Računalna simulacija hlađenja pogonskog elektromotora

Ceilinger, Petra

Master's thesis / Diplomski rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:602117

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-16**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Petra Ceilinger

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Računalna simulacija hlađenja pogonskog elektromotora

Mentor:

Doc. dr. sc. Severino Krizmanić, dipl. ing.

Student:

Petra Ceilinger

Zagreb, 2020.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru doc. dr. sc. Severinu Krizmaniću na stručnom vodstvu i pruženoj pomoći tijekom izrade diplomskog rada.

Zahvaljujem se kolegama iz cijelog CAE odjela tvrtke Rimac-automobili d.o.o. na pruženoj mogućnosti izrade diplomskog rada u sklopu tvrtke, te dobivenoj pomoći i podršci tijekom izrade istog. Posebno se zahvaljujem kolegama iz odjela *Simulations* i *Powertrain*.

Od srca se zahvaljujem roditeljima, cijeloj obitelji, dečku i prijateljima na pruženoj potpori tijekom studija.

Petra Ceilinger

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija zrakoplovstva

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Studentica: **Petra Ceilinger** Mat. br.: 0035195118

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Računalna simulacija hlađenja pogonskog elektromotora**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Numerical simulation of electric drive cooling**

Opis zadatka:

U usporedbi s klasičnim motorima s unutarnjim izgaranjem, moderne elektromotore kao pogonske agregate u putničkom i teretnom transportu odlikuje vrlo visoki stupanj korisnosti. Međutim, i kod elekromotornih pogona se javlja potreba za intenzivnim odvođenjem topline zbog velike specifične snage i kompaktne izvedbe motora. Uz navedeno, optimalne izvedbe sustava hlađenja kod klasičnih pogona su već dobro poznate, dok su elektromotorni pogoni u transportnim sredstvima relativno nova pojava, pa su tako i optimalne izvedbe njihovih podsustava predmet intenzivnog razvoja.

U ovom je radu potrebno provesti računalnu simulaciju hlađenja pogonskog elektromotora koristeći metode računalne dinamike fluida.

U sklopu rada potrebno je:
- opisati objekt simulacije zadan postojećom tehničkom dokumentacijom i skicama idejnih rješenja, dijelove sustava hlađenja i njihove karakteristike;
- izraditi geometrijske i proračunske modele objekta simulacije, te prema potrebi uvesti pojednostavljenja;
- obaviti sve postupke računalnog proračuna: prostorna diskretizacija geometrijskih modela, odabir i podešavanje numeričkog postupka, post-procesiranje rješenja.

Rad treba sadržavati:
- uvod;
- opis problema i metoda primijenjenih za njihovo rješavanje;
- odgovarajuće prikaze dobivenih rezultata i osvrt na rezultate;
- zaključke.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:	Rok predaje rada:	Predviđeni datumi obrane:
14. studenoga 2019.	16. siječnja 2020.	20. – 24.1.2020.

Zadatak zadao:
Doc. dr. sc. Severino Krizmanić

Predsjednik Povjerenstva:
Prof. dr. sc. Milan Vrdoljak

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA III
POPIS TABLICA V
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE VI
POPIS OZNAKA VII
SAŽETAK VIII
SUMMARY IX
1. UVOD 1
2. POGONSKI ELEKTROMOTORI I NJIHOVO HLAĐENJE 5
2.1. Indukcijski elektromotori 5
2.2. Elektromotori s permanentnim magnetima 6
2.2.1. Permanentni magneti korišteni kod elektromotora 8
2.3. Hlađenje elektromotora 9
2.3.1. Sustavi hlađenja elektromotora s rashladnom tekućinom 10
2.4. Elektromotori u zrakoplovstvu 15
2.5. Opis zadatka 16
3. MATEMATIČKI MODEL 17
3.1. Jednadžbe računalne dinamike fluida 17
3.1.1. Jednadžba kontinuiteta 17
3.1.2. Jednadžba očuvanja količine gibanja 18
3.1.3. Jednadžba očuvanja energije 18
3.1.4. Conjugate Heat Transfer – Prijenos topline između krutine i fluida 19
3.1.4.1. Prijenos topline kondukcijom 19
3.1.4.2. Prijenos topline konvekcijom 19
3.1.4.3. Svojstva materijala i bezdimenzijske značajke 20
3.1.5. Energijska jednadžba prijenosa topline u krutinama 21
3.1.6. Energijska jednadžba prijenosa topline u fluidima 21
3.2. *k-ω* SST model turbulencije 22
3.3. *Multiple Refrence Frame* (MRF) 24
3.3.1. Jednadžbe nestlačivog strujanja u rotacijskom koordinatnom sustavu 25
4. NUMERIČKI MODEL 27
4.1. Izrada geometrijskog modela elektromotora 27
4.2. Izrada numeričkih mreža 30
4.3. Ventilacijski gubici 36
4.4. Postavke simulacije 37
4.4.1. Rješavač 37
4.4.2. Struktura OpenFOAM case-a 38
4.4.3. Svojstva materijala 40
4.4.4. Početni i rubni uvjeti 42

4.4.4.1. Početni uvjeti 42
4.4.4.2. Rubni uvjeti 44
4.4.5. Podrelaksacija 45
5. REZULTATI I RASPRAVA 46
5.1. Ventilacijski gubici 46
5.2. Konvergencija rezultata 46
5.3. Elektromotor s glatkim rotorom 48
5.4. Elektromotor s lopaticama na rotoru 59
6. ZAKLJUČAK 71
LITERATURA 72

POPIS SLIKA

Slika 1. Sveukupni troškovi vlasništva zrakoplova [2] 1
Slika 2. Shema potpuno električnog pogona zrakoplova [3] 3
Slika 3. Shema serijsko hibridnog koncepta pogona zrakoplova [3] 3
Slika 4. Shema paralelno hibridnog koncepta pogona zrakoplova [3] 3
Slika 5. Siemens-FlyEco Mangus eFusion zrakoplov [5] 4
Slika 6. Shematski prikaz indukcijskog elektromotora [8] 6
Slika 7. Shematski prikaz SPM i IPM motora [9] 7
Slika 8. Prikaz dva načina umetanja magneta u rotor [10] 8
Slika 9. Shematski prikaz sustava hlađenja vodenim ogrtačem [12] 11
Slika 10. Tangencijalni način prolaska rashladne tekućine oko statora [11] 11
Slika 11. Aksijalni način prolaska rashladne tekućine oko statora [11] 12
Slika 12. Shematski prikaz sustava hlađenja elektromotora vodenim ogrtačem s unutrašnjom cirkulacijom zraka [12] 13
Slika 13. Shematski prikaz hlađenja elektromotora uljem [12] 14
Slika 14. Stator elektromotora 27
Slika 15. Željezo rotora elektromotora i magneti 28
Slika 16. Rotor elektromotora s lopaticama 28
Slika 17. Prikaz geometrije modela s lopaticama na rotoru 29
Slika 18. Prikaz geometrije modela s glatkim rotorom 29
Slika 19. Konvergencija maksimalnih temperatura regija 48
Slika 20. Raspodjela temperature na magnetima 49
Slika 21. Raspodjela temperature na magnetima po poprečnom presjeku magneta 50
Slika 22. Raspodjela temperature na željezu rotora koje je u dodiru s magnetima 50
Slika 23. Temperaturna raspodjela na željezu rotora 51
Slika 24. Temperaturna raspodjela po poprečnom presjeku željeza rotora 52
Slika 25. Temperaturna raspodjela po poprečnom presjeku željeza rotora 52
Slika 26. Temperaturna raspodjela na aluminijskom dijelu rotora 53
Slika 27. Temperaturna raspodjela po poprečnom presjeku aluminijskog dijela rotora 53
Slika 28. Temperaturna raspodjela po statoru 54
Slika 29. Raspodjela temperature po poprečnom presjeku statora 54
Slika 30. Raspodjela temperature po bakrenom dijelu statora 55
Slika 31. Raspodjela temperature po željeznom dijelu statora 55
Slika 32. Raspodjela temperature u zraku unutar elektromotora 56
Slika 33. Raspodjela temperature po poprečnom presjeku u zraku 56
Slika 34. Raspodjela temperature po poprečnom presjeku na prednjoj strani zraka 57
Slika 35. Raspodjela temperature po poprečnom presjeku na stražnjoj strani zraka 57
Slika 36. Raspodjela brzine u zraku 58
Slika 37. Raspodjela brzine po poprečnom presjeku zraka 58
Slika 38. Raspodjela brzine na dodiru zraka i rotora 59
Slika 39. Raspodjela temperature po magnetima 59
Slika 40. Raspodjela temperature po poprečnom presjeku magneta 60
Slika 41. Raspodjela temperature po željezu rotora koje je u dodiru s magnetima 60
Slika 42. Raspodjela temperature u željezu rotora 61
Slika 43. Raspodjela temperature po poprečnom presjeku željeza rotora 61
Slika 44. Raspodjela temperature po poprečnom presjeku željeza rotora 61
Slika 45. Raspodjela temperature u aluminijskom dijelu rotora 62

Slika 46. Raspodjela temperature po poprečnom presjeku u aluminijskom dijelu rotora 62
Slika 47. Raspodjela temperature po lopaticama rotora.....63
Slika 48. Raspodjela temperature po lopatici rotora.....63
Slika 49. Raspodjela temperature u statoru.....64
Slika 50. Raspodjela temperature po poprečnom presjeku statora.....64
Slika 51. Raspodjela temperature u bakrenom dijelu statora.....65
Slika 52. Raspodjela temperature u željeznom dijelu statora.....65
Slika 53. Raspodjela temperature u zraku unutar elektromotora.....66
Slika 54. Raspodjela temperature po poprečnom presjeku zraka.....66
Slika 55. Raspodjela temperature po poprečnim presjecima zraka na prednjoj strani 67
Slika 56. Raspodjela temperature po poprečnim presjecima zraka na stražnjoj strani.....67
Slika 57. Raspodjela brzine u zraku.....68
Slika 58. Raspodjela brzine po poprečnom presjeku zraka.....68
Slika 59. Raspodjela brzine na površini dodira zraka i rotora.....69

POPIS TABLICA

Tablica 1. Materijali permanentnih magneta i njihove karakteristike [9] 8
Tablica 2. Željene performanse razvijanih elektromotora [4] 15
Tablica 3. Koeficijenti *k-ωSST* modela [15] 24
Tablica 4. Podaci o mrežama motora s glatkim rotorom 30
Tablica 5. Podaci o mrežama motora s lopaticama na rotoru 33
Tablica 6. Kvaliteta mreže slučaja glatkog rotora 36
Tablica 7. Kvaliteta mreže slučaja rotora s lopaticama 36
Tablica 8. Svojstva materijala krutina [21] 41
Tablica 9. Svojstva fluida [21] 41
Tablica 10. Volumni toplinski izvori na 1/8 modela 41
Tablica 11. Početni uvjeti za tlak krutina 42
Tablica 12. Početni uvjeti za temperaturu regija krutina *magnets, rotorAl, rotorFe* i *rotorFeMag* 42
Tablica 13. Početni uvjeti za temperaturu regija krutina *statorCu* i *statorFe* 43
Tablica 14. Početni uvjeti za zrak *U, T, p* i *p_rgh* 44
Tablica 15. Početni uvjeti za zrak *alphat, k, nut* i *omega* 44
Tablica 16. Usporedba ventilacijskih gubitaka [W] 46
Tablica 17. Podaci za usporedbu 49
Tablica 18. Usporedba rezultata 70

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

1 Stator

2 Glatki rotor

3 Rotor s lopaticama

4 Magneti u rotoru

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	m^2	Površina
a	m^2/s	Toplinska provodnost
Bi	-	Biotov broj
c_p	J/(kg K)	Specifični toplinski kapacitet
f_i	N/kg	Masene sile
h	$W/(m^2 K)$	Koeficijent prijenosa topline
I	-	Intenzitet turbulencije
k		Turbulentna kinetička energija
M	kg/mol	Molarna masa
p	Pa	Tlak
Pr	-	Prandtlov broj
Pr_t	-	Turublentni Prandtlov broj
R	J/(mol K)	Plinska konstanta
Re	-	Reynoldsov broj
Q	J	Toplina
Q_i	W	Volumenski izvor topline
q	W/m^2	Toplinski tok
T	K	Temperatura
$\boldsymbol{u}$	m/s	Vektor brzine
v	m/s	Komponenta brzine
W	W	Ventilacijski gubici
Σ_{ji}	N/m^2	Simetrični tenzor viskoznosti
δ_{ij}	-	Kroneckerov simbol
λ	W/(m K)	Toplinska provodljivost
μ	Pa s	Dinamička viskoznost
ν	m^2/s	Kinematička viskoznost
ν_t	m^2/s	Turbulentna kinematička viskoznost
ρ	kg/m^3	Gustoća
ω	s^{-1}	Specifična turbulentna energija

SAŽETAK

Ideja električnog pogona transportnih sredstava svakim danom postaje sve zastupljenija. Razlozi tome leže u manjem zagađenju u odnosu na motore s unutarnjim izgaranje, tiši rad, smanjenje buke, jeftinijem „gorivu“. Uz baterije za spremanje energije, najvažniji sastavni dio električnog sustava transportnih sredstava je električni motor. Prolaskom struje kroz namotaje statora i brzim okretanjem motora dolazi do njegovog zagrijavanja. Kako bi se smanjili toplinski gubici potrebno je obratiti posebnu pažnju na hlađenje elektromotora.

U ovom radu su metodama računalne dinamike fluida (RDF) provedene simulacije hlađenja rotora elektromotora s permanentnim magnetima za dva slučaja. Jedan je slučaj glatkog rotora, a drugi slučaj je rotor s lopaticama. Simulacije prijenosa topline su provedene u programu *OpenFOAM* 4.1. Dobiveni rezultati simulacija za glatki rotor uspoređeni su s dobivenim podacima za usporedbu. Također, međusobno su uspoređeni i podaci dobiveni RDF simulacijama za slučaj glatkog rotora i rotora s lopaticama. Na temelju rezultata na kraju rada dan je zaključak.

Ključne riječi: elektromotor, glatki rotor, rotor s lopaticama, prijenos topline, RDF

SUMMARY

The idea of electric propulsion is becoming more and more prevalent every day. Reasons for that are lower pollution in comparison with internal combustion engines, silent engine operation, lower noise level, cheaper propulsion. With battery for storing energy, electric motors are one of the most important part of the electric drive system. By passing current through stator windings and great rotor speed of rotation, motor is heating up. Therefore, to reduce heat losses, the motor must be cooled.

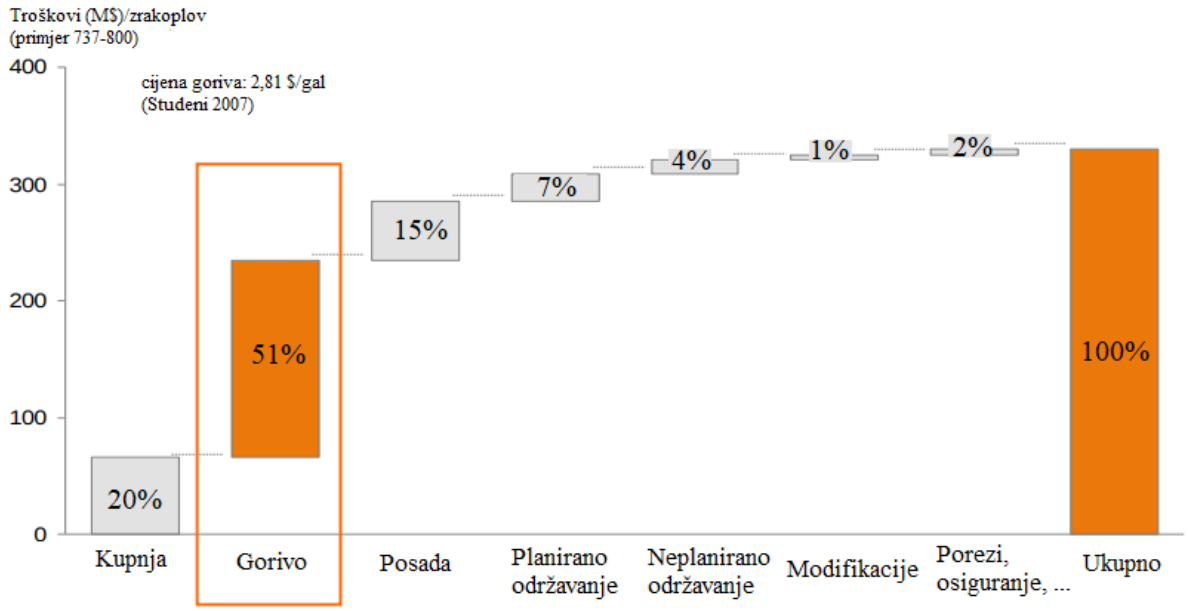
In these thesis, CFD conjugate heat transfer simulations in program *OpenFOAM* 4.1 were carried out for two cases. One is the motor with no blades on rotor, ie. flat rotor, and the other one is motor with blades on rotor. The CFD results for motor with no rotor blades were compared with given data. The CFD results for motors with and without rotor blades were compared mutually. Based on the results, at the end of this thesis, a conclusion is given.

Key words: electric motor, flat rotor, rotor with blades, conjugate heat transfer, CFD

1. UVOD

Zbog zabrinjavajućih klimatskih promjene i zagađenja zraka, te zahtjeva tržišta za novom generacijom vozila, potpuno baterijski pogonjena vozila smatraju se budućnošću. Kako je za održivu i zelenu budućnost važno smanjiti upotrebu motora s unutarnjim izgaranjem u transportnim vozilima, sve se više pažnje posvećuje korištenju električnih motora za pogon transportnih sredstava. Razvoj električnih motora, točnije električnih motora s permanentnim magnetima, doveo je do sljedećih poboljšanja: maksimalna brzina rotacije se povećala do 20000 okretaja u minuti, gustoća snage se povećava, masa se smanjuje, a aksijalne dimenzije motora postaju sve manje. Problem nastaje u sve većoj toplini koja se generira na elektromotoru, zbog toga performanse i trajanje takvih strojeva izrazito ovise o termalnim uvjetima u kojima se nalaze. Optimalna konstrukcija sustava hlađenja elektromotora igra vitalnu ulogu u povećanju sveukupne efikasnosti, produljenju životnog vijeka elektromotora, te prevenciji demagnetiziranja permanentnih magneta unutar elektromotora [1].

Danas, zbog sve većih ekoloških problema i strogih regulacija emisija i buke, električna vozila postaju sve zanimljivija i u zrakoplovnoj industriji. Jedan dodatan razlog želje prelaska na električnu energiju za pogon ekonomske je prirode. Naime, konvencionalno gorivo predstavlja 51% sveukupnih troškova vlasništva zrakoplova [2]. Na slici 1 grafički je prikazana raspodjela troškova vlasništva zrakoplova, od trenutka kada ga kupac kupi do trenutka kada prestane biti njegovo vlasništvo, bilo da ga je prodao ili umirovio.



Slika 1. Sveukupni troškovi vlasništva zrakoplova [2]

Podaci u ovom grafikonu su iz rujna 2007. godine i dobiveni su promatranjem satnih operativnih troškova 41 američkih zrakoplova Boeing 737-800. Pretpostavljeno je prosječno vrijeme korištenja zrakoplova 10,3 sati dnevno, dok je životni ciklus predviđen na 20 godina. Kada bi se u potpunosti prešlo na električnu energiju, sveukupni troškovi vlasništva zrakoplova bili bi znatno manji. Električni pogon u zrakoplovu omogućio bi:

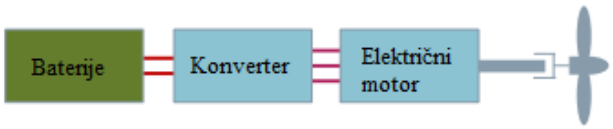
- manju ili nikakvu potrošnju goriva, pa time i zagađenje,
- povećanje aerodinamičke efikasnosti,
- tihi pogon, što bi omogućilo smanjenje buke,
- manje troškove (gorivo, održavanje, ...) [3].

Prelazak na električnu energiju za pogon zrakoplova vrlo je aktivna tema današnjice, te se mnogi bave istraživanjima i eksperimentima na tu temu. Neki od njih su NASA koja se bavi istraživanjima o uvođenju električne energije za pogon velikih putničkih zrakoplova, dok se Siemens bavi pogonom malih sportskih zrakoplova. 2018. godine na AeroEXPO u Friedrichshafenu Siemens i FlyEco predstavili su dva električna zrakoplova od kojih je jedan potpuno električni Extra 330LE, a drugi je hibridni eFusion. Za pogon velikih zrakoplova potrebne su i velike snage elektromotora (oko 1 MW po motoru [4]), te puno energije za dovoljno dugo trajanje leta. Kako danas još uvijek ne postoje baterije koje bi u razumnim dimenzijama i masama osigurale potrebne količine energije, NASA ima plan da se do 2035. godine uvede hibridni uskotrupni putnički zrakoplovi [4].

Postoje tri osnovna koncepta električnog pogona zrakoplova:

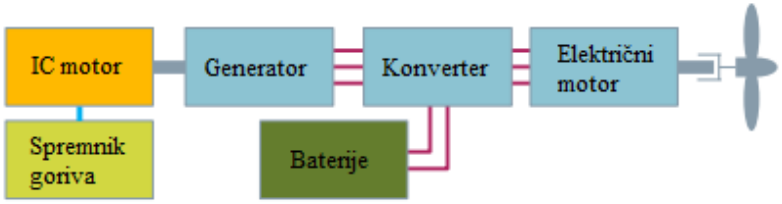
- potpuno električni,
- serijsko hibridni,
- paralelno hibridni [3].

Potpuno električni koncept za pogon zrakoplova koristi energiju iz baterija za pokretanje elektromotora koji pretvara električnu energiju u mehaničku kojom se ostvaruje rotacija propelera. Prednost takvog koncepta je jednostavnost, a nedostatak mu je u niskoj izdržljivosti baterija, pa time i ograničenom kratkom trajanju leta. Ovakav pogon koristi zrakoplov Extra 330LE i maksimalno trajanje leta mu je 20 minuta. Grafički prikaz ovakvog koncepta pogona nalazi se na slici 2.



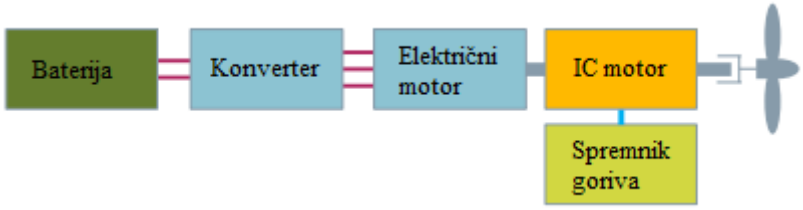
Slika 2. Shema potpuno električnog pogona zrakoplova [3]

Kod serijsko hibridnog koncepta koriste se elektromotor i motor s unutrašnjim izgaranjem zajedno. Baterijski pogon elektromotora se koristi za tiho polijetanje i slijetanje sa smanjenjem ispuštanja emisija, dok se tijekom leta motor s unutrašnjim izgaranjem koristi za generiranje električne energije kojima se pune baterije u letu, također preko generatora daje energiju elektromotoru koji okreće propeler. Prednosti takve konfiguracije su tiša polijetanja i slijetanja, te reducirane emisije prilikom istih faza leta. Nedostatak je u kompleksnosti izrade i većoj masi. Na slici 3. nalazi se prikaz serijsko hibridnog koncepta pogona.



Slika 3. Shema serijsko hibridnog koncepta pogona zrakoplova [3]

Kod paralelno hibridnog koncepta elektromotori osiguravaju rotaciju i pomažu motorima s izgaranjem da postignu vrhunske performanse. Konvencionalni motor u tom slučaju radi na svojoj optimalnoj radnoj točki, a dodatna snaga se dobiva od elektromotora. To je prednost ovog koncepta pogona zrakoplova, dok je nedostatak u kompleksnosti izrade i dodatnoj masi. Na slici 4. nalazi se prikaz paralelno hibridnog koncepta pogona zrakoplova.



Slika 4. Shema paralelno hibridnog koncepta pogona zrakoplova [3]

Primjer hibridnog zrakoplova koji koristi serijski koncept pogona je prije spomenuti Mangus eFusion koji je prikazan na slici 5. Kod njega se za pogon koristi Siemensov elektromotor SP55D. Snaga ovog elektromotora je 60 kW, a maksimalno može postići i 85 kW kratkotrajne snage. Jedan dizel motor s 3 cilindra koji se inače koristi u automobilu Smart koristi se za punjenje baterija u letu, te također i za pogon u letu. Kako je prije navedeno elektromotor kod polijetanja i slijetanja koristi energiju iz baterija, a tijekom leta dizelski motor preko generatora daje energiju elektromotoru koji pokreće propeler, te također puni baterije.

Slika 5. Siemens-FlyEco Mangus eFusion zrakoplov [5]

Sveukupni cilj uvođenja električne energije za pogon zrakoplova je smanjenje potrošnje goriva, tj. potrošnje energije, te smanjenje emisija i buke. Jedna od najvažnijih komponenata električnog pogona vozila je elektromotor. Detaljnije o elektromotorima za pogon vozila bit će opisano u poglavlju 2.

2. POGONSKI ELEKTROMOTORI I NJIHOVO HLAĐENJE

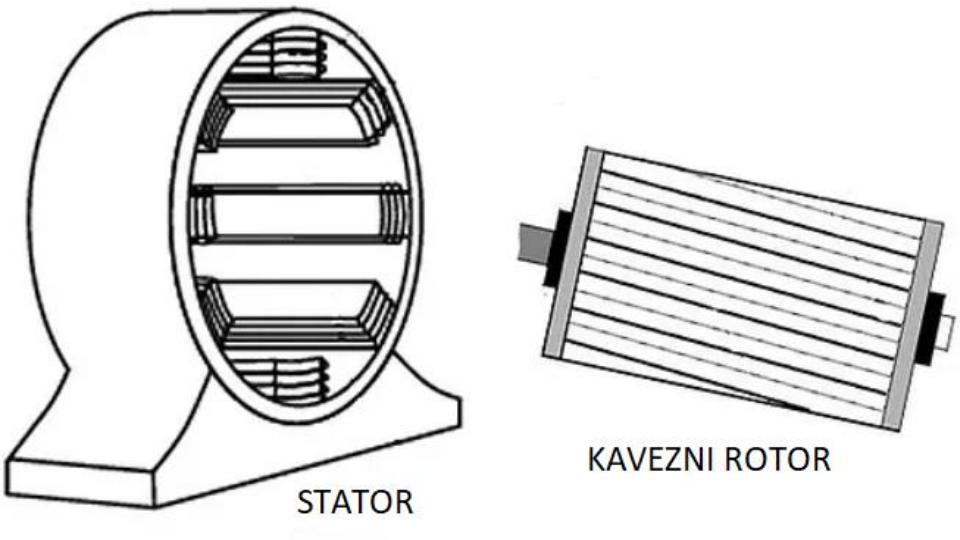
Zadaća električnih motora je pretvaranje električne energije u mehanički rad. Elektromotori su rotacijski strojevi koji rad obavljaju okretajem rotora uz razvijanje okretnog momenta. Postoje dvije vrte elektromotora:

- istosmjerni elektromotori,
- izmjenični elektromotori.

Kao što i samo njihovo ime kaže, ti motori pretvaraju ili istosmjernu ili izmjeničnu električnu struju u mehanički rad. Za električki pogonjena vozila korite se i istosmjerni i izmjenični motori. Najčešće su to izmjenični ili indukcijski ili elektromotori s permanentnim magnetima. Indukcijski elektromotori jeftinija su varijanta jer nemaju magnete od skupih materijala, ali imaju manju efikasnost što je uzrok i većoj masi samog motora, zahtijevaju veći inverter i kapacitet baterije [6]. To su ujedno i razlozi zašto se češće koriste elektromotori s permanentnim magnetima iako su skuplji. U izmjeničnim pogonskim elektromotorima također je potreban i inverter koji pretvara istosmjernu u izmjeničnu struju jer baterije daju samo istosmjernu struju.

2.1. Indukcijski elektromotori

Kod ovog elektromotora rotacijsko polje generira se u statorskim namotajima. To rotacijsko polje inducira struju na rotorskim rešetkama koje su kratko spojene. Generiranje struje zahtjeva razliku u brzini između rotora i magnetskog polja. Zbog toga se taj elektromotor naziva još i asinkronim elektromotorom. Interakcija između magnetskog polja i struje izaziva pogonsku silu. Indukcijski elektromotori dijele se na jednofazne i trofazne [7]. Kod trofaznog motora faze su zamaknute za 120°, što je ujedno i kut između magnetskih polja, a to omogućuje zakretanje rotora. Kod jednofaznog motora postoje pomoćni namotaji u statoru s kojim je u seriji spojen kondenzator. Kondenzator je zaslužan za razliku u fazi kada struja teče kroz zavojnice što omogućava pokretanje elektromotora. Trofazni se indukcijski elektromotori prema izvedbi rotorskog namotaja dijele na kavezne i klizno-kolutne. Kod kaveznih rotora bakrene žice su kratko spojene na oba dva kraja i nisu spojene na vanjsku uzbudu, dok su kod klizno kolutnih preko ležaja spojene na vanjsku uzbudu i nisu kratko spojene. Na slici 6 nalazi se shematski prikaz indukcijskog elektromotora.



Slika 6. Shematski prikaz indukcijskog elektromotora [8]

Indukcijski elektromotori jednostavne su konstrukcije, robusni su i pouzdani u pogonu. Također velike su efikasnosti, čak do 97%. Glavni nedostatak im je variranje brzine rotora s primijenjenim opterećenjem. Zbog toga se ipak češće u pogonskim elektromotorima koriste elektromotori s permanentnim magnetima.

2.2. Elektromotori s permanentnim magnetima

Permanentni magneti u elektromotorima upotrebljavaju se za postizanje uzbudnog magnetskog toka, tj. za zamjenu uzbudnog namotaja u rotoru. Takvi motori nemaju dovođenje uzbudne struje rotoru, već se uzbuda dobiva iz permanentnih magneta. Zbog toga su i manji gubici zbog razvijene topline u motoru. Ostale prednosti takvog elektromotora su da ima veliki okretni moment i izlaznu snagu u manjim dimenzijama i masi što doprinosi i manjoj inerciji, te je momentna karakteristika ravna u cijelom području rada. Također je i jednostavnije konstrukcije i održavanja jer nema kolektora, komutatora, četkica itd. Postoji više izvedba elektromotora s permanentnim magnetima, a razlikuju se prema:

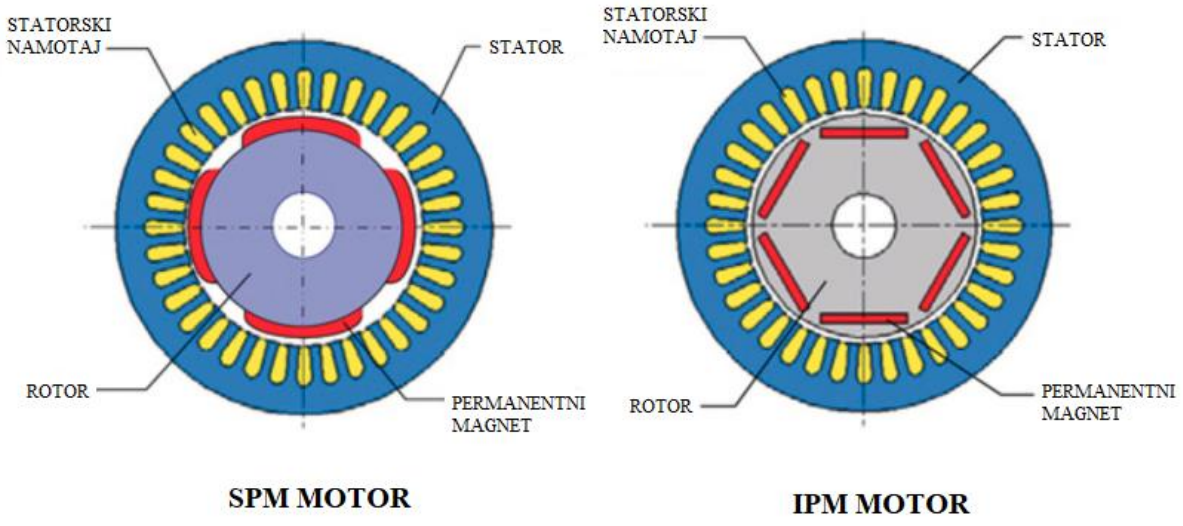
- usmjerenosti magnetskog toka radijalno ili aksijalno u elektromotoru,
- rotoru kao vanjskom ili unutarnjem dijelu elektromotora,
- načinu smještaja magneta...

Prema usmjerenosti razlikuju se elektromotori s radijalnim magnetskim tokom ili s aksijalnim. U ovom radu promatra se elektromotor s permanentnim magnetima s radijalnim magnetskim tokom. U takvim elektromotorima struja teče uzdužno, a magnetski tok je usmjeren radijalno. Stator ovakvog elektromotora sličan je statoru indukcijskog elektromotora.

Prema smještaju magneta u rotoru dijele se na:

- magneti na površini rotora (eng. „*surface permanent magnet motor*“ – SPM),
- magneti u unutrašnjosti rotora (eng. „*interior permanent magnet motor*“ – IPM) [9].

Na slici 7 nalazi se prikaz smještaja magneta kod SPM i IPM motora.

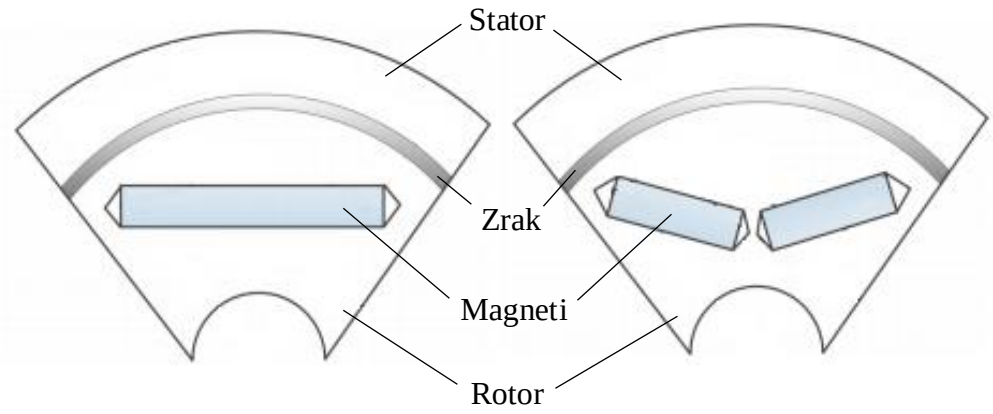


Slika 7. Shematski prikaz SPM i IPM motora [9]

SPM motori imaju magnete pričvršćene na vanjsku površinu rotora, ili su magneti umetnuti u površinu rotora. Glavna prednost takve izvedbe je jednostavnost izrade i montaže, dok su nedostaci izloženost magneta mogućem demagnetiziranju i mogućnost otpadanja blokova magneta s rotora pri većim brzinama vrtnje zbog djelovanja centrifugalne sile. U odnosu na izvedbu s magnetima u unutrašnjosti rotora imaju slabiju mehaničku snagu što ograničava maksimalnu brzinu vrtnje.

IPM motori imaju magnete ugrađene u unutrašnjost rotora, te su zbog toga IPM motori prikladni za upotrebu kod velikih broja okretaja. Postoji jako puno različitih načina umetanja magneta u rotor. Magneti mogu biti umetnuti kao veliki blokovi ili mogu biti rascjepkani, također mogu

biti postavljeni kao ravni, u V obliku, itd. Na slici 8 prikazana su dva različita načina umetanja magneta.



Slika 8. Prikaz dva načina umetanja magneta u rotor [10]

2.2.1. Permanentni magneti korišteni kod elektromotora

Za primjenu u elektromotorima se koriste različiti permanentni magneti. Permanentni magneti razlikuju se prema materijalu od kojeg su napravljeni. U tablici 1 nalazi se popis materijala od kojeg se izrađuju takvi magneti, te neke njihove karakteristike.

Tablica 1. Materijali permanentnih magneta i njihove karakteristike [9]

Materijal permanentnih magneta	Karakteristike
Niobij-željezo-bor (NbFeB)	Ima jako dobra svojstva za PM motore, temperatura demagnetiziranja (Curie temperatura) je vrlo niska, oko 150°C
Samarij-kobalt (SmCo)	Odlične performanse na visokim temperaturama (550°C), ali skupi
Aluminij-nikal-kobalt	Jeftini i dobrih svojstava, lako se demagnetiziraju
Feritno željezo	Jeftini, temperatura demagnetiziranje (450°C), remanencija je niska i zbog toga su potrebne veće dimenzije motora

Permanentni magneti se mogu demagnetizirati, tj. izgubiti svoja magnetska svojstva ako dožive pad ili udarac, ako se postignu vrlo visoke temperature ili pod utjecajem velikih električnih poremećaja ili smetnji. Feromagnetski materijali imaju nerazdvojiva magnetska svojstva, što znači koliko god ih cijepali, oni će imati dva pola, sjeverni i južni. Međutim, ta magnetska svojstva mogu biti emitirana u bilo kojem smjeru. Jedan od načina kako se feromagnetski materijali magnetiziraju je primjenom jakog magnetskog polja na materijal što izaziva da se magnetski dipoli usmjere, tj. poravnaju. Snažan udarac može pomaknuti atomsku poravnanost materijala, što oslabljuje njegovo magnetsko polje.
Temperatura također može utjecati na permanentni magnet. Toplina prisiljava magnetske čestice u materijalu da se miješaju. Magnetski dipoli imaju mogućnost da se odupru nekoj količini topline, iako izlaganje određenim temperaturama može smanjiti magnetsku snagu. Svi magnetni materijali imaju prag poznat kao Curie temperatura. Ta temperatura je prag koji definira temperaturu iznad koje će se demagnetizirati magnet.
Veliki električni poremećaji također mogu izazvati demagnetiziranje magneta. Ti poremećaji mogu biti zbog djelovanja materijala s velikim magnetskim poljem ili ako visoka struja prođe kroz materijal.

2.3. Hlađenje elektromotora

Elektromotor prilikom rada generira toplinu zbog elektromagnetskih, mehaničkih i ostalih gubitaka. Preko kondukcije, konvekcije i/ili zračenja toplina se prenosi na rashladni medij bazirano na razlici u temperaturama. Previsoka temperatura štetna je za elektromotor jer može doći do starenja izolacije vodiča, uništenja važnih komponenti kao što su vodiči namotaja, demagnetiziranja magneta, itd. Zbog toga je potrebno hladiti elektromotor. Za hlađenje elektromotora koriste se dvije osnovne metode:

- hlađenje zrakom,
- hlađenje rashladnim tekućinama.

Danas se elektromotori u automobilskoj industriji zbog relativno niskog koeficijenta prijenosa topline najčešće hlade tekućinama. Tekućine koje se najčešće koriste su voda, mješavine s vodom i ulje. Voda se najčešće koristi za indirektno hlađenje u sustavu hladnog ogrtača (eng. "*cooling jacket*") gdje cirkulira po kanalima u kućištu elektromotora. Ulje se koristi za direktno hlađenje ubrizgavanjem u unutrašnjost motora na vrući dio. Prednosti vodenog hlađenja u odnosu na zračno su sljedeći:

- veći omjer snage i veličine elektromotora,
- manja buka,
- veća iskoristivost,
- toplina koja se odvodi s motora ne disipira se direktno u okoliš,
- može se koristiti u potpuno zatvorenoj okolini.

Nedostaci su sljedeći:

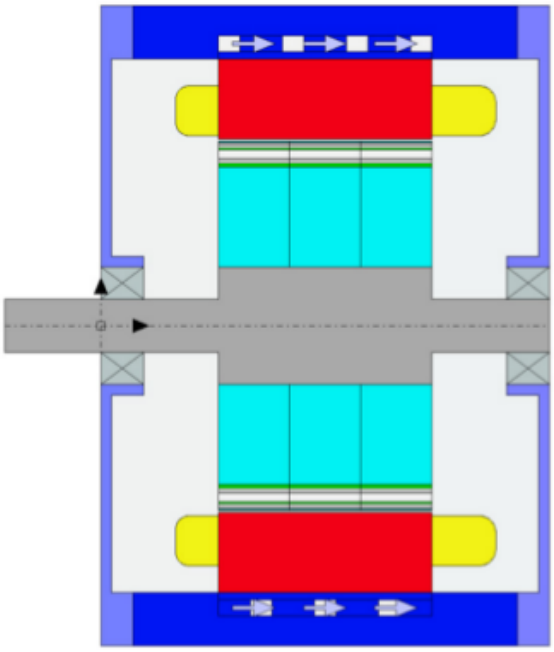
- skuplja proizvodnja,
- postojanje rizika od korozije,
- postojanje potrebe za kontroliranjem kemijskog sastava rashladne tekućine,
- postojanje rizika od zagađenja rashladne tekućine [11].

2.3.1. Sustavi hlađenja elektromotora s rashladnom tekućinom

Postoji mnogo sustava za hlađenje pogonskih elektromotora rashladnim tekućinama, a ovdje će ukratko biti opisana tri najčešće korištena načina:

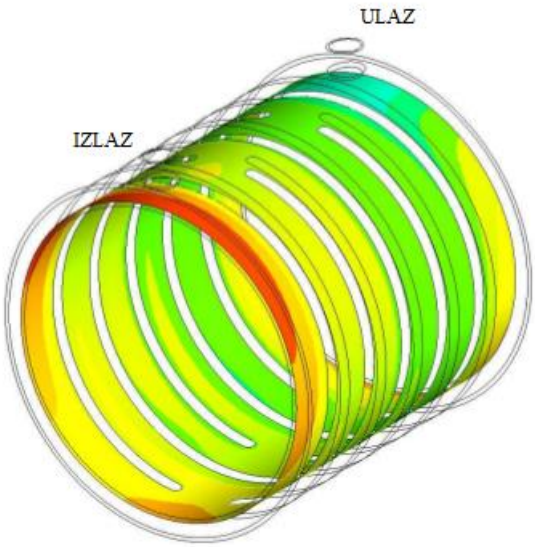
- hlađenje vodenim ogrtačem (eng. „*water jacket*“),
- hlađenje vodenim ogrtačem s unutarnjom cirkulacijom zraka,
- naštrcavanje ulja.

Sustav hlađenjem vodenim ogrtačem tipičan je način hlađenja električnih motora u transportnoj industriji. Kao što i samo ime kaže, ovaj tip hlađenja najčešće kao medij koristi vodu, a postoje i izvedbe gdje se koriste druge rashladne tekućine kao što su mješavine vode i glikola. Voda prolazi unutar kućišta oko statora elektromotora, te nema direktnog hlađenja rotora, već se rotor hladi predavanjem topline zraku između rotora i statora. Taj zrak predaje toplinu statoru, a stator ju predaje prema vodi, tj. rashladnoj tekućini. Slika 9 prikazuje skicu takvog hlađenja.



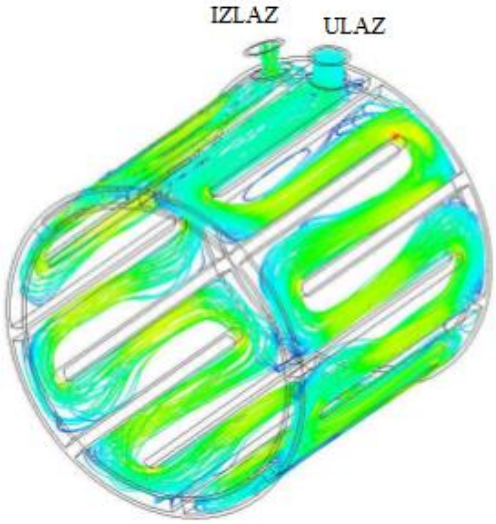
Slika 9. Shematski prikaz sustava hlađenja vodenim ogrtačem [12]

To je najjednostavniji način hlađenja i pruža dovoljno dobro hlađenje. Ovaj način najčešće je ili tangencijalan ili aksijalan [11]. Razlika je u načinu prolaska vode oko statora. Kod tangencijalnog načina voda prolazi kroz kanale koji su postavljeni spiralno u kućištu elektromotora oko statora. Grafički prikaz ovakvog načina prolaska vode prikazan je na slici 10.



Slika 10. Tangencijalni način prolaska rashladne tekućine oko statora [11]

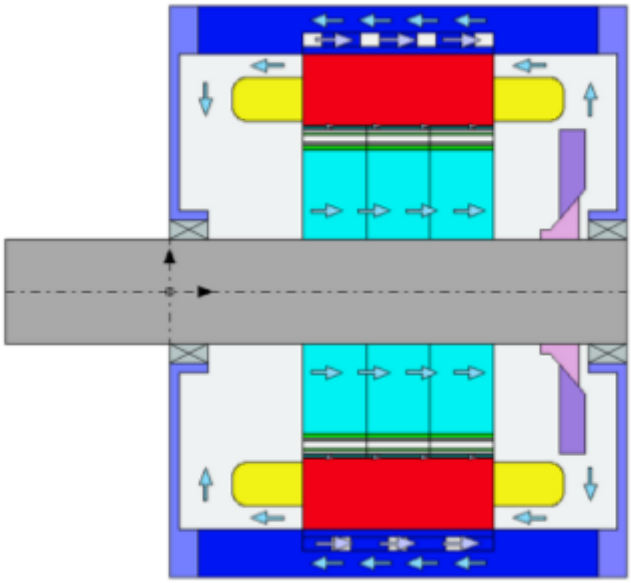
Kod aksijalnog prolaska tekućine oko statora voda prolazi kroz kanale postavljene po dužini statora. Kanali su postavljeni po cijelom krugu. Prikaz jednog od mnogih načina aksijalnog prolaska tekućine oko statora nalazi se na slici 11.



Slika 11. Aksijalni način prolaska rashladne tekućine oko statora [11]

Prednost aksijalnog načina je u tome što se voda i unutarnje površine manje zagriju, dok su nedostaci što je veći pad tlaka i potrebna je pumpa veće snage. Kod tangencijalnog načina pad tlaka je manji, pa se time smanjuje i potrebna snaga pumpe, ali dolazi do jačeg zagrijavanja fluida i unutarnjih površina [11].

Drugi način hlađenja je sustav hlađenja vodenim ogrtačem s unutrašnjom cirkulacijom zraka koja se ostvaruje ventilatorom pričvršćenim na osovinu. Zrak cirkulira između kanala za hlađenje na rotoru i kućišta. Zrak se hladi kada prolazi pokraj kućišta koje se ponaša kao izmjenjivač topline između vode i zraka. Prednost ovakvog sustava je što se snizuje temperatura zraka u elektromotoru i tako se osigurava hlađenje rotora i magneta čak i onda kada je motor hermetički zatvoren [12]. To potencijalno osigurava da se može koristiti jeftiniji magnet koji se demagnetizira na nižim temperaturama jer postoji njegovo direktno hlađenje zrakom. Na slici 12 se nalazi prikaz takvog način hlađenja.



Slika 12. Shematski prikaz sustava hlađenja elektromotora vodenim ogrtačem s unutrašnjom cirkulacijom zraka [12]

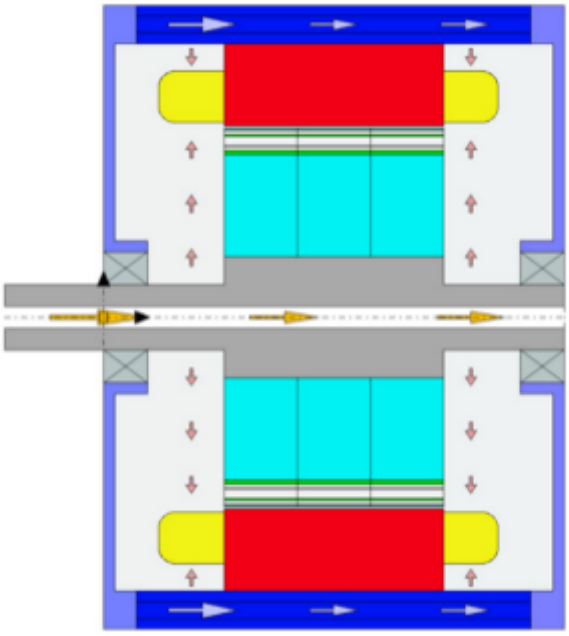
Kod ovo načina ventilacijski gubici zbog ventilatora u odnosu na električne gubitke su mali jer je mala gustoća zraka, te imaju minimalni utjecaj na efikasnost elektromotora.

Treći način hlađenja je ubrizgavanje ulja direktno na vodiče s ciljem smanjenja njihove temperature. Iskorišteno ulje za hlađenje uklanja se iz motora i ponovno se hladi, te vraća u rezervoar sustava za hlađenje. U odnosu na hlađenje s vodom, upotreba ulja kao medija za hlađenje ima potencijalne financijske prednosti jer se sustav za hlađenje može dijeliti s prijenosom, inverterom, zupčanicima, itd. Takvo hlađenje je efikasno zbog visoke razlike temperatura između namotaja statora i ulja za hlađenje. Postoje dva općenita načina dopremanja ulja do statorskih namotaja:

- ulje se doprema u šuplju osovinu, a zbog centrifugalne sile izlazi prema statorskim namotajima,
- ulje se doprema direktno na statorske namotaje preko mlaznica na vanjskoj strani statorskih namotaja.

Oba dvije metode imaju nedostatke. Kod dopremanja ulja kroz šuplju osovinu, ako je premala brzina nedovoljno je velika i centrifugalna sila, te je gravitacijska sila dominantna, te u tom

slučaju dolazi do nesimetričnog hlađenja namotaja. To dovodi do relativno više temperature na gornjem dijelu statorskih namotaja. Kod dopremanja ulja direktno na statorske namotaje preko mlaznica, nedostatak je taj što može doći do neujednačene distribucije ulja oko radijalne periferije. Kod oba dva načina postoji mogućnost da ulje uđe u zračnost između rotora i statora, te poveća ventilacijske gubitke. Na slici 13 nalazi se prikaz hlađenja uljem s oba dva gore opisana načina zajedno.



Slika 13. Shematski prikaz hlađenja elektromotora uljem [12]

Ulje prolazi kroz šuplju osovinu i zbog djelovanja centrifugalne sile izlazi kroz rupice i pada na statorske namotaje. Također u kućištu postoje i aksijalni kanali kroz koje prolazi ulje koje se kroz mlaznice direktno dovodi na krajeve statorskih namotaja. Prednost ovakvog načina hlađenja je da kanali koji prolaze po kućištu djeluju i kao sustav hlađenja vodenim ogrtačem, efektivnije je hlađenje i potencijalno pojednostavljuje i pojeftinjuje sveukupni sustav za hlađenje ako se koristi za hlađenje više komponenata. Nedostatak je kompleksnija konstrukcija sustava [12].

2.4. Elektromotori u zrakoplovstvu

Kako je u uvodnom dijelu rada spomenuto, postoji tendencija za uvođenjem električnog pogona u velike i male zrakoplove. Trenutna tehnologija izrade baterija još uvijek ne omogućava korištenje potpuno električnog pogona u velikim zrakoplovima u razumnim dimenzijama baterija. Zbog toga se na velikim zrakoplovima najprije želi uvesti hibridni pogon, gdje bi se koristio i električni i konvencionalni pogon zajedno, dok kod manjih sportskih zrakoplova postoji tendencija za uvođenjem potpuno električnog pogona. Kako još uvijek nema tehnologije vezane za baterije, trenutna istraživanja se fokusiraju na ostale komponente pogona, tj. elektromotore. NASA trenutno razvija 3 različita elektromotora koji bi se mogli koristiti za pogon velikih zrakoplova [4]. Takvi elektromotori imali bi dva do tri puta veću gustoću snage. Kontinuirana snaga takvih elektromotora je 1 MW ili više. U tablici 2 se nalaze ciljani podaci o motorima koje NASA razvija.

Tablica 2. Željene performanse razvijanih elektromotora [4]

	Kontinuirana snaga [MW]	**Specifična snaga [kW/kg]**	**Efikasnost [%]**	**Tip motora**	**Broj okretaja**	**Nominalne dimenzije**
1	1	13	> 96	Permanentni magnet	18000	Cilindar: 0,45 m s 0,12 m
2	2,7	13	> 96	Indukcijski	2500	Prsten: 1 m s 0,12 m
3	1,4	16	> 98	Indukcijski	6800	Cilindar: 0,4 m s 0,12 m

Kod manjih sportskih zrakoplova potrebne snage elektromotora su manje. Kreću se oko 40-80 kW. Za zrakoplove za prijevoz oko 12 putnika potrebno je više snage, oko 200-500 kW.

2.5. Opis zadatka

Ovaj diplomski rad posvetit će se numeričkoj simulaciji elektromotora s lopaticama i bez lopatica na rotoru elektromotora, u svrhu određivanja ventilacijskih gubitaka, te podataka o hlađenju rotora elektromotora koji se koristi za pogon hibridnog automobila. Ideja ovog rada je usporedba sveukupnog hlađenja rotora elektromotora koji ima lopatice na rotoru u odnosu na motor bez lopatica na rotoru. Geometrija na kojoj će se provoditi analize vrlo je pojednostavljena geometrija stvarnog elektromotora snage 80 kW.

Dokazano je da postavljanje lopatica na rotor poboljšava hlađenje potpuno zatvorenog pogonskog elektromotora uz prednost da dodatno ne komplicira sustav hlađenja. Primarna svrha loptica na rotoru je povećanje konvektivnog koeficijenta prijenosa topline.

Za potrebe ovog rada prema dobivenim skicama bilo je potrebno modelirati 1/8 pojednostavljenog rotora i statora elektromotora, te zraka između njih. Kućište i rashladna tekućina nisu modelirani, već se njihov utjecaj uzeo u obzir preko rubnih uvjeta. Također je bilo potrebno prostorno diskretizirati model i provesti simulacije hlađenja računalnom dinamikom fluida za brzinu od 5000 okretaja u minuti. Podatke dobivene simulacijom bilo je potrebno usporediti s dobivenim podacima za glatki rotor, dok je podatke za rotor s lopaticama bilo potrebno usporediti s onima za rotor bez lopatica. Na kraju je trebalo dati zaključak baziran na provedenim simulacijama.

3. MATEMATIČKI MODEL

Numerička simulacija strujanja fluida između rotora i statora elektromotora može se modelirati nestlačivim Navier-Stokesovim jednadžbama zbog malog Machovog broja u promatranom problemu. Machov broj kreće se oko 0,1 (5000 okretaja/sekundi), te se stlačivost fluida može zanemariti [13].

3.1. Jednadžbe računalne dinamike fluida

U ovom poglavlju, izložene su osnovne jednadžbe mehanike fluida koje se primjenjuju pri proračunima strujanja metodom konačnih volumena.

3.1.1. Jednadžba kontinuiteta

Jednadžba kontinuiteta ujedno je i jednadžba očuvanja mase. Ona govori da sva masa koja uđe u sustav mora biti jednaka onoj masi koja izađe iz sustava, tj. drugim riječima, masa ne može nastati iz ničeg ili nestati. Jednadžba kontinuiteta glasi:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_j)}{\partial x_j} = 0. \tag{1}$$

Za nestlačivi stacionarni slučaj jednadžba kontinuiteta glasi:

$$\frac{\partial (\rho v_j)}{\partial x_j} = 0. \tag{2}$$

Ako je problem stlačiv i fluid idealan, gustoća se izračunava preko jednadžbe stanja koja je termodinamička jednadžba stanja u kojoj su povezane varijable koje opisuju stanje materije pod danim fizikalnim uvjetima, a glasi:

$$\rho = p \cdot \frac{M}{RT}, \tag{3}$$

gdje je p polje tlaka, M molarna masa fluida, R je plinska konstanta, a T je temperaturno polje.

3.1.2. Jednadžba očuvanja količine gibanja

Jednadžba očuvanja količine gibanja je zapravo primjena drugog Newtonovog zakona na strujanje fluida. On govori da je zbroj sila koje djeluju na element fluida jednak masi elementa pomnoženoj s njegovom akceleracijom. Vektorska jednadžba očuvanja količine gibanja glasi:

$$\frac{\partial(\rho v_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i v_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}(-p\delta_{ji} + \Sigma_{ji}) + \rho f_i, \qquad \textbf{(4)}$$

gdje je Σ_{ji} simetrični tenzor viskoznih naprezanja koji raspisan prema Newtonom zakonu viskoznosti glasi:

$$\Sigma_{ji} = \mu\left(\frac{\partial v_j}{\partial x_j} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j}\right) - \frac{2}{3}\mu\frac{\partial v_k}{\partial x_k}\delta_{ji}. \qquad \textbf{(5)}$$

3.1.3. Jednadžba očuvanja energije

Jednadžba očuvanja energije dobivena je iz prvog zakona termodinamike koji govori da je promjena energije u vremenu jednaka zbroju obavljenog rada i generirane topline. Energetska jednadžba ne ovisi ni o jednadžbi kontinuiteta, ni o jednadžbi očuvanja količine gibanja. Zbog toga kada nema prijenosa topline u promatranom slučaju, ona se ne treba rješavati. Općenito, energetska jednadžba glasi:

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho e v_j)}{\partial x_j} = -p\frac{\partial v_j}{\partial x_j} + \Sigma_{ji}\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x_j}\right) + q_h, \qquad \textbf{(6)}$$

gdje je *e* specifična energija.

Kada postoji prijenos topline, energetska jednadžba treba se rješavati, ali prednost postoji u tome što se može rješavati neovisno o drugim dvjema jednadžbama. Problem prijenosa topline između krutine i fluida zove se *conjugate heat transfer*.

3.1.4. Conjugate Heat Transfer – Prijenos topline između krutine i fluida

Prijenos topline je protok toplinske energije koji nastaje kao posljedica temperaturnog gradijenta u mediju. Glavni mehanizmi kojima se prenosi toplina su kondukcija, konvekcija i zračenje [14]. U ovom radu koji se bavi problemom hlađenja rotora elektromotora zračenje će biti zanemareno prema prijedlozima iz literatura.

3.1.4.1. Prijenos topline kondukcijom

Prijenos topline kondukcijom nastaje na molekularnoj razini. Toplina se prenosi s čestica s većom energijom na one s manjom energijom, tj. toplina ide s tijela veće na tijelo manje temperature. Toplinski tok između dva tijela proporcionalan je temperaturnoj razlici između istih. Toplinski tok prema Fourierovom zakonu glasi:

$$q = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x_j}, \tag{7}$$

gdje je q[W/m^2] toplinski tok, λ[W/(m K)] toplinska provodljivost materijala, koja može biti i temperaturno ovisna, a $\frac{\partial T}{\partial x_j}$ [K/m] gradijent temperature. Negativni predznak ukazuje na smjer prijenosa topline s tijela više temperature na tijelo niže temperature.

3.1.4.2. Prijenos topline konvekcijom

Prijenos topline konvekcijom događa se u fluidima zbog mikroskopskog gibanja čestica i zbog sveukupnog gibanja fluida. Ovisno o glavnim silama koje izazivaju gibanje fluida prijenos topline može biti ili prirodnom i/ili prisilnom konvencijom.

Prirodna konvekcija nastaje zbog toplinske ekspanzije fluida. Varijacije gustoće fluida izazivaju sile uzgona koje uzrokuju gibanje fluida. Najčešće, prirodna konvekcija se događa zbog postojanja gravitacijskog polja koje izaziva da se topliji, rjeđi po gustoći, fluid diže, dok hladniji, gušći, fluid pada. Općenito prirodna konvekcija može nastati zbog djelovanja bilo koje volumne sile koja je proporcionalna gustoći.

Prisilna konvekcija nastaje kada gibanje fluida nastaje zbog vanjskog izvora, npr. ventilatora, a uzgon je zanemaren. Miješana konvekcija nastaje kada su prisutne i prirodna i prisilna konvekcija istodobno.

Newtonov zakon hlađenja govori da je izmjena toplina u vremenu proporcionalna razlici temperatura između tijela i njegovog okolnog medija, tipično fluida. Newtonov zakon hlađenja glasi:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = h \cdot A \cdot (T_s(t) - T_\infty), \quad \textbf{(8)}$$

gdje je Q [J] toplinska energija, T_s [K] temperatura krutine, T_∞ [K] temperatura okoline, A [m^2] površina prijenosa topline, a h [W/(m^2 K)] koeficijent prijenosa topline.

3.1.4.3. Svojstva materijala i bezdimenzijske značajke

Svojstva materijala koja su važna kod problema s prijenosom topline su:

- toplinska provodljivost λ [W/(m K)] – pokazatelj koliko je materijal dobar u prijenosu topline (materijali s niskom provodljivošću se koriste kao toplinski izolatori),
- specifični toplinski kapacitet c_p [J/(kg K)] – količina topline koja je potrebna da se 1 kg materijala temperatura podigne za 1 K,
- toplinska provodnost a [m^2/s] – mjera toplinske inercije materijala.

Veza između toplinske provodljivosti, provodnosti i specifičnog toplinskog kapaciteta glasi:

$$\lambda = a \cdot \rho \cdot c_p. \quad \textbf{(9)}$$

Bezdimenzijske značajke koje su važne kod problema s prijenosom topline su:

- Prandtlov broj $Pr = \frac{\nu}{\alpha}$ – omjer difuzije količine gibanja i toplinske provodnosti u fluidu. Prandtlov broj utječe na debljine kinematičkog i temperaturnog graničnog sloja. Ako je Pr << 1, debljina kinematičkog graničnog sloja je manja od debljine temperaturnog; ako je Pr = 1, tada su granični slojevi iste debljine; a ako je Pr >> 1, tada je debljina temperaturnog graničnog sloja manja.
- Turbulentni Prandtlov broj $Pr_t = \frac{\nu_t}{\alpha_t}$ – važan je kod modeliranja prijenosa topline u turbulentnom graničnom sloju.

- Biotov broj $Bi = \frac{hL}{k_s}$ – omjer toplinskog otpora krutine i fluida. On je mjera intenziteta prijenosa topline kroz razdjelnu dodirnu plohu između krutine i fluida u strujanju.

3.1.5. Energijska jednadžba prijenosa topline u krutinama

Prijenos topline u krutinama modelira se jednadžbom prijenosa topline kondukcijom koja glasi:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j}\right) = Q_i, \quad \textbf{(10)}$$

gdje je Q volumenski izvor topline.

3.1.6. Energijska jednadžba prijenosa topline u fluidima

Energijska jednadžba prijenosa topline u fluidima dana je jednadžbom (6). Kod nestlačivih strujanja gustoća ρ smatra se konstantnom, zbog toga energetska jednadžba prestaje biti spregnuta s preostalim dvjema. To omogućava da se jednadžba kontinuiteta i jednadžba očuvanja količine gibanja mogu rješavati zasebno, a kasnije se na temelju dobivenog polja brzine zasebno riješi i energetska jednadžba. Kod stlačivih jednadžbi, sve tri jednadžbe su spregnute i trebaju se rješavati zajedno. Specifična totalne energije e zbroj je specifične unutarnje energije u i specifične kinetičke energije $k = \frac{1}{2}u^2$:

$$e = u + k. \quad \textbf{(11)}$$

Energijska jednadžba može se pisati i preko entalpije koja je zbroj unutarnje energije i kinematskog tlaka:

$$h = e + \frac{p}{\rho}. \quad \textbf{(12)}$$

Specifična entalpije često se modelira kao proporcionalna temperaturi sa specifičnim toplinskim kapacitetom c_p kao konstantom proporcionalnosti, te tako osigurave vezu između entalpije i temperature:

$$h = c_p T. \tag{13}$$

Da bi se riješile sve nepoznanice (brzine, tlak, gustoća, temperatura) potrebna je dodatna jednadžba. To je jednadžba stanja koja definira vezu između gustoće, tlaka i temperature. Ona ovisi o vrsti fluida koji se modelira. Npr., za idealne plinove, ona glasi:

$$p = \rho R T, \tag{14}$$

gdje je *R* plinska konstanta koja ovisi o vrsti plina.

3.2. *k-ω* SST model turbulencije

K-ω SST model turbulencije jedan je od najčešće korištenih modela. U prethodno opisani matematički model, dodaje još dvije dodatne transportne jednadžbe. Jedna je za turbulentnu kinetičku energiju *k*, a druga je za specifičnu turbulentnu energiju disipacije *ω*. Ovaj model kombinacije je dva modela: *k-ε* i *k-ω*. U ovom modelu *k-ω* model koristi se za rješavanje problema u graničnom sloju, dok se *k-ε* koristi za probleme slobodne struje, tj. probleme u regijama udaljenim od zida. Inicijalizacija turbulentne kinetičke energije *k* dana je jednadžbom:

$$k = \frac{2}{3}(UI)^2, \tag{15}$$

gdje je *U* referentna brzina, a *I* intenzitet turbulencije. Intenzitet turbulencije označuje nivo turbulencije, a definira se kao:

$$I = \frac{u'}{U}, \tag{16}$$

gdje je *u'* srednja vrijednost turbulentnih fluktuacija brzine.

Inicijalizacija specifične turbulentne energije disipacije dana je jednadžbom:

$$\omega = \frac{k^{0,5}}{C_\mu L}, \tag{17}$$

gdje je $C\mu$ konstanta iznosa 0,09, a L je referentna dužina.

Dodatne transportne jednadžbe su:

- jednadžba turbulentne kinetičke energije

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho D_k \frac{\partial k}{\partial x_j}\right) + \rho G - \frac{2}{3}\rho k \frac{\partial v_j}{\partial x_j} - \rho\beta^* \omega k + S_k, \tag{18}$$

- jednadžba specifične disipacije turblentne kinetičke energije

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho D_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right) + \frac{\rho\gamma G}{\nu} - \frac{2}{3}\rho\gamma\omega \frac{\partial v_j}{\partial x_j} - \rho\beta\omega^2 - \rho(F_1 - 1)CD_{k\omega} + S_\omega, \tag{19}$$

- turbulentna viskoznost

$$\nu_t = \frac{\alpha_1 k}{\max(a_1\omega, b_1 F_2 S)}. \tag{20}$$

Pomoćni izrazi glase:

$$P_k = min\left(\tau_{ij}\frac{\partial u_j}{\partial x_i}, 10\beta^* k\omega\right), \tag{21}$$

$$F_1 = tanh\left[min\left[max\left[\left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^k \omega y}, \frac{500\nu}{y^2\omega}\right), \frac{4\sigma_{\omega^2} k}{CD_{k\omega} y^2}\right]\right]^4\right], \tag{22}$$

$$F_2 = tanh\left[\left[max\left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^k \omega y}, \frac{500\nu}{y^2\omega}\right)\right]^2\right], \quad \textbf{(23)}$$

$$CD_{k\omega} = max\left(2\rho\sigma_{\omega^2}\frac{1}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_i}\frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10}\right), \quad \textbf{(24)}$$

$$\Phi = \Phi_1 F_1 + \Phi_2(1 - F_1). \quad \textbf{(25)}$$

Iznosi koeficijenata se nalaze u tablici 3.

Tablica 3. Koeficijenti *k-ωSST* modela [15]

α_1	α_2	β_1	β_2	β^*	σ_{k1}	σ_{k2}	$\sigma_{\omega1}$	$\sigma_{\omega2}$
$\frac{5}{9}$	0,44	$\frac{3}{40}$	0,0828	$\frac{9}{100}$	0,85	1	0,5	0,865

Koeficijenti su podešeni tako da model najbolje moguće opisuje stvarno fizikalno ponašanje turbulentnog strujanja fluida.

3.3. *Multiple Refrence Frame* (MRF)

Multiple Refrence Frame, u daljnjem tekstu MRF, relativno je jednostavna, robusna i efektivna stacionarna aproksimacija strujanja u kojoj se individualne zone gibaju različitim rotacijskim ili translacijskim brzinama. U MRF metodi, rotacija između zona uzima se u obzir dodatnim članovima Coriolisove i centrifugalne sile u jednadžbama, bez pomaka mreže. Zona koja se giba, rješava se MRF jednadžbama, a ako je zona stacionarna (ω = 0) koriste se stacionarne jednadžbe. MRF metoda često se naziva i „pristup smrznutog rotora“ (eng. „*frozen rotor approach*“) jer mreža konačnih volumena ostaje fiksna, zamrznuta, tijekom izračuna [16].

3.3.1. Jednadžbe nestlačivog strujanja u rotacijskom koordinatnom sustavu

Za svaku zonu kojoj je dodijeljena rotacijska brzina različita od nule, Navier-Stokesove jednadžbe koje se koriste za rješavanje nestlačivog strujanja fluida moraju se modificirati. Za opći vektor **A** u inercijskom koordinatnom sustavu, može se pisati:

$$\left[\frac{\mathrm{d}\mathbf{A}}{\mathrm{d}t}\right]_{\mathrm{I}} = \left[\frac{\mathrm{d}\mathbf{A}}{\mathrm{d}t}\right]_{\mathrm{R}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{A}, \tag{26}$$

gdje je ω vektor kružne brzine. Ako se općeniti vektor **A** supstituira s vektorom položaja **r**, jednadžba (26) se transformira u:

$$\left[\frac{\mathrm{d}\mathbf{r}}{\mathrm{d}t}\right]_{\mathrm{I}} = \left[\frac{\mathrm{d}\mathbf{r}}{\mathrm{d}t}\right]_{\mathrm{R}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}. \tag{27}$$

Derivacija vektora pozicije jednaka je brzini, pa se jednadžba (27) može pisati:

$$\mathbf{u}_{\mathrm{I}} = \mathbf{u}_{\mathrm{R}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}. \tag{28}$$

Daljnje deriviranje jednadžbe (27) rezultira izrazima za akceleraciju u inercijskom sustavu:

$$\left[\frac{\mathrm{d}\mathbf{u}_{\mathrm{I}}}{\mathrm{d}t}\right]_{\mathrm{I}} = \left[\frac{\mathrm{d}\mathbf{u}_{\mathrm{R}}}{\mathrm{d}t}\right]_{\mathrm{R}} + \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\omega}}{\mathrm{d}t} \times \mathbf{r} + 2\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{u}_{\mathrm{R}} + \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}. \tag{29}$$

Tri karakteristična člana desne strane jednadžbe su:

- $\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\omega}}{\mathrm{d}t} \times \mathbf{r}$ – tangencijalna akceleracija,
- $2\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{u}_{\mathrm{R}}$ – Coriolisova akceleracija,
- $\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}$ – centrifugalna akceleracija.

Uzimajući u obzir jednadžbu (29) za akceleracijski član, Navier-Stokesove jednadžbe za nestlačivo strujanje s kinematičkom viskoznošću u inercijskom koordinatnom sustavu mogu se pisati kao:

$$\frac{\partial \mathbf{u}_\mathrm{I}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}_\mathrm{I} \times \mathbf{u}_\mathrm{I}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\nu \nabla \mathbf{u}_\mathrm{I}), \tag{30}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u}_\mathrm{I} = 0. \tag{31}$$

Jednadžba (30) predstavlja jednadžbu količine gibanja, a jednadžba (31) predstavlja jednadžbu kontinuiteta. Ako se ove jednadžbe prilagode rotacijskom koordinatnom sustavu, dobivaju se jednadžbe koje se koriste u MRF modelu [17]:

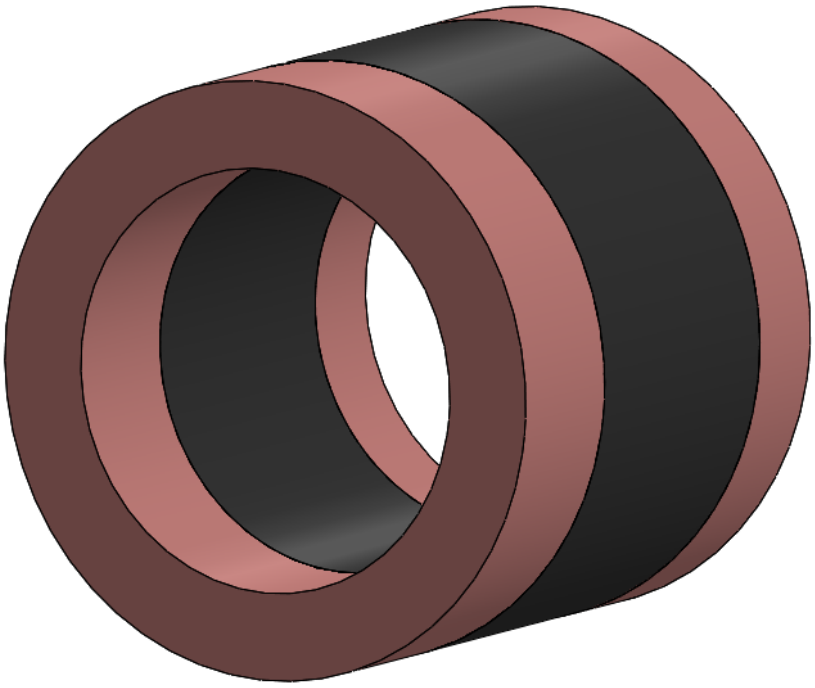
$$\frac{\partial \mathbf{u}_\mathrm{R}}{\partial t} + \omega \times \mathbf{u}_\mathrm{I} + \nabla \cdot (\mathbf{u}_\mathrm{R} \times \mathbf{u}_\mathrm{I}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\nu \nabla \mathbf{u}_\mathrm{I}), \tag{32}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u}_\mathrm{I} = 0. \tag{33}$$

4. NUMERIČKI MODEL

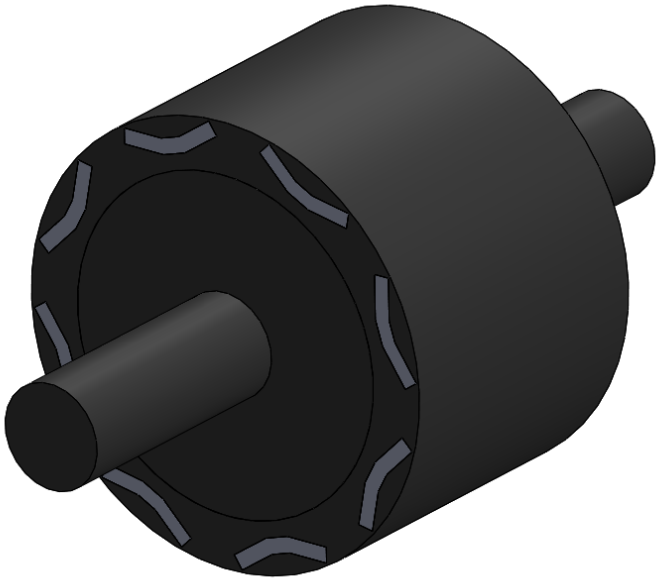
4.1. Izrada geometrijskog modela elektromotora

Pojednostavljene geometrije promatranog elektromotora izrađene su u programu SolidWorks, te dorađene u programu SpaceClaim. Geometrije su napravljene na temelju pojednostavljenih skica pravog elektromotora bez lopatica na rotoru. Izgled i broj lopatica na rotoru proizvoljno su modelirani. Napravljena su dva modela za dva različita rotora, jedan s lopaticama, a drugi glatki rotor bez lopatica. Budući da je zadatak bio provjeriti kako lopatice utječu na hlađenje rotora modelirani su samo rotor s vratilom i permanentnim magnetima, zrak oko rotora i stator. Kućište i rashladna tekućina u ovim modelima nisu modelirani kao krutina i drugi fluid već se njihova prisutnost opisuje rubnim uvjetima. Ovim pojednostavljenjem omogućeno je korištenje cikličkih rubnih uvjeta jer je svaki dio sam za sebe osnosimetričan. Također, modelirana je samo 1/8 cijelog modela. Geometrije statora i rotora su također pojednostavljene. Stator predstavlja valjak koji je sastavljen od 2 materijala, bakra i željeza. Na slici 14. se nalazi prikaz pojednostavljenog statora elektromotora.



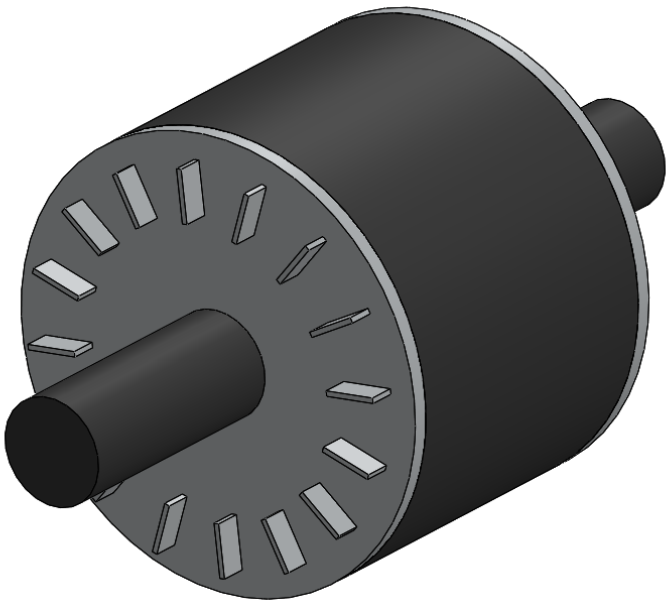
Slika 14. Stator elektromotora

Rotor je modeliran također kao valjak u kojem se nalaze permanentni magneti cijelom dužinom željeznog dijela kao što je prikazano na slici 15. Na krajevima rotora nalazi se i aluminijski diskovi sa svake strane.



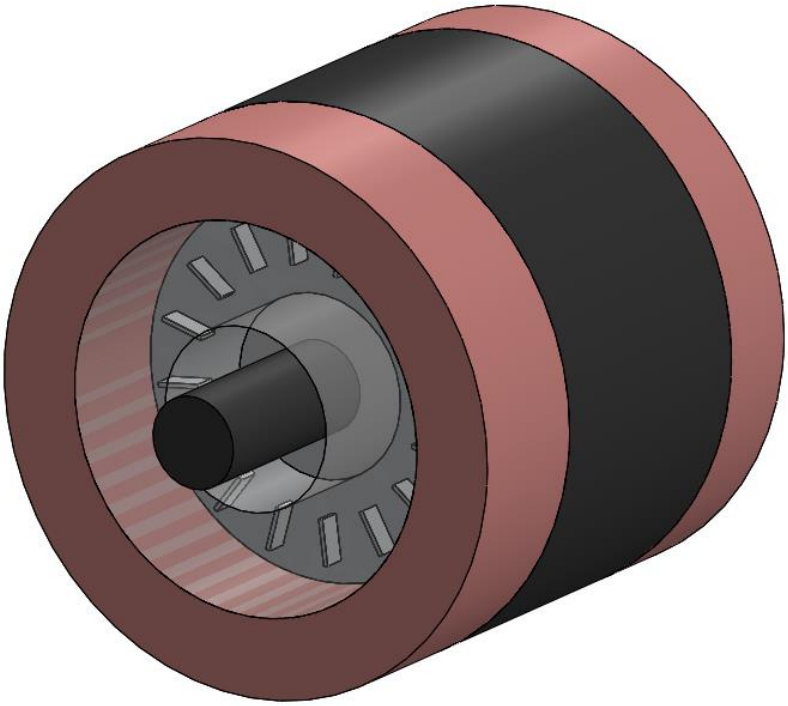
Slika 15. Željezo rotora elektromotora i magneti

Lopatice na rotoru modelirane su kao pravokutnici dimenzija 20 mm × 2 mm × 10 mm i postavljeno ih je 16 na svaku stranu rotora. Izgled rotora s lopaticama nalazi se na slici 16.



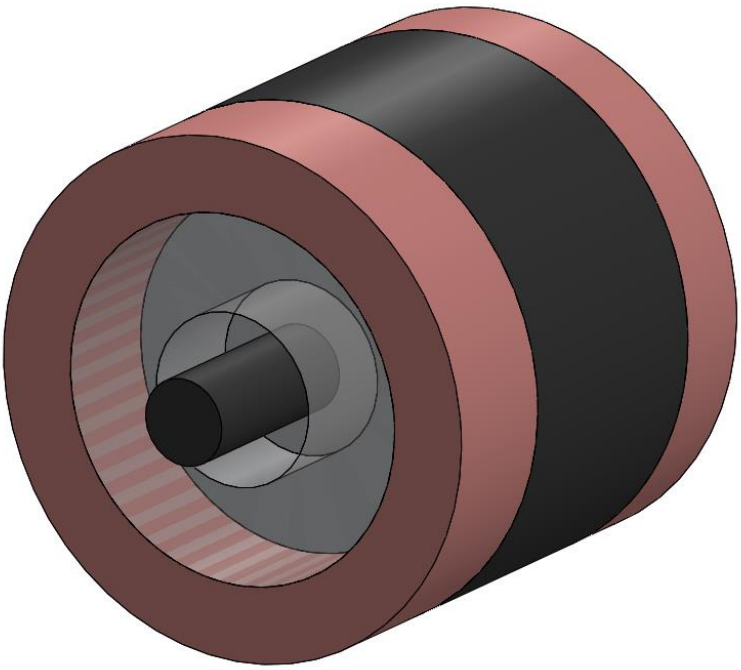
Slika 16. Rotor elektromotora s lopaticama

Na slici 17 nalazi se prikaz cijelog modela rotora s lopaticama, statora i zraka.



Slika 17. Prikaz geometrije modela s lopaticama na rotoru

Na slici 18 prikaz je cijelog modela glatkog rotora, statora i zraka.

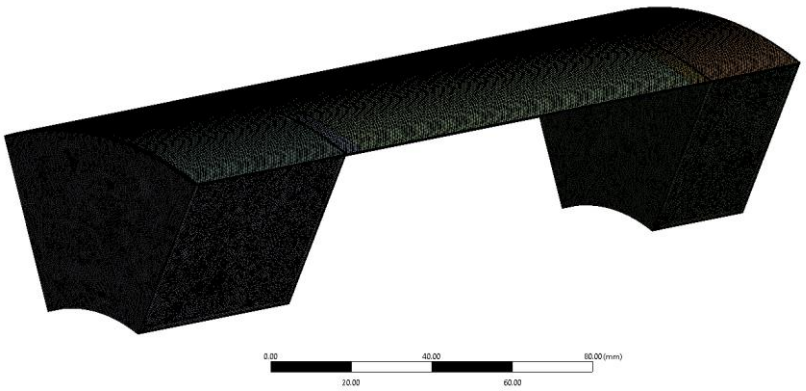
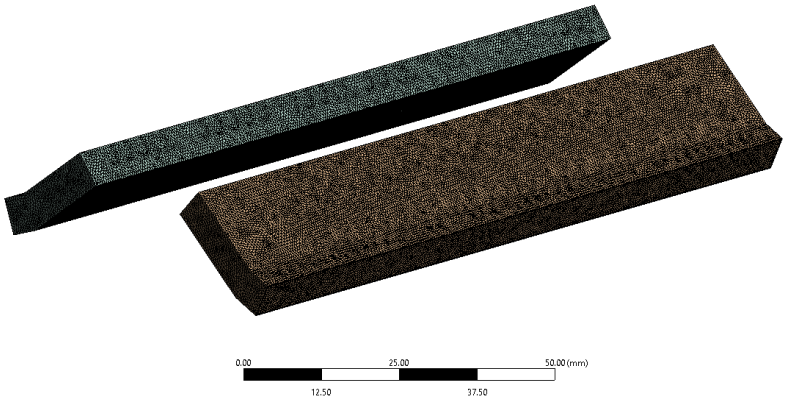


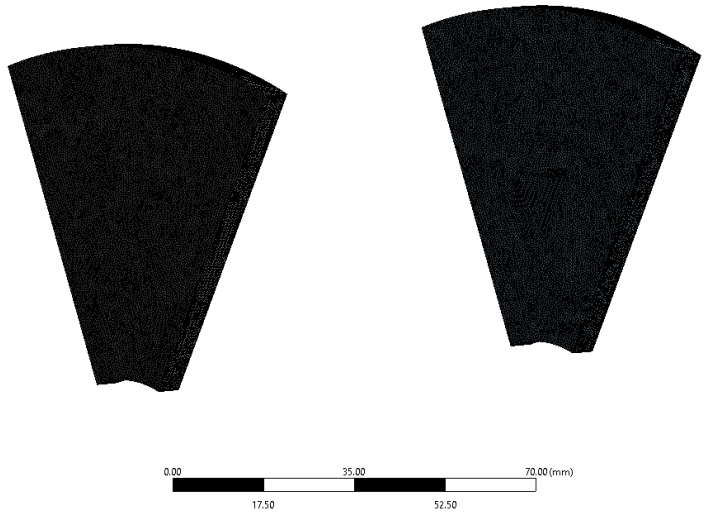
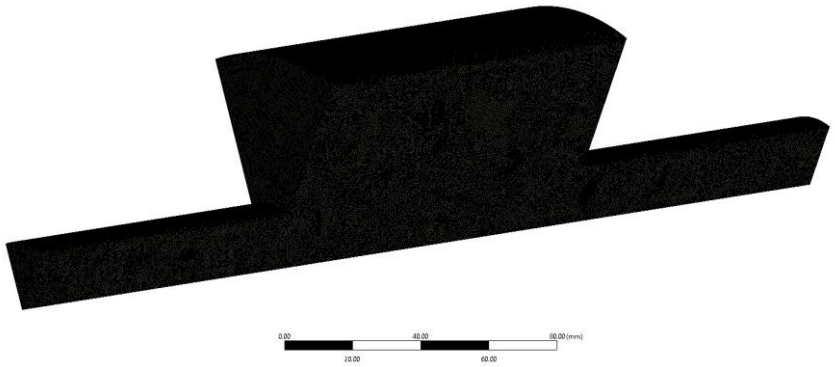
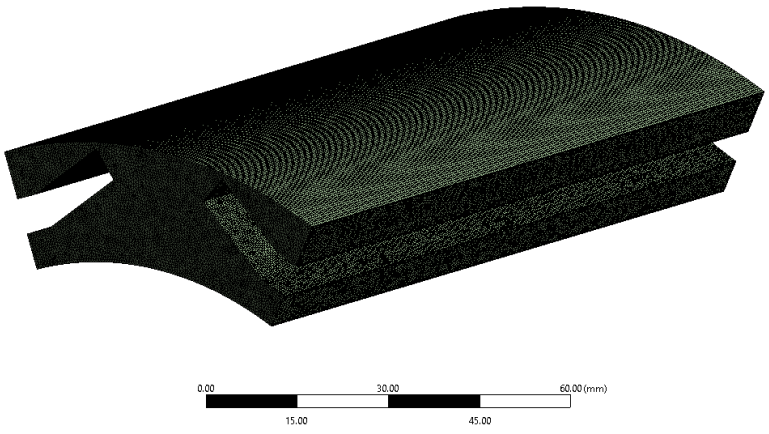
Slika 18. Prikaz geometrije modela s glatkim rotorom

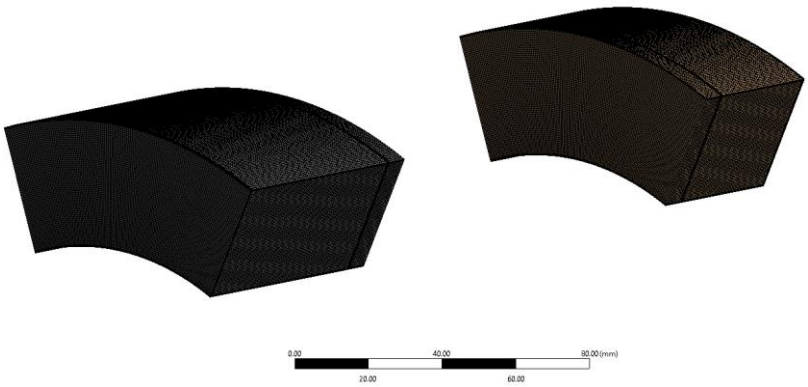
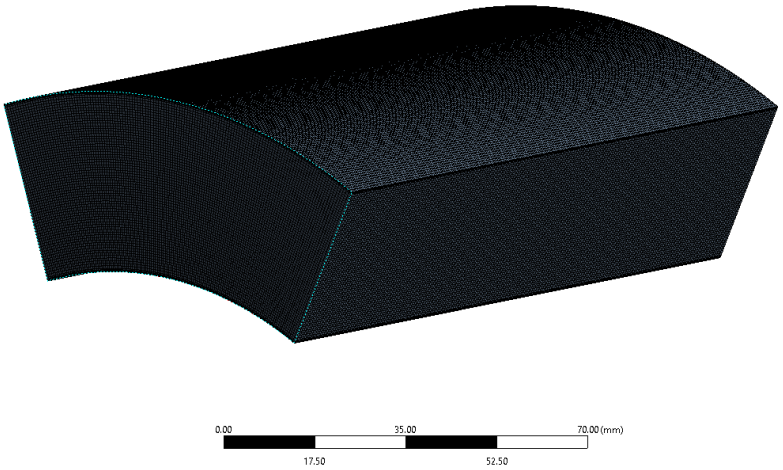
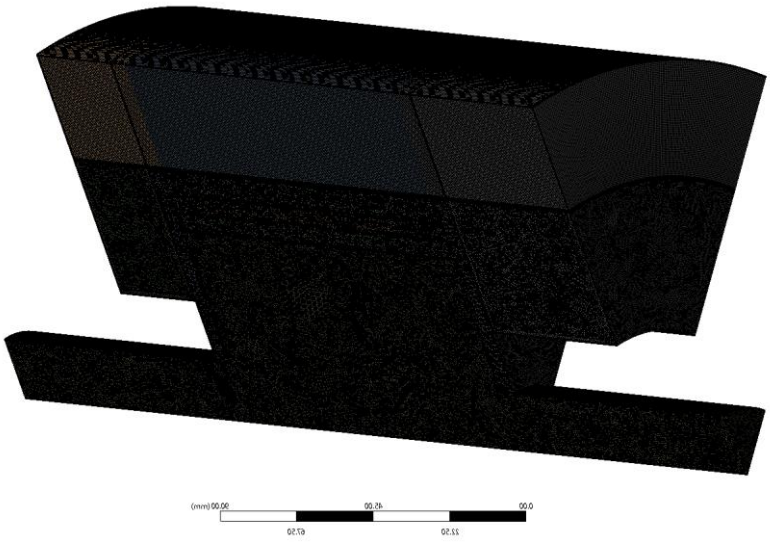
4.2. Izrada numeričkih mreža

Mreže konačnih volumena oba modela izrađene su u programu ANSYS Meshing. Podaci o mrežama elektromotora s glatkim rotorom nalazi se u tablici 4, dok se u tablici 5 nalaze podaci o mrežama elektromotora s lopaticama na rotoru. Mreže su dobivene na isti način, sve regije zajedno su izrađene u programu tako da se osigurala komfornost mreže između različitih dijelova, a nakon toga mreža za svaku regiju je izvezena zasebno. Na granici dodira različitih regija provedena je posebna diskretizacija u cilju boljeg razlučivanja područja graničnog sloja.

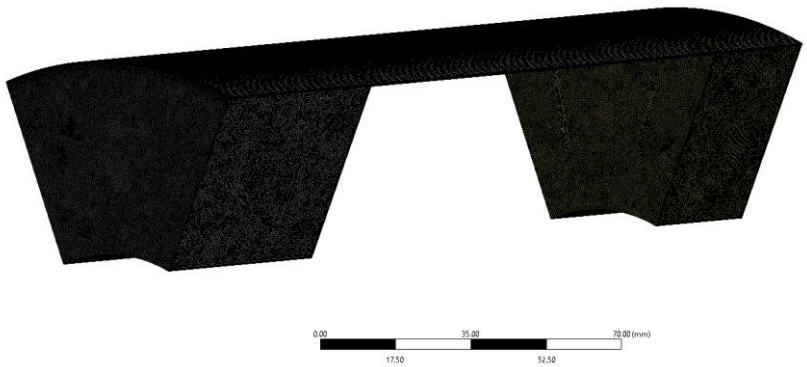
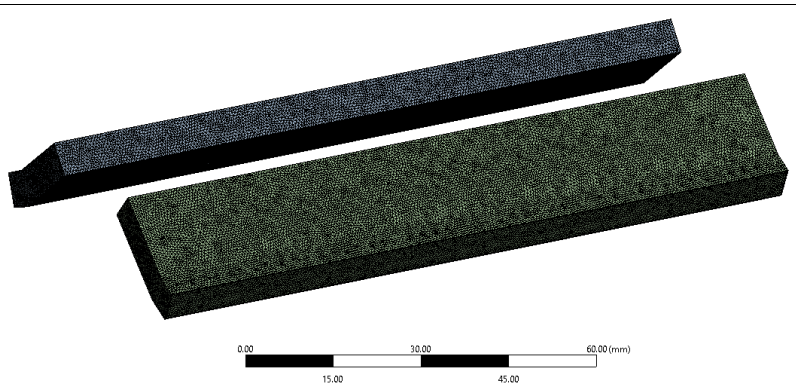
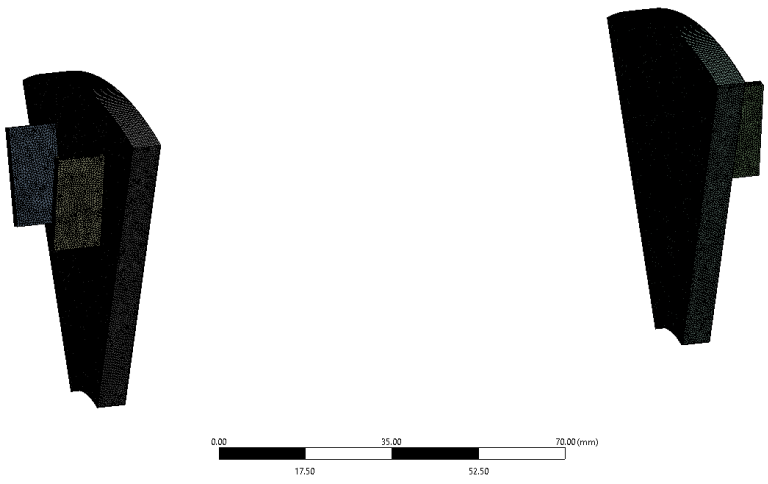
Tablica 4. Podaci o mrežama motora s glatkim rotorom

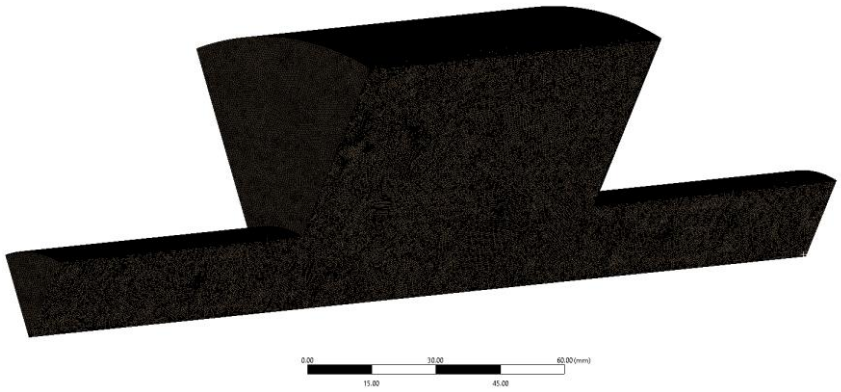
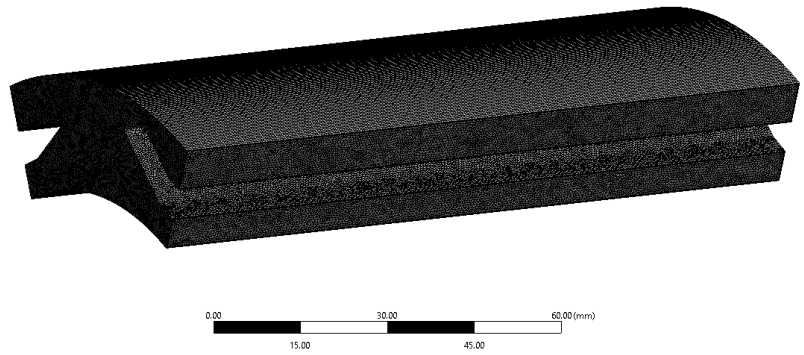
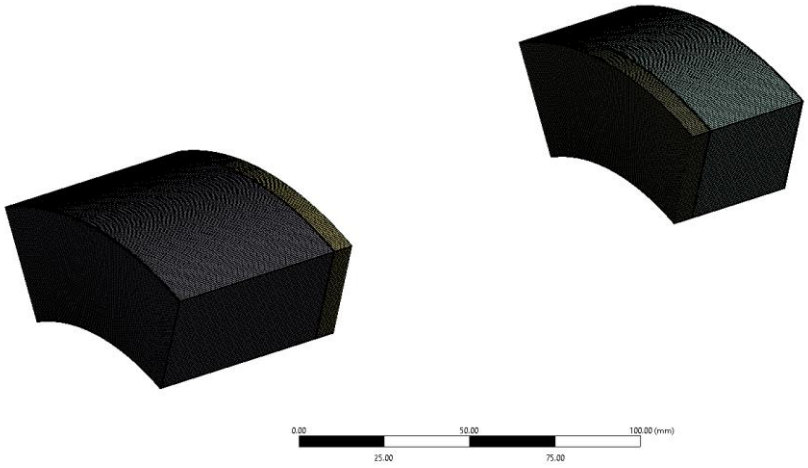
Regija	**Prikaz**	**Broj ćelija**
air		5421997
magnets		1217241

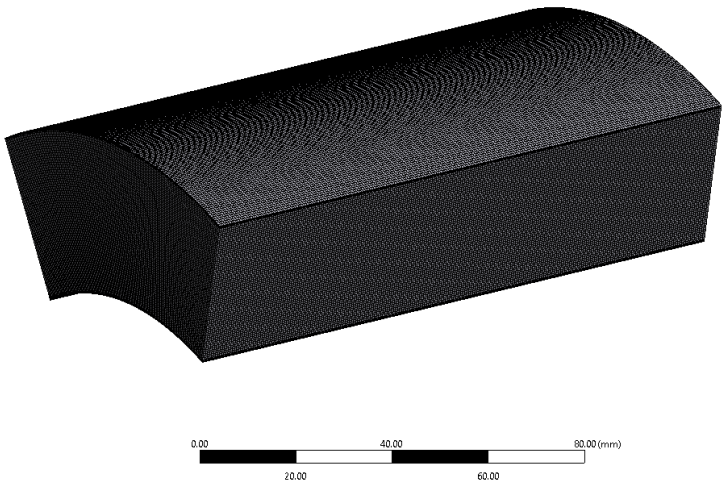
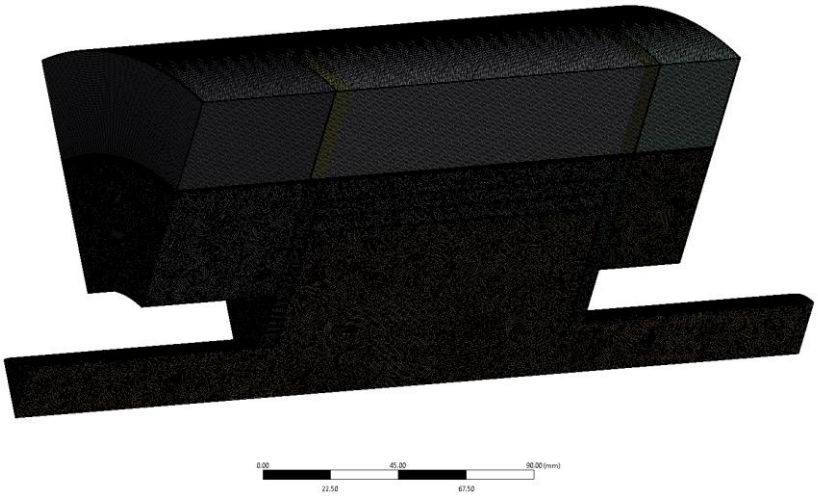
rotorAl		1293014
rotorFe		4577036
rotorFeMag		3526776

statorCu		2290596
statorFe		2476320
Ukupno		20802980

Tablica 5. Podaci o mrežama motora s lopaticama na rotoru

Regija	Prikaz	Broj ćelija
air		6005826
magnets		1219351
rotorAl		1644536

rotorFe		4660117
rotorFeMag		3808641
statorCu		2352504

statorFe		2476320
Ukupno		22167295

Kvaliteta mreže određuje se prema dva parametra: maksimalna neortogonalnost i maksimalno skošenje konačnog volumena. U tablici 6 prikazani su podaci o kvaliteti numeričkih mreža za slučaj glatkog rotora, a u tablici 7 nalaze se podaci za slučaj rotora s lopaticama.

Tablica 6. Kvaliteta mreže slučaja glatkog rotora

Regija	Max neortogonalnost	Max skošenje konačnog volumena
air	68,2034	2,51017
rotorAl	75,0175	2,50439
rotorFe	64,5774	2,50429
rotorFeMag	76,2043	2,51182
magnets	67,5597	2,51891
statorCu	2,63359	0,0163121
statorFe	2,73478	0,0123028

Tablica 7. Kvaliteta mreže slučaja rotora s lopaticama

Regija	Max neortogonalnost	Max skošenje konačnog volumena
air	72,7434	2,5996
rotorAl	82,5364	2,69128
rotorFe	66,5914	2,4997
rotorFeMag	70,3113	2,57662
magnets	61,4122	2,51858
statorCu	2,73322	0,0111467
statorFe	2,7341	0,0111404

4.3. Ventilacijski gubici

Ventilacijski gubici u elektromotoru podrazumijevaju snagu koju fluid koji okružuje rotor preuzima kao rezultat relativnog gibanja između rotora i statora elektromotora. Ti gubici smanjuju sveukupnu efikasnost elektromotora [18]. Dio snage elektromotor treba trošiti na svladavanje tih gubitaka. Zbog toga vrlo je važno odrediti koliko više snage se treba trošiti na

svladavanje tih gubitaka pri korištenju rotora s lopaticama u odnosu na glatki rotor. Ventilacijski gubici u elektromotoru, prema [18] iznose:

$$W = C_d \pi r^4 \rho \omega L, \tag{34}$$

gdje C_d predstavlja koeficijent sile naprezanja na zidu, r predstavlja radijus rotora, L predstavlja dužinu razmaka između rotora i statora, ω predstavlja kutnu brzinu rotora, a ρ predstavlja gustoću zraka u razmaku između rotora i statora.

Iznos koeficijenta sile naprezanja na zidovima rotora za analitički proračun računa se po približnoj formuli koja ovisi o Re broju [18]:

$$\frac{1}{\sqrt{C_d}} = B + 1{,}768 \cdot \ln\left(Re \cdot \sqrt{C_d}\right), \tag{35}$$

gdje je B eksperimentalna vrijednost od 2,04.

U ovom radu ventilacijski gubici su izračunati tako da se u programu *OpenFOAM* izračunao moment oko osi rotacije na komunikacijskim površinama dodira rotora i zraka. Dobiveni moment pomnožio se s brojem okretaja motora da bi se dobila snaga:

$$P = M\omega. \tag{36}$$

Kako bi se dobili sveukupni ventilacijski gubici elektromotora, dobiven iznos pomnožen je s brojem 8 budući da je simulirana samo 1/8 elektromotora.

4.4. Postavke simulacije

4.4.1. Rješavač

U oba modelirana slučaja korišten je rješavač *chtMultiRegionSimpleFoam* a simulacije su izvršene u programu *OpenFOAM* verziji 4.1. Rješavač *chtMultiRegionSimpleFoam* je stacionarni slučaj rješavača *chtMultiRegionFoam*. Prijenos topline u krutinama

(*laplacianFoam* solver) kombiniran je s *buoyantFoam* rješavačem za prijenos topline između krutine i fluida [19]. U krutinama prijenos topline se događa kondukcijom, a u fluidima konvekcijom. Rješavač uzima u obzir efekte uzgona ako ih ima, a interakcija između krutine i fluidne regije se postiže rubnim uvjetom *mappedWall*.

4.4.2. Struktura OpenFOAM case-a

Pri proračunu *OpenFOAM* računalnim paketom, svaki slučaj sastoji se od tri glavna direktorija, a to su *0, constant* i *system*. U direktoriju *0* nalaze se početni uvjeti potrebni za pokretanje simulacije. On se sastoji od datoteka gdje svaka predstavlja određeno svojstvo, npr. datoteka *p* predstavlja tlak, datoteka *U* predstavlja brzinu, itd. U direktoriju *constant* nalaze se podaci o mreži, podaci o svojstvima materijala, fizici simulacije itd. U ovom direktoriju podaci o mreži spremaju se u poddirektorij *polyMesh*. On se sastoji od 8 datoteka: *boundary, cellZones, faces, faceZones, neighbour, owner, points* i *pointZones*. U direktoriju *system* nalaze se tri glavne datoteke *fvSchemes, fvSolution* i *controlDict*. U datoteci *fvSchemes* određuju se diskretizacijske sheme koje se koriste za svaki član jednadžbi zasebno. Datoteka *fvSolution* sadrži postavke za metode izračuna tlaka i brzine, numeričke metode, tolerancije i konvergencije. U datoteci *controlDict* postavljaju se željeni podaci o simulaciji kao što su rješavač, broj iteracija, zapisivanje podataka, od kuda počinje simulacija, kada završava itd [20]. Stablo slučajeva korištenih u ovom radu nalazi se ispod.

SLUČAJ

→ 0

→ air

→ alphat

→ k

→ nut

→ omega

→ p

→ p_rgh

→ T

→ U

→ magnets

→ p

→ T

→ rotorAl (isto kao i magnets)

→ rotorFe (isto kao i magnets)

→ rotorFeMag (isto kao i magnets)

→ statorCu (isto kao i magnets)

→ statorFe (isto kao i magnets)

→ constant

→ air

→ polyMesh

→ boundary

→ cellZones

→ faces

→ faceZones

→ neighbour

→ owner

→ points

→ pointZones

→ g

→ MRFProperties

→ thermophysicalProperties

→ turbulenceProperties

→ magnets

→ polyMesh (isto kao i air)

→ fvOptions

→ thermophysicalProperties

- → rotorAl
  - → polyMesh (isto kao i air)
  - → thermophysicalProperties
- → rotorFe (isto kao i magnets)
- → rotorFeMag (isto kao i magnets)
- → statorCu (isto kao i magnets)
- → statorFe (isto kao i magnets)
- → regionProperties

→ system

- → air
  - → decomposePar
  - → fvSchemes
  - → fvSolution
- → magnets (isto kao i air)
- → rotorAl (isto kao i air)
- → rotorFe (isto kao i air)
- → rotorFeMag (isto kao i air)
- → statorCu (isto kao i air)
- → statorFe (isto kao i air)
- → controlDict
- → decomposeParDict
- → fvSchemes
- → fvSolution

4.4.3. Svojstva materijala

Potrebna svojstva svakog od materijala određena su za temperaturu koja se dobila kao ulazni podatak. Podaci o svojstvima određenih materijala krutina korištenih u simulacijama nalaze se u tablici 8.

Tablica 8. Svojstva materijala krutina [21]

Regija	Materijal	Temp [°C]	λ [W/(m K)]	c_p [J/(kg K)]	ρ[kg/m^3]
magnets	željezo	157	67	385	7874
rotorAl	aluminij	100	240	910	2700
rotorFe	željezo	159	67	450	7874
rotorFeMag	željezo	88	74	450	7874
statorCu	bakar	85	395	390	8690
statorFe	željezo	74	75	385	7874

U tablici 9 nalaze se podaci o korištenim svojstvima fluida.

Tablica 9. Svojstva fluida [21]

Regija	Materijal	Temp [°C]	c_p [J/(kg K)]	ν [Pa s]	Pr
air	zrak	85	1010	$2.11 \cdot 10^{-5}$	0.703

Podaci iz tablica 8 i 9 implementirani su preko datoteke *thermophysicalProperties* koja se nalazi u direktoriju *constant* određenog *case*-a.

Također u direktoriju *constant* nalaze se i datoteke *fvOptions* gdje su zadani volumni izvori topline. Iznosi volumnih izvora predstavljaju toplinske gubitke u određenim regijama dobiveni kao ulazni podaci. Budući da je simulirana samo 1/8 cijelog modela, dobiveni podaci o gubicima podijeljeni su s 8. U tablici 10 nalaze se podaci o volumnim izvorima.

Tablica 10. Volumni toplinski izvori na 1/8 modela

Regija	Volumni izvor [W]
magnets	49,375
rotorFe	3
rotorFeMag	15,125
statorCu	181,5
statorFe	138,125

U regiji *air* i *rotorAl* nema toplinskih gubitaka, pa tako u njihovim direktorijima u *constant*-u nema ni datoteke *fvOptions*.

4.4.4. Početni i rubni uvjeti

4.4.4.1. Početni uvjeti

Početni uvjeti postavljaju se u direktoriju *0*. Za krutine postavljeni su početni uvjeti za tlak i brzinu. U tablici 11 su prikazani korišteni početni uvjeti za tlak.

Tablica 11. Početni uvjeti za tlak krutina

Komunikacijska površina	**Početni uvjet**
*.*_interface*	calculated
*wall.**	calculated
*cyclic.**	cyclicAMI

U tablici 12 prikazani su početni uvjeti za temperaturu sljedećih regija krutina: *magnets, rotorAl, rotorFe* i *rotorFeMag*. Početno polje temperature za slučaj s glatkim rotorom postavljeno je na temperaturu dobivenu kao ulazni podatak za svaku regiju, dok je za slučaj s lopaticama na rotoru temperatura postavljena na svim regijama na 85°C.

Tablica 12. Početni uvjeti za temperaturu regija krutina *magnets, rotorAl, rotorFe* i *rotorFeMag*

Komunikacijska površina	**Početni uvjet**
*.*_interface*	compressible::turbulentTemperatureCoupledBaffleMixed
*wall.**	zeroGradient
*cyclic.**	cyclicAMI

U tablici 13 prikazani su početni uvjeti za temperaturu sljedećih regija krutina: *statorCu* i *statorFe*. Početno polje temperature za oba dva promatrana slučaja postavljeno je na gore opisan način.

Tablica 13. Početni uvjeti za temperaturu regija krutina *statorCu* i *statorFe*

Komunikacijska površina	**Početni uvjet**
*.*_interface*	compressible::turbulentTemperatureCoupledBaffleMixed
*wall.**	externalWallHeatFluxTemperature
*cyclic.**	cyclicAMI

Kako su modelirani samo stator, rotor i zrak između njih, efekt rashladne tekućine oko elektromotora uzet je u obzir preko početnog uvjeta *externalWallHeatFluxTemperature*. Primjer jednog tog početnog uvjeta korištenog u promatranim slučajevima prikazan je ispod.

```
{
    type            externalWallHeatFluxTemperature;    tip rubnog uvjeta
    Ta              uniform 328;                        temperatura rashladne tekućine
                                                                [K]
    h               uniform 408;                        koeficijent prijenosa topline
                                                                [W/m2K]
    value           uniform 358;                        temperatura krutine [K]
    kappaMethod     solidThermo;
    kappa           none;
}
```

Iznos koeficijenta prijenosa topline i temperatura rashladne tekućine također su dobiveni kao ulazni podaci.

Za fluidnu regiju postavljeni su početni uvjeti za turbulenciju, brzinu, tlak, temperaturu.

U tablici 14 prikazani su početni uvjeti za fluidnu regiju *U*, *T*, *p* i *p_rgh*.

Tablica 14. Početni uvjeti za zrak *U, T, p* i *p_rgh*

Komunikacijska površina	**U**	**T**	**p**	**p_rgh**
*.*_interface*	noSlip	compressible::turbulentTemperatureCoupledBaffleMixed	calculated	fixedFluxPressure
*wall.**	fixedValue	externalWallHeatFluxTemperature / zeroGradient	calculated	zeroGradient
*cyclic.**	cyclicAMI	cyclicAMI	cyclicAMI	cyclicAMI

U tablici 15 prikazani su početni uvjeti za fluidnu regiju *alphat, k, nut* i *omega*.

Tablica 15. Početni uvjeti za zrak *alphat, k, nut* i *omega*

Komunikacijska površina	**alpha**	**k**	**nut**	**omega**
*.*_interface*	compressible::alphatWallFunction	kqRWallFunction	nutkWallFunction	zeroGradient
*wall.**	calculated	kqRWallFunction	nutkWallFunction	zeroGradient
*cyclic.**	cyclicAMI	cyclicAMI	cyclicAMI	cyclicAMI

Početne vrijednosti alphat i nut postavljene su na 0, dok su početne vrijednosti za k i omegu izračunate prema formulama (15) i (16).

4.4.4.2. Rubni uvjeti

Kako su simulacije provedene na 1/8 geometrije, korišten je ciklični rubni uvjet *cyclicAMI* na stranama. Rubni uvjeti između različitih regija su *mappedWall*. Primjer jednog takvog rubnog uvjeta prikazan je ispod. Za primjer je uzeta površina komunikacije zraka s aluminijskim dijelom rotora.

airToRotorAl_interface		ime komunikacijske površine
{		
type	mappedWall;	tip komunikacijske površine
nFaces	55236;	broj površina ćelija na komunikacijskoj površini
startFace	14147018;	identifikacijski broj početne komunikacijske površine
sampleMode	nearestPatchFace;	način povezivanja
sampleRegion	rotorAl;	ime regije s kojom se povezuje
samplePatch	rotorAlToAir_interface;	ime komunikacijske površine na regiji s kojom se povezuje
}		

Na kraju imena svake komunikacijske površine koja komunicira s drugom regijom zbog jednostavnosti postavljanja početnih uvjeta dodan je nastavak "_interface".

Zidni rubni uvjeti su postavljeni za komunikaciju s okolinom, i također zbog lakšeg postavljanja početnih uvjeta nazivi tih komunikacijskih površina počinju s "wall".

4.4.5. Podrelaksacija

Podrelaksacijski faktori koriste se zbog povećanja stabilnosti simulacije, pogotovo u stacionarnim problemima [22]. Oni ograničavaju promjenu vrijednosti polja. Nova vrijednost polja jednaka je staroj vrijednosti uvećanoj za razliku izračunate trenutno vrijednosti i stare pomnožene s podrelaksacijskim faktorom, tj. prikazano formulom:

$$Q_n = Q_o + \alpha(Q - Q_o), \tag{37}$$

gdje je Q_n nova vrijednost polja, α je podrelaksacijski faktor, Q predstavlja trenutno izračunatu vrijednost, a Q_o predstavlja staru vrijednost polja dobivenu u prošloj iteraciji.

Iznos od 0,99 postavljen je za podrelaksacijski faktor za izračun entalpije krutina, te i za fluidnu regiju, dok je iznos od 0,3 postavljen za izračun tlaka u fluidu, te 0,7 za izračun brzine i parametre turbulencije fluide regije.

5. REZULTATI I RASPRAVA

5.1. Ventilacijski gubici

U tablici 16 nalazi se usporedba ventilacijskih gubitaka elektromotora s glatkim rotorom dobivenih simulacijom i podataka dobivenih za usporedbu izračunatih prema analitičkoj formuli (34). Također, prikazana je i usporedba ventilacijskih gubitaka glatkog rotora i rotora s lopaticama na istom broju okretaja od 5000 okretaja u minuti.

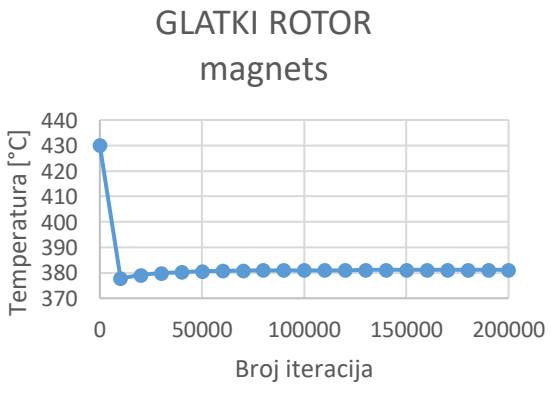
Tablica 16. Usporedba ventilacijskih gubitaka [W]

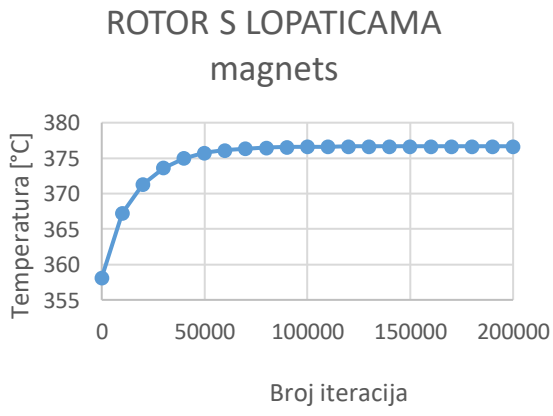
	Analitička formula	**Računalna dinamika plinova**
Elektromotor s glatkim rotorom	33	38
Elektromotor s lopaticama na rotoru	-	53

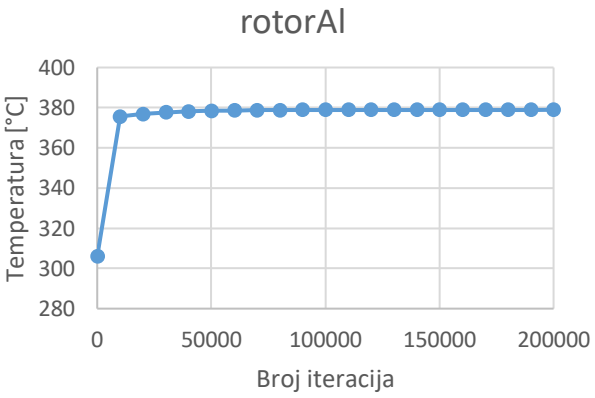
Odstupanja rezultata modela elektromotora s glatkim rotorom dobivenih simulacijom računalne dinamike fluida vrlo su mala naspram analitičkog izračuna pa se mogu smatrati točnima. Ventilacijski gubici očekivano su veći na geometriji s lopaticama na rotoru.

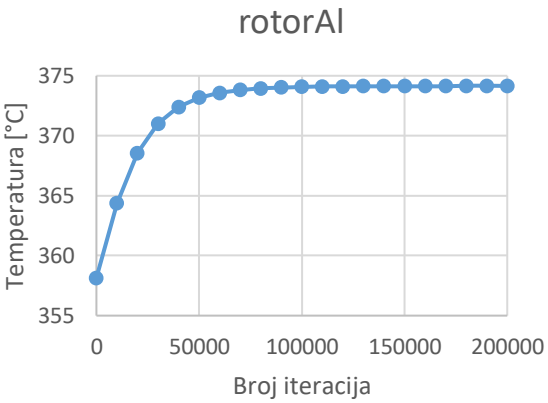
5.2. Konvergencija rezultata

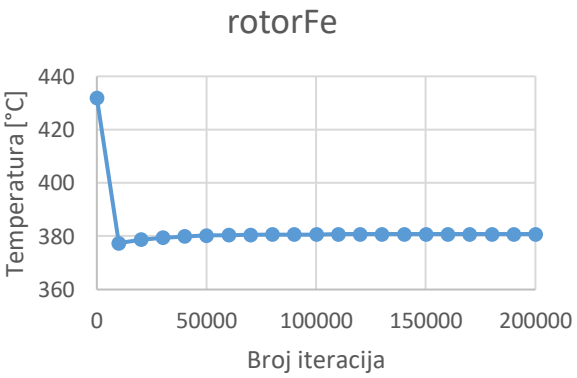
Sljedeće slike prikazuju konvergenciju maksimalnih temperatura određenih regija elektromotora. S lijeve strane nalaze se podaci za elektromotor s glatkim rotorom, dok se s desne strane nalaze podaci za elektromotor s rotorom s lopaticama. Obje simulacije puštene su do 200000 iteracija.

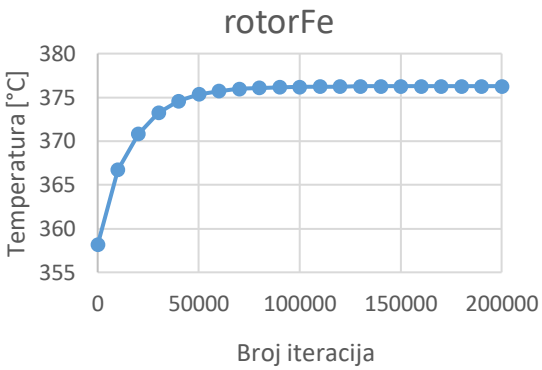


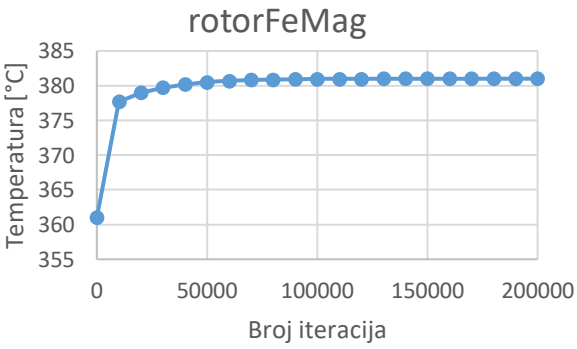


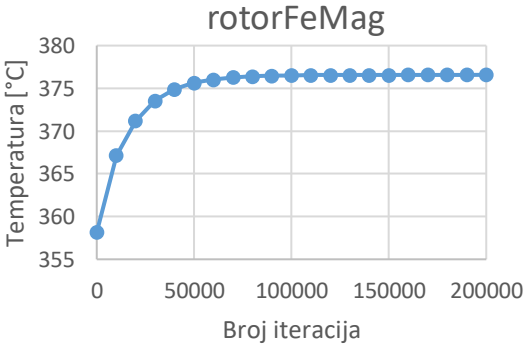

rotorAl
Temperatura [°C]
400
380
360
340
320
300
280
0
50000
100000
150000
200000
Broj iteracija

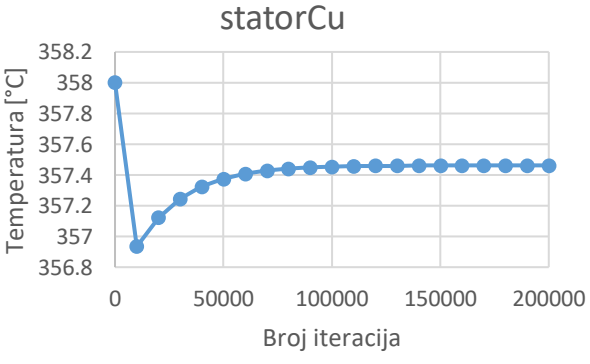

rotorAl
Temperatura [°C]
375
370
365
360
355
0
50000
100000
150000
200000
Broj iteracija

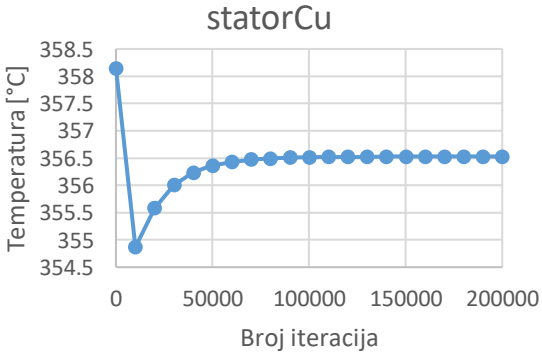

rotorFe
Temperatura [°C]
440
420
400
380
360
0
50000
100000
150000
200000
Broj iteracija

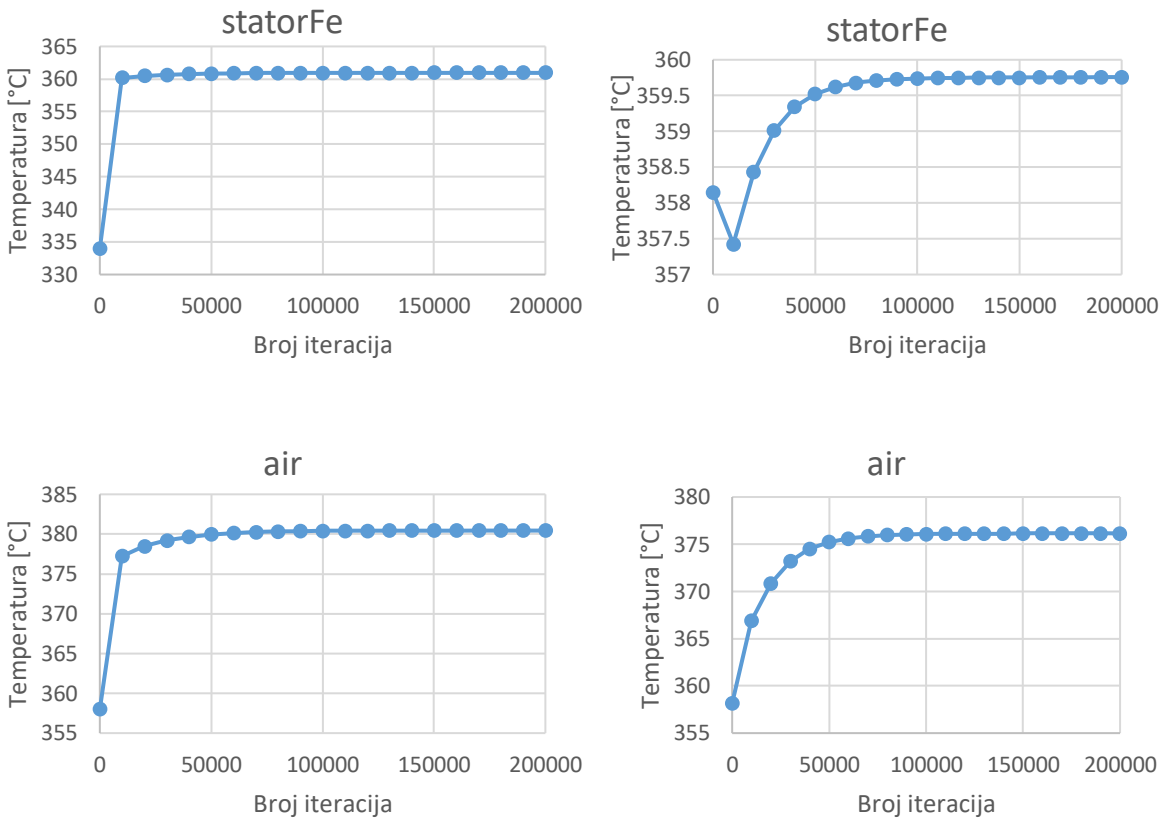

rotorFe
Temperatura [°C]
380
375
370
365
360
355
0
50000
100000
150000
200000
Broj iteracija


rotorFeMag
Temperatura [°C]
385
380
375
370
365
360
355
0
50000
100000
150000
200000
Broj iteracija


rotorFeMag
Temperatura [°C]
380
375
370
365
360
355
0
50000
100000
150000
200000
Broj iteracija


statorCu
Temperatura [°C]
358.2
358
357.8
357.6
357.4
357.2
357
356.8
0
50000
100000
150000
200000
Broj iteracija


statorCu
Temperatura [°C]
358.5
358
357.5
357
356.5
356
355.5
355
354.5
0
50000
100000
150000
200000
Broj iteracija



Slika 19. Konvergencija maksimalnih temperatura regija

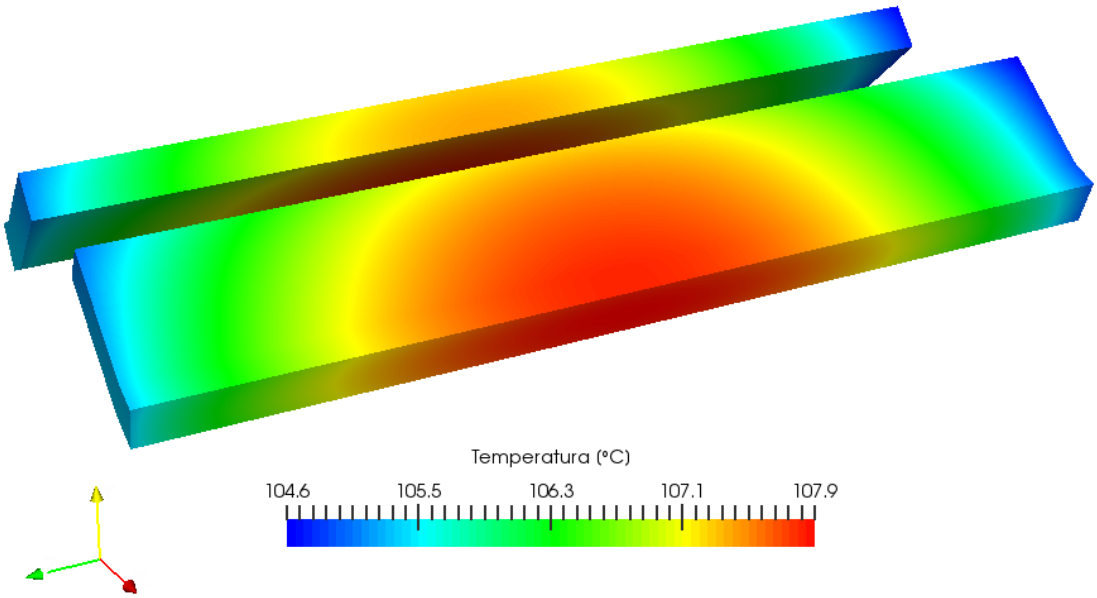
5.3. Elektromotor s glatkim rotorom

Rezultati dobiveni simulacijom računalne dinamike fluida za elektromotor s glatkim rotorom uspoređeni su s dobivenim podacima za usporedbu. Dobiveni podaci za usporedbu zapravo su srednje temperature određenih regija pravog elektromotora i oni se nalaze u tablici 17.

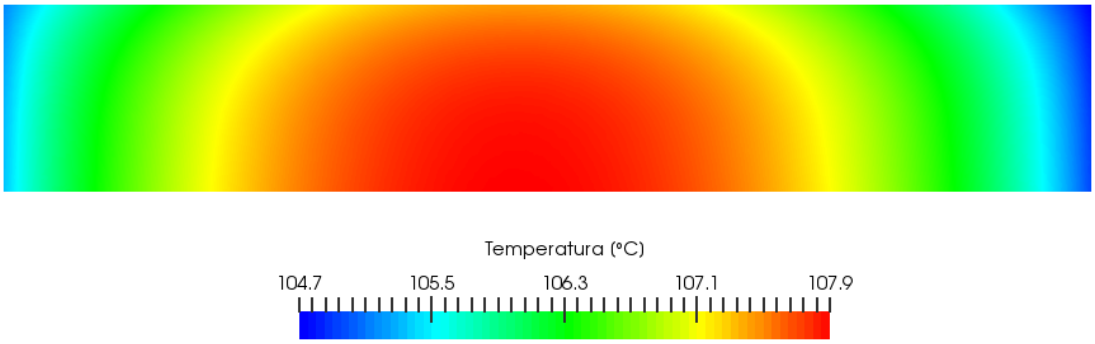
Tablica 17. Podaci za usporedbu

Regija	Temperatura [°C]
Namotaj statora	85
Jaram statora	61
Zrak u unutrašnjosti na strani prednjeg štita	80
Zrak u unutrašnjosti na strani stražnjeg štita	90
Magneti	157
Rotorsko željezo bliže zračnom rasporu	88
Jaram rotora	159

Na sljedećim slikama prikazana je raspodjela temperature na magnetima.



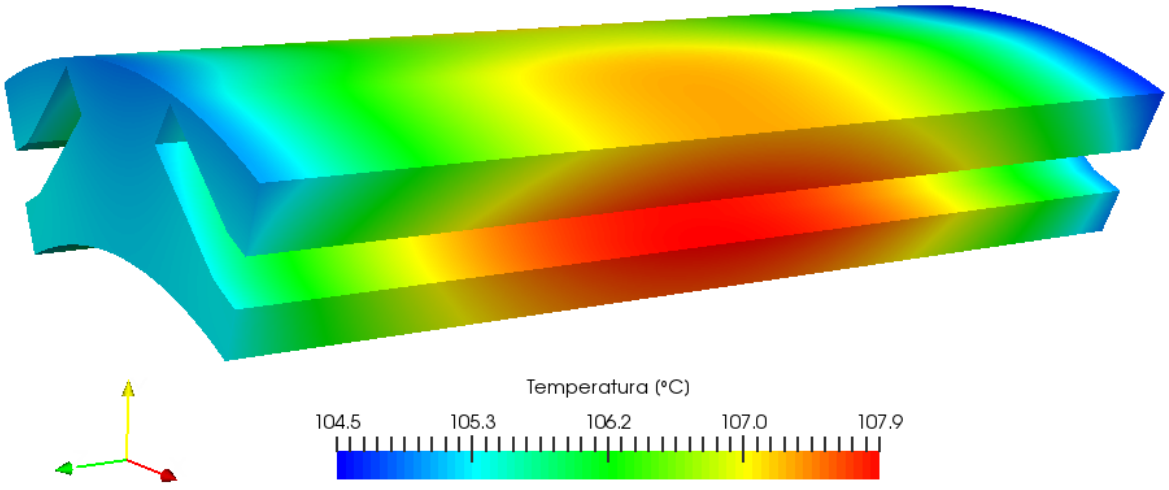
Slika 20. Raspodjela temperature na magnetima



Slika 21. Raspodjela temperature na magnetima po poprečnom presjeku magneta

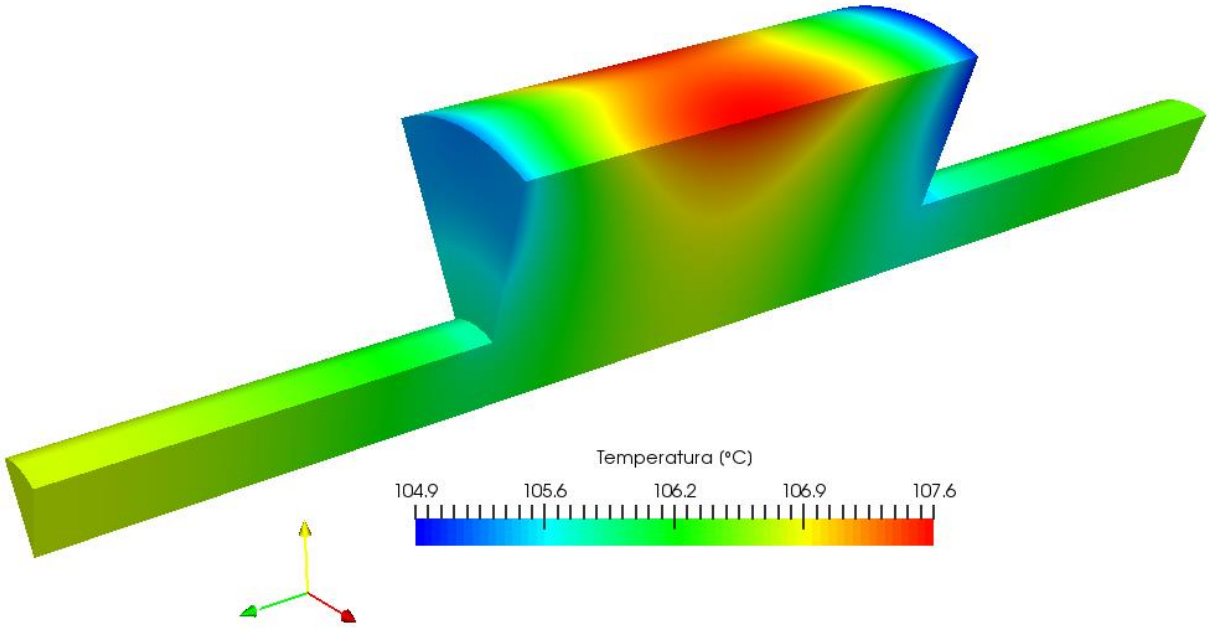
Raspodjela temperature na magnetima kreće se od 105 do 108 °C što je za 50 °C manje od podataka za usporedbu. No kako su uvedena pojednostavljenja, te se geometrija ovih magneta razlikuje od prave geometrije, dobivena raspodjela smata se dovoljno dobrom. Na sredini magneta najviše su temperature, dok su na krajevima najniže jer se približavaju aluminijskom dijelu rotora koji je u direktnom dodiru sa zrakom.

Na sljedećoj slici prikazana je temperaturna raspodjela na željezu rotora koji je u direktnom dodiru s magnetima.

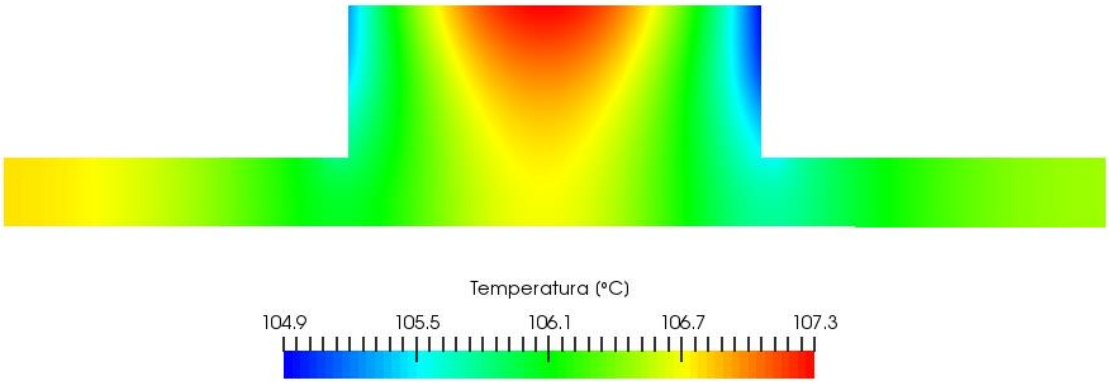


Slika 22. Raspodjela temperature na željezu rotora koje je u dodiru s magnetima

Temperaturna raspodjela na ovom dijelu rotorskog željeza, slična je kao i na magnetima što je zapravo i očekivano. Magneti imaju veći volumenski izvor nego željezo rotora i generiraju više topline, a između magneta i željeza rotora je idealna veza te dolazi do kondukcijskog prijenosa topline. Može se primijetiti i da je gornji dio željeza rotora hladniji nego donji, a razlog tome je što je s gornje strane zrak u razmaku između rotora i statora, dok se donji dio spaja na drugi dio rotorskog željeza, a njegova temperaturna raspodjela nalazi se na slici 23. Temperaturna raspodjela po poprečnom presjeku nalazi se na slikama 24 i 25. U usporedbi s podacima za usporedbu, dobivene vrijednosti temperatura simulacijom su više. Objašnjenje leži u idealnom spoju magneta i željeza rotora, te pojednostavljenoj geometriji korištenih u simulaciji. U realnom slučaju nema idealnog spoja, već postoje zračni zazori oko magneta, a zrak se ponaša kao toplinska izolacija te nema direktnog kondukcijskog prijenosa topline kao što je to slučaj u ovom radu.

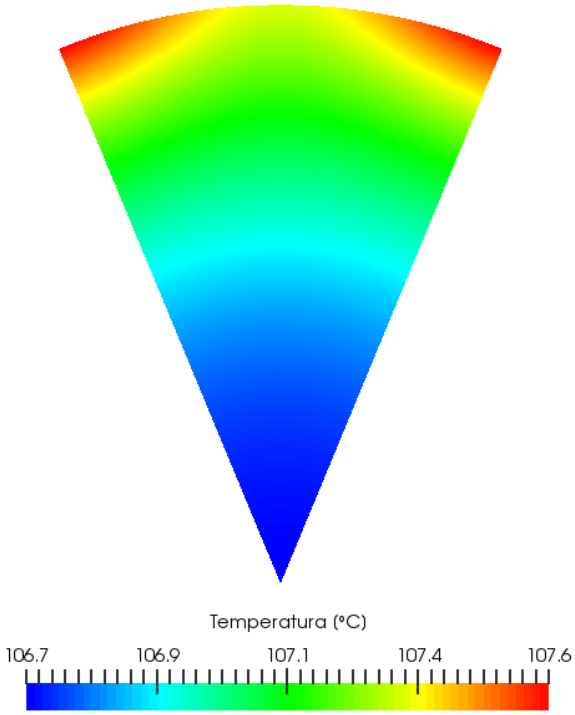


Slika 23. Temperaturna raspodjela na željezu rotora



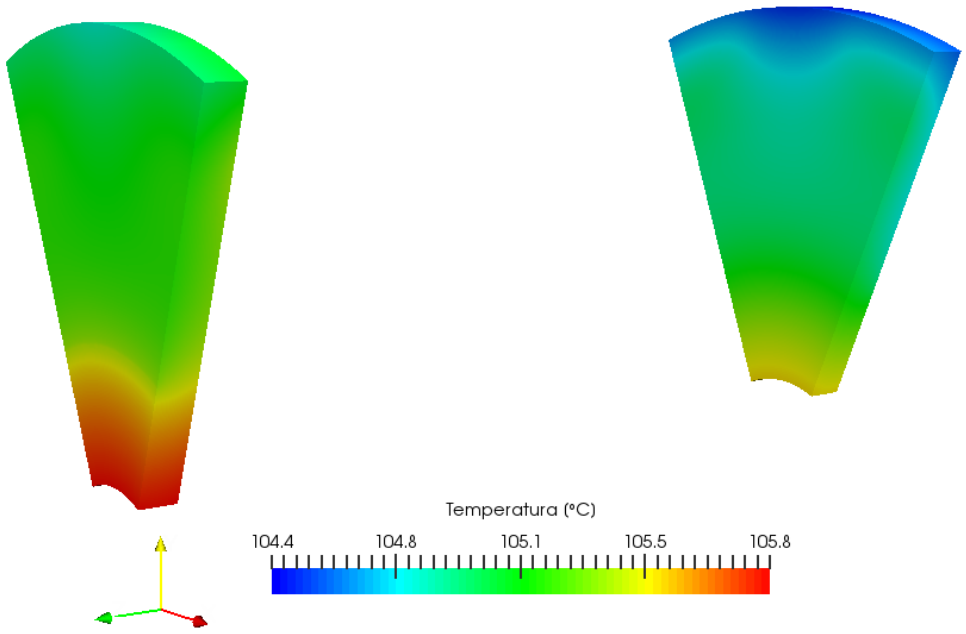
Slika 24. Temperaturna raspodjela po poprečnom presjeku željeza rotora

Jedna strana hladnija je od druge, što se moglo primijetiti i na prijašnjim regijama. Razlog tome je u samoj geomtriji elektromotora. S hladnije strane nalazi se manji prostor za zrak, manje namotaja statora i bliže se nalazi kućište s rashladnom tekućinom. Iako je ta razlika u temperaturama niska, dovoljna je da se primijeti i utjecaj geometrije elektromotora na temperaturu raspodjelu.

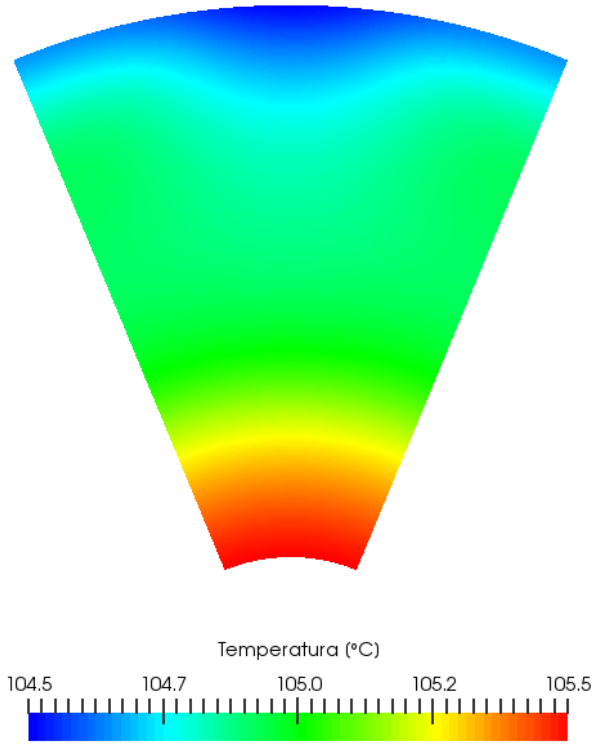


Slika 25. Temperaturna raspodjela po poprečnom presjeku željeza rotora

Na sljedećim slikama je prikaz temperaturne raspodjele na aluminijskom dijelu rotora.



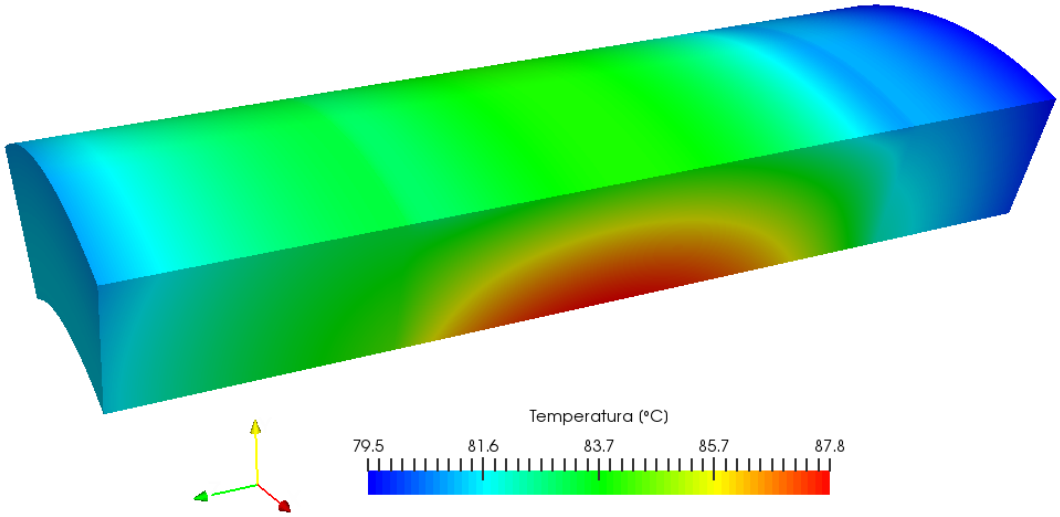
Slika 26. Temperaturna raspodjela na aluminijskom dijelu rotora



Slika 27. Temperaturna raspodjela po poprečnom presjeku aluminijskog dijela rotora

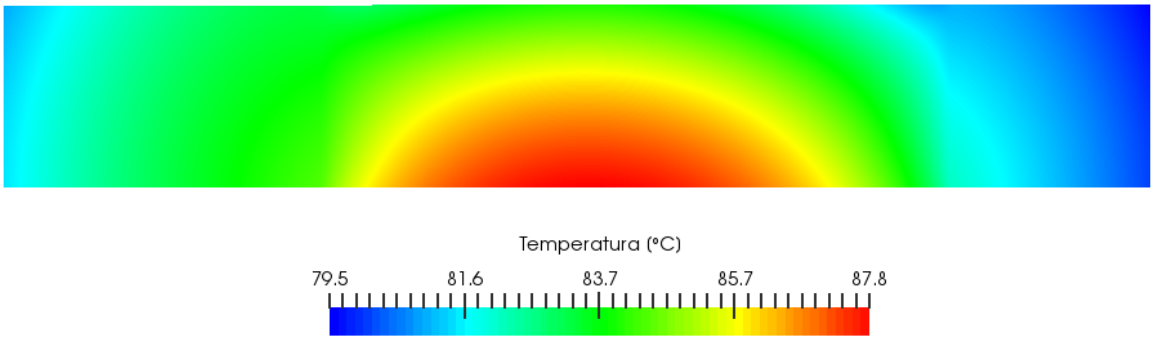
Kako aluminij dobro provodi toplinu, njegove temperature su približno jednake željezu i magnetima s kojima se dodiruje.

Na slici 28 nalazi se prikaz temperaturne raspodjele po cijelom statoru.



Slika 28. Temperaturna raspodjela po statoru

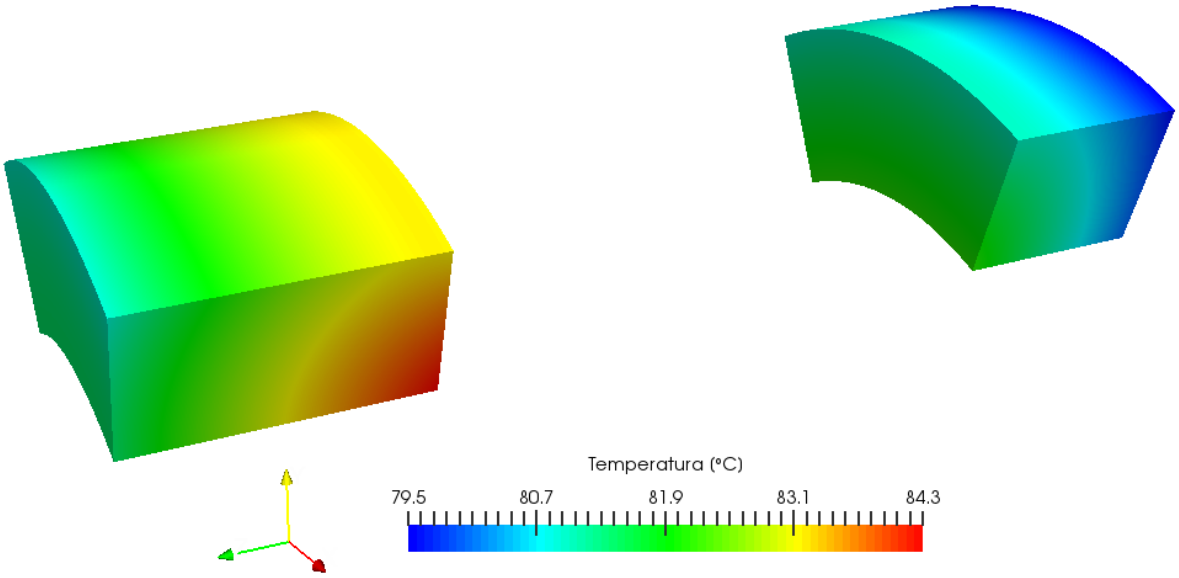
Raspodjela temperature po poprečnom presjeku cijelog statora prikazana je na slici 29.



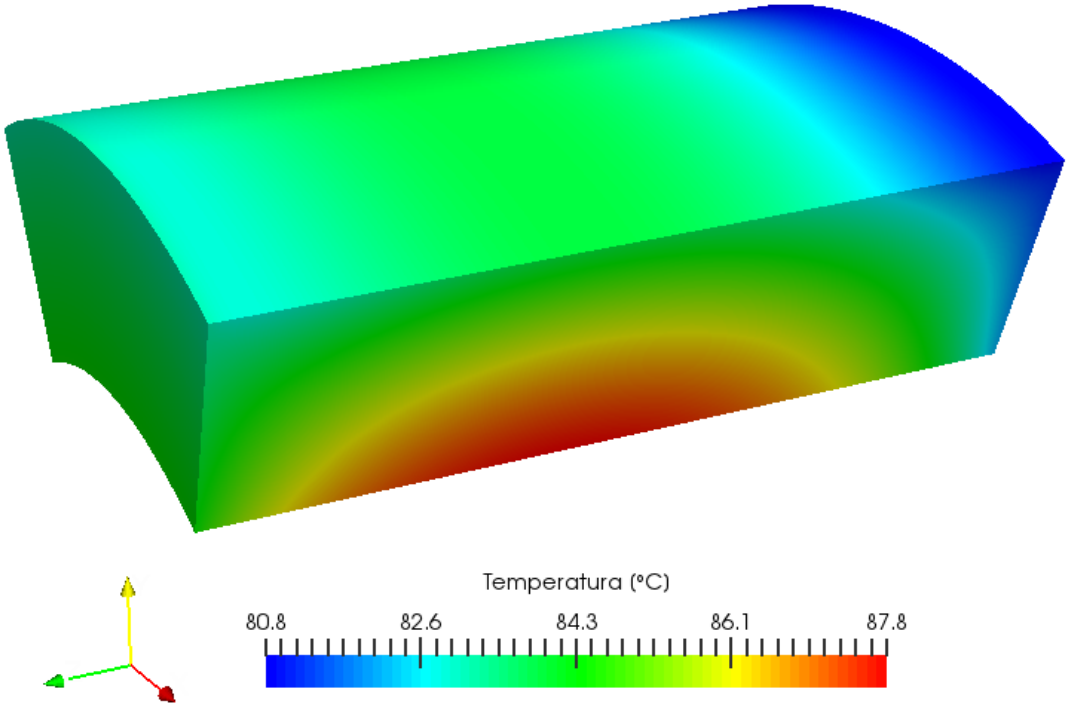
Slika 29. Raspodjela temperature po poprečnom presjeku statora

Temperaturna raspodjela dobivena simulacijom računalne dinamike fluida zbog pojednostavljene geometrije ne poklapa se u potpunosti s podacima za usporedbu.

Temperaturne raspodjele po bakrenim namotajima, te željezu statora prikazane su na sljedećim slikama.

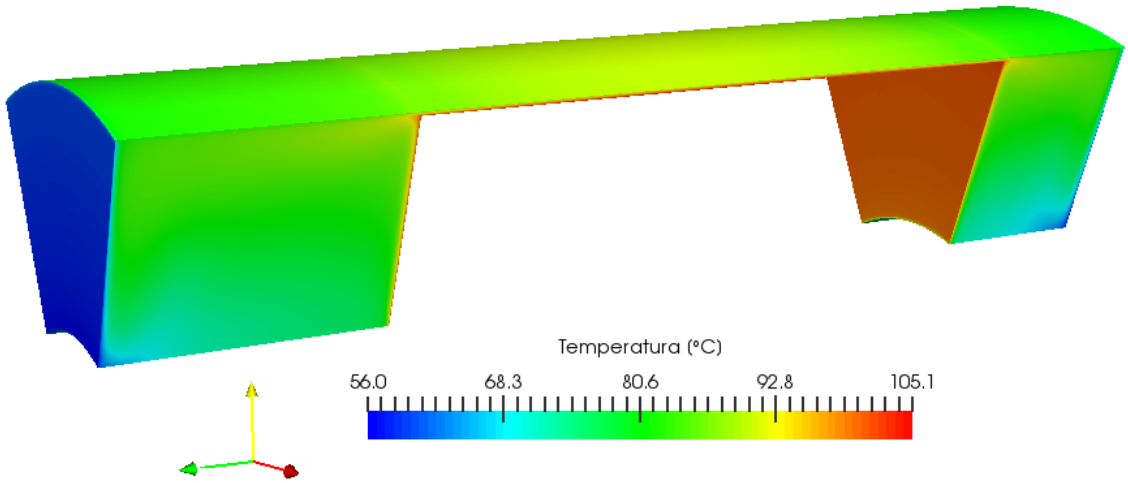


Slika 30. Raspodjela temperature po bakrenom dijelu statora



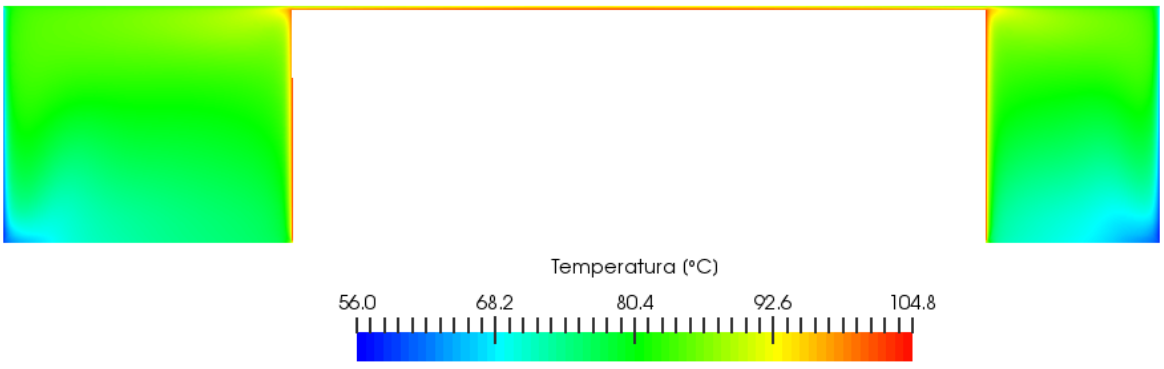
Slika 31. Raspodjela temperature po željeznom dijelu statora

Prikaz temperaturne raspodjele u zraku unutar elektromotora nalazi se na sljedećim slikama.



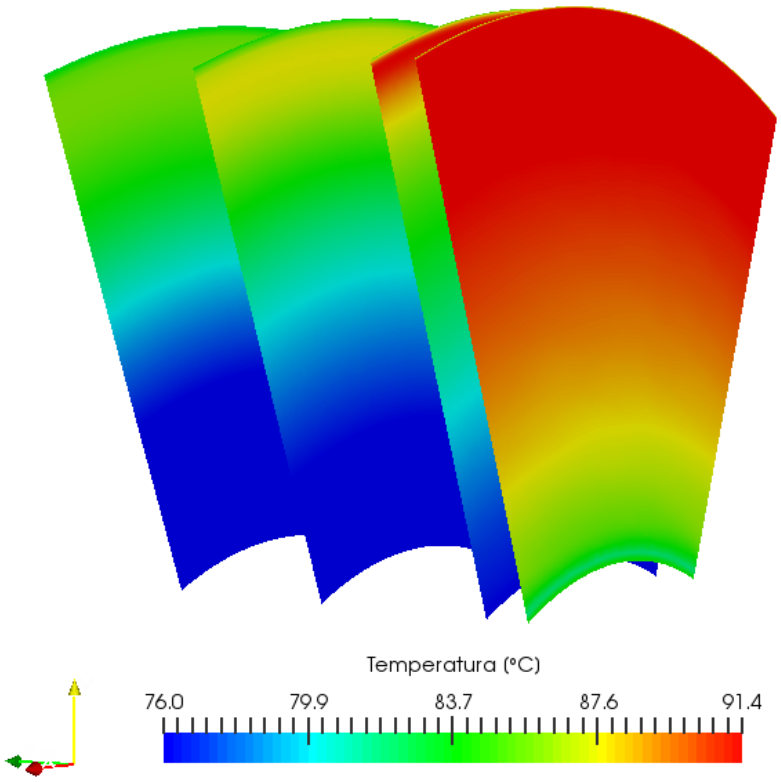
Slika 32. Raspodjela temperature u zraku unutar elektromotora

Zrak na krajevima direktno dodiruje kućište u kojem se nalazi rashladna tekućina čija je temperatura 55 °C i zbog toga su krajevi zraka na nižoj temperaturi u odnosu na ostatak. Temperaturna raspodjela u zraku poklapa se s podacima za usporedbu. Temperaturna raspodjela po poprečnom presjeku prikazana je na slici 33.

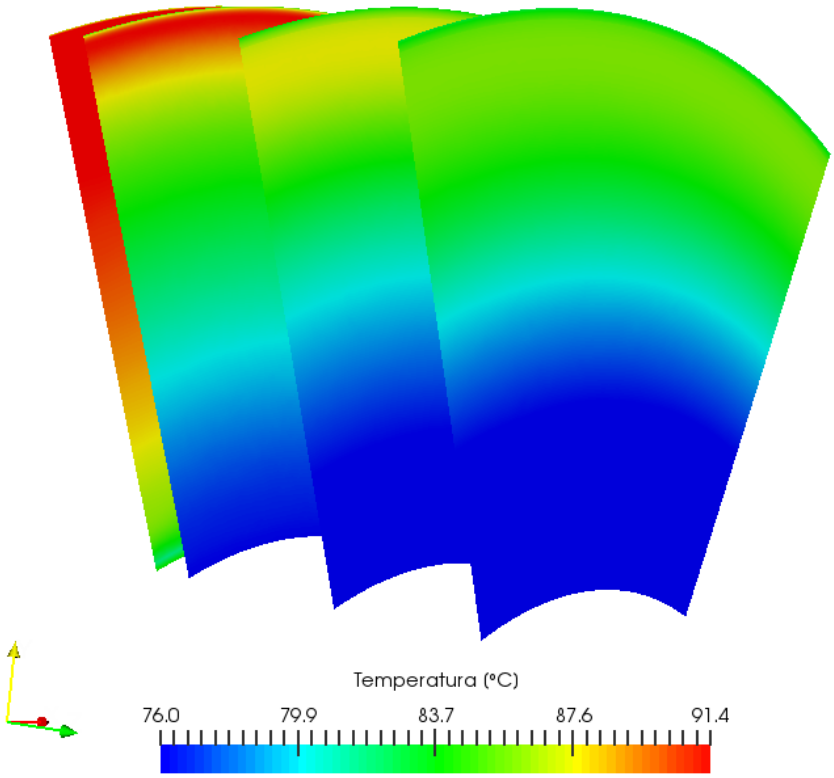


Slika 33. Raspodjela temperature po poprečnom presjeku u zraku

Na slici 34 prikazana je temperaturna raspodjela po poprečnim presjecima zraka na prednjoj strani, dok je na slici 35 prikazana raspodjela na stražnjoj strani zraka.

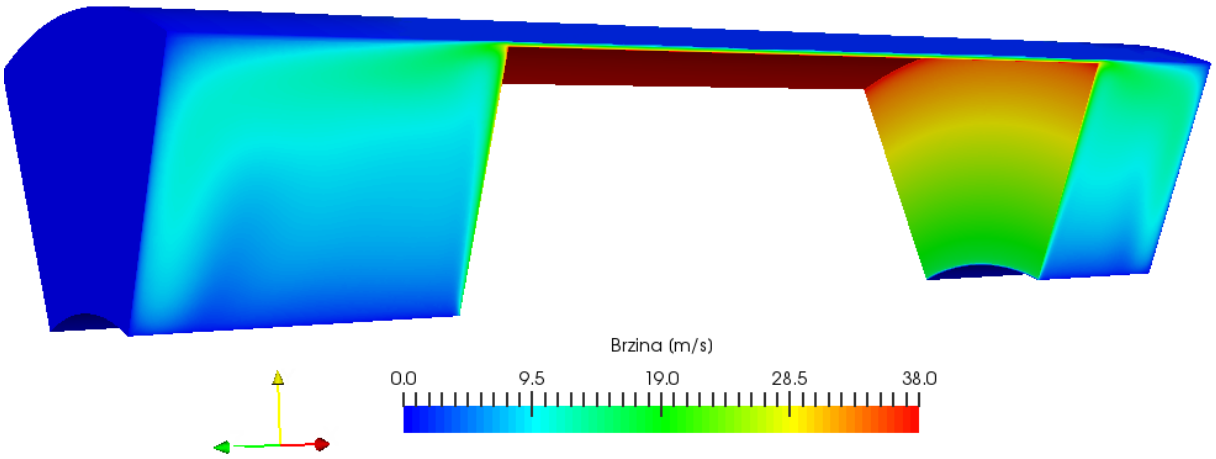


Slika 34. Raspodjela temperature po poprečnom presjeku na prednjoj strani zraka

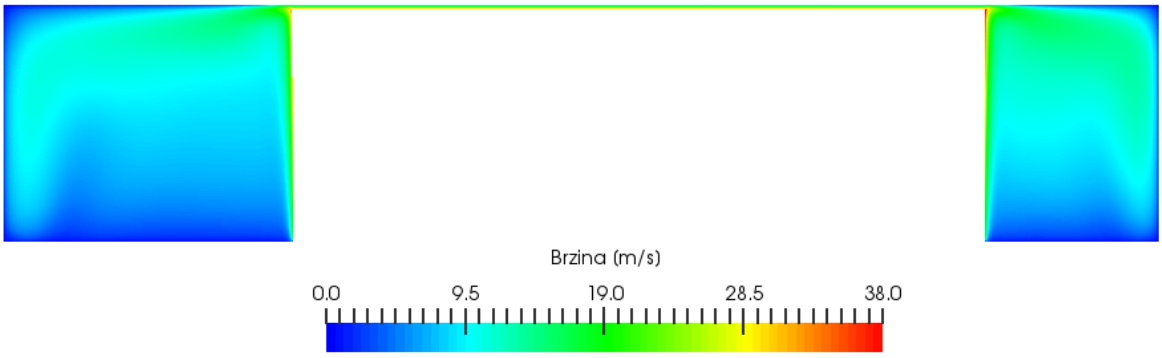


Slika 35. Raspodjela temperature po poprečnom presjeku na stražnjoj strani zraka

Na sljedećim slikama nalaze se prikazi raspodjele brzine u zraku u unutrašnjosti elektromotora.



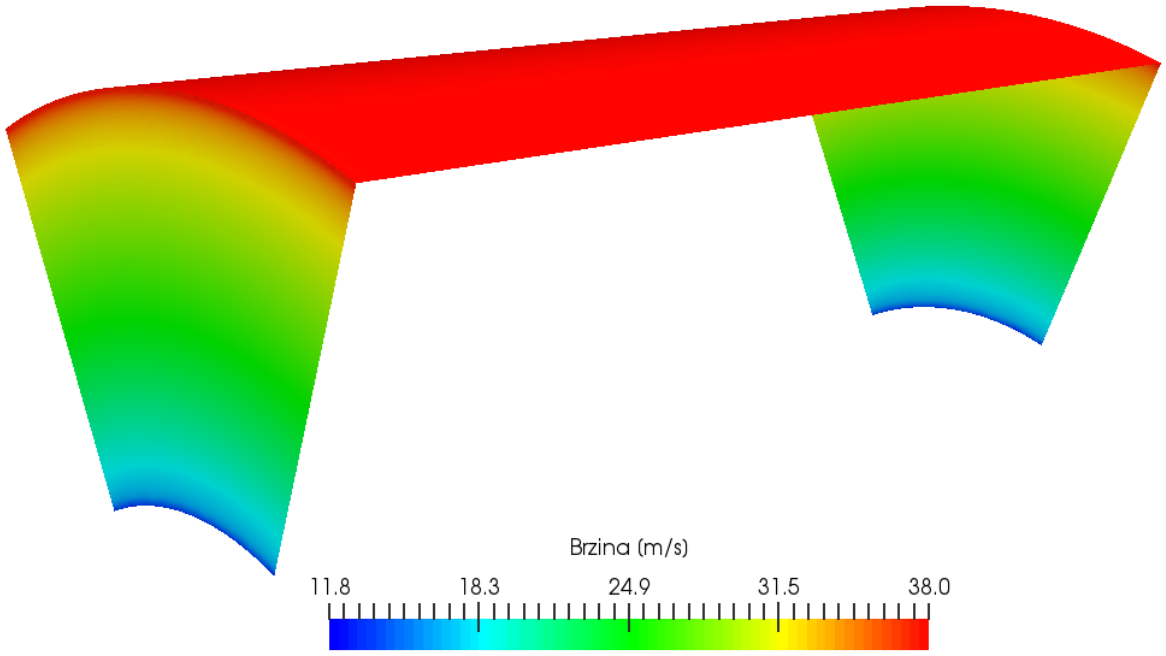
Slika 36. Raspodjela brzine u zraku



Slika 37. Raspodjela brzine po poprečnom presjeku zraka

Budući da u promatranom problemu nema ulaza ni izlaza zraka, dolazi samo do njegovog miješanja. Kako se rotor okreće, brzina zraka koji dodiruje rotor mijenja se po radijusu, i dolazi do maksimalne vrijednosti na najvećem radijusu. Također može se primijetiti i trend vrtloga koji nastaju zbog rotacije rotora i „izlaska“ zraka iz uskog razmaka između rotora i statora.

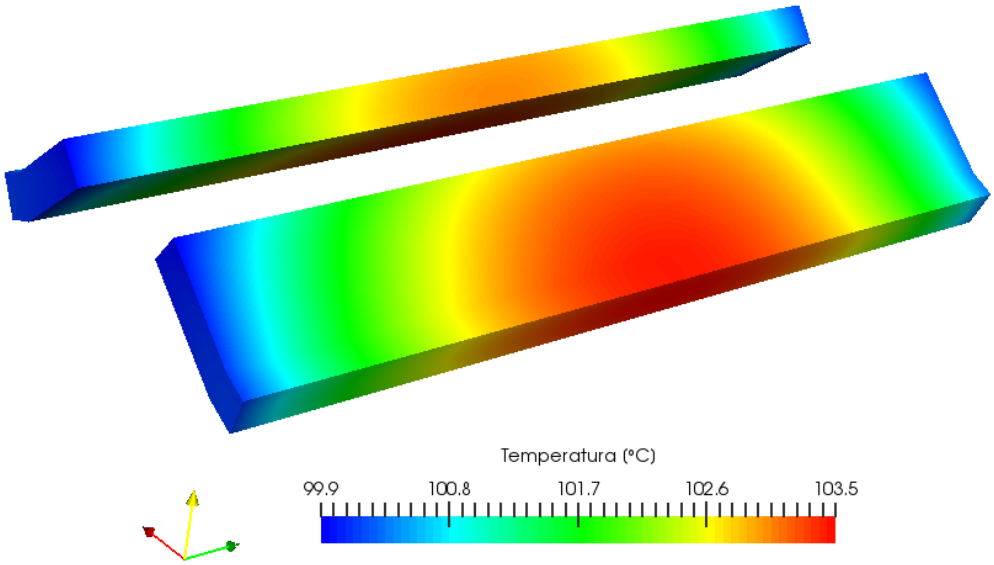
Na slici 38 prikazana je raspodjela brzine na površini dodira zraka i rotora koja se u ovom slučaju mijenja s radijusom.



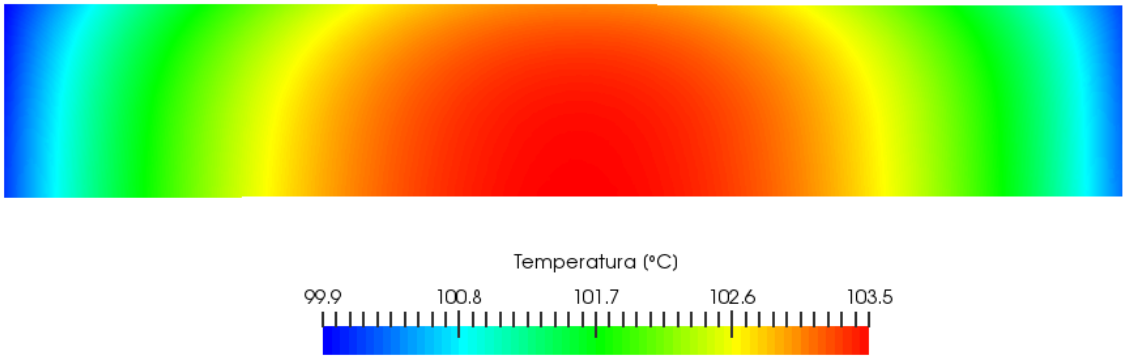
Slika 38. Raspodjela brzine na dodiru zraka i rotora

5.4. Elektromotor s lopaticama na rotoru

Za ovu geometriju ne postoje dobiveni podaci za usporedbu, već se dobiveni rezultati simulacijom računalne dinamike fluida uspoređuju s podacima za slučaj s glatkim rotorom. Raspodjela temperature u magnetima nalazi se na sljedećim slikama.



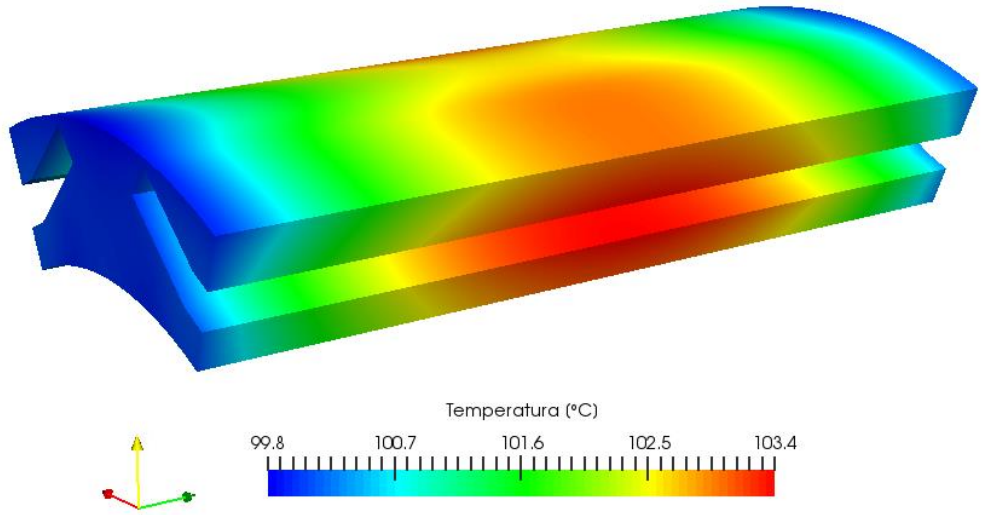
Slika 39. Raspodjela temperature po magnetima



Slika 40. Raspodjela temperature po poprečnom presjeku magneta

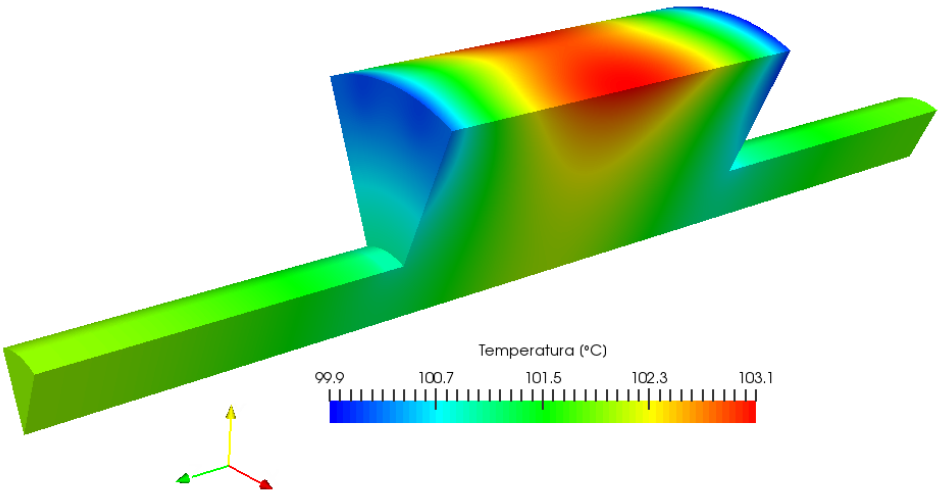
Uspoređujući ove podatke s podacima na slikama 20 i 21, može se primijetiti da je raspodjela temperature ostala ista, te da se temperatura u magnetima spustila za oko 5 °C.

Na sljedećoj slici prikaz je temperaturne raspodjele željeza rotora koje je u direktnom dodiru s magnetima.

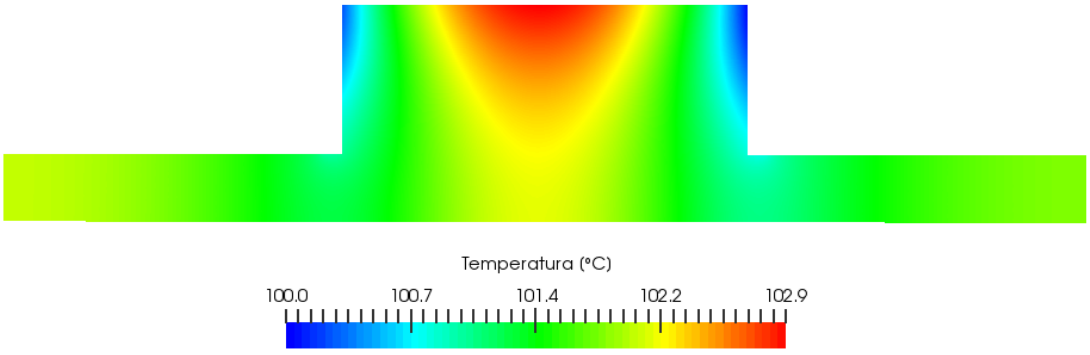


Slika 41. Raspodjela temperature po željezu rotora koje je u dodiru s magnetima

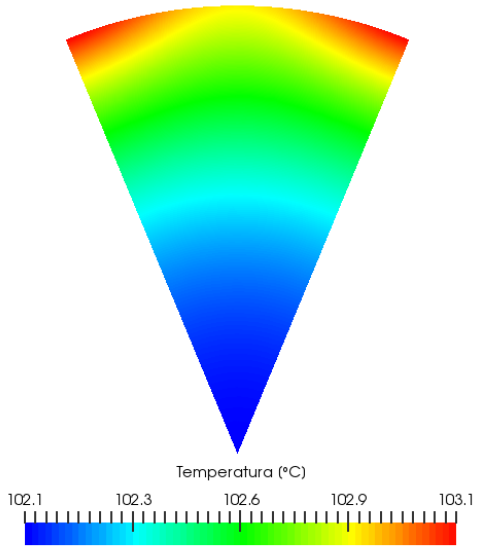
Uspoređujući ove temperature sa slikom 22, također se primjećuje da je temperatura i u ovoj regiji smanjena za oko 5 °C, dok je raspodjela ostala ista. Na sljedećim slikama nalazi se prikaz temperaturne raspodjele na željezu rotora.



Slika 42. Raspodjela temperature u željezu rotora



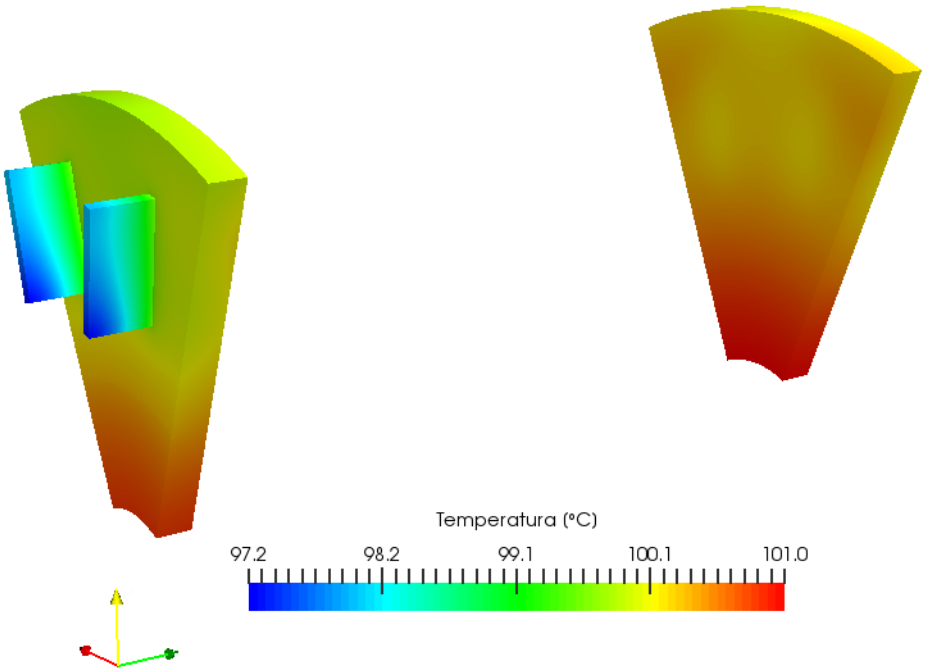
Slika 43. Raspodjela temperature po poprečnom presjeku željeza rotora



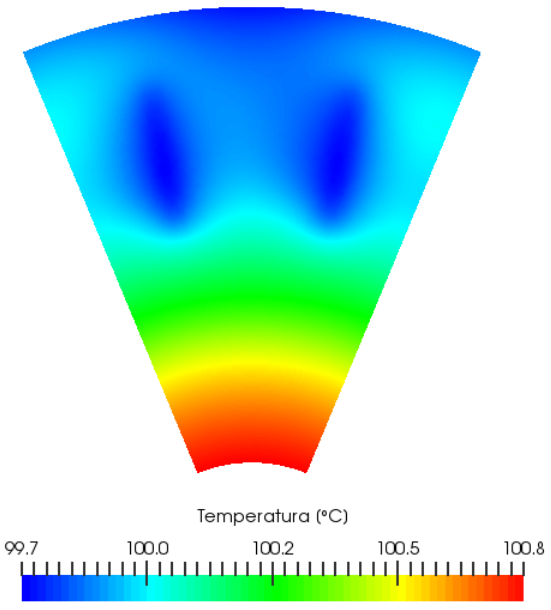
Slika 44. Raspodjela temperature po poprečnom presjeku željeza rotora

U usporedbi s podacima sa slika 23, 24 i 25, također se primjećuje sveukupni pad temperature od oko 5°C, te ista raspodjela temperature u željezu rotora.

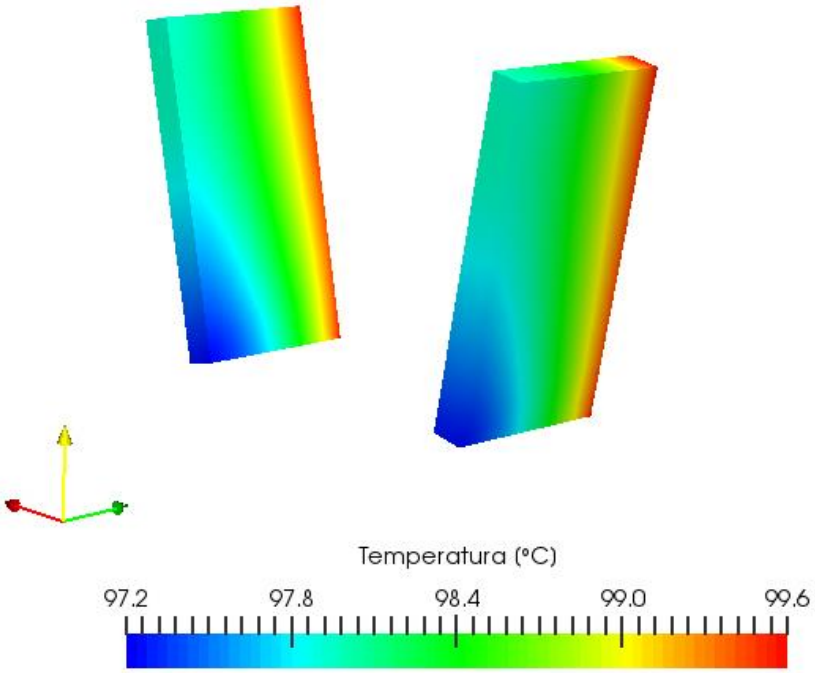
Na sljedećim slikama nalazi se prikaz temperaturne raspodjele po aluminijskom dijelu rotora s lopaticama.



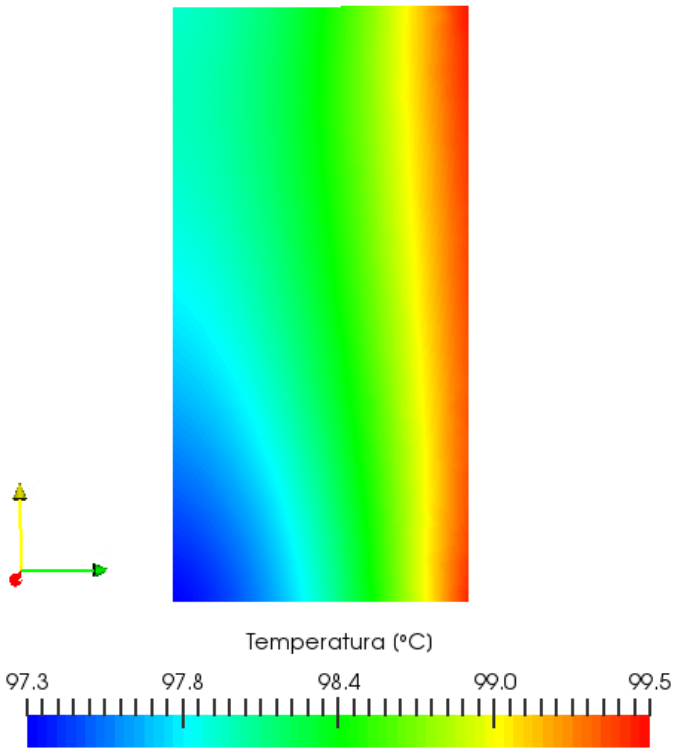
Slika 45. Raspodjela temperature u aluminijskom dijelu rotora



Slika 46. Raspodjela temperature po poprečnom presjeku u aluminijskom dijelu rotora



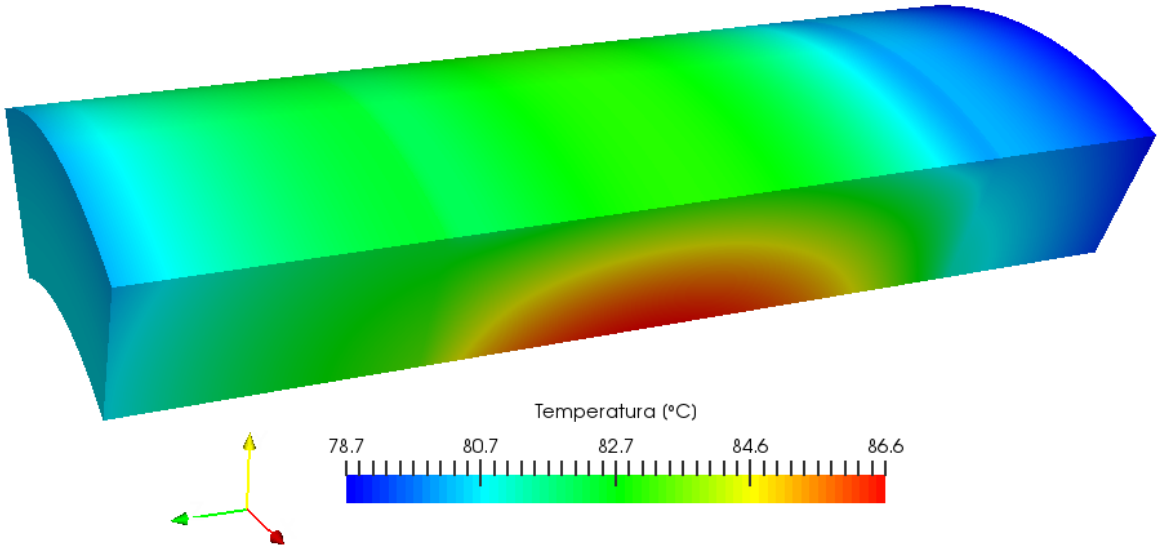
Slika 47. Raspodjela temperature po lopaticama rotora



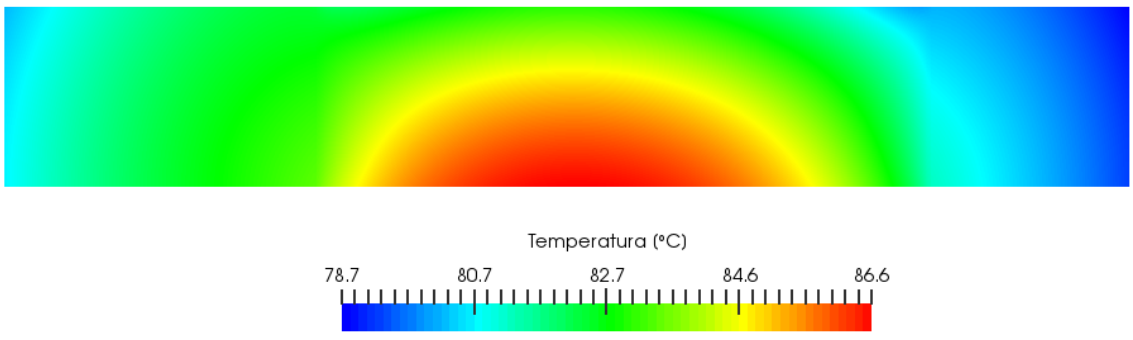
Slika 48. Raspodjela temperature po lopatici rotora

Uspoređujući ove podatke s podacima sa slika 26 i 27, primjećuje se sveukupni pad temperature aluminijskog dijela rotora za oko 5 °C. Raspodjela je malo drugačija zbog dodatka lopatica. Same lopatice na dodiru s rotorom imaju višu temperaturu nego na krajevima gdje su u dodiru sa zrakom. Također se može primijetiti da su gornji vrhovi lopatica topliji od donjih, a to je zbog položaja lopatica u odnosu na magnete.

Na sljedećim slikama nalazi se temperaturna raspodjela u statoru elektromotora.



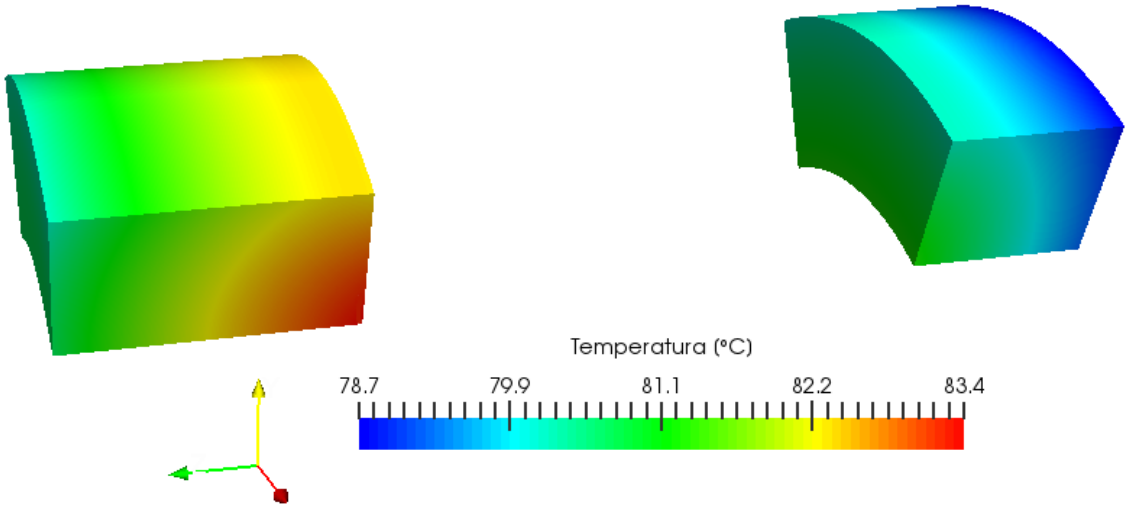
Slika 49. Raspodjela temperature u statoru



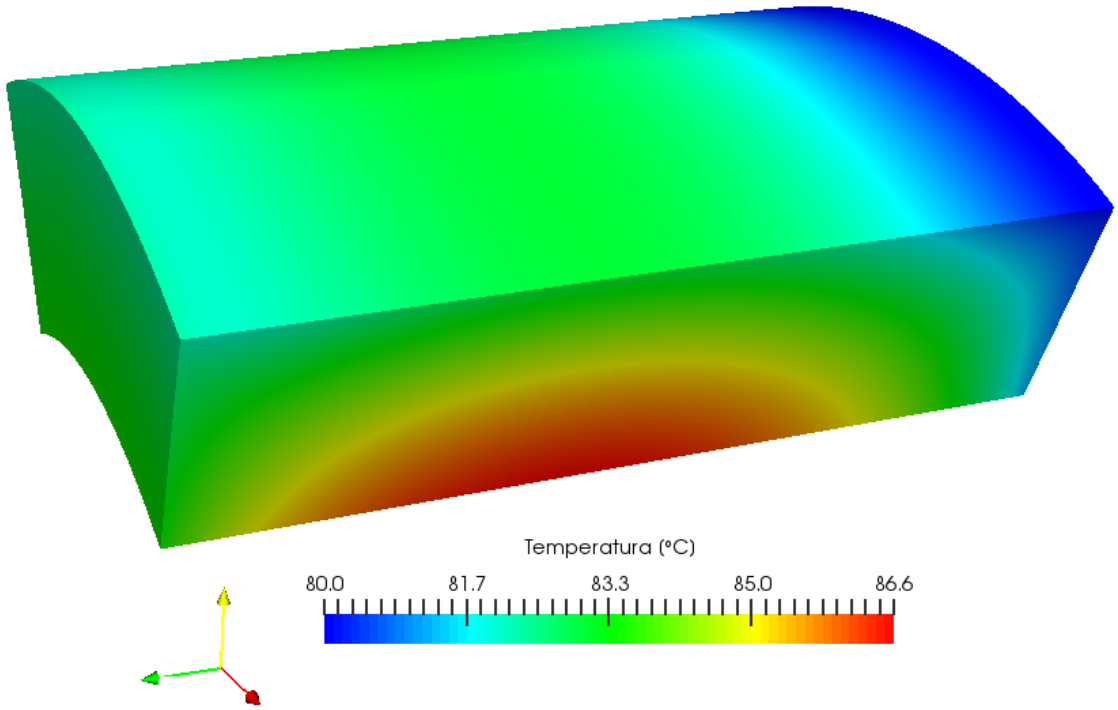
Slika 50. Raspodjela temperature po poprečnom presjeku statora

Uspoređujući ove podatke s podacima sa slika 28 i 29, primjećuje se da je raspodjela ista, ali se sveukupna temperatura snizila za oko 1°C.

Raspodjela temperature po bakrenom i po željeznom dijelu statora prikazane su na sljedećim slikama.



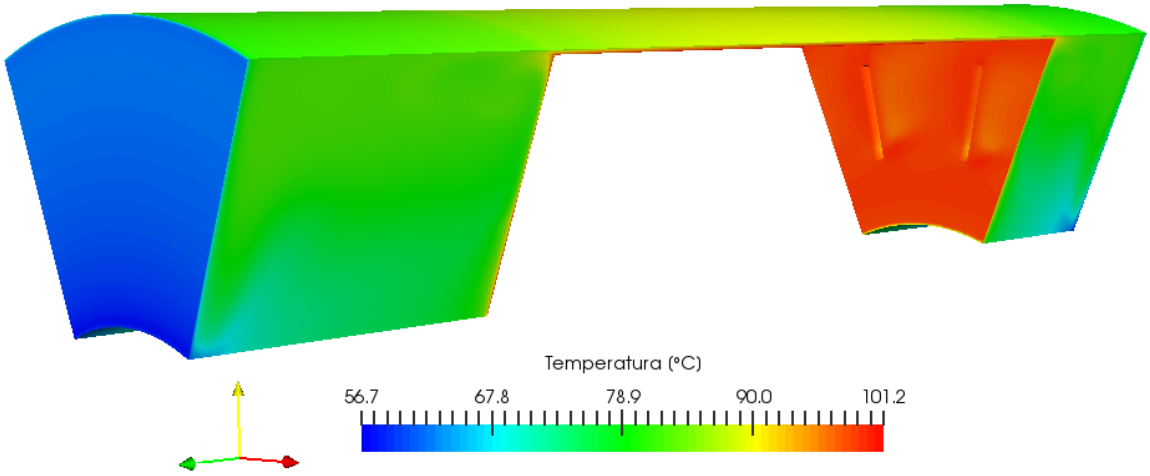
Slika 51. Raspodjela temperature u bakrenom dijelu statora



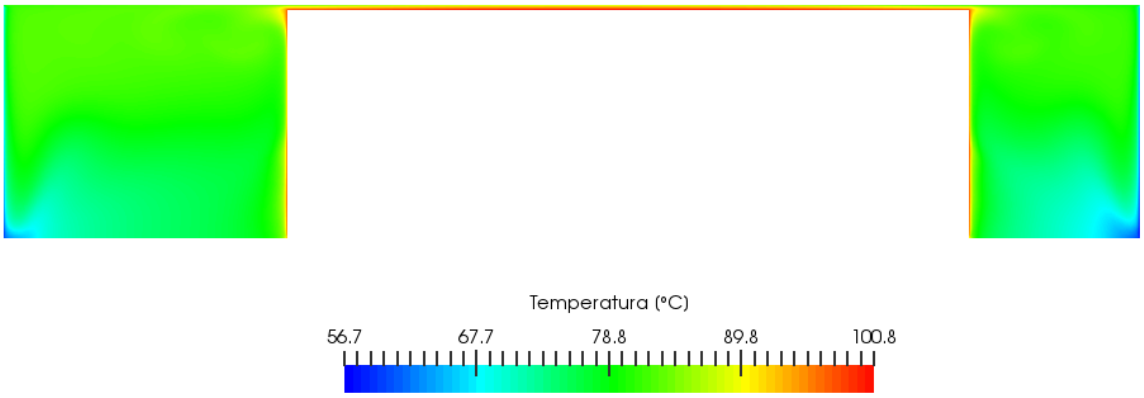
Slika 52. Raspodjela temperature u željeznom dijelu statora

Kako je prije spomenuto, temperature i bakrenog i željeznog dijela statora smanjene su za oko 1 °C.

Na sljedećim slikama prikazana je raspodjela temperature u zraku unutar elektromotora.



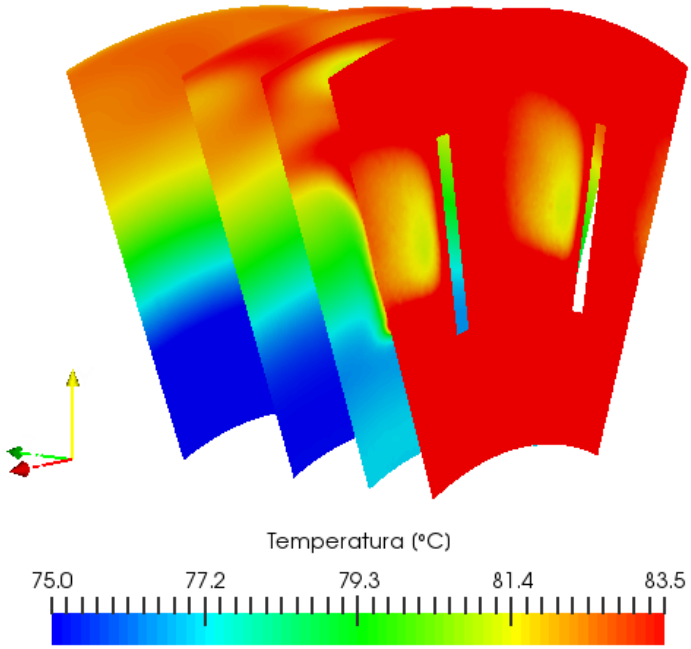
Slika 53. Raspodjela temperature u zraku unutar elektromotora



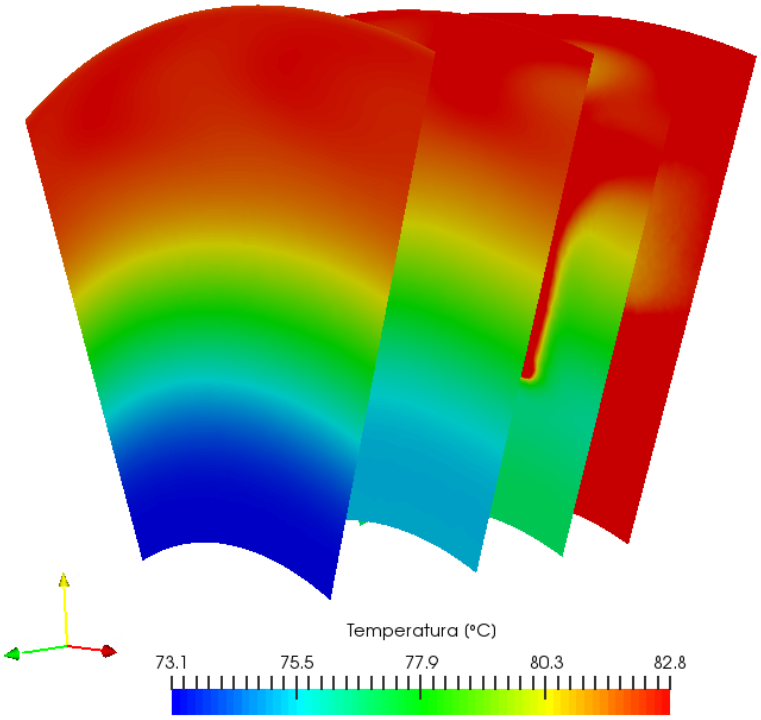
Slika 54. Raspodjela temperature po poprečnom presjeku zraka

Uspoređujući ove podatke s podacima sa slika 32 i 33, može se primijetiti da se i temperatura zraka u unutrašnjosti malo smanjila, a to se može objasniti većim vrtloženjem zraka u unutrašnjosti elektromotora.

Na sljedećim slikama nalazi se temperaturna raspodjela zraka po poprečnim presjecima na prednjoj i stražnjoj strani.

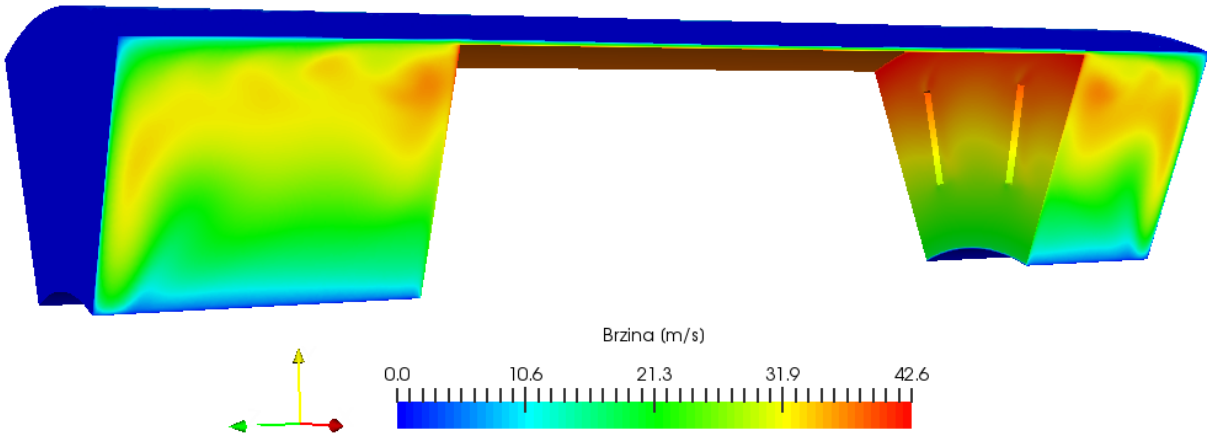


Slika 55. Raspodjela temperature po poprečnim presjecima zraka na prednjoj strani

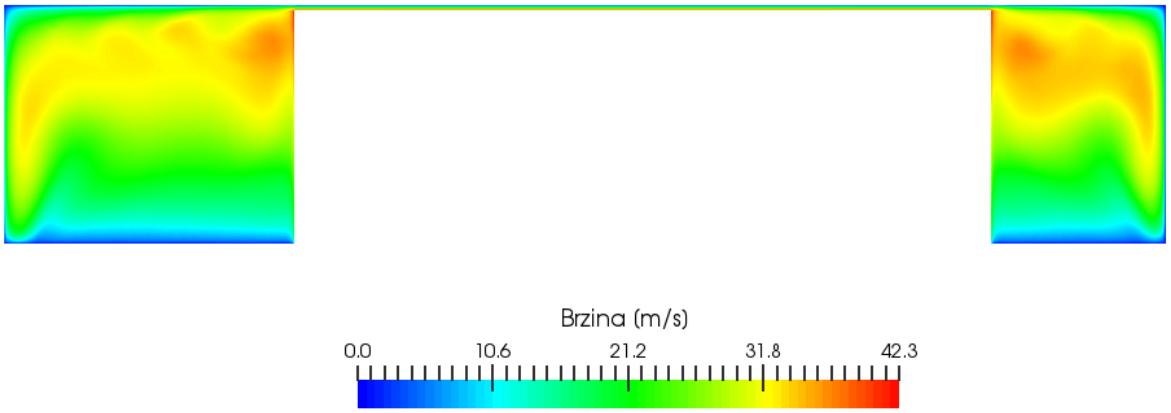


Slika 56. Raspodjela temperature po poprečnim presjecima zraka na stražnjoj strani

Na sljedećim slikama nalaze se prikazi raspodjele brzine u zraku u unutrašnjosti elektromotora.



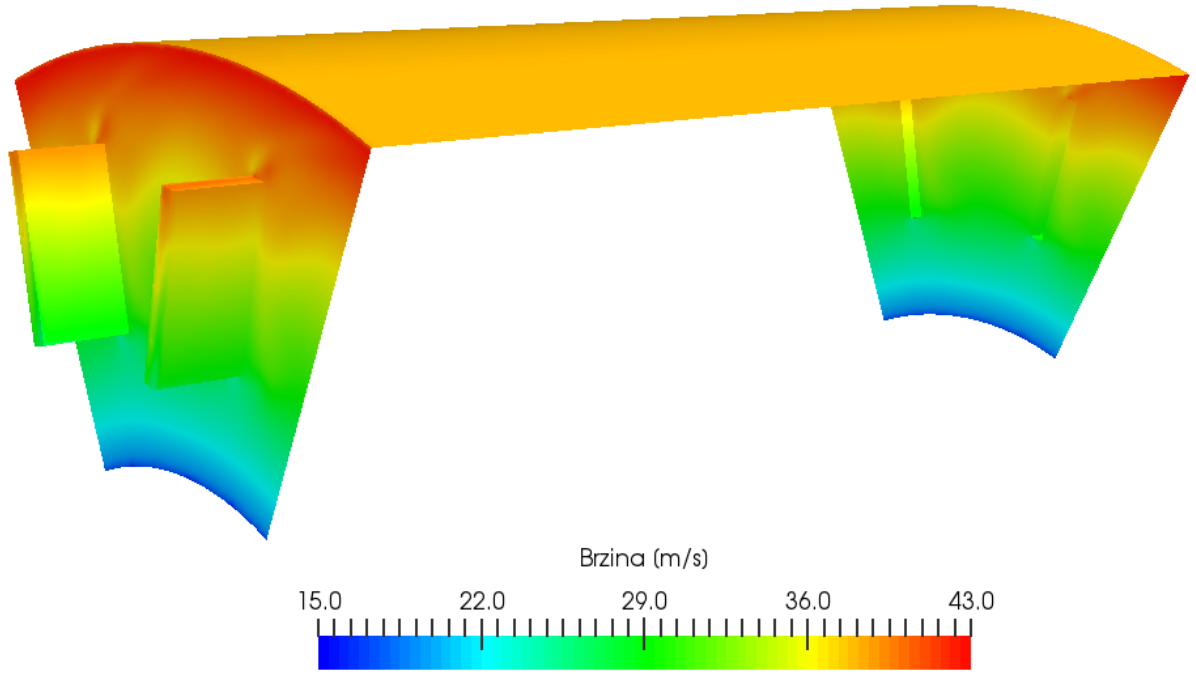
Slika 57. Raspodjela brzine u zraku



Slika 58. Raspodjela brzine po poprečnom presjeku zraka

U usporedbi sa slikama 36 i 37, primjećuje se jače vrtloženje zraka unutar elektromotora s dodatkom lopatica na rotoru.

Na slici 59 prikazana je raspodjela brzine na površini dodira zraka i rotora.



Slika 59. Raspodjela brzine na površini dodira zraka i rotora

Na slici se primjećuje da je najveća brzina na gornjim bočnim dijelovima površine dodira zraka s aluminijskim dijelom rotora. Takva raspodjela se može objasniti dodatnim vrtloženjem zraka unutar elektromotora zbog dodatka lopatica na krajevima rotora. Također se primjećuje da dodatno vrtloženje na utječe na strujanje zraka unutar malog razmaka između rotora i statora.

U tablici 18 nalazi se prikaz usporedbe maksimalnih temperatura određenih regija dobivene simulacijama računalne dinamike fluida i njihova međusobna razlika.

Tablica 18. Usporedba rezultata

	Maksimalna temperatura [°C]		Razlika temperatura [°C]
Regija	**Elektromotor bez rotorskih lopatica**	**Elektromotor s rotorskim lopaticama**	
air	380,4	376,1	4,3
magnets	381,1	376,7	4,4
rotorAl	379,0	374,2	4,8
rotorFe	380,7	376,3	4,4
rotorFeMag	381,0	374,6	6,4
statorCu	357,5	356,5	1
statorFe	360,9	359,8	1,1

Primjećuje se da je pad maksimalnih temperatura rotorskih regija između 4,4 °C i 6,4 °C, zraka 4,3 °C, a statorskih regija 1 °C. Najveći pad je na željezu rotora oko magneta. Ono je u direktnom dodiru sa magnetima i prima najviše topline od njih, a također ima i veću dodirnu površinu s aluminijskim dijelom rotora od samih magneta.

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu uspoređeno je hlađenje rotora elektromotora s lopaticama i bez lopatica. Lopatice su modelirane kao pravokutnici i proizvoljno ih je uzeto 16 na svakoj strani rotora. Zatim je napravljena prostorna diskretizacija modela, te su na kraju provedene i simulacije računalne dinamike fluide.

Rezultati dobiveni računalnom dinamikom fluida za hlađenje elektromotora s glatkim rotorom uspoređeni su s dostupnim podacima za stvarni elektromotor. Oni se u potpunosti ne poklapaju zbog vrlo pojednostavljene geometrije elektromotora i uvedenih pojednostavljenja korištenih u ovom radu.

Također, međusobno su uspoređeni podaci glatkog rotora i rotora s lopaticama, te je zaključeno da postavljanjem lopatica na rotor elektromotora dolazi do sniženja temperature cijelog rotora i statora elektromotora. Primijećen je pad sveukupne temperature od oko 5 °C na cijelom rotoru, te pad od 1 °C na statoru.

Uvođenjem lopatica dolazi i do povećanja ventilacijskih gubitaka. U promatranom slučaju za smanjenje temperature od oko 5°C dobiva se dodatnih 15 W ventilacijskih gubitaka. Iznos ventilacijskih gubitaka naspram elektromagnetskih je puno manji. U ovom slučaju, ventilacijski gubici elektromotora s rotorskim lopaticama iznose 53 W, dok elektromagnetski iznose približno 3000 W. Također, iznos ventilacijskih gubitaka je mali naspram ukupne snage promatranog elektromotora koja iznosi 80 kW.

U ovom radu nije provjereno, ali pretpostavka je da se povećanjem broja lopatica, te promjenom geometrije na aerodinamički prihvatljiviju još mogu dodatno smanjiti ventilacijski gubici, te povećati pad sveukupne temperature elektromotora.

LITERATURA

[1] Rahman, K.M., Ehsani, M.: *Performance Analysis of Electric Motor Technologies for an Electric Vehicle Powertrain*, Dearborn, USA, 1996.

[2] Filipenko M.: *HTS-Technology for hybrid electric aircraft*, PDF presentacija, Siemens AG 2017.

[3] Siemens eAircraft: *Disrupting the way you will fly!*, PDF prezentacija, Siemens AG 2018.

[4] https://www1.grc.nasa.gov/aeronautics/electrified-aircraft-propulsion-eap/, pristupljeno: 27.11.2019.

[5] https://www.airliners.net/photo/Siemens/Magnus-eFusion/4357795/L, pristupljeno: 28.11.2019.

[6] Goss, J., Popescu, M., Staton, D.: *A Comparison of an Interior Permanent Magnet and Copper Rotor Induction Motor in Hybrid Electric Vehicle Application*, Conference Paper, 2013.

[7] https://hr.wikipedia.org/wiki/Indukcijski_motor, pristupljeno: 28.11.2019.

[8] https://www.electricalfunctions.com/single-post/2019/02/04/Induction-motor, pristupljeno: 28.11.2019.

[9] https://www.controleng.com/articles/understanding-permanent-magnet-motors/, pristupljeno: 28.11.2019.

[10] Dutta, R., Ahsanllah, K., Rahman, F.: *Cogging Torque and Torque Ripple in a Direct Drive Interior Permanent Magnet Generator*, Conference Paper, 2016.

[11] Bouzek, L., Pechanek, R.: *Analyzing of Two Types Water Cooling Electric Motors Using Computational Fluid Dynamics*, Conference Paper, 2012.

[12] Goss, J.: *Performance Analysis of Electric Motor Technologies for an Electric Vehicle Powertrain*, White Paper, Wrexham UK

[13] Virag, Z.: *Računalna dinamika fluida*, Predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2014.

[14] Yau, L.C.: *Conjugate Heat Transfer with the Multiphysics Coupling Library preCICE*, Tehničko sveučilište u München, München 2016.

[15] https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-turbulence-ras-k-omega-sst.html, prustiljeno: 30.12.2019.

[16] Cvijetić, G.: *Steady State Methods for Turbomachinery*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.

[17] Horvat, M.: *A Study of Rotor-Stator Interaction Models for Numerical Perfomance Prediction of Centrifugal Pupms*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.

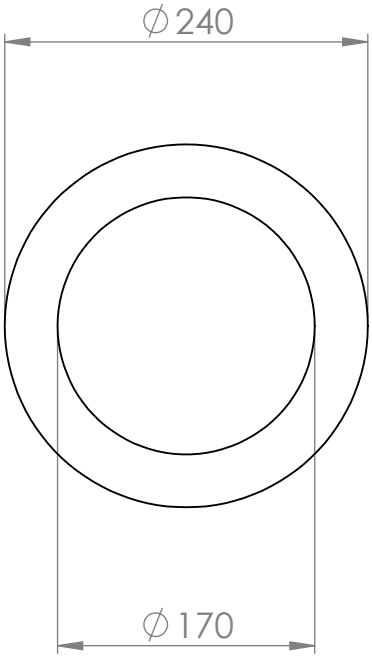
[18] Vrancik, J.E.: *Prediction of windage power loss in alternators*, Lewis Research Center, Cleveland, Ohio, 1968.

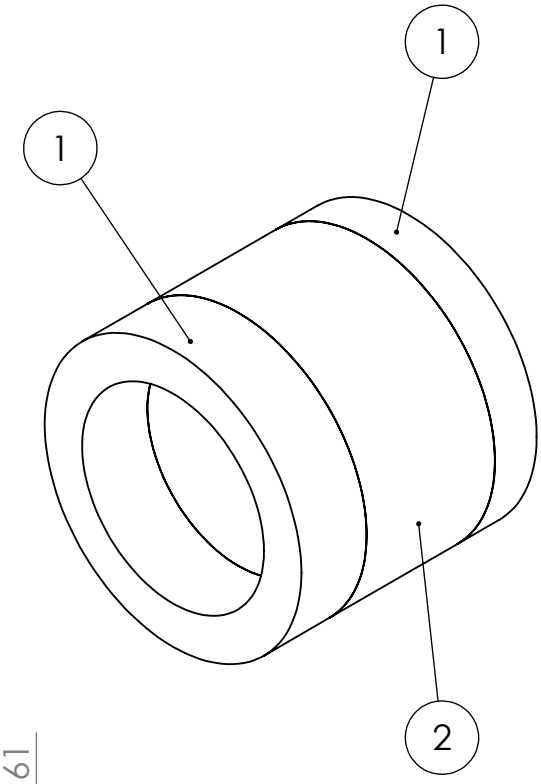
[19] Van Der Tempel, M.: *A chtMultiRegionSimpleFoam tutorial,* Chalmers University of Technology, 2012.

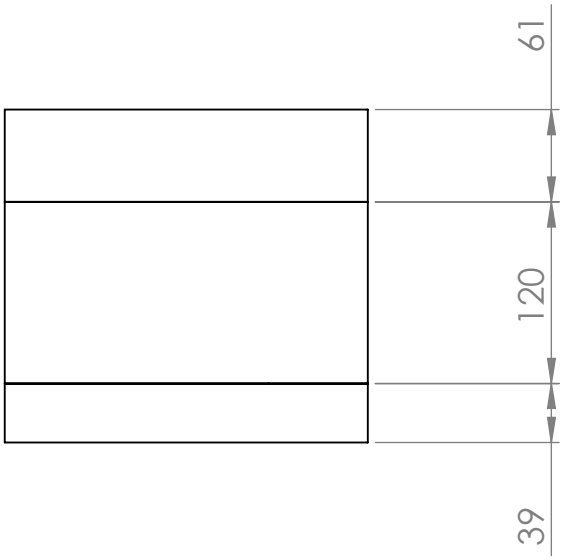
[20] *OpenFOAM Tutorial One Basic Case SetUp,* 4th edition, 2018.

[21] https://www.engineeringtoolbox.com/, pristupljeno: 15.11.2019.

[22] https://cfd.direct/openfoam/user-guide/v6-fvsolution/, pristupljeno: 13.12.2019.



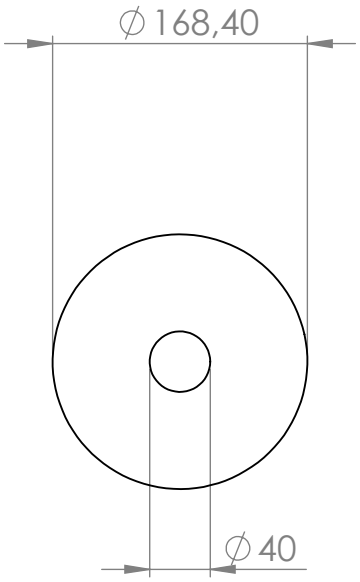


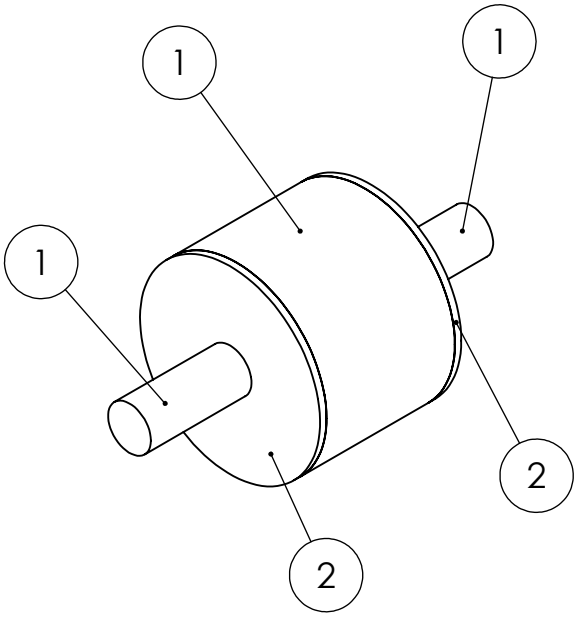


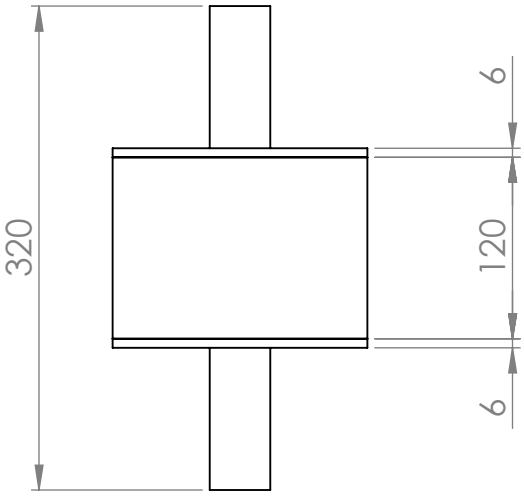
1 Bakar

2 Željezo

MATERIJAL: Bakar i željezo	
NASLOV: Stator	
CRTEŽ BROJ: 1	A4
MJERILO:1:5	STRANICA 1 OD 4

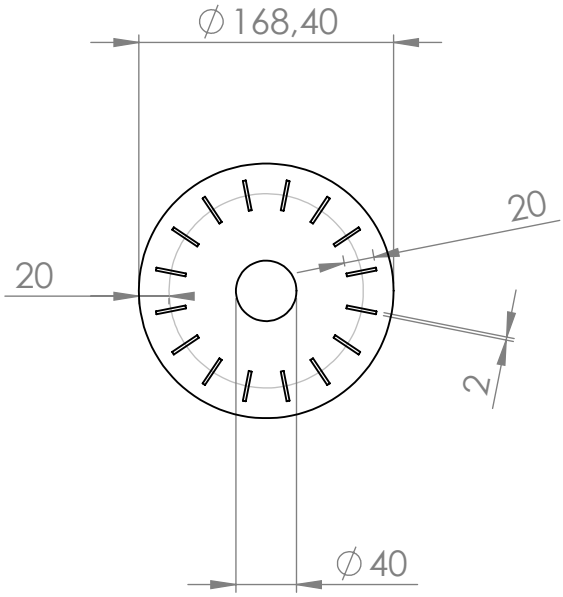


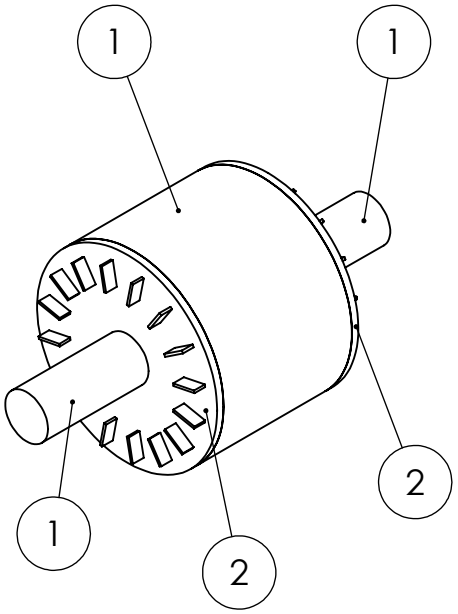


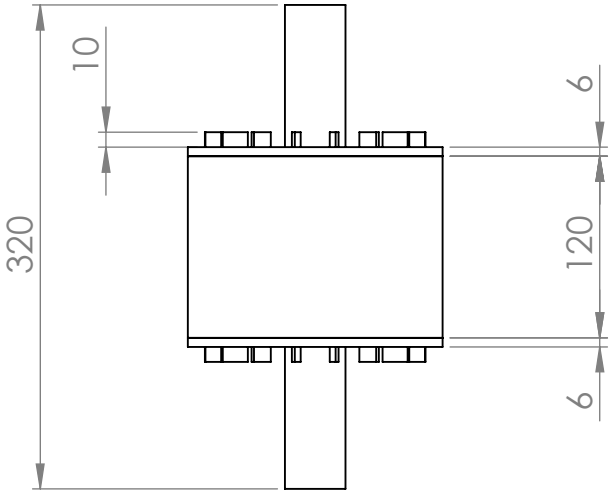


1	Željezo
2	Aluminij

MATERIJAL:	Željezo i aluminij
NASLOV:	Glatki rotor
CRTEŽ BROJ:	2
A4	
MJERILO:1:5	STRANICA 2 OD 4



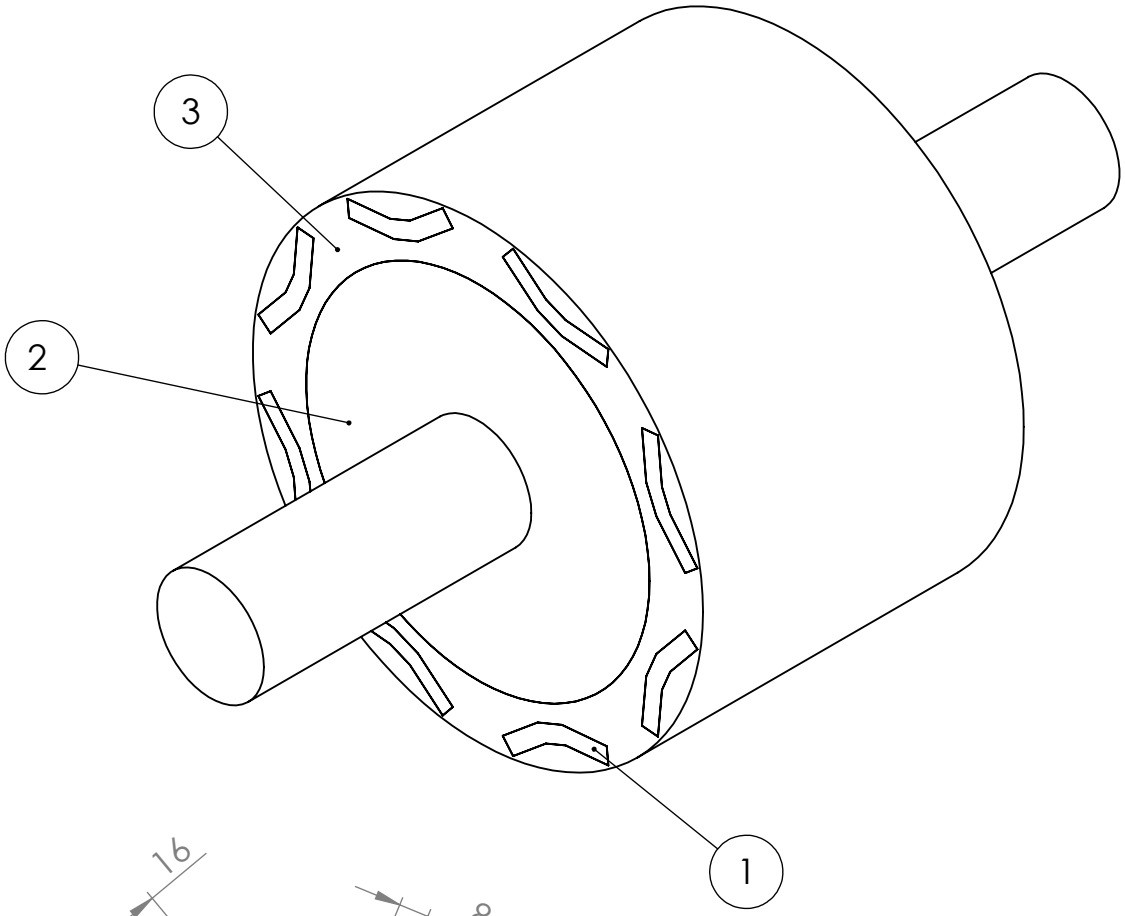


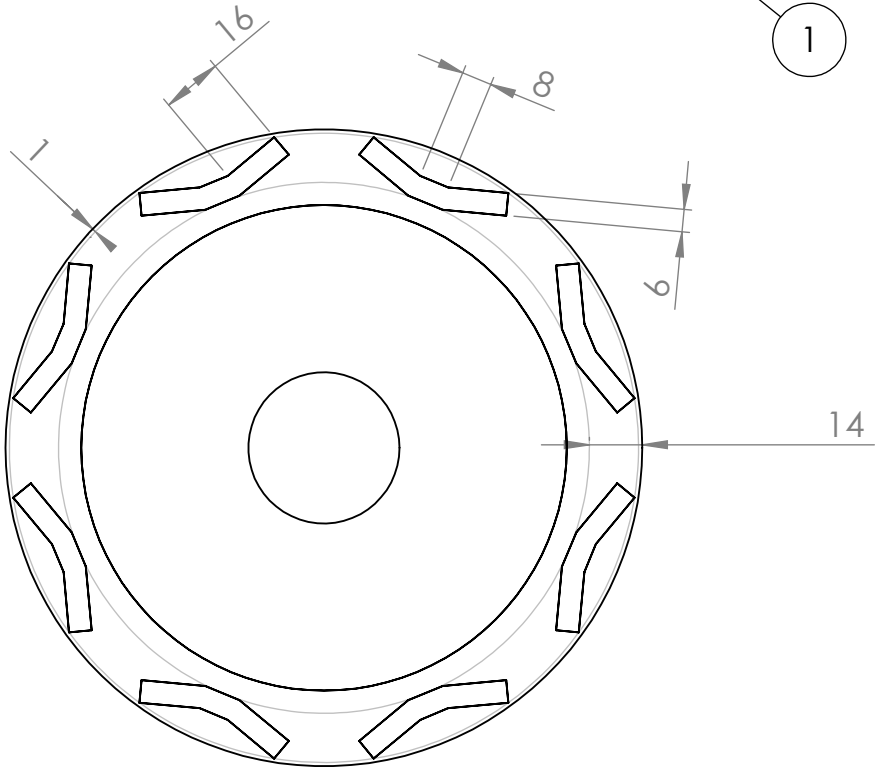


1 Željezo

2 Aluminij

MATERIJAL:	Željezo i aluminij
NASLOV:	Rotor s lopaticama
CRTEŽ BROJ: 3	A4
MJERILO:1:5	STRANICA 3 OD 4





1	magneti
2	rotorFe
3	rotorFeMag

MATERIJAL:	Željezo
NASLOV:	Magneti u rotoru
CRTEŽ BROJ:	4
	A4
MJERILO: 1:2	STRANICA 4 OD 4