

# Proces izrade bezkolektorskog istosmjernog elektromotora

---

Žufić, Mark

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Pula / Sveučilište Jurja Dobrile u Puli**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:137:178061>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-03**



Repository / Repozitorij:

[Digital Repository Juraj Dobrila University of Pula](#)



SVEUČILIŠTE JURJA DOBRILE U PULI  
Odjel za tehničke studije

**Mark Žufić**

**„PROCES IZRADE BEZKOLEKTORSKOG ISTOSMJERNOG  
ELEKTROMOTORA“**

Završni rad

Pula, 2020.

SVEUČILIŠTE JURJA DOBRILE U PULI  
Odjel za tehničke studije

**Mark Žufić**

**„PROCES IZRADE BEZKOLEKTORSKOG ISTOSMJERNOG  
ELEKTROMOTORA“**

Završni rad

**JMBAG: 0069072489, izvanredni student**

**Studijski smjer: Proizvodno strojarstvo**

**Predmet: Osnove elektrotehnike i elektronike, Osnove automatike**

**Mentor: doc. dr. sc. Nicoletta Saulig**

Pula, svibanj 2020.

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Ja, Mark Žufić, kandidat za prvostupnika smjera Proizvodno strojarstvo ovime izjavljujem da je ovaj Završni rad rezultat isključivo mogega vlastitog rada, da se temelji na mojim istraživanjima te da se oslanja na objavljenu literaturu kao što to pokazuju korištene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da niti jedan dio Završnog rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz kojega necitiranog rada, te da ikoji dio rada krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za koji drugi rad pri bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili radnoj ustanovi.

Student:

U Puli, svibanj 2020.

---

1. UVOD.....	5
2. ELEKTROMOTORI.....	6
2.1. Istosmjerni elektromotori.....	6
3. BEZKOLEKTORSKI ISTOSMJERNI ELEKTROMOTORI.....	7
4. SASTAVNI DJELOVI.....	8
4.1. Stator, rotor.....	8
4.2. Upravljački sklop.....	9
5. PROBLEMATIKA PRORAČUNA IZLAZNIH KARAKTERISTIKA.....	11
5.1. Ansoft Maxwell Software.....	11
6. PROCES IZRADE.....	12
6.1. Proračun.....	12
6.2. Modeliranje.....	17
7. SASTAVLJANJE ROTORA.....	20
8. NAMATANJE STATORA.....	23
9. HALLOVI SENZORI.....	28
9.1. Postavljanje Hallovih senzora.....	29
10. IZLAZNE KARAKTERISTIKE.....	32
ZAKLJUČAK.....	36
LITERATURA.....	37
POPIS SLIKA I GRAFOVA.....	37

## 1. UVOD

Izum elektromotora značajno je utjecao na stvaranje i razvijanje tehnologije koju danas koristimo. Gotovo sva današnja svjetska industrija nezamisliva je bez elektromotora, a zbog svoje visoke korisnosti, elektromotori sve više pronalaze svoju primjenu kao glavni pogon u svim vrstama transportnih sredstava. Od prve praktične upotrebe elektromotora 1832. do danas, elektromotori su neprestano razvijani i poboljšavani. Napretkom i s ciljem učinkovitije primjene nastale su brojne vrste elektromotora koje su rezultirale podjelom istih u različite kategorije. Jedna od najnovijih i najučinkovitijih vrsta je upravo bezkolektorski istosmjerni elektromotor. Bezkolektorski istosmjerni elektromotor zapravo je istosmjerni elektromotor bez rotorskih namotaja i mehaničke komutacije struje. Rotorski namotaji zamijenjeni su trajnim magnetima, a mehanička komutacija elektroničkom. Zamjenom tih dijelova reducirane su masa i dimenzije stroja, a znatno povećana efikasnost. Povećana efikasnost dovela je do širenja područja primjene, odnosno do veće proizvodnje ovakve vrste elektromotora. Bezkolektorski istosmjerni elektromotori upotrebljavaju se u gotovo svim osobnim računalima, u svim novijim akumulatorskim električnim ručnim alatima, električnim biciklima i skuterima, pa sve do električnih automobila i ostalih električnih vozila. U ovom radu detaljno je opisan princip rada te prednosti bezkolektorskih istosmjernih elektromotora. Opisani su i svi sastavni dijelovi te je objašnjena njihova uloga u elektromotoru. Navedeni su problemi proračuna izlaznih karakteristika i predstavljeno je rješenje problematike uz pomoć softvera za simulaciju, dizajn i analizu elektromotora. Za dokazivanje rješenja problematike, prikazan je cijeli proces izrade bezkolektorskog istosmjernog elektromotora. Detaljno je opisano sastavljanje statora i rotora, a posebna pažnja pridana je načinu namatanja zavojnica na statoru. Istaknuta je i važnost Hallovih senzora u elektromotoru te je prikazano njihovo postavljanje na stator. Prikazane su performanse analiziranog elektromotora te su priloženi grafički prikazi krivulja ovisnosti izlazne snage, momenta i korisnosti o broju okretaja elektromotora.

## 2. ELEKTROMOTORI

Elektromotori su strojevi koji pretvaraju električnu energiju u mehanički rad. Elektromotori se dijele na izmjenične i istosmjerne. Izmjenične elektromotore pokreće izmjenična struja, odnosno okretno magnetno polje koje izmjenična struja stvara. Okretno magnetno polje te zapravo prvi izmjenični elektromotor patentirao je Nikola Tesla 1887. godine. Izmjenični elektromotori sastoje se od statora na kojem se nalaze zavojnice, napajane izmjeničnom strujom, te rotora čija izvedba ovisi o vrsti elektromotora. Te vrste su asinkroni elektromotor (induciranje napona u rotoru) i sinkroni elektromotor (rotor napajan istosmjernom strujom). Izmjenični elektromotori se danas najviše koriste u industrijskim postrojenjima i kućanskim, radioničkim i laboratorijskim uređajima.

### 2.1. Istosmjerni elektromotori

Istosmjerni elektromotori dijele se na kolektorske i bezkolektorske. Kolektorski istosmjerni elektromotori sastoje se od statora i rotora te mogu raditi kao elektromotori i kao generatori istosmjerne struje. Ta dva režima rada omogućava tzv. kolektor koji se nalazi na rotoru stroja. Rotor se sastoji od jezgre sa utorima u koje je uloženi rotorski namot te kolektora na kojeg je rotorski namot spojen.<sup>1</sup> Kolektor je zapravo pravilno cilindrično geometrijsko tijelo koje se sastoji od posebnih bakrenih lamela koje su međusobno pažljivo izolirane. Po kolektoru, pri okretanju, klize grafitne četkice koje su nepomične i pričvršćene za stator, a služe za napajanje rotorskog namota. Glavni zadatak kolektora u elektromotornom režimu rada je preusmjeravanje struje u točno određenom trenutku u pojedine segmente namota rotora kako bi se postignulo kontinuirano okretanje rotora. Stator, odnosno namotaji statora mogu biti izvedeni s neovisnom, serijskom ili složenom (kompaundiranom) uzбудom ili s trajnim magnetima.

---

<sup>1</sup> Električni motor. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2020.

### 3. BEZKOLEKTORSKI ISTOSMJERNI ELEKTROMOTORI

Razvojem poluvodičke elektronike 1960-ih dovelo je do mogućnosti eliminiranja kolektora i grafitnih četkica u do tada poznatim istosmjernim elektromotorima, pa je tako nastao bezkolektorski istosmjerni elektromotor. Sastoji se od statora na kojem se nalaze namotaji te rotora na kojem se nalaze trajni magneti. Umjesto preko mehaničkog kolektora, komutacija struje kroz statorski namot realizira se pomoću senzora položaja rotora i upravljačkog kruga. Senzor položaja rotora precizno detektira točnu poziciju rotorskih magneta u odnosu na statorske zavojnice. Pomoću tog podatka upravljački sklop propušta pozitivnu ili negativnu struju kroz one zavojnice na statoru čije će nastalo magnetsko polje uzrokovati pozitivni elektromagnetni moment na rotor stroja. Na one zavojnice čije bi magnetno polje uzrokovalo negativni elektromagnetni moment na rotor stroja, upravljački sklop ne propušta nikakvu struju te se one u tom trenutku ne koriste. To je zapravo osnovni princip rada bezkolektorskih istosmjernih elektromotora.<sup>2</sup>Mogućnost održavanja konstantnog momenta pri svim mogućim brojevima okretaja, velika efikasnost, visoka izlazna snaga i dugi životni vijek, samo su neke od brojnih karakteristika koje daju prednost ovakvoj vrsti elektromotora u odnosu na ostale. Zbog tih prednosti svoju primjenu pronalaze u gotovo svim segmentima svjetske industrije. Bezkolektorski istosmjerni elektromotor za električni motocikl prikazan je na Slici 1.



Slika 1: Bezkolektorski istosmjerni elektromotor za električni motocikl (5 kW)

---

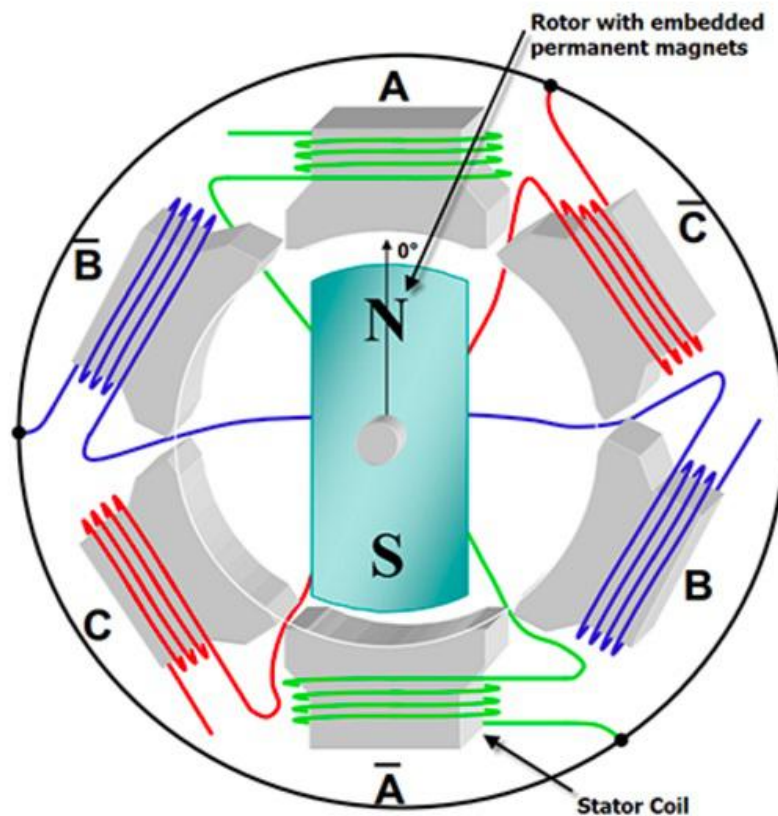
<sup>2</sup> Padmaraja Yedamale, Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals, Microchip Tehnology Inc., 2003.



## 4. SASTAVNI DJELOVI

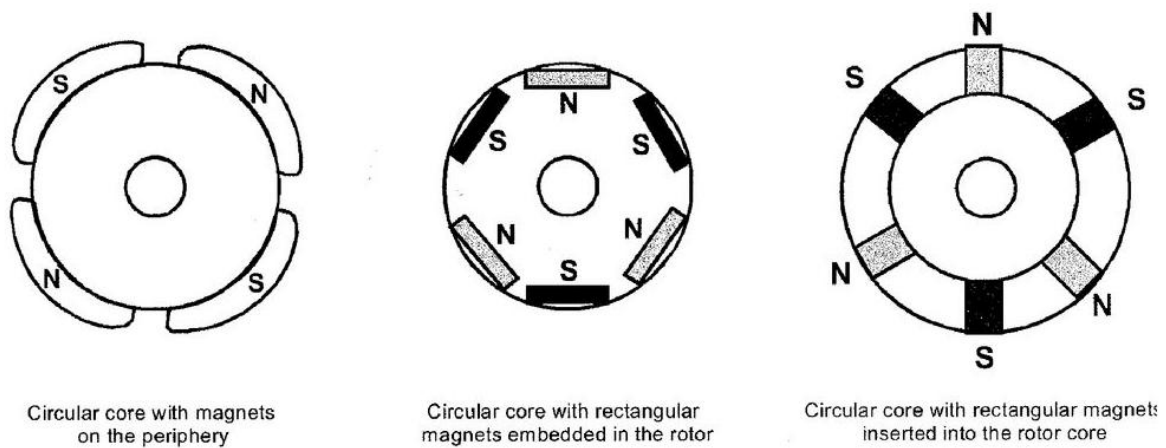
### 4.1. Stator, rotor

Stator bezkolektorskog istosmjernog elektromotora sastoji se od feromagnetnih segmenata međusobno izoliranih limova čiji oblik ovisi o vrsti izvedbe samog elektromotora (unutarnji stator ili vanjski stator). U oba slučaja, na statoru se nalaze utori u koje se postavljaju zavojnice kako bi se prilikom prolaska struje zavojnicom stvorilo usmjereno magnetsko polje. Najčešće, stator bezkolektorskog istosmjernog elektromotora sastoji se od tri zavojnice namotane oko više utora tako da oko svakog utora stvore različito magnetsko polje. To se postiže tako da se oko jednog utora zavojnica namata u jednom smjeru, a oko svakog sljedećeg utora, namatanog istom zavojnicom, u suprotnom smjeru od prethodnog (Slika 2).



Slika 2: Prikaz pravilnog namatanja statora

Rotor bezkolektorskog istosmjernog elektromotora sastoji se od jezgre i trajnih magneta. Broj trajnih magneta postavljenih na rotor ovisi o broju utora na statoru stroja. Materijal od kojeg su jezgra i trajni magneti rotora izrađeni odabiru se na temelju potrebne jačine magnetskog polja za pojedini elektromotor. Materijali koji se najviše upotrebljavaju su Neodimj (Nd), Samarij - Kobalt (SmCo) i legura Neodimija, Željeza i Bora (NdFeB). Rotor može biti vanjski i unutarnji. U oba slučaja, trajni magneti, odnosno njihovi polovi raspoređeni su naizmjenično po rotoru s obzirom na broj utora statora.



Slika 3: Primjeri rasporeda trajnih magneta po rotoru elektromotora

## 4.2. Upravljački sklop

Treći glavni dio bezkolektorskog elektromotora je upravljački sklop (Slika 4). On je najčešće odvojen od samog elektromotora pa komunikaciju uspostavlja pomoću vodiča, ali može biti i pričvršćen za samo kućište elektromotora. Upravljački sklop dijeli se na 4 osnovna elementa:

a) Inverter - sastoji se od najčešće šest MOSFET tranzistora koji mogu provoditi veliku količinu struje, a istovremeno tu količinu struje mogu uključivati i isključivati iz strujnog kruga na vrlo visokim frekvencijama

- MOSFET tranzistori ovakvog tipa su vrlo skupi pa zato ovaj dio upravljačkog sklopa spada u najskuplji dio

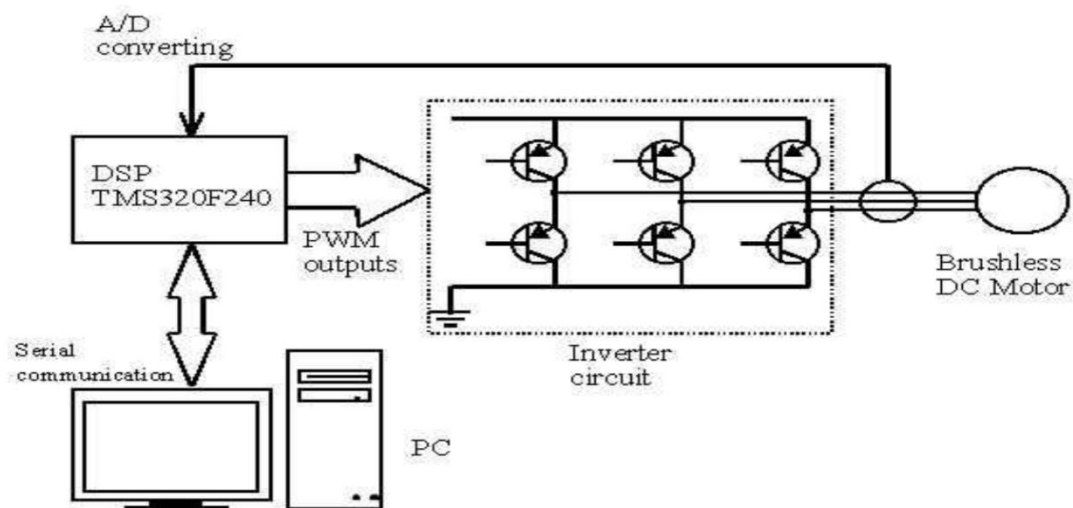
b) Logički sklopovi - primaju signal iz Hallovih senzora te dekodiraju poziciju rotora

- stvaraju široko impulsnu modulaciju (PWM - Pulse Width Modulation) koja zapravo određuje ponašanje elektromotora (npr. ulazni napon, broj okretaja)

- većina upravljačkih sklopova sadrži konektore za komunikaciju s računalima te koriste digitalni signalni procesor jer obrađuje podatke u realnom vremenu pa tako eliminira mogućnost kašnjenja

c) Temperaturna zaštita - svi MOSFET tranzistori postavljeni su na aluminijski hladnjak te zaštićeni termičkom zaštitom koja, u slučaju pregrijavanja, isključuje prolaz struje kroz tranzistore kako bi ih zaštitila od uništavanja

d) Priključak za napajanje izmjeničnom strujom - uz glavni istosmjerni priključak, ovaj priključak omogućava nam da bezkolektorski istosmjerni motor pokrećemo izmjeničnom strujom - sadrži kondenzatore koji pomažu u filtriranju napona odnosno u postizanju što preciznijeg ulaznog napona



Slika 4: Shematski prikaz upravljačkog sklopa

## 5. Problematika proračuna izlaznih karakteristika

Prije samog početka izrade novog elektromotora, potrebno je odabrati područje primjene te njegove ulazne i izlazne karakteristike. To se odnosi na dimenzije statora i rotora, ulazni napon i struju te na željenu izlaznu snagu, moment i odgovarajući broj okretaja. Kako bi se zadovoljile željene izlazne karakteristike, potrebno je točno proračunati ulogu svakog dijela elektromotora. Odgovarajući broj namota zavojnice, potrebnu jačinu magnetskog polja trajnih magneta, elektromagnetni moment kojim će svaka zavojnica djelovati na rotor, odgovarajući zračni raspored između statora i rotora, samo su neki od kompleksnih proračuna koje treba izračunati prije samog početka izrade elektromotora. Takvi proračuni u praksi i proizvodnji oduzimaju bi previše vremena da ih sami računamo, pa se zato koriste posebni računalni programi u kojima se sastavi model i proračuna sve što je potrebno za izradu novog elektromotora. Postoji nekoliko tih programa, npr. JMAG, Motor - CAD Software, Ansoft Maxwell Software, MagNet software, MotorSolve Software.

### 5.1. Ansoft Maxwell Software

Ansoft Maxwell Software je program za simulaciju elektromagnetskih polja te dizajn i analizu elektromotora, aktuatora, senzora, transformatora, zavojnica i ostalih elektromagnetskih i elektromehaničkih uređaja. Ovaj program koristi se metodom konačnih elemenata kako bi precizno riješio električne i magnetske probleme.<sup>3</sup>U metodi konačnih elemenata koristi se prijelaz iz parcijalne diferencijalne jednačbe u sustav linearnih jednačbi, koji se može zapisati u matricnoj formulaciji, odnosno diskretizira se promatranu domenu u onoliko konačnih elemenata koliko je potrebno kako bi se dobilo točno rješenje u određenim područjima. Ansoft Maxwell programski paket besplatan je i dostupan svim korisnicima Windows operativnog sustava novijih verzija. Kako bi se uspješno savladalo baratanje svim funkcijama programskog paketa nužna je edukacija i eksperimentiranje na bazičnim primjerima.

---

<sup>3</sup> Vladimir Mirković, Josip Užar, Primjena metode konačnih elemenata u građevinarstvu, 2012.

## 6. PROCES IZRADE

Potrebno je stvoriti elektromotor koji će sa određenim ulaznim podacima u potpunosti zadovoljavati željene izlazne podatke i uz to imati najveću moguću korisnost.

Ulazni podaci - maksimalni ulazni napon -  $U = 36$  [V]

- maksimalna ulazna struja -  $I = 25$  [A]

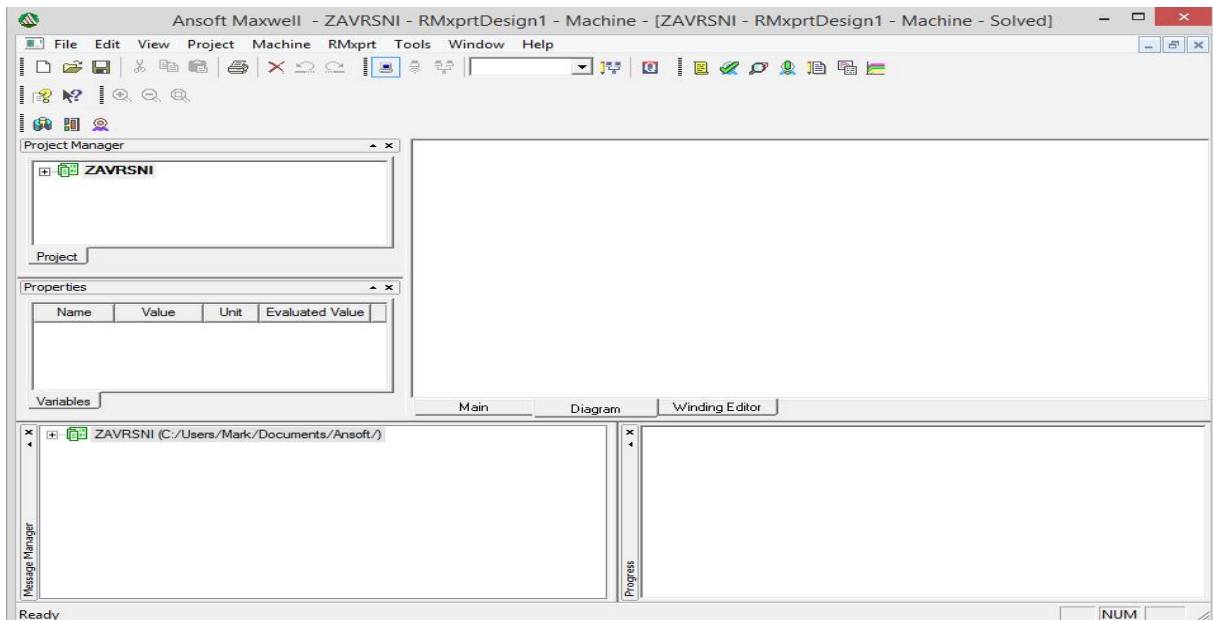
Izlazni podaci - izlazna snaga -  $P = 800$  [W]

- minimalni broj okretaja rotora -  $n = 500$  [okr/min]

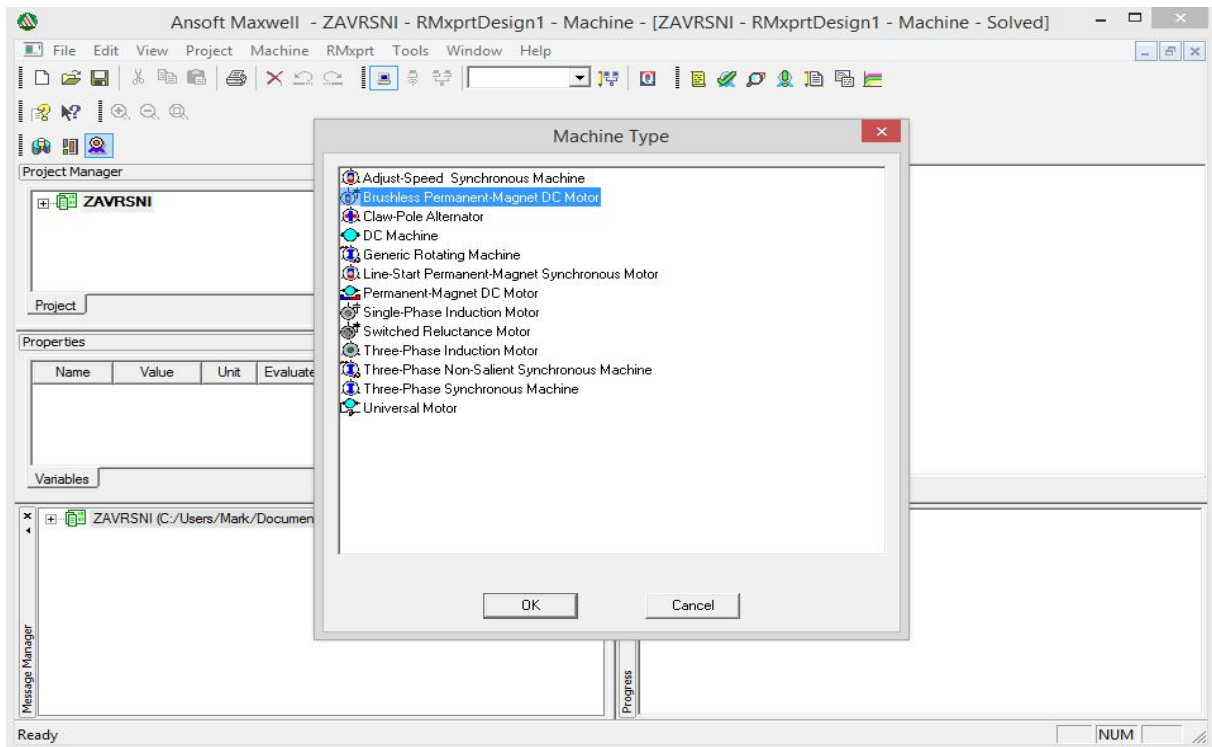
Za potrebe izrade ovakvog elektromotora, napravljen je proračun te model statora i rotora u Ansoft Maxwell Software-u.

### 6.1. Proračun

Da bi se mogao stvoriti i analizirati novi elektromotor u Ansoft Maxwell Software-u, potrebno je otvoriti program i kliknuti na „Insert RMxprt Design“ te potom odabrati željeni tip stroja za analizu.

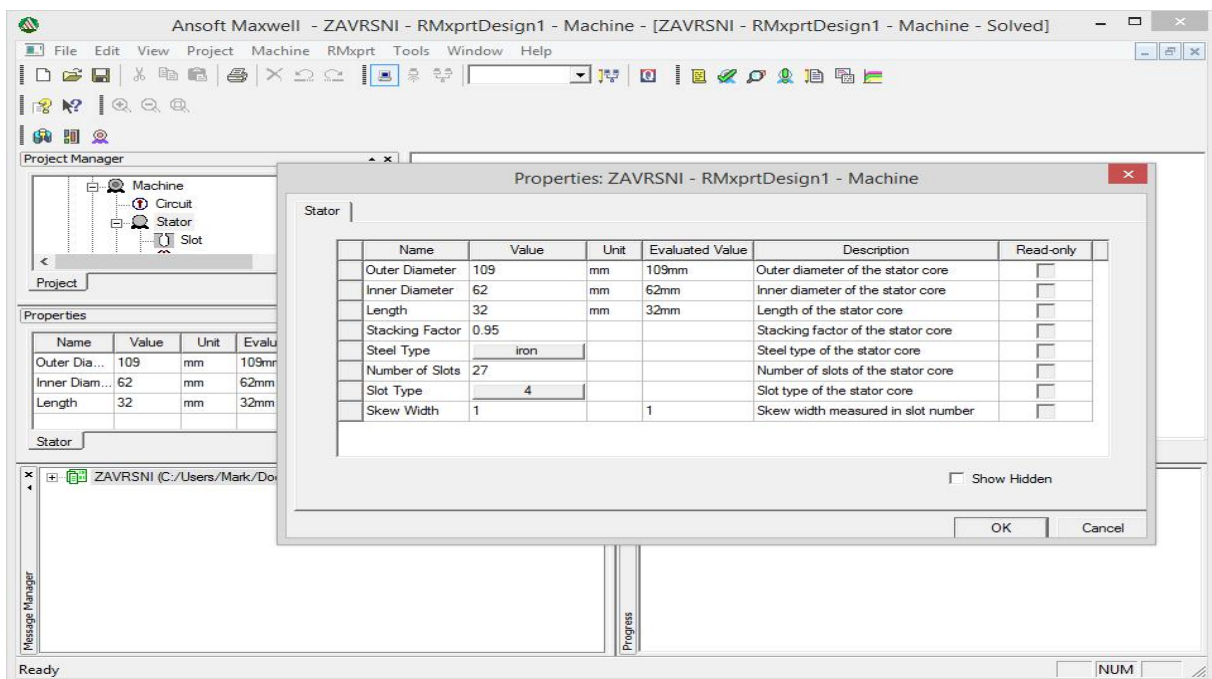


Slika 5: Radna površina Ansoft Maxwell Software-a



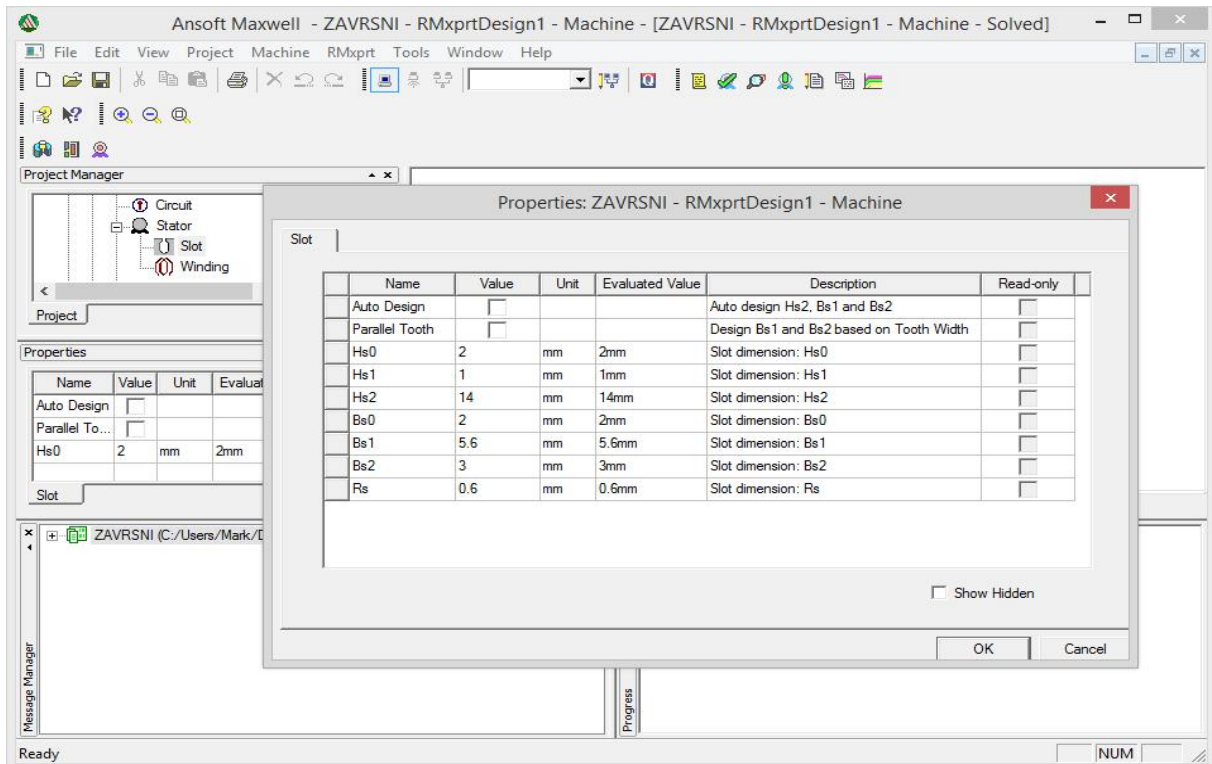
Slika 6: Odabir tipa stroja za analizu

Odabrali smo „Brushless Permanet-Magnet DC Motor“ i započinjemo unositi podatke. Najprije se određuje vrsta izvedbe (unutrašnji ili vanjski rotor), a zatim unose dimenzije statora i broj utora na statoru.

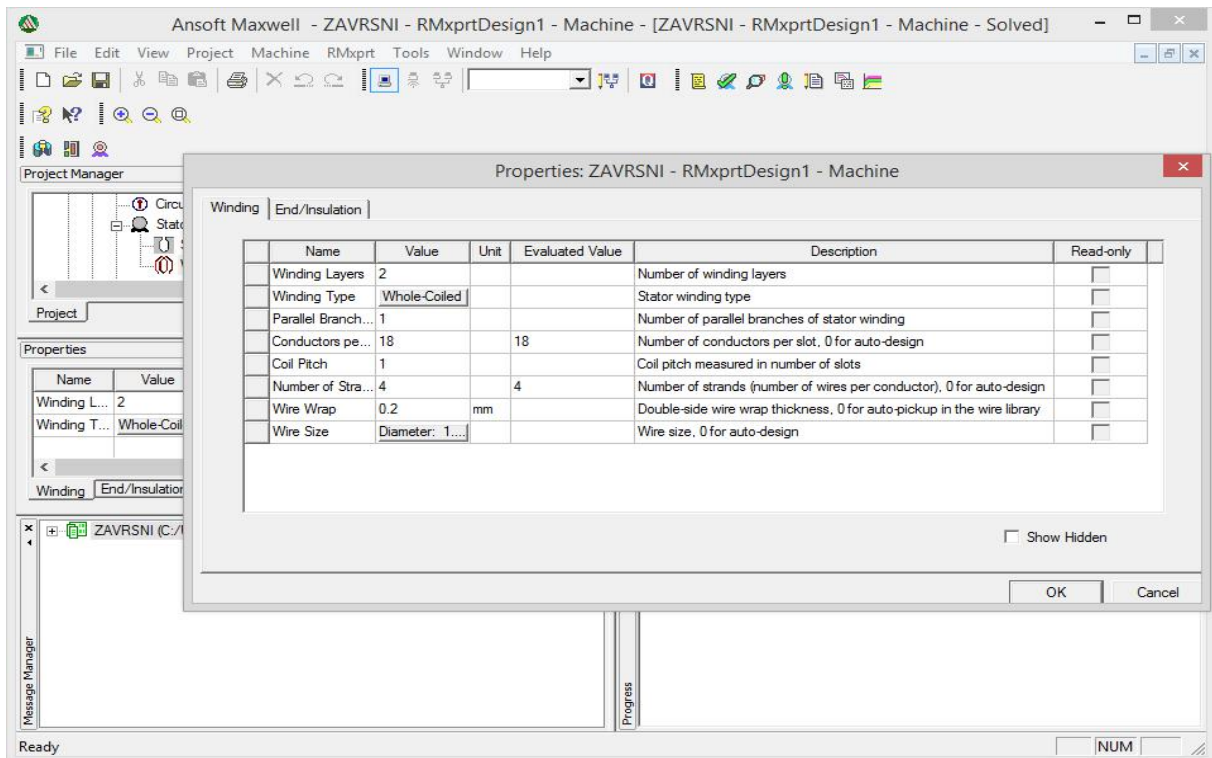


Slika 7: Unos podataka o statoru

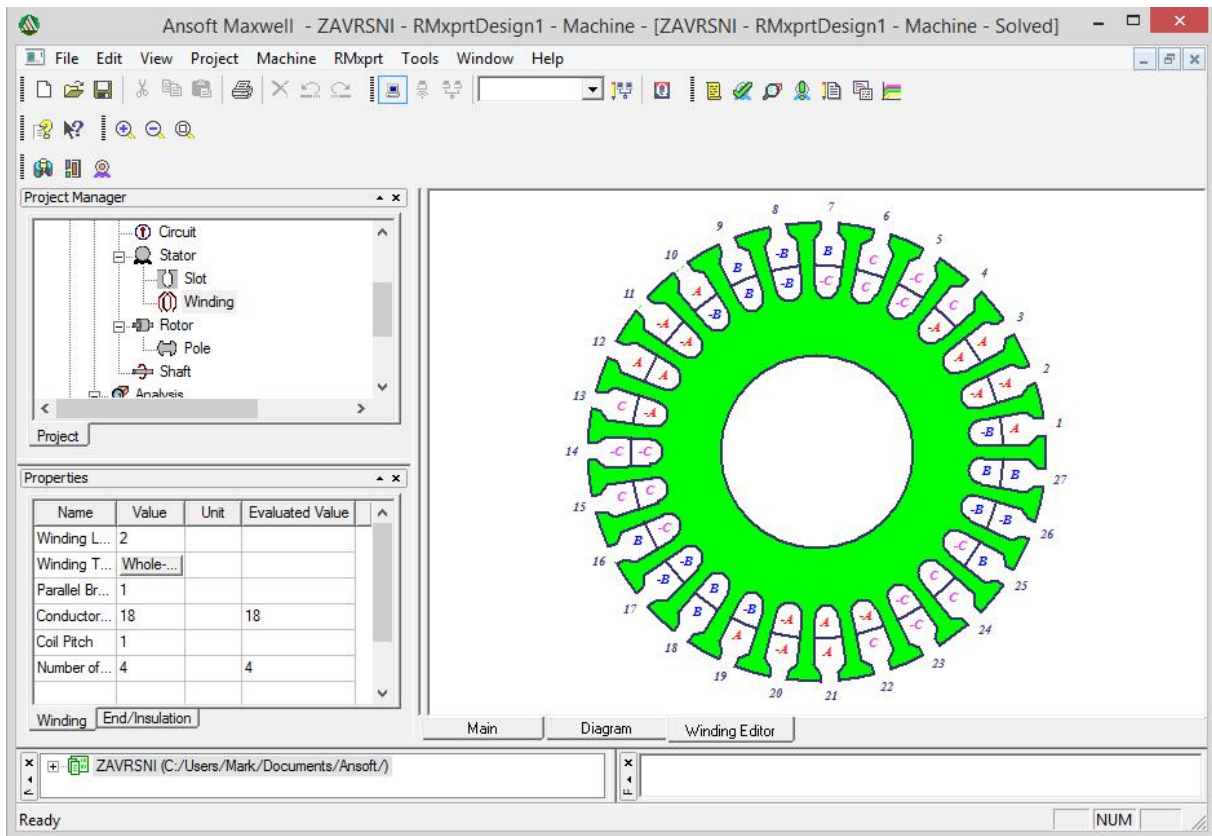
Zatim se unose detaljniji podatci o statorskim utorima i zavojnicama te stvara redosljed namatanja. Za unos tih podataka potrebna je edukacija i korištenje korisničkog priručnika programa Ansoft Maxwell Software.



Slika 8: Unos podataka o statorskim utorima

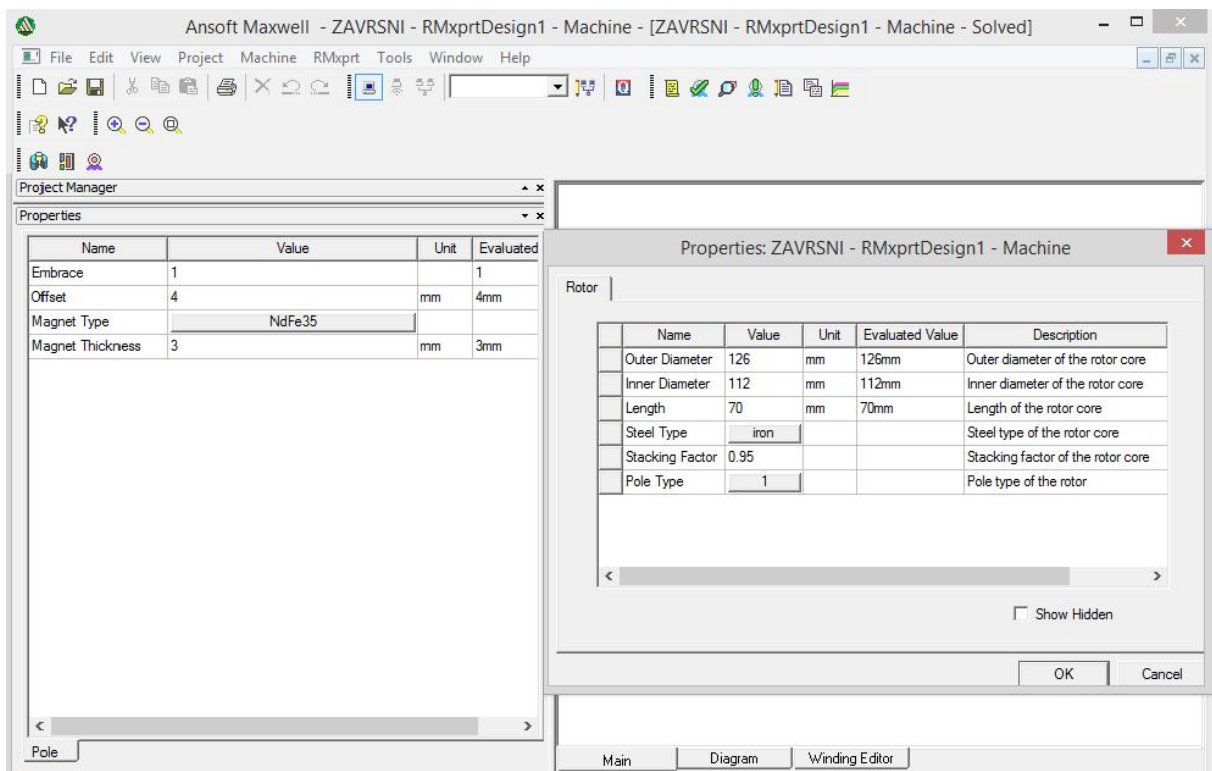


Slika 9: Unos podataka o zavojnicama



Slika 10: Redosljed namatanja zavojnica

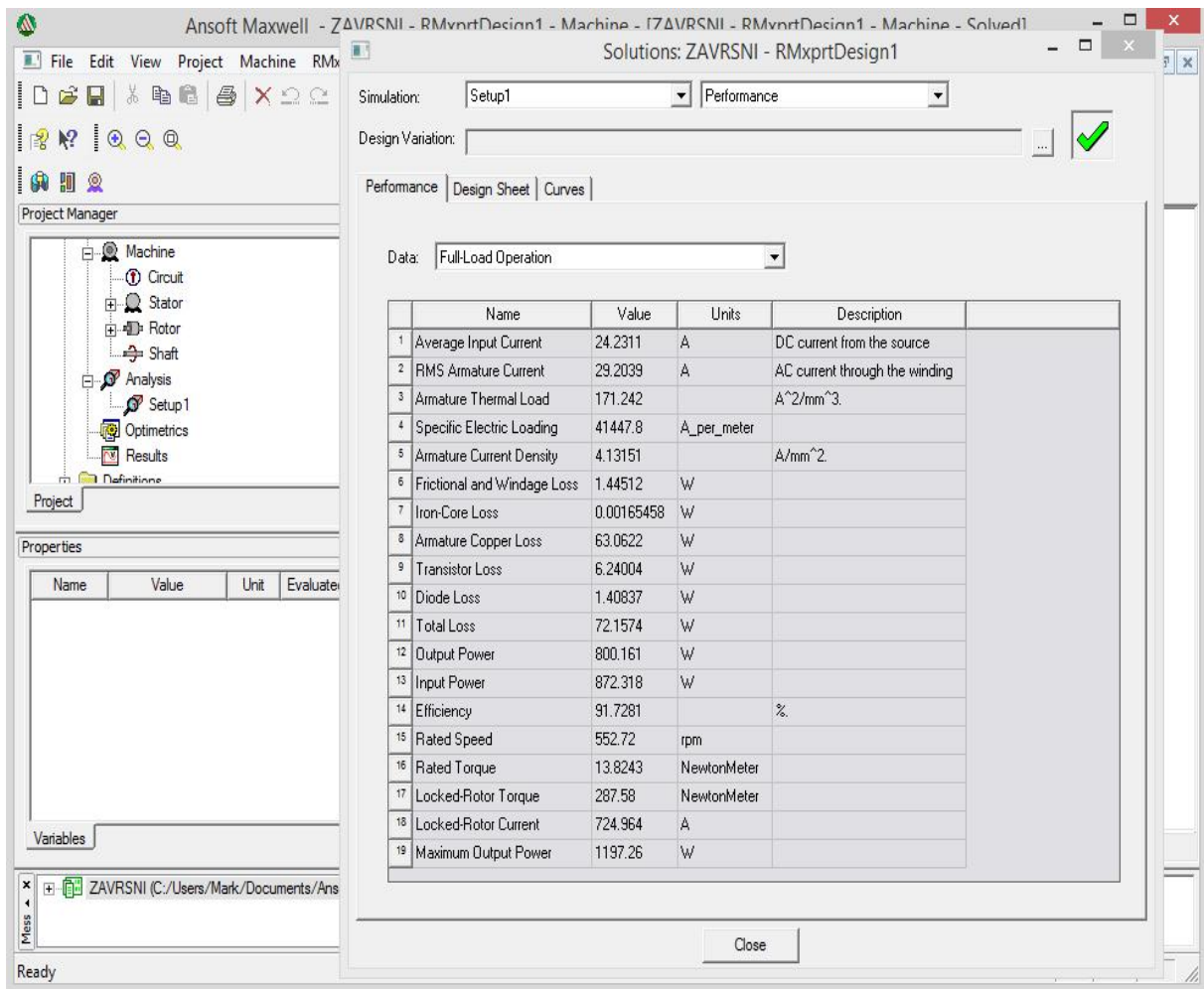
Slijedi unošenje dimenzija rotora te veličine i tipa trajnih magneta rotora.



Slika 11: Veličina i tip trajnih magneta i dimenzije rotora



Ovime završava unos podataka za izradu, pa se prelazi na unos ulaznih podataka te pokretanje proračuna i analize ovog elektromotora. Za postavljanje ulaznih podataka klikne se na „Add a solution setup“ i unosi prethodno zadane ulazne podatke. Zatim se odabire „Solution Data“ i program započinje s analizom elektromotora. Dobivena rješenja iz analize uspoređuju se s prethodno zadanim izlaznim podacima. Ukoliko se podaci podudaraju i zadovoljavaju željene uvijete efikasnosti, izrada može započeti.

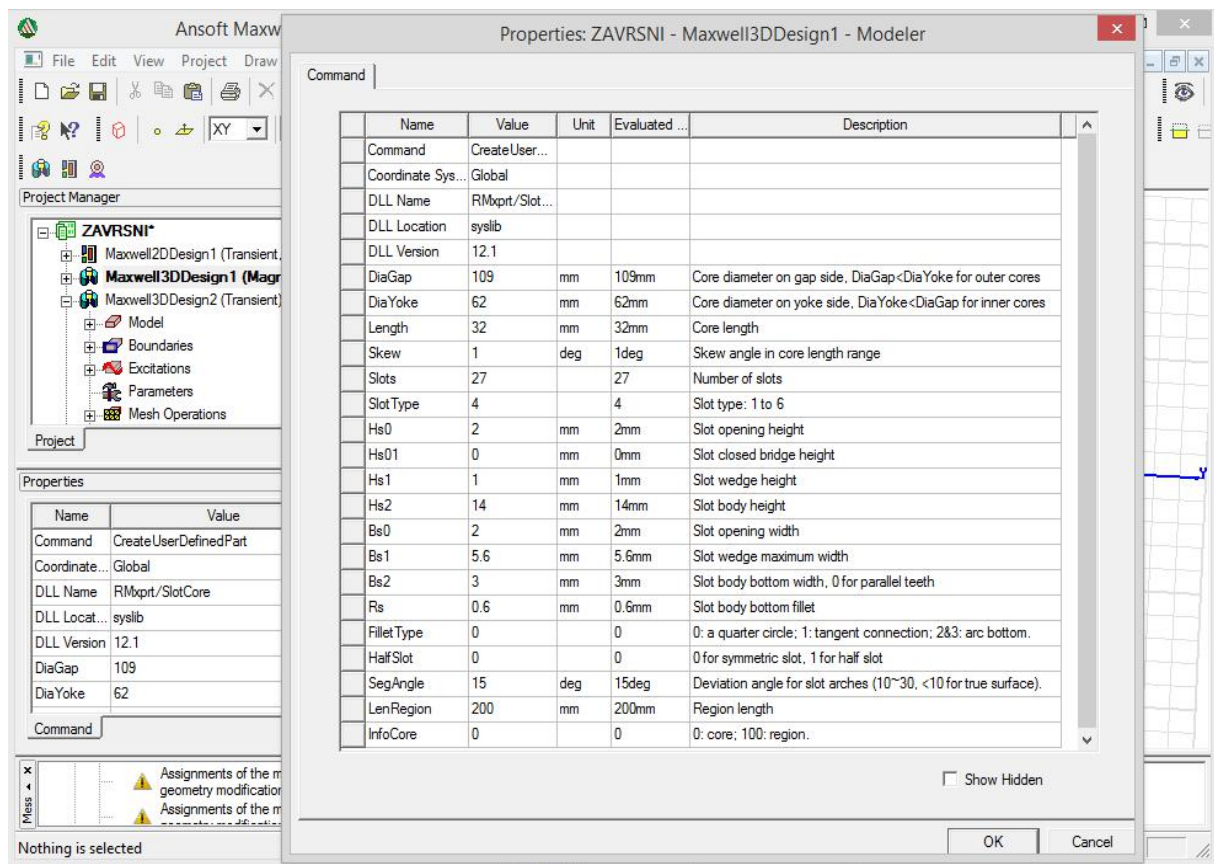


Slika 12: Dio rezultata analize elektromotora

Rezultati analize u potpunosti se podudaraju sa zadanim i željenim izlaznim podacima, a korisnost ovog elektromotora iznosi  $\eta = 91,7\%$ . Među ostalim, u rezultatima analize mogu se pronaći svi podaci koji su potrebni za izradu bezkolektorskog istosmjernog elektromotora s ovim izlaznim karakteristikama. Prije početka izrade, valja napraviti model i simulaciju elektromotora kako bi se izbjegli svi mogući problemi koji se mogu pojaviti tijekom same izrade.

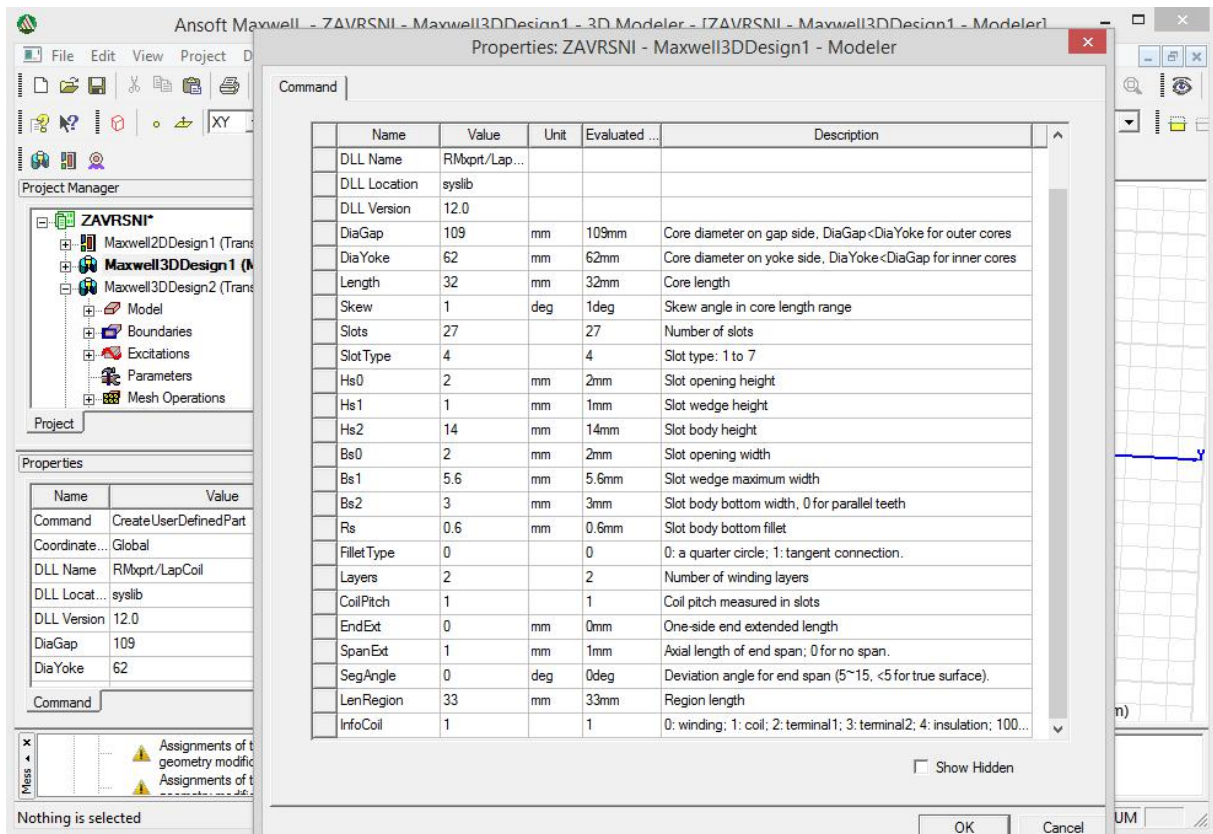
## 6.2. Modeliranje

Model elektromotora napravljen je u Ansoft Maxwell Software-u te zapravo u ovom slučaju služi kao konačna provjera svih dimenzija prije početka same izrade elektromotora. U analizi elektromotora pronalaze se dimenzije statora, rotora i svih njihovih sastavnih dijelova te se pomoću njih stvara model elektromotora. U programu Ansoft Maxwell Software otvara se 3D radna površinu te klikne na „Draw“ zatim „RMxpirt“ te odabire „Slot Core“. Otvara se prozor kojeg je potrebno popuniti sa dimenzijama statora te dimenzijama svih njegovih dijelova osim zavojnica.

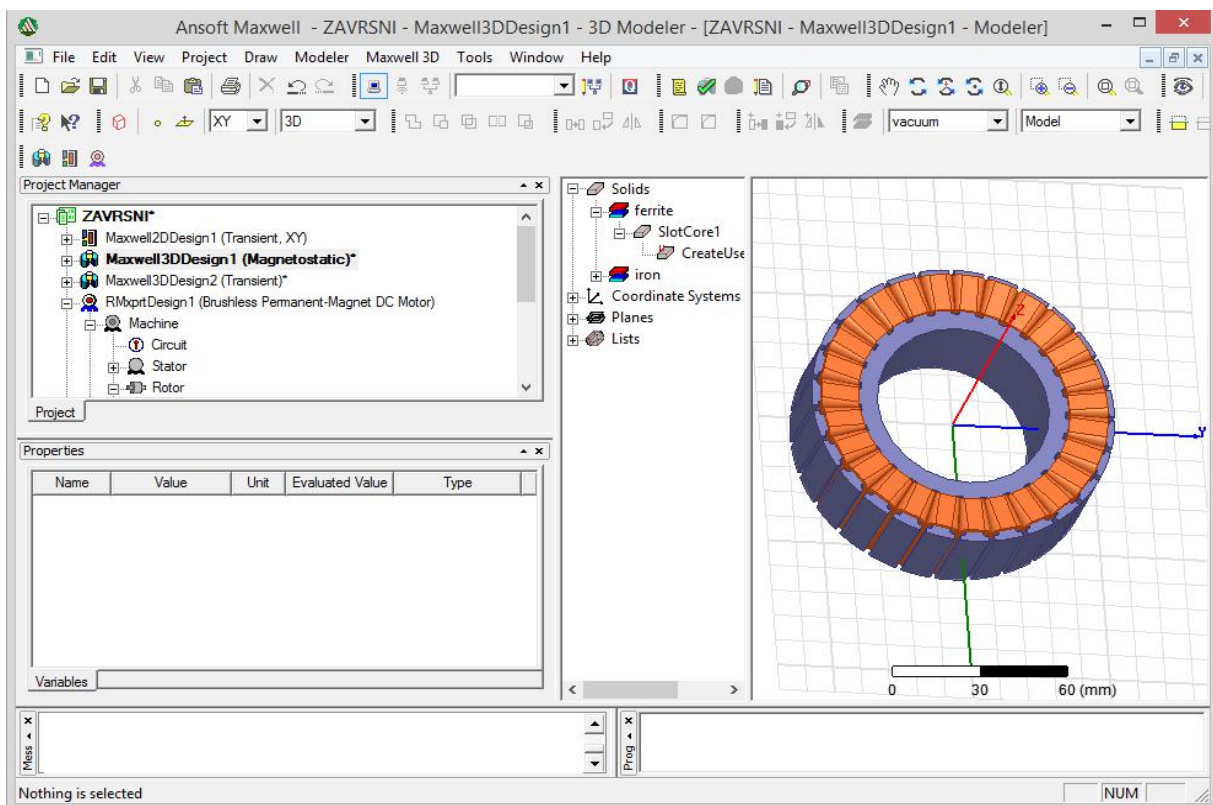


Slika 13: Unos dimenzija statora

Potom se opet odabire „Draw“ zatim „RMxpirt“ i zatim „LapCoil“. Sada se otvara prozor kojeg je potrebno popuniti sa svim podacima o zavojnicama. Nakon toga, na radnoj površini, pojavljuje se model statora elektromotora sa pripadajućim namotanim zavojnicama. Ako se neka od dimenzija ne poklapa sa ostalima, program je prepoznaje kao grešku i odbija stvoriti zadani model. Upravo ta karakteristika programa može poslužiti kao konačna provjera dimenzija elektromotora kojeg se želi proizvesti.

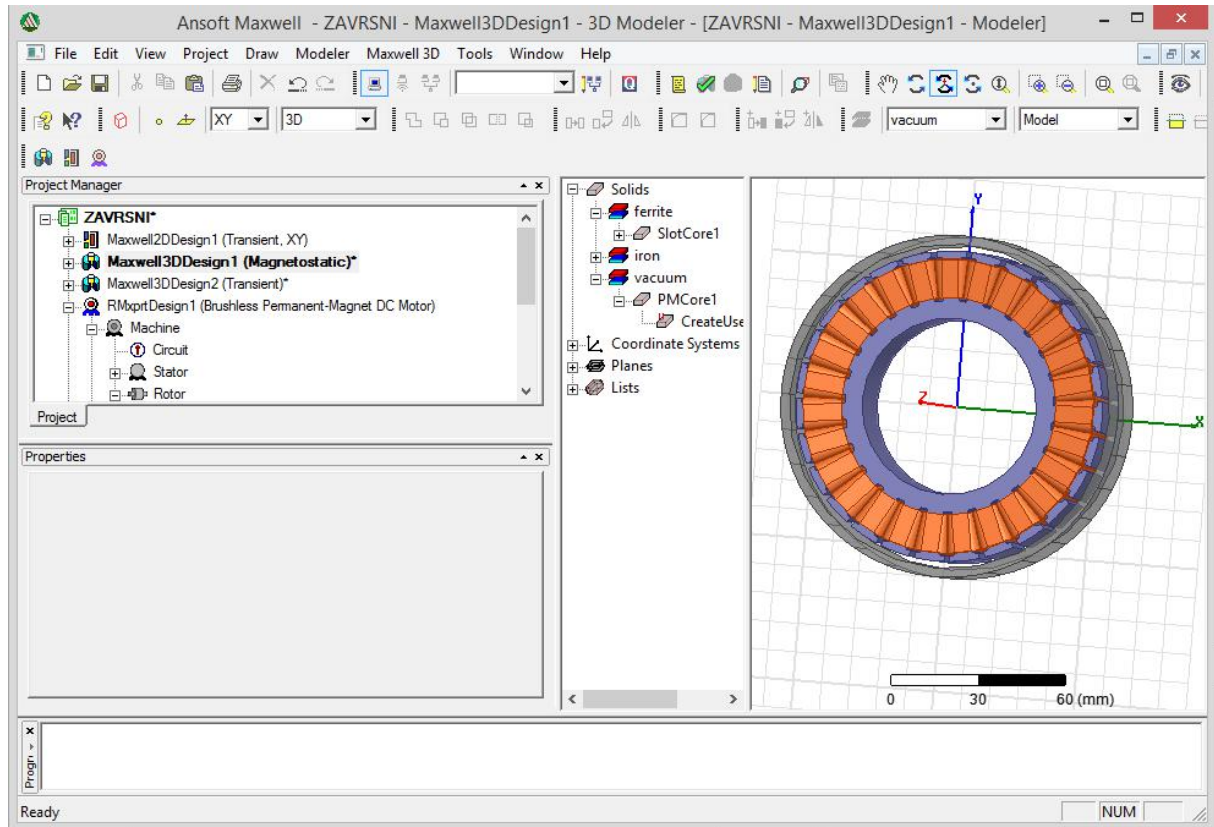


Slika 14: Unos podataka o zavojnicama



Slika 15: Konačan model statora

Još preostaje provjera veličine zračnog raspora između statora i rotora koju je moguće provjeriti dizajniranjem dijela rotora. Odabire se „Draw“ zatim „RMxprt“ te zatim „PMCore“ i otvara se prozor u kojeg se upisuju dimenzije magneta te unutarnji promjer rotora.



Slika 16: Konačan model statora i rotora

Program nije prepoznao niti jednu pogrešku što znači da su sve dimenzije ispravne i izrada može započeti.

## 7. SASTAVLJANJE ROTORA

Postoje dva tipa izvedbe rotora kod bezkolektorskih istosmjernih elektromotora, a to su vanjski i unutrašnji rotor. Rotor ovog elektromotora vanjske je izvedbe te je izrađen od aluminijske legure. Rotor se sastoji od kućišta, trajnih magneta, ležajeva, poklopca kućišta te radijalnog brtvenog prstena. U kućište rotora ugrađuje se ležaj i lijepe trajni magneti, a u poklopac kućišta rotora ugrađuje se drugi ležaj i radijalni brtveni prsten.



Slika 17: Dijelovi rotora

Izrada započinje zagrijavanjem kućišta rotora kako bi se u njega mogao ugraditi ležaj. Nakon ugradnje ležaja, potrebno je ohladiti kućište rotora i tek onda započeti lijepiti trajne magnete. U ovom slučaju, vrlo je bitan ovaj redosljed sastavljanja rotora jer bi u suprotnom redosljedu postojala mogućnost oštećivanja trajnih magneta i oslabljivanje lijepljenih spojeva prilikom zagrijavanja.



Slika 18: Lijepljenje trajnih magneta

Trajni magneti lijepe se na unutrašnji dio kućišta rotora posebnim dvokomponentnim ljepilom razvijenim upravo za tu svrhu. Trajni magneti postavljaju se tako da njihovi polovi budu naizmjenično raspoređeni, a u ovom slučaju lijepe se i jedan do drugoga bez razmaka. Nakon toga, uzima se poklopac kućišta rotora te u njega ugrađuje ležaj te radijalni brtveni prsten koji štiti ležaj od okolne prljavštine.



Slika 19: Poklopac kućišta rotora

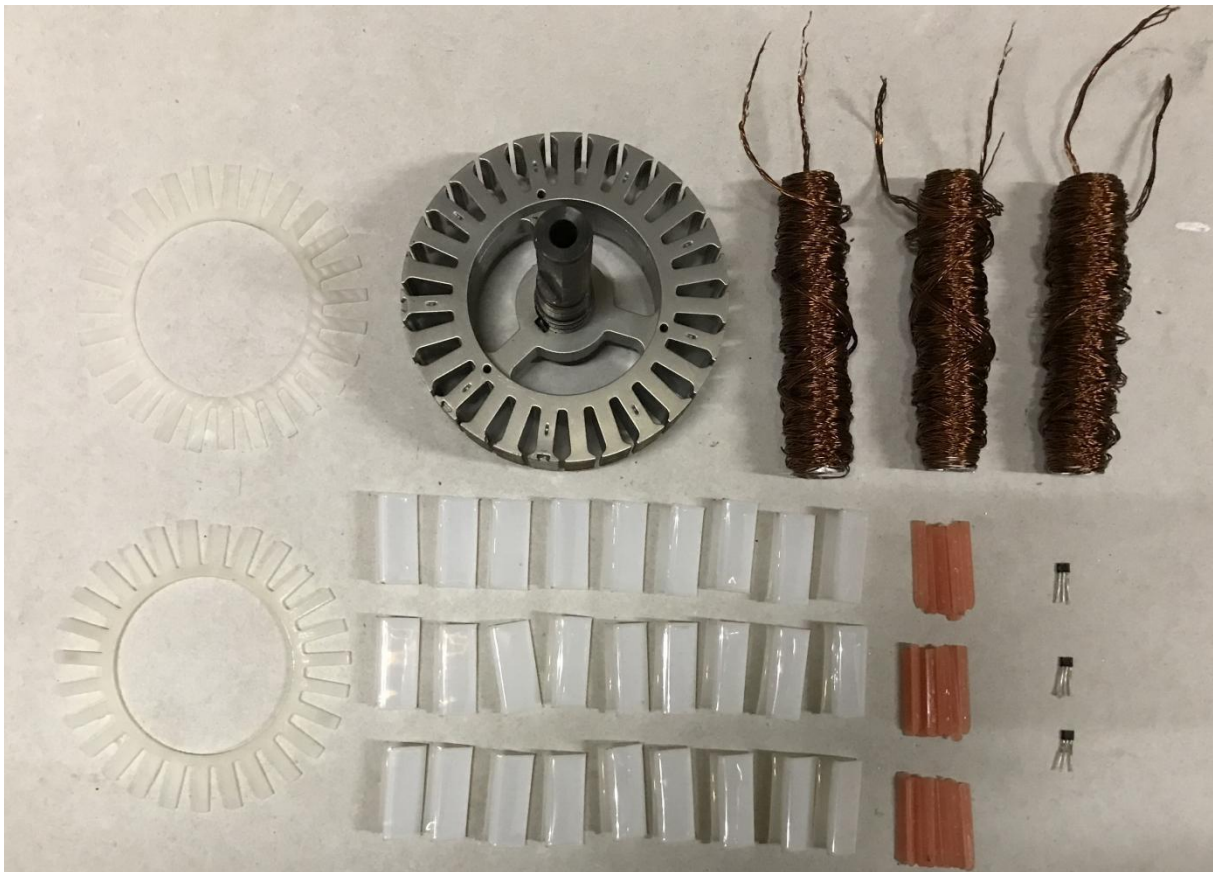
Time završava sastavljanje rotora i započinje se sa namatanjem i sastavljanjem statora.



Slika 20: Sastavljeni rotor

## 8. NAMATANJE STATORA

Kod statora, kao i kod rotora, postoje dvije izvedbe a to su unutrašnji i vanjski stator. Tip statora ovog elektromotora je unutrašnji i izrađen je od feromagnetskih segmenata međusobno izoliranih limova. Stator se sastoji od 27 utora oko kojih su namotane tri zavojnice. Svaka zavojnica zauzima devet točno određenih utora na statoru, a oko svakog utora namata se tako da kada je prikučena na istosmjerni izvor napajanja, stvara različito magnetsko polje oko svakog namota. Dijelovi statora su: tri zavojnice, zaštite utora (sprječavaju mogućnost oštećenja zavojnice) i tri Hallova senzora.



Slika 21: Dijelovi statora

Sastavljanje statora započinje postavljanjem zaštite oko utora koja će spriječiti oštećivanje zavojnice prilikom namatanja. Zatim se uzima zavojnica i namata ju se oko prvog utora uzimajući u obzir smjer namatanja i broj zavoja. Zavojnice su prethodno pripremljene i



odrezane na duljinu izračunatu u programu Ansoft Maxwell Software. Umjesto od jedne žice presjeka 1 mm<sup>2</sup>, svaka pripremljena zavojnica, radi lakšeg namatanja sastoji se od pet žica iste duljine i presjeka 0,2 mm<sup>2</sup>.

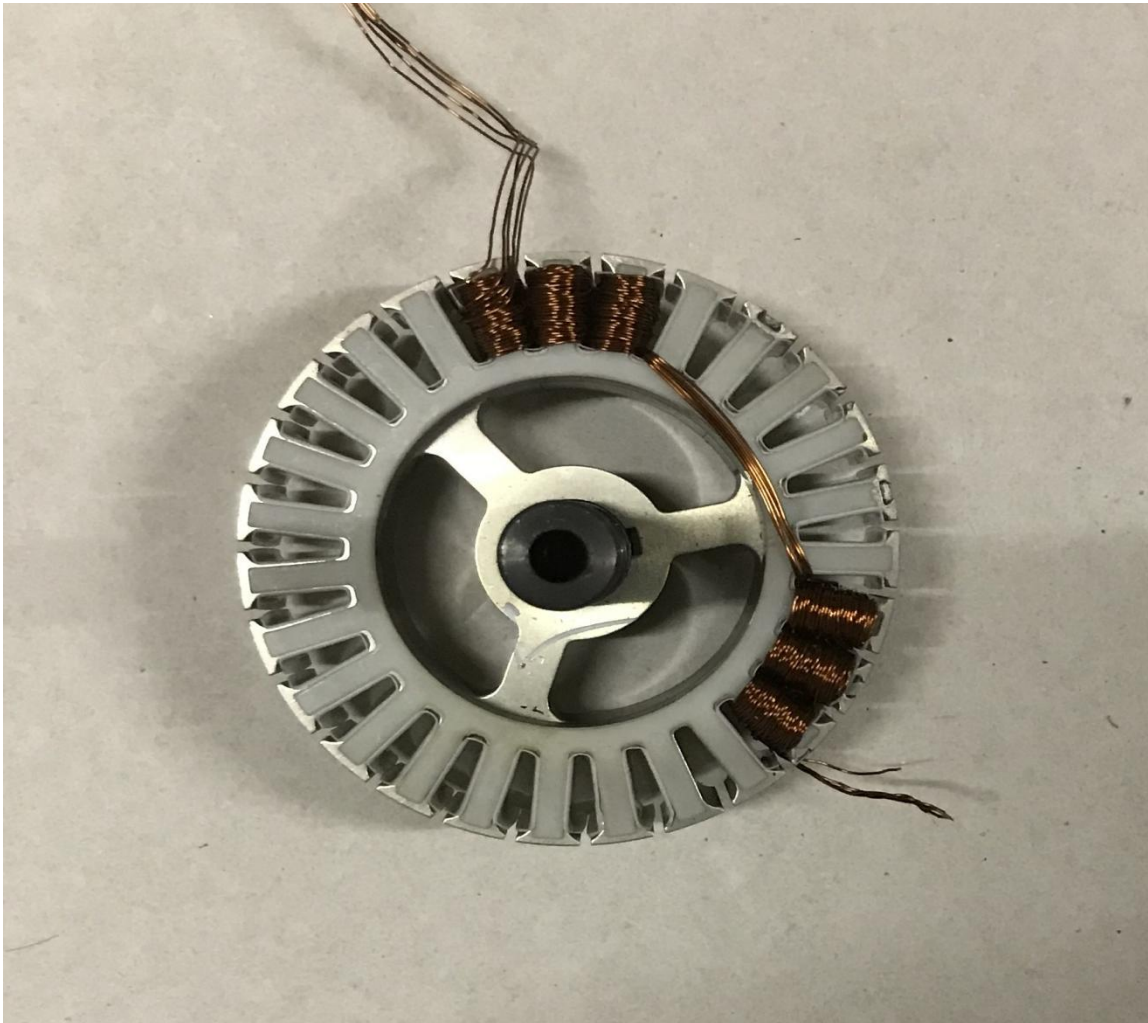


Slika 22: Stator sa postavljenim zaštitama



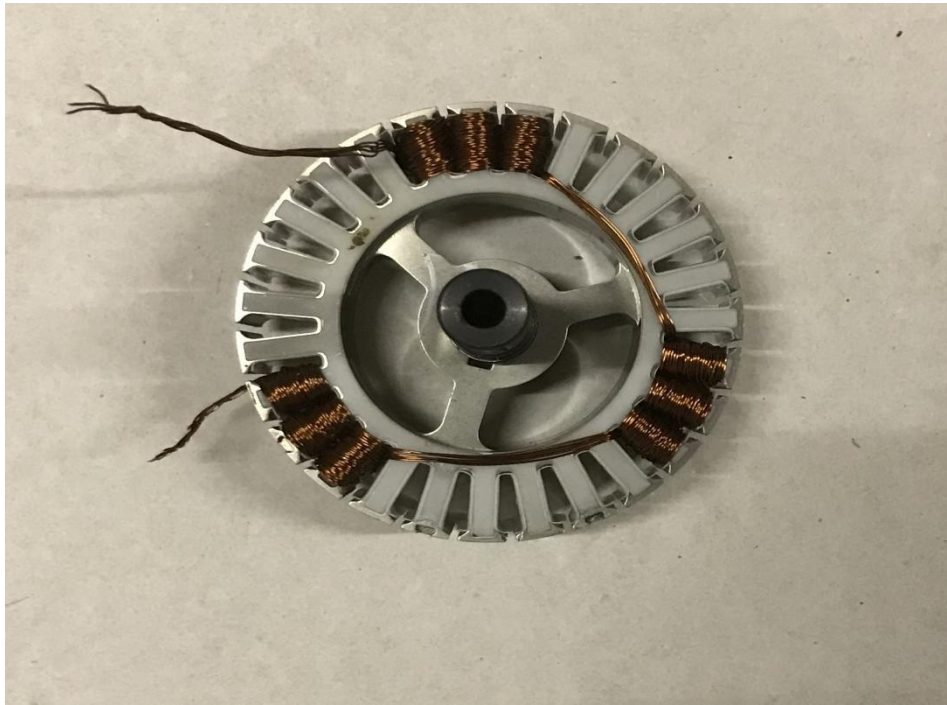
Slika 23: Namatanje prvog namotaja

Kada je namotan prvi namotaj, istom zavojnicom ali u suprotnom smjeru namata se drugi namotaj pa se zatim opet promijeni smjer i namata treći namotaj. Ta tri namotaja čine prvu skupinu namotaja i moraju se nalaziti jedan do drugoga. Zatim se preskače šest utora kako bi se stvorio razmak od  $120^\circ$  između prve i druge skupine namotaja. Drugu skupinu namotaja namata se istom procedurom, odnosno istim redoslijedom smjera namatanja kao kod prve skupine.



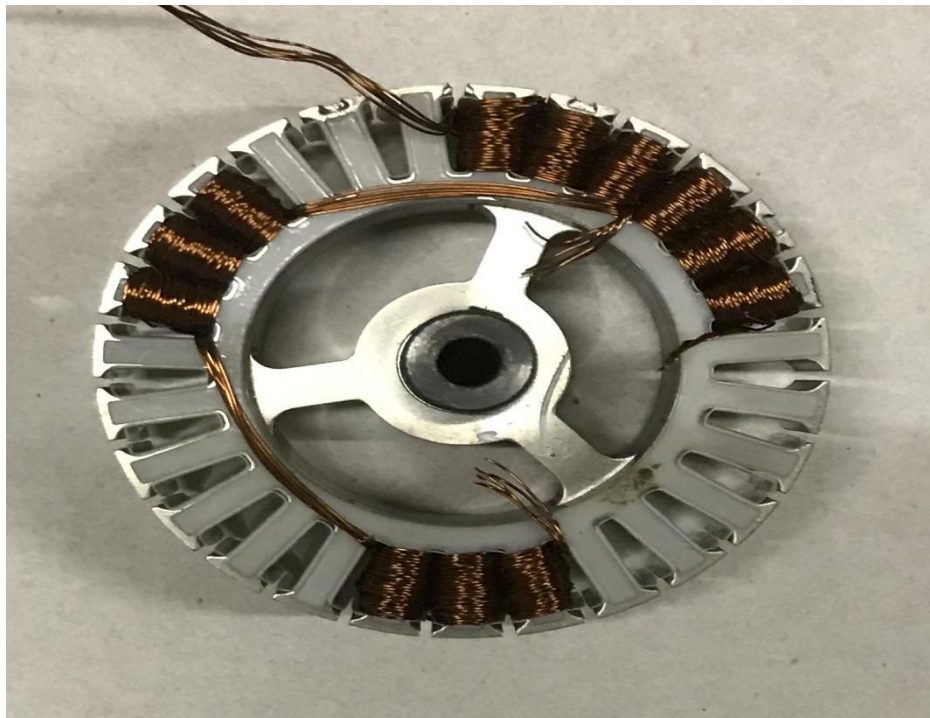
Slika 24: Namatanje druge skupine namotaja

Treću skupinu namotaja pomiče se za još šest utora, tako da sve tri skupine namotaja budu međusobno udaljene  $120^\circ$ . Vrlo je bitno da sve tri skupine namotaja budu namatane istim redoslijedom smjera namatanja pa se tako i treća skupina namotaja namata istom procedurom kao prethodne dvije.



Slika 25: Stator s jednom namotanom zavojnicom

Nakon toga uzima se druga zavojnica i namata ju se oko prva tri utora do prve skupine namotaja i to istim smjerom namatanja kao kod prethodne zavojnice.



Slika 26: Namatanje druge zavojnice

Zatim se, istom zavojnicom, namata preostale dvije skupine namotaja, uzimajući u obzir da njihov međusobni razmak mora biti  $120^\circ$ .



Slika 27: Stator s dvije namotane zavojnice

Zatim se uzima posljednju zavojnicu i ponavlja proceduru namatanja kao kod prethodne dvije zavojnice. Za kraj, uzimaju se krajevi zavojnica, spaja ih se zajedno te izolira termosakupljajućim bužiom.



Slika 28: Namotani stator

## 9. HALLOVI SENZORI

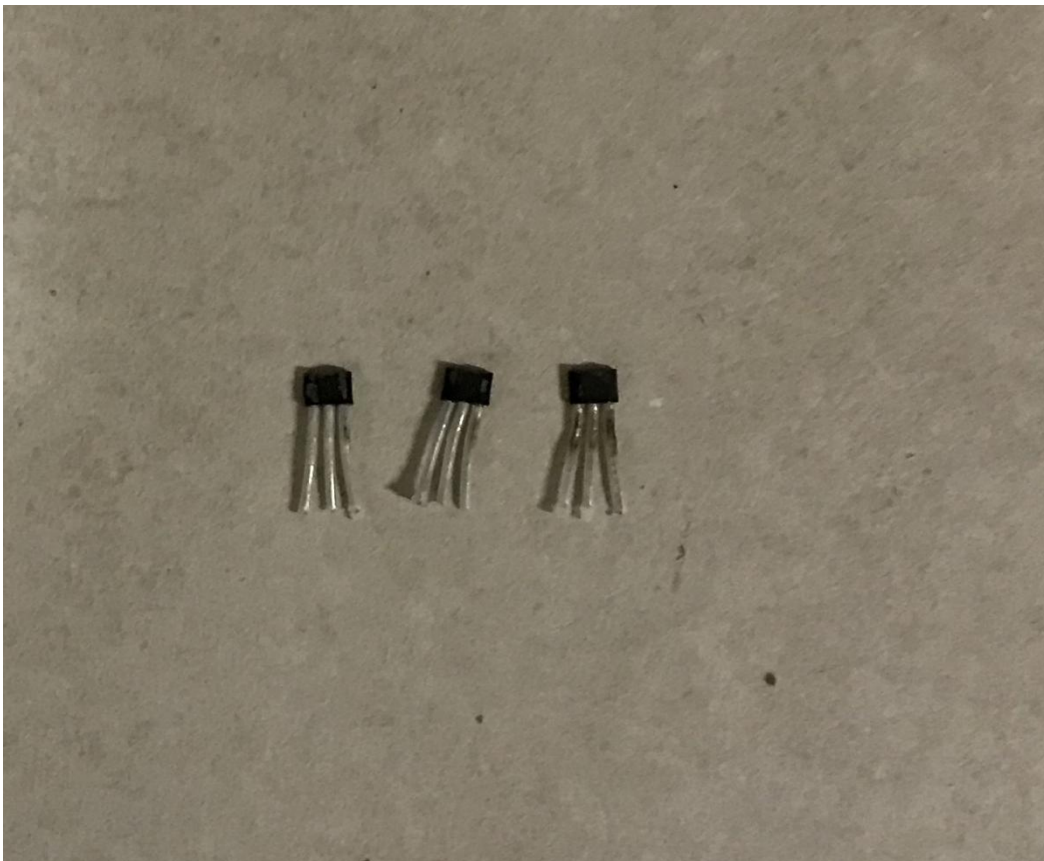
Kako bi prethodno opisani elektromotor mogao raditi, nužno je znati poziciju rotora u odnosu na stator u svakom trenutku. Točni podaci o poziciji rotora vrlo su bitni i za same radne karakteristike elektromotora. Pouzdani i precizni podaci omogućit će precizniju komutaciju i smanjiti gubitke, a samim time i povećati korisnost elektromotora. Za određivanje pozicije rotora mogu se koristiti Hallovi senzori, optički enkoderi, magnetski enkoderi ili metoda povratne elektromotorne sile. Metoda povratne elektromotorne sile vrlo je komplicirana, ima puno nedostataka i samim time ograničava radne karakteristike elektromotora. Korištenje enkodera je zapravo najpreciznija i najpouzdanija varijanta ali se zbog visoke cijene koristi samo u aplikacijama u kojim je potrebna najviša razina preciznosti. U bezkolektorskim istosmjernim elektromotorima najviše se koriste Hallovi senzori, ponajviše zbog dobrog omjera cijene i preciznosti. Pomoću Hallovih senzora stvaraju se UVW signali čija vrijednost ovisi o ugradbenoj poziciji samog senzora. Ugradbena pozicija Hallovih senzora ovisi o tome od koliko se namotaja sastoji jedna skupina namotaja i o broju utora na statoru. U bilo kojoj poziciji rotora dobiva se po jedan signal iz svakog od tri Hallova senzora, stvarajući tako UVW signale koji se koriste za komutaciju i upravljanje elektromotorom. Hallovi senzori rade na principu Hallovog efekta otkrivenog 1879. godine. <sup>4</sup>Vodljivi materijal priključen je na bateriju, a krajevi vodljivog materijala priključeni su na voltmetar tako da izmjereni napon bude jednak nuli. Primjenom magnetskog polja na taj materijal dovodi do pojave Lorentzove sile, i kao posljedica, otklanjanje naboja prema krajevima materijala. Otklonom naboja prema krajevima materijala stvara se razlika potencijala i voltmetar pokazuje određeni napon. Mjerni napon ovisi o udaljenosti magnetskog polja i vodljivog materijala, ali i o polaritetu magnetskog polja. Promjenom polariteta magnetskog polja, mijenja se i polaritet induciranog napona. Pomoću opisanog efekta, zbog poznatog rasporeda trajnih magneta na rotoru, može se precizno odrediti poziciju rotora u odnosu na Hallove senzore, odnosno na sam stator.

---

<sup>4</sup> Edward Ramsden, Hall-Effect Sensors: Theory and Application, 2006.

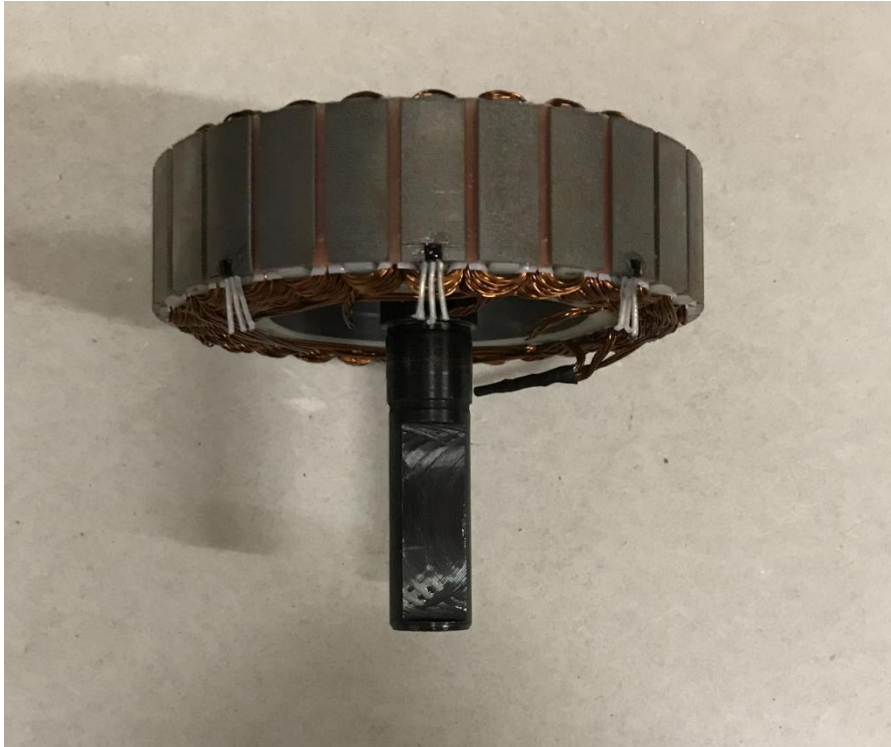
## 9.1. Postavljanje Hallovih senzora

Hallove senzore postavlja se na točno određena mjesta na statoru kako bi se dobila točna informacija o poziciji rotora. Hallovi senzori moraju biti međusobno udaljeni za kut kojeg određujemo tako da  $360^\circ$  podijelimo sa brojem utora na statoru i zatim taj broj pomnožimo sa brojem namotaja od kojih se jedna skupina namotaja sastoji.. U ovom slučaju broj utora na statoru je 27, a jedna skupina namotaja sastoji se od tri namotaja. Dobiven je kut od  $40^\circ$ , a to znači da se Hallove senzore postavlja na stator s obaveznim međusobnim razmakom od  $40^\circ$ . Poziciju prvog postavljenog Hallovog senzora odabire se proizvoljno, a preostala dva senzora postavljamo prema izračunatom međusobnom razmaku.



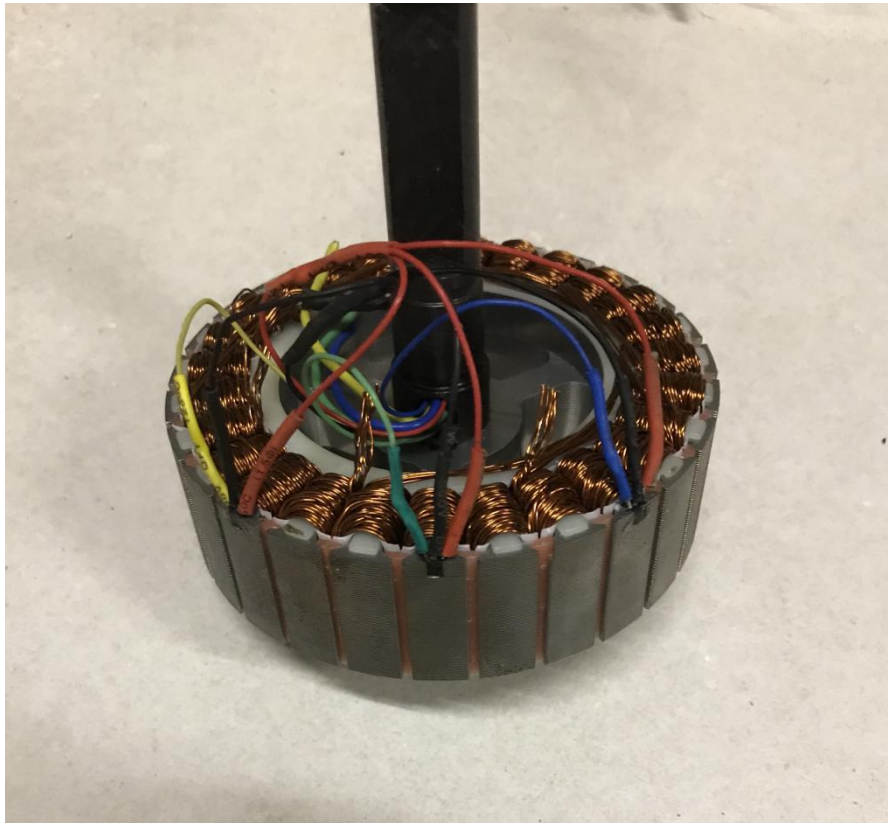
Slika 29: Hallovi senzori

Na statoru je potrebno stvoriti tri udubljenja, međusobno razmaknuta za  $40^\circ$  te u njih postaviti Hallove senzore, pričvršćujući ih ljepilom.



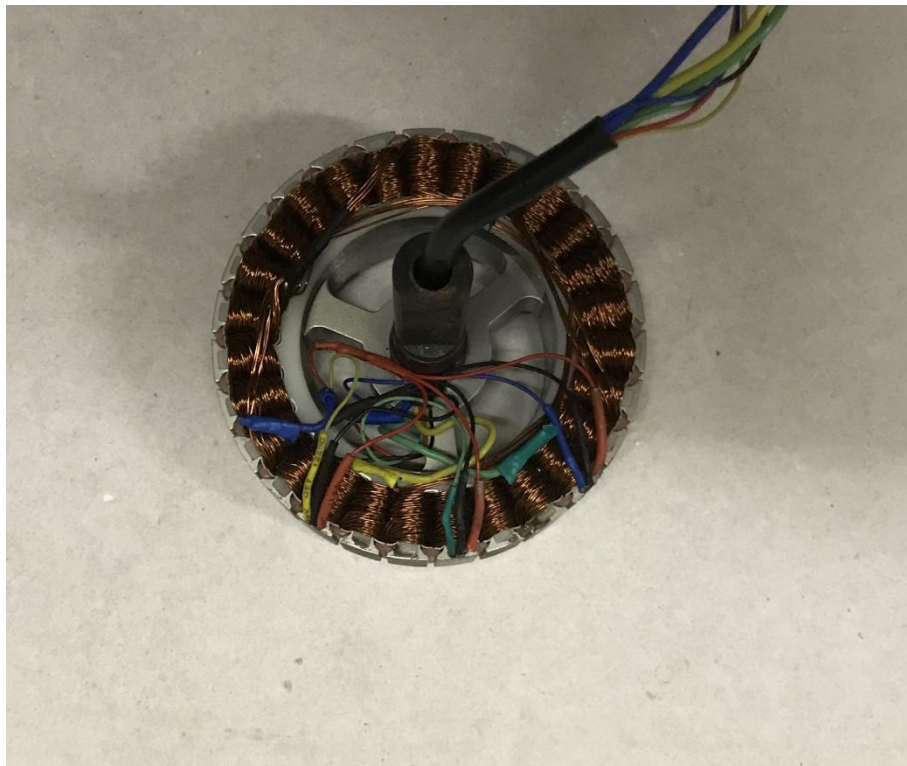
Slika 30: Postavljanje Hallovih senzora

Zatim se na svaki senzor spaja dva vodiča za napajanje i jedan vodič za izlazni signal.



Slika 31: Stator sa postavljenim Hallovim senzorima

Još preostaje spajanje vodiča na početke zavojnica i završno sklapanje elektromotora.





Slika 32: Stator spreman za ugradnju



Slika 33: Gotov elektromotor

## 10. IZLAZNE KARAKTERISTIKE

Izlazne karakteristike elektromotora prikazuju kako se, na koji način i u kojem trenutku performanse elektromotora mijenjaju u određenim postavljenim uvjetima. Uvjeti se postavljaju tako da odgovaraju uvjetima i opterećenjima za koje je taj elektromotor predviđen. Izlazne karakteristike izračunate su u programu Ansoft Maxwell Software i prikazuju podatke izračunate pri maksimalnom dopuštenom opterećenju elektromotora te grafove koji obuhvaćaju sve režime rada elektromotora. Neki od najbitnijih podataka i performansi su:

Izlazna snaga -  $P = 800,161$  [W]

Okretni moment -  $M = 13,824$  [Nm]

Korisnost -  $\eta = 91,72$  [%]

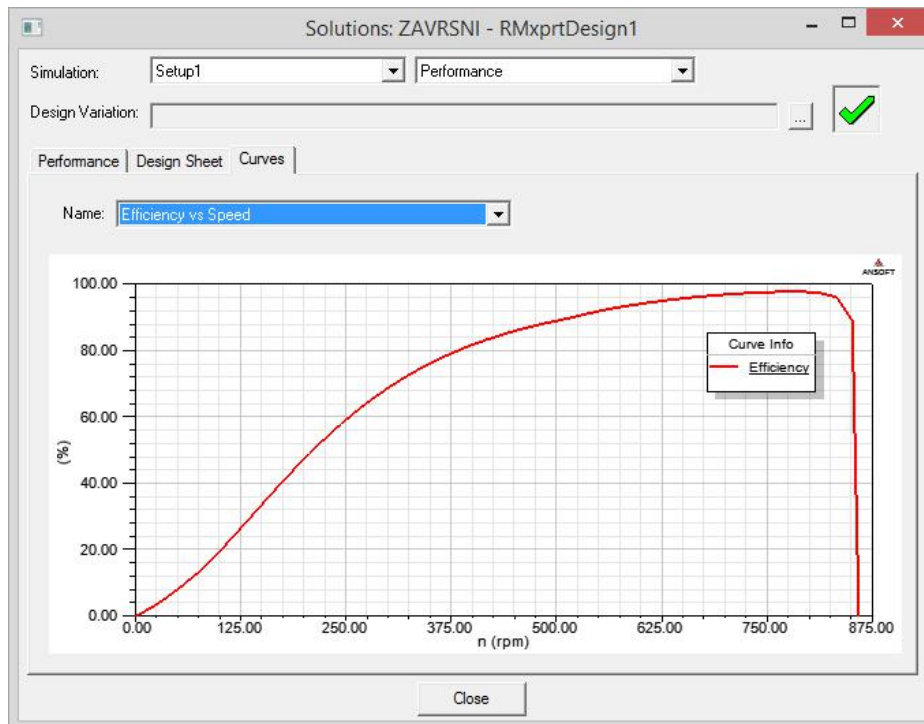
Ostali podaci i performanse elektromotora prikazane su na slici 34.

The screenshot shows a software window titled 'Solutions: ZAVRSNI'. It contains a 'Simulation:' dropdown set to 'Setup1' and a 'Performance' dropdown. Below is a 'Design Variation:' field. There are three tabs: 'Performance' (selected), 'Design Sheet', and 'Curves'. The main content area is titled 'BRUSHLESS PERMANENT MAGNET DC MOTOR DESIGN' and contains two tables.

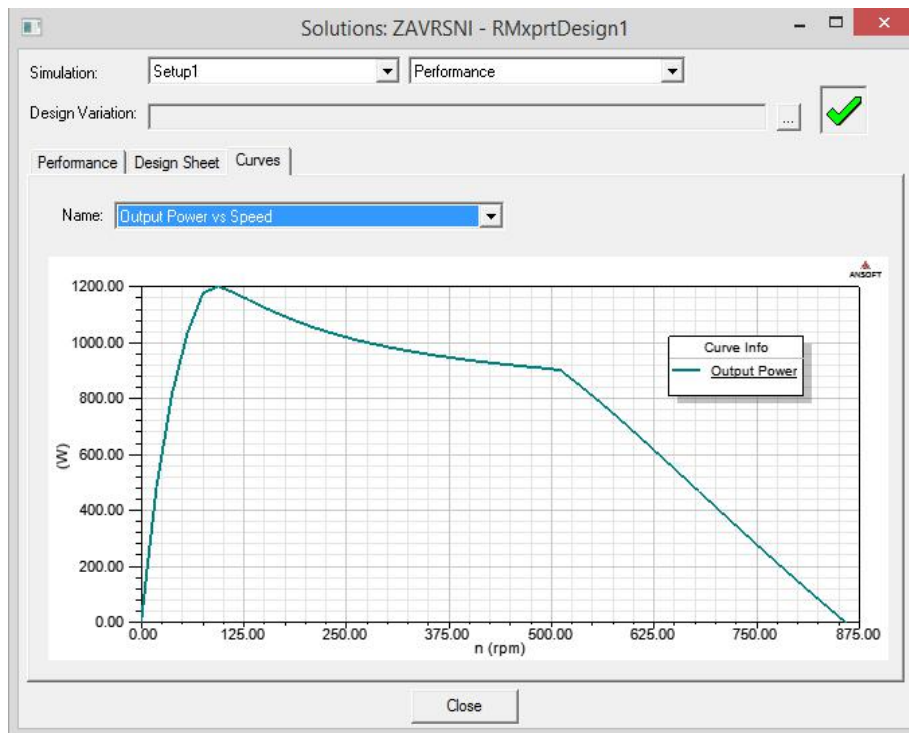
GENERAL DATA		FULL-LOAD DATA	
File: Setup1.res		Average Input Current (A):	24.2311
Rated Output Power (kW):	0.8	Root-Mean-Square Armature Current (A):	29.2039
Rated Voltage (V):	36	Armature Thermal Load (A <sup>2</sup> /mm <sup>3</sup> ):	171.242
Number of Poles:	30	Specific Electric Loading (A/mm):	41.4478
Given Rated Speed (rpm):	500	Armature Current Density (A/mm <sup>2</sup> ):	4.13151
Frictional Loss (W):	1.25	Frictional and Windage Loss (W):	1.44512
Windage Loss (W):	0.046875	Iron-Core Loss (W):	0.00165458
Rotor Position:	Outer	Armature Copper Loss (W):	63.0622
Type of Load:	Constant Power	Transistor Loss (W):	6.24004
Type of Circuit:	Y3	Diode Loss (W):	1.40837
Lead Angle of Trigger in Elec. Degrees:	0	Total Loss (W):	72.1574
Trigger Pulse Width in Elec. Degrees:	120	Output Power (W):	800.161
One-Transistor Voltage Drop (V):	0.1	Input Power (W):	872.318
One-Diode Voltage Drop (V):	0.1	Efficiency (%):	91.7281
Operating Temperature (C):	75	Rated Speed (rpm):	552.72
Maximum Current for CCC (A):	0	Rated Torque (N.m):	13.8243
Minimum Current for CCC (A):	0	Locked-Rotor Torque (N.m):	287.58
		Locked-Rotor Current (A):	724.964

Slika 34: Performanse elektromotora

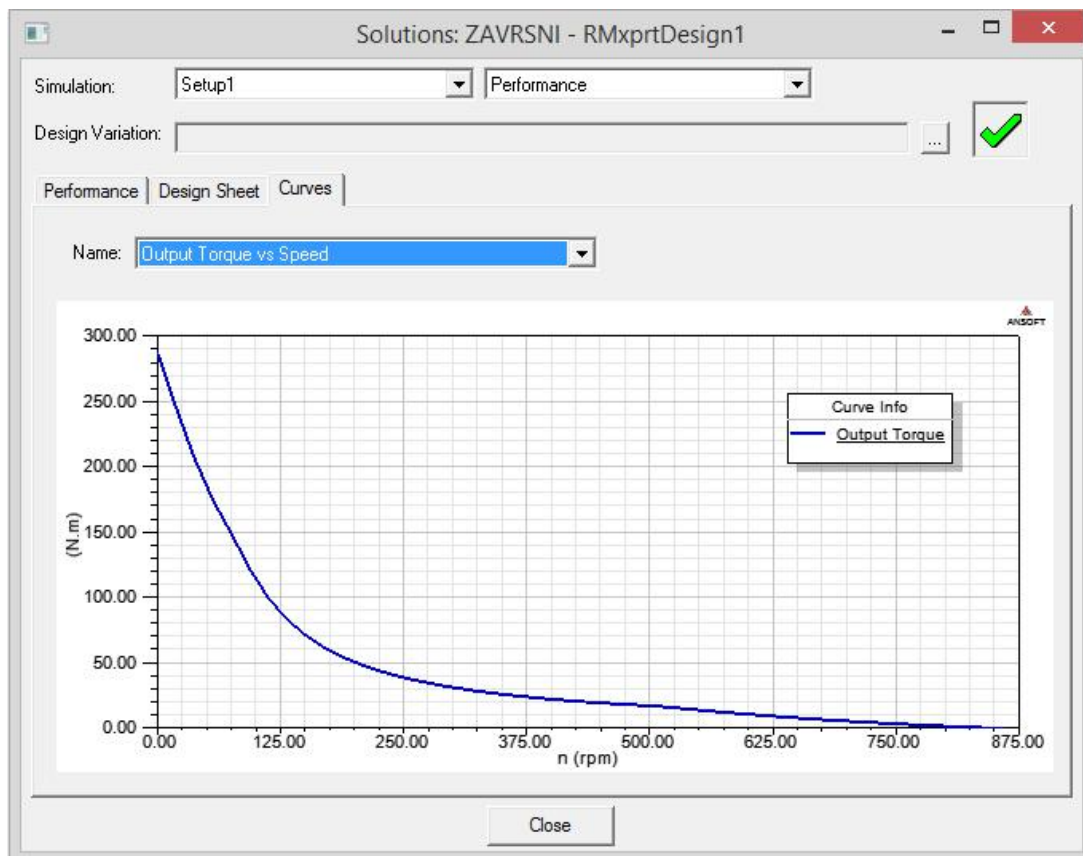
Ponašanje izlaznih karakteristika elektromotora najbolje prikazuju grafovi, odnosno grafički prikazi krivulja ovisnosti određenih parametra o broju okretaja. Prikaz ovisnosti korisnosti, momenta i izlazne snage o broju okretaja prikazan je upravo tim grafovima u daljnjem radu.



Graf 1: Ovisnost koisnosti o broju okretaja



Graf 2: Ovisnost izlazne snage o broju okretaja



Graf 3: Ovisnost okretnog momenta o broju okretaja

Najveći broj okretaja ovog elektromotora iznosi 869 okr/min i to postiže u režimu rada bez opterećenja, odnosno u prazom hodu.

## ZAKLJUČAK

Cilj ovog završnog rada bio je ukazati na prednosti korištenja bezkolektorskih istosmjernih elektromotora te prikazati cjelokupni proces proizvodnje jednog takvog elektromotora. Izuzevši izračun, sam proces proizvodnje pokazao se jednostavnim, a područje primjene proizvoda zapravo može postati vrlo široko. Također, Ansoft Maxwell Software pokazao se kao izuzetno dobar, kvalitetan i precizan program za modeliranje i analizu bezkolektorskih istosmjernih elektromotora. Bez Ansoft Maxwell Software-a i njemu sličnih programa, određivanje i izračunavanje svih potrebnih parametara za stvaranje novog elektromotora bilo bi poprilično teško i dugotrajno. Iako zahtjeva puno eksperimentiranja i korištenja korisničkog priručnika, s druge je strane ipak besplatan i u potpunosti pouzdan. Višestruke prednosti korištenja bezkolektorskog istosmjernog elektromotora u odnosu na ostale elektromotore čine ga najboljim izborom u raznim primjenama. Bezkolektorski istosmjerni elektromotori imaju znatno veću efikasnost, održavanja gotovo nema, vrlo su tihi u radnom režimu, lako su upravljivi, imaju veliki raspon broja okretaja i jedini potrošni dijelovi su ležajevi. Zahvaljujući potpunoj kontroli broja okretaja i okretnog momenta, ovi elektromotori vrlo se lako mogu primijeniti na gotovo sve vrste transportnih sredstava. Jedini nedostaci ovakvih elektromotora su zapravo njihova visoka cijena i nepravilan rad u okruženju vanjskih magnetskih polja. Visoka cijena proizlazi iz kompliciranog upravljačkog kruga te enkodera ili senzora potrebnih za određivanje pozicije rotora. Također, ukoliko se bezkolektorski istosmjerni elektromotor nalazi u magnetiziranoj okolini, prilikom radnog režima može doći do nepravilnog rada odnosno do grešaka u komutaciji i pada broja okretaja. Ipak, usporedimo li ova dva nedostatka bezkolektorskih istosmjernih elektromotora i nedostatke ostalih elektromotora, vidi se da bezkolektorski istosmjerni elektromotor ima najmanje nedostataka i to ga čini najpouzdanijim elektromotorom za bilo koju primjenu. S obzirom da se danas vrlo velika važnost prilikom pretvaranja energije iz jednog oblika u drugi pridaje korisnosti, bezkolektorski istosmjerni elektromotori postaju vrlo poželjni kao pretvornici električne energije u mehaničku, uz vrlo male gubitke i minimalno održavanje.

## LITERATURA

- Električni motor. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2020.
- Padmaraja Yedamale, Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals, Microchip Tehnology Inc., 2003.
- Vladimir Mirković, Josip Užar, Primjena metode konačnih elemenata u građevinarstvu, 2012.
- Edward Ramsden, Hall-Effect Sensors: Theory and Application, 2006.

## POPIS SLIKA I GRAFOVA

SLIKA 1: Bez kolektorski istosmjerni elektromotor za električni motocikl (5 kW)

SLIKA 2: Prikaz pravilnog namatanja statora

SLIKA 3: Primjeri rasporeda trajnih magneta po rotoru elektromotora

SLIKA 4: Shematski prikaz upravljačkog sklopa

SLIKA 5: Radna površina Ansoft Maxwell Software-a

SLIKA 6: Odabir tipa stroja za analizu

SLIKA 7: Unos podataka o statoru

SLIKA 8: Unos podataka o statorskim utorima

SLIKA 9: Unos podataka o zavojnicama

SLIKA 10: Redosljed namatanja zavojnica

SLIKA 11: Veličina i tip trajnih magneta i dimenzije rotora

SLIKA 12: Dio rezultata analize elektromotora

SLIKA 13: Unos dimenzija statora

SLIKA 14: Unos podataka o zavojnicama

SLIKA 15: Konačan model statora

SLIKA 16: Konačan model statora i rotora

SLIKA 17: Dijelovi rotora

SLIKA 18: Lijepljenje trajnih magneta

SLIKA 19: Poklopac kućišta rotora

SLIKA 20: Sastavljeni rotor

SLIKA 21: Dijelovi statora

SLIKA 22: Stator sa postavljenim zaštitama

SLIKA 23: Namatanje prvog namotaja

SLIKA 24: Namatanje druge skupine namotaja

SLIKA 25: Stator s jednom namotanom zavojnicom

SLIKA 26: Namatanje druge zavojnice

SLIKA 27: Stator s dvije namotane zavojnice

SLIKA 28: Namotani stator

SLIKA 29: Hallovi senzori

SLIKA 30: Postavljanje Hallovih senzora

SLIKA 31: Stator sa postavljenim Hallovim sensorima

SLIKA 32: Stator spreman za ugradnju

SLIKA 33: Gotov elektromotor

SLIKA 34: Performanse elektromotora

GRAF 1 : Ovisnost korisnosti o broju okretaja

GRAF 2: Ovisnost izlazne snage o broju okretaja

GRAF 3: Ovisnost okretnog momenta o broju okretaja