolžna reaktanca,

$L_q$ = prečna reaktanca.

Ker razlika med  $L_d$  in  $L_q$  praktično ne obstaja, je reluktančni prispevek k navoru zanemarljiv. Elektromagnetni navor SPM motorja nastaja predvsem zaradi interakcije med magnetnim poljem trajnih magnetov na rotorju in vrtilnim magnetnim poljem statorja (Miller, 1989; Krishnan, 2010; Kim, 2017).

Elektromagnetni navor lahko zapišemo kot:

$$T_m = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \Psi_{TM} \cdot i_q,$$

$T_m$ = elektromagnetni navor motorja (Nm),

$3/2$ = konstanta, ki izhaja iz trifaznega sistema in Parkove transformacije,

$p$ = število polovih parov (število rotorskih polov deljeno z 2),

$\Psi_{TM}$ = magnetni pretok trajnih magnetov (Wb),

$i_q$ = prečna komponenta statorskega toka (A).

### 2.3.2 IPM

Interior Permanent Magnet, druga možna izvedba permanentno-magnetnega sinhronskega motorja je IPM, pri kateri so trajni magneti vstavljeni v notranjost rotorjevega paketa.

Značilnosti SPM motorja so:

- mehansko robustnejša konstrukcija,
- izrazita magnetna izraženost,
- različni vzdolžna in prečna reaktanca:

$$L_d < L_q,$$

$L_d$ = vzdolžna reaktanca,

$L_q$ = prečna reaktanca.

Razlika med  $L_d$  in  $L_q$ , povzroči dodatni reluktančni navor, ki se prišteje magnetnemu navoru. Skupni elektromagnetni navor IPM motorja je zato sestavljen iz magnetnega in reluktančnega prispevka.

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (\Psi_{TM} \cdot i_q + (L_d - L_q) \cdot i_d \cdot i_q),$$

$T_e$  = elektromagnetni navor motorja (Nm),

$3/2$  = konstanta, ki izhaja iz trifaznega sistema in Parkove transformacije,

$p$  = število polovih parov (število rotorskih polov deljeno z 2),

$\Psi_{TM}$  = magnetni pretok trajnih magnetov (Wb),

$i_q$  = prečna komponenta statorskega toka (A),

$i_d$  = vzdolžna komponenta statorskega toka (A),

$L_d$  = vzdolžna reaktanca,

$L_q$  = prečna reaktanca.

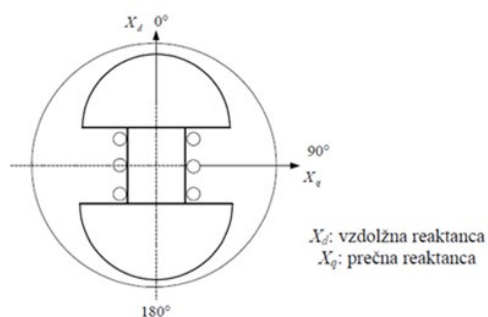
V nasprotju z IPM motorjem je pri SPM motorju, ki je obravnavan v tej nalogi, reluktančni navor zanemarljiv, saj velja približek  $L_d \approx L_q$  (Sul, 2011).

## 2.4 $L_d$ – vzdolžna reaktanca in $L_q$ – prečna reaktanca

$L_d$  predstavlja vzdolžno reaktanco statorja, merjeno v smeri rotorjevega magnetnega polja, torej vzdolž d-osi (angl. direct axis). Ta reaktanca opisuje magnetne lastnosti stroja v smeri magnetnega toka rotorjevih permanentnih magnetov in vpliva na količino magnetnega toka, ki ga ustvari statorski tok v tej smeri.

$L_q$  predstavlja prečno reaktanco statorja, merjeno pravokotno na smer rotorjevega magnetnega polja, torej vzdolž q-osi (angl. quadrature axis). Ta reaktanca opisuje magnetne lastnosti stroja v smeri, ki je pravokotna na rotorjev magnetni tok.

Pri sinhronskih strojih z izraženimi poli se zaradi neenakomerne zračne reže pojavijo različne magnetne upornosti v d- in q-smeri, zato velja  $L_d \neq L_q$ . V obravnavanem primeru pa gre za PMSM motor z neizraženimi poli, kjer je zračna reža približno enakomerna, zato sta vzdolžna in prečna reaktanca približno enaki ( $L_d \approx L_q$ ). Posledično je reluktančni navor zanemarljiv, elektromagnetni navor pa nastaja predvsem zaradi interakcije med magnetnim poljem statorja in poljem permanentnih magnetov rotorja (Krause idr., 2013; Hrovatina, 2007).



Slika 1: Skica prečne in vzdolžne reaktance  
(Vir: Hrovatina, 2007)

## 2.5 Elektronika in krmiljenje

Permanentno-magnetni sinhronski motor (PMSM) za svoje delovanje zahteva ustrezno močnostno elektroniko, saj ga ni mogoče neposredno priključiti na trifazno omrežje s konstantno frekvenco. Ker je vrtilna hitrost neposredno odvisna od frekvence napajanja, je za regulacijo hitrosti, navora in optimizacijo izkoristka nujna uporaba frekvenčnega pretvornika (inverterja) ter ustreznega krmilnega sistema.

Tipična struktura frekvenčnega pretvornika vključuje:

- Usmernik (AC/DC pretvornik) pretvori omrežno izmenično napetost v enosmerno napetost.
- DC-vmesni člen vsebuje kondenzatorje za glajenje napetosti in shranjevanje energije.
- Razsmernik (DC/AC pretvornik) s pomočjo polprevodniških stikal generira trifazno izmenično napetost z nastavljivo frekvenco in amplitudo.

## 2.6 Prednosti in slabosti

### 2.6.1 Prednosti

- Visoka gostota moči, PMSM motorji dosegajo veliko razmerje med izhodno močjo in maso oziroma volumnom motorja. Trajni magneti omogočajo visoko gostoto magnetnega pretoka brez dodatnega vzbujevalnega navitja, kar zmanjšuje dimenzije rotorja in povečuje specifično moč. To je posebej pomembno v aplikacijah, kjer sta masa in prostor omejena (npr. električna vozila).
- Visoka učinkovitost, rotor nima vzbujevalnega navitja, zato ni rotorskih bakrenih izgub. Glavnina izgub nastaja v statorju (bakrene in železne izgube) ter v močnostni elektroniki. PMSM motorji zato tipično dosegajo izkoristke nad 90 %, pri

optimiziranih izvedbah tudi nad 95 %. Posledično so toplotne obremenitve manjše, zahteve po hlajenju nižje, obratovalni stroški pa zmanjšani.

- Velik navor pri nizki hitrosti, PMSM motor razvije nazivni navor že pri zelo nizkih vrtljajih, tudi pri mirovanju (če je ustrezno krmiljen). To omogoča neposreden pogon brez mehanskih reduktorjev ali z manjšimi prestavnimi razmerji. Lastnost je posebej pomembna pri servo pogonih in električnih vozilih.
- Majhna vztrajnost rotorja, rotor z vgrajenimi trajnimi magneti je praviloma lažji od rotorja z vzbujevalnim navitjem ali kletko. Manjša vztrajnost pomeni hitrejši dinamični odziv, kar omogoča natančno regulacijo hitrosti in položaja.

### **2.6.2 Slabosti**

- Potreben inverter, PMSM motor ne more delovati neposredno na omrežno napetost s fiksno frekvenco. Za njegovo delovanje je nujna uporaba močnostne elektronike, ki poveča kompleksnost sistema, stroške in možnost dodatnih izgub.
- Nevarnost demagnetizacije, trajni magneti so občutljivi na visoke temperature, preobremenitvene tokove in kratke stike.
- Omejeno območje oslabitve polja, pri višjih hitrostih je potrebno zmanjševati učinkoviti magnetni tok (oslabitev polja), da napetost ostane znotraj omejitev inverterja.
- Cena magnetov, trajni magneti, zlasti NdFeB, vsebujejo redke zemeljske elemente, katerih cena je lahko visoka in podvržena tržnim nihanjem. To povečuje stroške motorja (Miljavec in Jereb, 2014).

### **3 BAKRENI VODNIK ZA NAVIJANJE STATORJEV**

Bakreni vodnik je osnovni material za izdelavo navitij v statorjih elektromotorjev. Zaradi svoje odlične električne in toplotne prevodnosti je tehnično čist baker najbolj razširjen material za ta namen. Vodnik mora poleg dobre prevodnosti zagotavljati tudi mehansko trdnost, toplotno obstojnost in zanesljivo električno izolacijo, saj je navitje pogosto izpostavljeno visokim temperaturam, vibracijam in elektromagnetnim obremenitvam.

Za preprečevanje kratkih stikov med posameznimi ovoji je bakreni vodnik prevlečen s tankim slojem izolacijskega laka. Ta sloj ne vpliva na električno prevodnost, a ima ključno vlogo pri zanesljivem delovanju elektromotorja. Lakirani bakreni vodnik mora biti odporen na segrevanje, mehansko obrabo in kemikalije ter hkrati omogočati kompaktno in natančno navijanje, še posebej pri ročnem vlaganju v statorske utore, kjer je prostor zelo omejen.

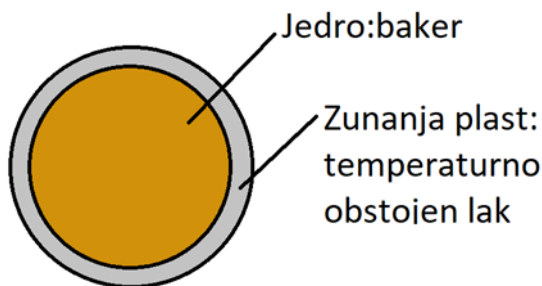
#### **3.1 Lakirani bakren vodnik**

Lakirani bakreni vodnik je standardni tip vodnika, ki se uporablja za navijanje statorjev v elektromotorjih. Gre za baker visoke čistosti, ki je zaradi svojih lastnosti – predvsem visoke električne in toplotne prevodnosti – idealen za uporabo v navitjih. Za razliko od običajnega bakrenega vodnika je ta vrsta dodatno zaščitena z izolacijskim lakom, ki preprečuje električni stik med posameznimi ovoji v navitju.

Izolacijski lak je nanesen v enem ali več slojih in je izdelan iz materialov, ki prenesejo visoke temperature ter so odporni proti mehanskim poškodbam, vlagi in kemikalijam. Debelina in vrsta laka se lahko prilagajata glede na zahteve delovanja elektromotorja – odvisno od napetosti, temperature okolja in načina vgradnje.

Lakirani vodnik omogoča kompaktno in natančno navijanje, saj je vsak ovoj električno izoliran, ne da bi bilo treba med ovoje vgrajevati dodatne izolacijske materiale. Zato se izboljša učinkovitost motorja, poveča zanesljivost in zmanjša možnost okvar zaradi prebojev.

V praksi se uporabljajo različni razredi lakov, ki določajo temperaturno obstojnost vodnika (npr. razred F – do 155 °C, razred H – do 180 °C). Poleg tega se lahko uporabljajo različne kombinacije lakov za boljšo mehansko trdnost in odpornost proti vplivom okolja.

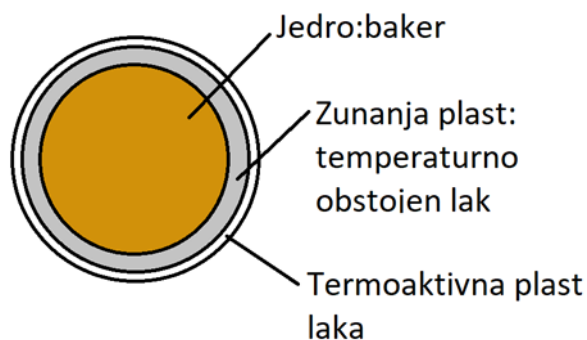


Slika 2: Ponazoritev lakiranega bakrenega vodnika  
(Lastni vir)

### 3.2 Dvopremazni lakirani vodnik

Dvopremazni lakirani vodnik ima dva sloja izolacijskega laka. Prvi sloj je zasnovan tako, da se ob prvem segrevanju motorja delno zmežča in steče, kar omogoča spojitve ovojev med seboj ter izboljša mehansko stabilnost navitja. Drugi sloj zagotavlja dodatno električno in mehansko zaščito, ki ostane obstojna tudi po toplotni aktivaciji prvega sloja.

Takšen vodnik omogoča kompaktno, trdno in varno navitje brez dodatne impregnacije. Pogosto se uporablja pri ročnem vlaganju statorjev, kjer sta pomembni natančnost in zanesljivost pri dolgotrajnem obratovanju motorja.



Slika 3: Ponazoritev dvojnega lakiranega bakrenega vodnika  
(Lastni vir)

### 3.3 Alternativni materiali za navijanje

Čeprav je baker najpogostejši material za navijanje elektromotorjev, se v določenih primerih uporablja tudi aluminijasti vodnik. Aluminij je lažji in cenejši, vendar ima približno 60 % nižjo električno prevodnost kot baker, zato je za enako zmogljivost potreben večji presek vodnika.

Uporablja se predvsem v aplikacijah, kjer so stroški in masa pomembnejši od dimenzij ali učinkovitosti – na primer v avtomobilski industriji in manjših napravah. Pri uporabi aluminija je treba upoštevati tudi posebnosti pri spojih, izolaciji in mehanski obdelavi, saj je material mehkejši in bolj občutljiv na poškodbe kot baker.

## 4 PRAKTIČNI DEL NAVIJANJA STATORJA

V tem poglavju se bomo posvetili postopku dela in ugotovitvam.

### 4.1 Navijalna shema

Prikazana navijalna shema predstavlja razgrnjeno obliko statorskega navitja trifaznega električnega stroja. Utori statorja so prikazani linearno, čeprav so v realnem stroju razporejeni po obodu statorskega paketa. V vsakem utoru sta nameščeni dve stranici tuljav (zgornja in spodnja plast), kar pomeni, da gre za dvoslojno navitje.



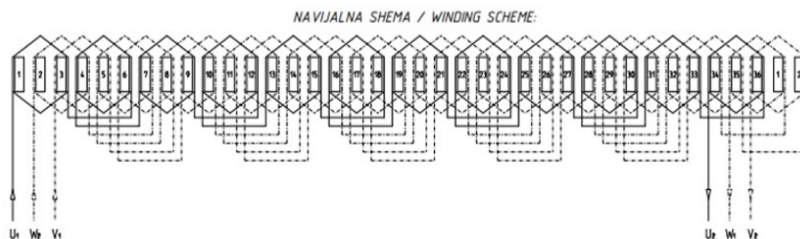
Slika 4: Primer dvojnega navitja  
(Lastni vir)

Navitje je razdeljeno na tri faze (U, V in W), katerih začetki in konci so označeni na priključnih sponkah (npr. U1, V1, W1 ter U2, V2, W2). Posamezne tuljave so med seboj povezane v fazne skupine, ki so medsebojno prostorsko zamaknjene za  $120^\circ$  električnih, kar omogoča nastanek vrtilnega magnetnega polja pri trifaznem napajanju (Wu, 2006).

Besedilo diplomske Korak tuljave (razdalja med obema stranicama iste tuljave) določa razmik med utoroma, v katerih sta nameščeni stranici tuljave. V našem primeru sta stranici tuljave v utorih 1 in 4, zato sta med njima dva utora. Tuljava tako premosti dva utora. Glede na prikaz gre za porazdeljeno navitje, saj je posamezna faza razporejena po več utorih. Takšna izvedba zmanjšuje višje harmonske komponente magnetnega polja in izboljšuje sinusno obliko inducirane napetosti (Srb, 1990).

$y = 3$  utori

$y$  = korak tuljave



*Slika 5: Navijalna shema*  
(Vir: Domel, 2014)

V naslednji tabeli (tabela 1) so izračunane najboljše možne polnitve, preseki vodnikov. Z rumeno barvo je označen izhodiščni serijski elektromotor; z rdečo barvo so označeni preseki, ki smo jih poskusili vstaviti, ampak so za primer utorov in postopka navijanja prepolni; s sivo barvo je označeno navitje, ki sem ga uporabil.

Število zavojev na tuljavo	Število paralelnih vodnikov	Premer vodnikov (mm)	Število tuljav/režo	Presek tuljave (mm <sup>2</sup> )	Razmerje
12	3	1,4	2	55,42	1,017
12	4	1,25	2	58,90	1,081
12	5	1,12	2	59,11	1,085
12	6	1	2	56,55	1,038
12	7	0,95	2	59,54	1,093
12	8	0,85	2	54,48	1,000
12	9	0,85	2	61,28	1,125
12	10	0,8	2	60,32	1,107
12	11	0,75	2	58,32	1,071
12	12	0,71	2	57,01	1,047
12	13	0,67	2	55,00	1,010
12	13	0,71	2	61,76	1,134
12	14	0,67	2	59,23	1,087
12	15	0,63	2	56,11	1,030
12	15	0,67	2	63,46	1,165
12	16	0,63	2	59,85	1,099
12	17	0,6	2	57,68	1,059
12	18	0,6	2	61,07	1,121

*Tabela 1: Možni preseki vodnikov za navijanje*  
(Lastni vir)

## 4.2 Izdelava in vstavljanje izolacije

Pri navijanju statorjev je ena izmed ključnih faz priprava ustrezne izolacije, ki ločuje prevodnike od magnetnega jedra stroja. Izolacija mora zagotavljati visoko dielektrično trdnost, odpornost na temperaturne obremenitve in mehansko stabilnost. Najpogosteje se uporabljajo materiali, kot so v našem primeru nomex papirna izolacija; poznamo pa tudi poliestrske filme ali kompozitne izolacije.

Prvi del postopka je izrezovanje primernih velikosti trakov za vstavljanje v utore statorja.

Zaradi varčevanja s prostorom bomo za medfazno izolacijo uporabili izolacijo debeline 0,25 mm; za izolacijo med navitjem in jedrom statorja bo primernejša debelina 0,45 mm, kajti izolacija mora zdržati večje mehanske obremenitve.



*Slika 6: Rezanje izolacije*  
(Lastni vir)

Da bomo lahko izolacijo lažje oblikovali v primeren U profil, ki bo nalegal v utor statorja, smo uporabili ročno orodje za žlebljenje. To orodje nam omogoča, da je vsak kos izolacije enak in se pri prepogibanju ne zlomi (Slika 7).



*Slika 7: Žlebilnik izolacije  
(Lastni vir)*

Ko smo izolacijo narezali in naredili žlebove, sledi ukrivljanje in vstavljanje izolacije v utore statorja. Za lepše in hitrejše delo, ker je izolacije zelo trda in bi lahko naredili nelinearne upogibe, sem uporabil model, izdelan za prepogibanje izolacije



*Slika 8: Prepogibanje izolacije  
(Lastni vir)*



*Slika 9: Vstavljanje izolacije v stator  
(Lastni vir)*

### 4.3 Navijanje

Pri pripravah na navijanje statorja je bilo najprej potrebno vodnik z večjega koluta prenaviti na več manjših kolotov, saj je to omogočilo lažje rokovanje in natančnejše delo; postopek navijanja sem s tem pohitril. Ko so bili manjši koluti pripravljeni, sem moral določiti natančno mero, po kateri sem izvedel navijanje posameznih tuljav, da so ustrezale tehničnim zahtevam statorja. Ko so bile tuljave navite, sem jih uskladil po orientaciji ter jih skrbno vstavil v stator, pri čemer je bilo pomembno paziti na pravilno razporeditev in napetost vodnikov, da je bila zagotovljena pravilna funkcionalnost celotnega sestava. Pri vstavitvi v stator sem si pomagal z izolirnim papirjem. Ta mi je olajšal, da so posamezni vodniki lažje zdrsnili v utor; pri tem je izolacija nudila zaščito, da se vodnik pri vstavljanju ni podrgnil in poškodoval.



*Slika 10: Navijanje tuljav in vstavljanje v stator  
(Lastni vir)*

#### 4.4 Postopki električne in mehanske stabilizacije navitja statorja

Po navijanju tuljav sem med posameznimi fazami statorja izvedel dodatno izolacijo, in sicer tako, da sem kritične prehode in stične točke prelepil z izolirnim selotejpom. Ta postopek je izredno pomemben, saj preprečuje možnost medfaznega stika, zmanjšuje tveganje za kratke stike ter zagotavlja dolgoročno električno in termično zanesljivost navitja. Ustrezna izolacija namreč bistveno prispeva k varnemu delovanju elektromotorja in podaljšuje njegovo življenjsko dobo.

Ko je bila električna izolacija zaključena, sem konce statorja dodatno mehansko utrdil. To sem dosegel s povijanjem navitja z vrvjo, kar poveča mehansko stabilnost tuljav, zmanjšuje poškodbe od vibracij med delovanjem ter preprečuje premikanje vodnikov zaradi centrifugalnih sil. S tem je zagotovljena robustnejša konstrukcija, ki prenese obremenitve pri delovanju motorja in ohranja pravilno obliko navitja.



*Slika 11: Izoliranje med fazami  
(Lastni vir)*



*Slika 12: Povijanje z vrvjo  
(Lastni vir)*

## 5 MERJENJE IZOLACIJSKE PREBOJNOSTI IN UPORNOSTI NAVITJA

Po končanem navijanju je bilo potrebno izvesti meritev prebojne odpornosti, saj ta test predstavlja ključen korak pri preverjanju kakovosti električne izolacije navitja. Prebojna meritev omogoča odkrivanje morebitnih poškodb izolacijskega sloja, nepravilno položenih vodnikov ali neustrezno izvedene medfazne izolacije. S tem se zagotovi, da med obratovanjem ne pride do neželenih električnih prebojev, ki bi lahko povzročili okvaro motorja, zmanjšanje njegove učinkovitosti ali celo popolno odpoved naprave.

### 5.1 Priprava na meritev in meritev prebojnosti

Pred izvedbo meritev je bilo potrebno izvesti razizolacijo, kar pomeni odstraniti lak oziroma izolacijski premaz na končnih delih vodnikov. Ta postopek je nujen, saj omogoča dober električni stik med merilno opremo in vodnikom ter zagotavlja natančne in ponovljive meritve. Nepravilno ali nepopolno odstranjena izolacija bi lahko povzročila slab stik, kar bi privedlo do netočnih rezultatov ali napačne interpretacije stanja navitja.



Slika 13: Test prebojnosti  
(Lastni vir)

## 5.2 Meritev električne upornosti

Izmerjene vrednosti upornosti posameznih tuljav so bile nižje v primerjavi s tovarniško izdelanim (serijsko proizvedenim) motorjem enakih nazivnih karakteristik. Razlika je posledica uporabe več paralelnih vodnikov z večjim skupnim presekom v navitju. S tem smo povečali polnilni faktor navitja.

Meritev DC upornosti je standardni preskusni parameter električnih strojev, saj neposredno odraža geometrijo navitja (razmerje L/A) in stanje vodnika. Predstavlja tudi del rutinskih preskusov skladno z IEC standardi. V našem primeru je bila DC upornost merjena 4-vodno.

Znižanje DC upornosti neposredno zmanjšuje bakrene izgube ( $I^2R$ ) in s tem pozitivno vpliva na izkoristek stroja. AC vplivi (efekt površinskega toka in učinka bližnjih vodnikov ter konstrukcijsko pogojene dodatne izgube) v tej analizi niso obravnavani, saj se magnetna geometrija stroja ni spreminjala. Meritve so bile izvedene pri stabilizirani sobni temperaturi, rezultati pa so bili preračunani na referenčno temperaturo 20 °C. Temperatura okolice se avtomatsko meri in snema v merilnem sistemu.

Serijska (tovarniška) upornost navitja =  $R_s = 0,26 \Omega$

Izmerjena upornost navitja =  $R_m = 0,246 \Omega$

$$\Delta R = R_s - R_m = 0,26\Omega - 0,246\Omega = 0,014\Omega$$

$$\text{Izboljšava (\%)} = \frac{\Delta R}{R_s} \times 100 = \frac{0,014}{0,26} \times 100 = 0,0538 \times 100 = 5,38\%$$

Na podlagi opravljenega izračuna sem ugotovil, da sem z izvedenimi prilagoditvami dosegel 5,38-odstotno zmanjšanje upornosti statorja. Rezultat potrjuje, da so bile izbrane metode optimizacije ustrezne in učinkovite, saj znižana upornost neposredno prispeva k manjšim izgubam ter izboljšani učinkovitosti delovanja stroja.

## 6 SESTAVA MOTORJA

### 6.1 Vstavljanje ohišja

Pri montaži elektromotorja je bilo potrebno zagotoviti ustrezno prileganje aluminijastega ohišja na statorski paket z navitjem. Zaradi tesnega naležnega spoja montaža pri sobni temperaturi ni bila mogoča, zato je bilo aluminijasto ohišje pred montažo segreti v peči. Segrevanje je povzročilo toplotno raztezanje aluminija, s čimer se je začasno povečal notranji premer ohišja in omogočila enostavna namestitvev na paket z navitjem.

Peč je bila nastavljena na temperaturo približno 80 do 120 °C, kar je zadostovalo za potrebno raztezanje materiala, a hkrati ni predstavljalo tveganja za poškodbe izolacije navitja ali drugih sestavnih delov elektromotorja. Po montaži in ohlajanju ohišja na sobno temperaturo se je zaradi krčenja aluminija vzpostavil trden in zanesljiv spoj med ohišjem in statorskim paketom.

Pri izvajanju postopka je bila uporabljena ustrezna osebna varovalna oprema. Uporabljene so bile zaščitne rokavice za delo pri visokih temperaturah, zaščitna delovna obleka ter zaščitna obutev, s čimer je bila zagotovljena varnost pri rokovanju s segretim deli in pri montaži elektromotorja.



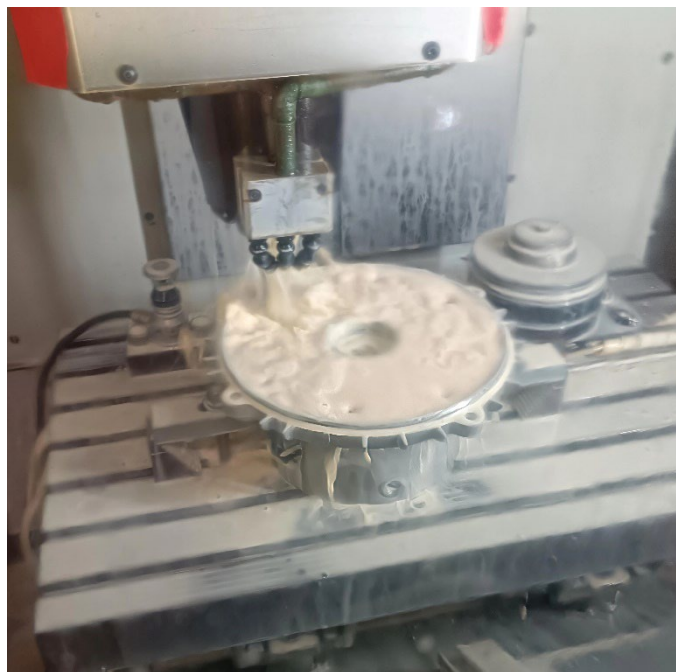
Slika 14: Vstavljanje aluminijastega ohišja na paket  
(Lastni vir)

## 6.2 Predelava prirobnice

Med postopkom sestavljanja elektromotorja je bilo ugotovljeno, da serijska prirobnica ne zagotavlja ustreznega prileganja na statorski paket z navitjem. Razlog za to so bile daljše tuljave navitja, ki so nastale kot posledica ročnega navijanja, pri katerem ni mogoče doseči enake ponovljivosti in kompaktnosti navitja kot pri strojni izdelavi. Zaradi navedenih odstopanj je bilo potrebno prirobnico konstrukcijsko predelati.

V okviru predelave prirobnice je bilo potrebno porezati hladilna rebra, saj so ta v prvotni izvedbi ovirala pravilno prileganje in montažo na statorski paket z navitjem. Obdelava hladilnih reber je bila izvedena na CNC rezkalnem stroju, kar je omogočilo natančno odstranitev materiala brez negativnega vpliva na mehansko trdnost komponente. Kljub posegu je bila zagotovljena zadostna hladilna površina za učinkovito odvajanje toplote med delovanjem elektromotorja.

S predelano prirobnico je bila omogočena pravilna montaža elektromotorja ter zagotovljeno mehansko stabilno in ni bilo več možnosti nevarnosti stika navitja z ohišjem (Kovač, 1999).



*Slika 15: Predelava prirobnice  
(Lastni vir)*



Slika 16: Prirobnica po končani obdelavi  
(Lastni vir)

### **6.3 Montaža mehanskih komponent in električnih priključkov**

V zaključni fazi izdelave je bila izvedena končna montaža elektromotorja. Vsi mehanski sestavni deli so bili pravilno nameščeni in medsebojno poravnani, nato pa so bili priviti z ustreznimi pritrdilnimi elementi in predpisanim zateznim momentom, s čimer je bila zagotovljena mehanska stabilnost celotnega sklopa.

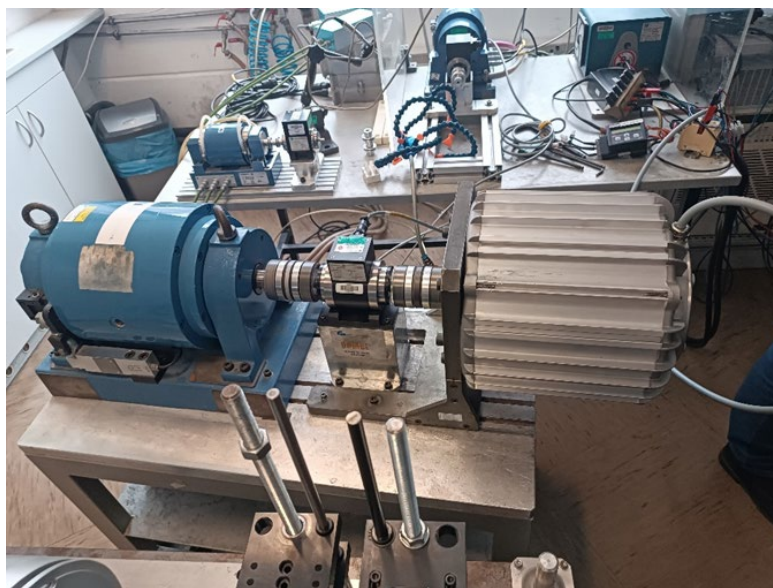
V nadaljevanju je bila izvedena namestitev električnih priključnih kablov, ki so bili povezani na priključne sponke elektromotorja v skladu z načrtom vezave. Pri tem je bila nameščena tudi ustrezna podložka, ki zagotavlja zanesljiv električni stik ter mehansko razbremenitev priključka. Po končani montaži je bila preverjena pravilnost pritrditve vseh komponent ter urejenost in varnost električnih povezav.

## 7 MERITEV

### 7.1 Priprava na meritev

Po končani montaži je bilo izvedeno testiranje elektromotorja nazivne moči 10 kW, katerega namen je bil preveriti pravilnost delovanja ter izmeriti njegove obratovalne karakteristike. Pred začetkom meritev je bilo potrebno elektromotor ustrezno mehansko pritrditi na preizkusno mizo oziroma nosilno konstrukcijo, s čimer je bila zagotovljena stabilnost in varnost med obratovanjem ter preprečeno neželjeno premikanje ali vibracije.

Po pritrditvi motorja so bile izvedene električne meritve pri različnih obremenitvah. Med testiranjem so se merili tokovi, vhodna električna moč, izhodna mehanska moč, vrtilni moment, število vrtljajev ter izkoristek motorja. Meritve so bile izvedene postopno, pri čemer se je obremenitev povečevala, rezultati pa so zbrani in prikazani v preglednici. Na podlagi izmerjenih vrednosti je bilo mogoče analizirati obnašanje elektromotorja pri različnih delovnih točkah ter ovrednotiti njegovo učinkovitost.



*Slika 17: Merilna naprava  
(Lastni vir)*

## 7.2 Rezultati meritev upornosti

Meritve upornosti navitij elektromotorja so bile izvedene s serijskim merilnikom upornosti. Pred začetkom meritev so bili elektromotorji najmanj 24 ur shranjeni v merilnem prostoru, kjer je bila stalna temperatura 20 °C, da se je zagotovilo temperaturno ravnovesje motorjev z okolico. S tem smo zmanjšali vpliv temperature na izmerjene vrednosti upornosti.

Ker je električna upornost kovinskih vodnikov temperaturno odvisna, je bilo potrebno izmerjene vrednosti po potrebi preračunati na referenčno temperaturo 20 °C. Preračun je bil izveden z uporabo linearne temperaturne odvisnosti upornosti.

Ker so bile meritve izvedene pri temperaturi, ki je zelo blizu 20 °C, so bile temperaturne korekcije majhne, vendar je bil preračun kljub temu izveden zaradi večje natančnosti in primerljivosti rezultatov.

Zaradi večje natančnosti smo pri meritvah vzeli povprečje večjih elektromotorjev. Temperatura navitja pri trajni nazivni obremenitvi je 100 °C pri temperaturi okolice 40 °C, kar pomeni, da se pri sobni temperaturi 20 °C navitje segreje na 80 °C.

Preračun upornosti na temperaturo 20 °C je podan z enačbo:

$$R_{20} = \frac{R_T}{1 + \alpha(T - 20)}$$

$R_{20}$  = upornost pri temperaturi 20 °C,

$R_T$  = izmerjeno upornost pri temperaturi,

$T$  = temperatura med meritvijo v °C,

$\alpha$  = temperaturni koeficient upornosti materiala vodnika (za baker  $\alpha=0,0039K^{-1}$ )

Merjenje upornosti:			
Naši priključki:		Izmerjeno:	Izračunano 20 °C
R (U-V)	[Ω]	0,508	0,504
R (V-W)		0,504	0,500
R (W-U)		0,507	0,503

*Tabela 2: Meritve upornosti prototipnega motorja*

(Vir: Domel, 2026)

Merjenje upornosti (serijski motorji):			
Naši priključki:		Izmerjeno:	Izračunano 20 °C
R (U-V)	[Ω]	0,545	0,533
R (V-W)		0,552	0,541
R (W-U)		0,541	0,536

*Tabela 3: Meritev upornosti serijskih motorjev*  
(Vir: Domel, 2014)

### 7.3 Rezultati meritve induktivnosti

Induktivnost predstavlja lastnost električnega vodnika oziroma tuljave, da se upira spremembam toka, saj se ob spremembi toka v navitju ustvari magnetno polje. Zato se v vodniku inducira napetost, ki nasprotuje spremembi toka. Induktivnost je odvisna od geometrije navitja, števila ovojev, magnetnih lastnosti jedra ter zračnih rež v motorju. Pri elektromotorjih ima induktivnost pomemben vpliv na dinamično obnašanje motorja, še posebej pri prehodnih pojavih, kot so zagon, spremembe hitrosti in krmiljenje z elektronskimi pretvorniki.

Meritev induktivnosti je bila izvedena z merilnikom pri frekvenci 1 kHz. To pomeni, da je merilna naprava za določanje induktivnosti uporabljala izmenični signal s frekvenco 1 kHz. Pri tej frekvenci so vplivi mehanskih gibanj rotorja zanemarljivi in meritev je stabilna in ponovljiva.

Induktivnost je možno meriti pri 50 Hz, vendar se 1 kHz pogosto uporablja kot standardna merilna frekvenca pri električnih strojih. Idealna magnetna induktivnost naj bi bila neodvisna od frekvence, vendar meritev z RLC metrom ne vključuje zgolj geometrijske induktivnosti, temveč celotno impedanco navitja pri izbrani frekvenci. Z naraščanjem frekvence se zaradi frekvenčno odvisne permeabilnosti jedra, vrtilnih tokov, izgub v materialu, efekta površinskega toka ter parazitskih kapacitivnosti spreminja tudi izmerjena vrednost. Zato rezultat odstopa od idealne magneto-statične induktivnosti.

Ker PMSM motor v realnem obratovanju deluje z inverterjem pri PWM frekvencah približno 8–20 kHz, je meritev pri 1 kHz primeren kompromis med nizkofrekvenčnim obnašanjem in dejanskimi dinamičnimi pogoji delovanja.

Merjenje induktivnosti: @ 1kHz			
Naši priključki:		Minimum:	Maksimum:
L (U-V)	[mH]	7,37	7,57
L (V-W)		7,41	7,60
L (W-U)		7,32	7,54

*Tabela 4: Merjenje induktivnosti prototipnega motorja*  
(Vir: Domel, 2026)

Merjenje induktivnosti: @ 1kHz (serijski motorji)			
Naši priključki:		Minimum:	Maksimum:
L (U-V)	[mH]	7,54	7,78
L (V-W)		7,48	7,70
L (W-U)		7,45	7,68

Tabela 5: Merjenje induktivnosti serijskih motorjev  
(Vir: Domel, 2014)

## 7.4 Merjenje inducirane napetosti (BEMF)

Inducirana napetost (angl. Back Electromotive Force – BEMF) je napetost, ki se inducira v navitjih elektromotorja kot posledica njegovega vrtenja. Nastane zaradi Faradayevega zakona elektromagnetne indukcije, ko se vodnik ali navitje giblje v magnetnem polju.

Ko skozi navitje motorja teče tok, se ustvari magnetno polje, ki povzroči navor in vrtenje rotorja. Pri tem se rotor giblje v magnetnem polju statorja, kar inducira napetost v navitjih, ki je nasprotno polaritete od napajalne napetosti. Zato se imenuje inducirana napetost.

BEMF je sorazmerna kotni hitrosti motorja:

$$E_{BEMF} = k_e \cdot \omega$$

$E_{BEMF}$  = inducirana napetost,

$k_e$  = konstanta motorja,

$\omega$  = kotna hitrost motorja

Meritev inducirane napetosti (BEMF):						
Faza	f	Pk-Pk	RMS	n	$K_e$ Pk-Pk	$K_e$ RMS
	[Hz]	[V]	[V]	[rpm]	[Vs/rad]	[Vs/rad]
U-V	100,0	518,41	194,79	1000	2,47529	1,86019
V-W	100,0	524,27	196,55	1000	2,50327	1,87695
W-U	100,0	521,15	195,54	1000	2,48834	1,86727

Tabela 6: Meritev inducirane napetosti prototipnega motorja  
(Vir: Domel, 2026)

Meritev inducirane napetosti (BEMF) (serijski motorji):						
Faza	f	Pk-Pk	RMS	n	Ke <sub>Pk-Pk</sub>	Ke <sub>RMS</sub>
	[Hz]	[V]	[V]	[rpm]	[Vs/rad]	[Vs/rad]
U-V	100,0	514,14	190,42	1000	2,43063	1,83598
V-W	100,0	512,80	189,38	1000	2,46322	1,84503
W-U	100,0	516,56	191,47	1000	2,45051	1,83927

*Tabela 7: Meritev inducirane napetosti serijskih motorjev*  
(Vir: Domel, 2014)

Meritve inducirane napetosti (BEMF) se izvajajo pri konstantni vrtljajih. Motor ima 12 polov, kar pri 1000 RPM znese 100 Hz, kar je frekvenca inducirane napetosti pri hitrosti 1000 RPM.

## 7.5 Meritve zmogljivosti motorja

Na koncu smo še merili elektromotor pri sobni temperaturi 20 °C, pri čemer smo merili hladen motor. Motor smo vrteli s hitrostjo 1600 vrtljajev na minuto v smeri urinega kazalca (CW). Pri tej hitrosti vrtenja in pri šestih parih polov je električna frekvenca enaka:

$$f = \frac{n \cdot p}{60} = \frac{1600 \cdot 6}{60} = 160\text{Hz}$$

f= električna frekvenca vrtenja magnetnega polja (Hz),

n= mehanska vrtilna hitrost rotorja (rpm),

p= število parov polov elektromotorja,

60= pretvorbeni faktor iz vrtljajev na minuto v vrtljaje na sekundo (1 minuta ima 60 sekund)

Z naraščanjem vrtilnega momenta se postopno povečujeta tok statorja ( $I_a$ ) in tok magnetizacije ( $I_m$ ), kar je posledica večje obremenitve motorja in potrebe po večji električni moči. Vhodna električna moč ( $P_{1a}$  in  $P_{1m}$ ) narašča približno linearno z obremenitvijo, kar kaže na stabilno delovanje motorja v celotnem merilnem območju.

Število vrtljajev ( $n$ ) ostaja praktično konstantno pri približno 1600 vrt/min, kar je značilno za asinhronski elektromotor in potrjuje dobro togost mehanske karakteristike motorja. Izhodna mehanska moč ( $P_2$ ) se z naraščanjem vrtilnega momenta linearno povečuje, kar potrjuje pravilno pretvorbo električne energije v mehansko delo.

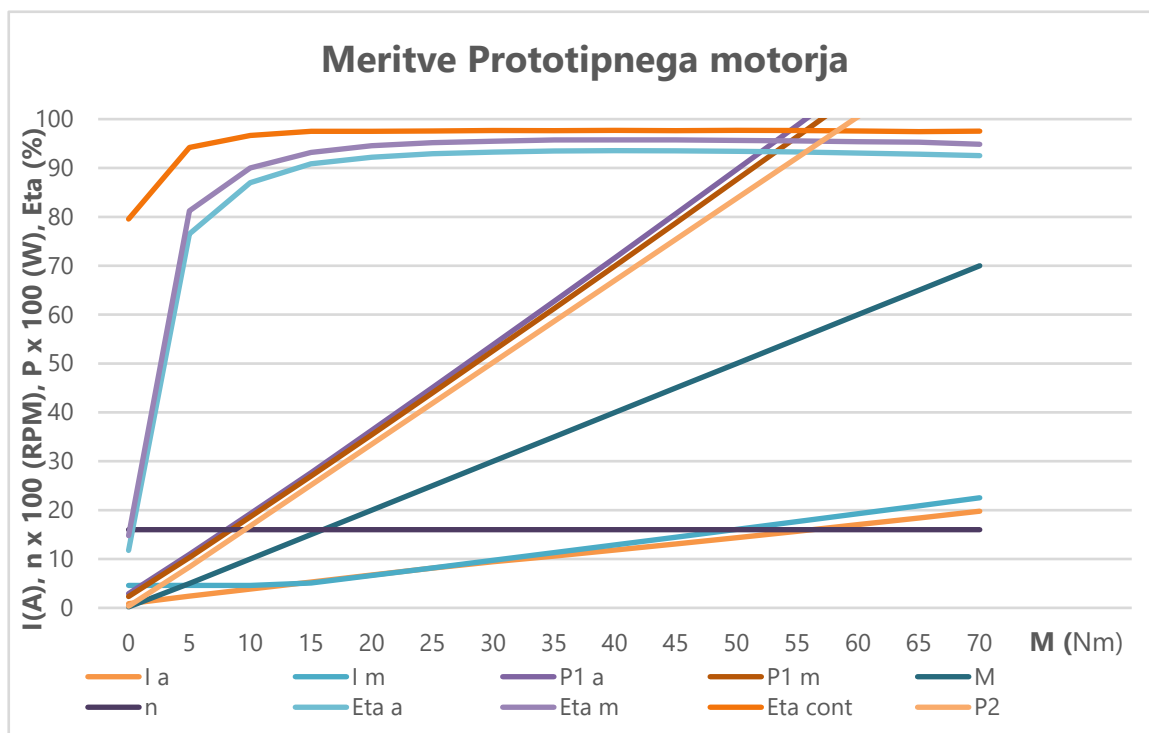
Izkoristek motorja ( $\eta_a$ ) se z naraščanjem obremenitve izrazito poveča. Pri majhnih obremenitvah je izkoristek nizek zaradi prevlade izgub, medtem ko pri večjih obremenitvah doseže visoke vrednosti in se stabilizira. Najvišji izkoristek je dosežen

v območju srednjih do višjih obremenitev, kar ustreza tipičnim obratovalnim pogojem elektromotorja.

Skupni izkoristek sistema (Eta cont) ostaja visok v celotnem območju obremenitev, kar kaže na učinkovito zasnovo in ustrezno izvedbo elektromotorja ter njegovo primernost za trajno obratovanje pri večjih obremenitvah.

<b>I a</b>	<b>I m</b>	<b>P1 a</b>	<b>P1 m</b>	<b>M</b>	<b>n</b>	<b>P2</b>	<b>Eta a</b>	<b>Eta m</b>	<b>Eta cont</b>
<b>[A]</b>	<b>[A]</b>	<b>[W]</b>	<b>[W]</b>	<b>[Nm]</b>	<b>[RPM]</b>	<b>[W]</b>	<b>[%]</b>	<b>[%]</b>	<b>[%]</b>
0,86	4,59	291	232	0,2	1600	34	11,76	14,78	79,56
2,42	4,60	1095	1031	5,0	1600	838	76,52	81,22	94,21
3,86	4,59	1926	1862	10,0	1600	1675	86,99	90,00	96,66
5,27	5,10	2765	2696	15,0	1600	2512	90,87	93,20	97,51
6,73	6,63	3633	3543	20,0	1600	3350	92,22	94,57	97,51
8,14	8,18	4508	4399	25,0	1600	4188	92,91	95,20	97,59
9,44	9,75	5390	5264	30,0	1600	5026	93,24	95,47	97,66
10,59	11,31	6272	6124	35,0	1600	5863	93,48	95,73	97,65
11,82	12,89	7163	6998	40,0	1600	6701	93,55	95,75	97,70
13,09	14,47	8063	7874	45,0	1600	7539	93,50	95,75	97,65
14,35	16,07	8968	8761	50,0	1600	8378	93,42	95,63	97,69
15,68	17,66	9877	9647	55,0	1600	9215	93,30	95,53	97,67
17,03	19,27	10801	10541	60,0	1600	10052	93,07	95,37	97,59
18,39	20,87	11730	11430	65,0	1600	10889	92,84	95,27	97,45
19,78	22,53	12674	12361	70,0	1600	11728	92,53	94,87	97,53

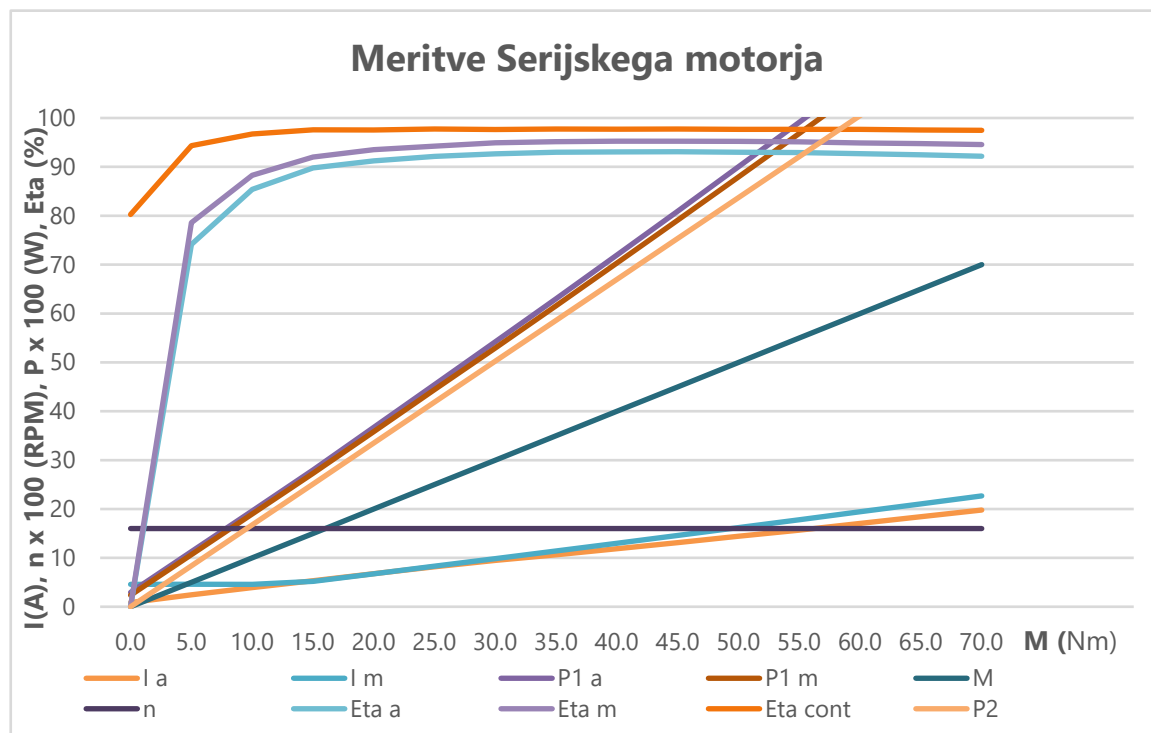
*Tabela 8: Meritve prototipnega motorja*  
(Vir: Domel, 2026)



Slika 18: Meritve v grafu prototipnega motorja  
(Vir: Domel, 2026)

$I_a$	$I_m$	$P1_a$	$P1_m$	$M$	$n$	$P2$	$\eta_a$	$\eta_m$	$\eta_{cont}$
[A]	[A]	[W]	[W]	[Nm]	[RPM]	[W]	[%]	[%]	[%]
0,86	4,58	294	236	0,0	1600	0	0,04	0,05	80,26
2,45	4,59	1130	1066	5,0	1600	837	74,12	78,58	94,33
3,90	4,58	1961	1897	10,0	1600	1675	85,40	88,28	96,74
5,31	5,18	2798	2730	15,0	1600	2512	89,79	92,01	97,59
6,78	6,73	3671	3582	20,0	1600	3349	91,22	93,51	97,55
8,19	8,29	4545	4442	25,0	1600	4187	92,13	94,25	97,75
9,48	9,84	5422	5294	30,0	1600	5025	92,68	94,92	97,64
10,64	11,41	6302	6159	35,0	1600	5861	93,01	95,16	97,74
11,89	13,00	7197	7033	40,0	1600	6699	93,07	95,24	97,72
13,13	14,60	8095	7912	45,0	1600	7536	93,10	95,25	97,74
14,42	16,20	9005	8795	50,0	1600	8374	93,00	95,22	97,67
15,68	17,81	9914	9685	55,0	1600	9211	92,92	95,11	97,69
17,05	19,43	10841	10588	60,0	1600	10049	92,69	94,90	97,67
18,41	21,05	11772	11484	65,0	1600	10885	92,47	94,78	97,56
19,79	22,68	12715	12393	70,0	1600	11722	92,19	94,58	97,47

Tabela 9: Meritve serijskega motorja  
(Vir: Domel, 2014)



Slika 19: Meritve v grafu serijskega motorja  
(Vir: Domel, 2014)

## 8 ZAKLJUČKI

V diplomski nalogi smo obravnavali optimizacijo polnitve distribuiranega navitja električnega motorja z namenom izboljšanja njegovih električnih in energijskih lastnosti. Osredotočili smo se na geometrijo navitja in izkoristek razpoložljivega prostora v utorih statorja, pri čemer je bilo navijanje izvedeno ročno, kar omogoča večjo prilagodljivost in hkrati prinaša določene omejitve z vidika ponovljivosti.

Na podlagi izvedenih izračunov je bila dosežena približno 5 % izboljšava faktorja polnjenja, kar se je neposredno odrazilo v zmanjšani električni upornosti navitja. Nižja upornost pomeni manjše bakrene izgube, kar teoretično vodi do višje učinkovitosti in boljših obratovalnih lastnosti motorja. Nižja upornost je bila pridobljena s povečanjem preseka vodnika.

Praktične meritve so pokazale, da je dejansko izboljšanje učinkovitosti motorja znašalo približno 0,5 %, kar je tudi teoretično pričakovano pri tem motorju brez konstrukcijskih sprememb. Pri postopku izdelave imajo pomembno vlogo tolerance, kot so neidealna razporeditev izolacijskih materialov ter vpliv višine čelnih navitij, ki niso neposredno vključeni v osnovnih izračunih faktorja polnitve.

Na delovanje motorja dodatno vplivajo še druge izgube, kot so železne izgube, mehanske izgube in toplotni učinki, ki skupaj določajo končno učinkovitost.

K odstopanjem lahko prispevajo tudi tolerance lastnosti mehkomagnetnih (statorsko in rotorsko jedro) in trdomagnetnih (trajni magneti) materialov ter merilne negotovosti pri eksperimentalni določitvi karakteristik motorja.

Kljub temu rezultati potrjujejo, da optimizacija polnitve distribuiranega navitja pozitivno vpliva na delovanje motorja in predstavlja smiseln pristop za izboljšanje njegove učinkovitosti. Naloga tako poudarja pomen natančnega načrtovanja navitij ter upoštevanja praktičnih omejitev pri prehodu iz teoretičnih izračunov v realno izvedbo.

## 9 LITERATURA IN VIRI

Bakshi, U. A. in Bakshi, M. V. (2020). *D.C. motors*. Pune: Technical Publications.

Chapman, S. J. (2011). *Electric machinery fundamentals*. New York: McGraw-Hill.

Domel (2014). *Ohišje s statorjem koda 766.2.685*. Železniki, Slovenija.

Domel (2026). *Interne meritve motorja s kodo 766.2.685*. Železniki, Slovenija.

Fitzgerald, A. E., Kingsley, C. Jr. in Umans, S. D. (2013). *Electric machinery*. New York: McGraw-Hill.

Hanselman, D. (2003). *Brushless permanent magnet motor design*. New York: McGraw-Hill.

Hrovatina, J. (2007). *Vodenje obratovanja EES*. Ljubljana: Fakulteta za elektrotehniko.

Hughes, A. in Drury, B. (2019). *Electric motors and drives: Fundamentals, types and applications* (5. izd.). Harlow: Pearson.

Kim, S. H. (2017). *Electric motor control: DC, AC, and BLDC motors*. Oxford: Elsevier.

Kovač, M. (1999). *Gradiva*. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo.

Krause, P. C., Wasynczuk, O., Sudhoff, S. D. in Pekarek, S. (2013). *Analysis of electric machinery and drive systems*. Hoboken: Wiley-IEEE Press.

Krishnan, R. (2010). *Permanent magnet synchronous and brushless DC motor drives*. Boca Raton: CRC Press.

Miljavec, D. in Jereb, P. (2014). *Električni stroji: temeljna znanja*. Ljubljana: Fakulteta za elektrotehniko.

Miller, T. J. E. (1989). *Brushless permanent magnet and reluctance motor drives*. Oxford: Clarendon Press.

Mohanraj, D., Arul David R., Verma R., Sathiyasekar K., Barnawi A., Chokkalingam B., Mihet-Popa L. (2022). *A review of BLDC motor: State of art, advanced control techniques and applications*. IEEE Access, 10.

Srb, N. (1990). *Tehnika namatanja elektromotorja*. Ljubljana: Tehniška založba Slovenije.

Sul, S. K. (2011). *Control of electric machine drive systems*. Hoboken: Wiley-IEEE Press.

Wildi, T. (2006). *Electrical machines, drives and power systems*. Harlow: Pearson.

Wu, B. (2006). *Modern power electronics and AC drives*. Upper Saddle River: Prentice Hall.

Zagradišnik, I. in Ritonja, J. (2025). *Električni in elektromehanski pretvorniki* (zapiski predavanj). Ljubljana: Fakulteta za strojništvo.

Zagradišnik, I. in Slemnik, B. (2023). *Električni rotacijski stroji*. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo.