

Univerza v Ljubljani

Fakulteta za elektrotehniko

Simon Čemažar

**Izračun elektromagnetnih  
vibracij sesalne enote z metodo  
končnih elementov**

Magistrsko delo

Mentor: dr. Damijan Miljavec, univ. dipl. ing

Ljubljana, 2018



## Zahvala

*Najprej bi se zahvalil mentorju dr. Damijanu Miljavcu, za vse strokovne nasvete, komentarje in usmeritve, ki so uspešno pripeljale do zaključka pričujočega magistrskega dela.*

*Zahvaljujem se podjetju Domel d.o.o., ki mi je omogočilo izdelavo magistrskega dela. Zahvala gre tudi dr. Borisu Benedičiču za trud pri izbiri teme magistrskega dela. Iskrena hvala dr. Mateju Tadini, za vse nasvete s področja strukturne analize in za vse opravljene meritve.*

*Nenazadnje pa bi se rad zahvalil ženi Patriciji, ki me je podpirala med nastajanjem tega magistrskega dela.*

# Vsebina

|          |                                                                    |           |
|----------|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Uvod</b>                                                        | <b>3</b>  |
| 1.1      | Predstavitev naloge . . . . .                                      | 4         |
| 1.2      | Proces modeliranja elektromagnetnih vibracij . . . . .             | 5         |
| <b>2</b> | <b>Splošno o hrupu električnih strojev</b>                         | <b>7</b>  |
| 2.1      | Proces generiranja vibracij in hrupa električnih strojev . . . . . | 7         |
| 2.2      | Elementarni viri hrupa električnih strojev . . . . .               | 9         |
| 2.2.1    | Aerodinamični hrup . . . . .                                       | 9         |
| 2.2.2    | Mehanski hrup . . . . .                                            | 9         |
| 2.2.3    | Magnetni hrup . . . . .                                            | 10        |
| <b>3</b> | <b>Magnetne sile v sinhronskem stroju s trajnimi magneti</b>       | <b>12</b> |
| 3.1      | Delovanje sinhronskega stroja s trajnimi magneti . . . . .         | 12        |
| 3.2      | Konstrukcija sinhronskega stroja s trajnimi magneti . . . . .      | 12        |
| 3.2.1    | Konstrukcija statorja . . . . .                                    | 13        |
| 3.2.2    | Konstrukcija rotorja . . . . .                                     | 14        |
| 3.3      | Generiranje magnetnih sil . . . . .                                | 15        |
| <b>4</b> | <b>Elektromagnetna analiza</b>                                     | <b>18</b> |

---

|          |                                                                               |           |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.1      | Priprava 3D modela . . . . .                                                  | 19        |
| 4.2      | Rezultati simulacije . . . . .                                                | 21        |
| 4.3      | Verifikacija 3D modela . . . . .                                              | 25        |
| 4.3.1    | Meritev samodržnega momenta . . . . .                                         | 26        |
| <b>5</b> | <b>Strukturna analiza</b>                                                     | <b>29</b> |
| 5.1      | Modalna analiza . . . . .                                                     | 30        |
| 5.1.1    | Hrupen stator . . . . .                                                       | 32        |
| 5.1.2    | Tišji stator . . . . .                                                        | 34        |
| 5.1.3    | Ohišje in okrov . . . . .                                                     | 36        |
| 5.1.4    | Sestav . . . . .                                                              | 37        |
| 5.2      | Modalno testiranje . . . . .                                                  | 39        |
| 5.2.1    | Način merjenja . . . . .                                                      | 39        |
| 5.2.2    | Vpetje merjenja . . . . .                                                     | 40        |
| 5.2.3    | Vzbujanje merjenja . . . . .                                                  | 41        |
| 5.2.4    | Validacija strukturnega modela z eksperimentalno modalno<br>analizo . . . . . | 42        |
| 5.3      | Vibracijska analiza . . . . .                                                 | 46        |
| <b>6</b> | <b>Zaključek</b>                                                              | <b>52</b> |
| <b>A</b> | <b>Lastne frekvence</b>                                                       | <b>57</b> |

## Seznam slik

|     |                                                                                                    |    |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1 | Proces modeliranja elektromagnetnega hrupa. . . . .                                                | 6  |
| 2.1 | Shema nastajanja hrupa in vibracij v električnem stroju [4]. . . .                                 | 8  |
| 3.1 | Različne konstrukcijske oblike sinhronskih strojev s trajnimi magneti [6]. . . . .                 | 13 |
| 3.2 | Različne konfiguracije statorjev sinhronskih strojev [6]. . . . .                                  | 14 |
| 3.3 | Različne konfiguracije rotorjev sinhronskih strojev [7]. . . . .                                   | 14 |
| 3.4 | Radialna in tangencialna komponenta magnetnih sil. . . . .                                         | 16 |
| 3.5 | Porazdelitev radialne in tangencialne komponente gostote magnetnega pretoka v zračni reži. . . . . | 17 |
| 3.6 | Porazdelitev radialne komponente tlaka vzdolž zračne reže. . . . .                                 | 17 |
| 4.1 | CAD model (prerez) pred uvozom v JMAG - Designer. . . . .                                          | 19 |
| 4.2 | Podroben pogled na mrežo končnih elementov v območju zračne reže - presek 3D modela. . . . .       | 20 |
| 4.3 | Magnetne sile na statorju in rotorju. . . . .                                                      | 22 |
| 4.4 | Rezultirajoča radialna komponenta sile na polov čovelj. . . . .                                    | 23 |
| 4.5 | Rezultirajoča tangencialna komponenta sile na polov čovelj. . . . .                                | 23 |
| 4.6 | Harmonske komponente radialne sile v odvisnosti od toka. . . . .                                   | 24 |

---

|      |                                                                                                    |    |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.7  | Harmonske komponente tangencialne sile v odvisnosti od toka. . .                                   | 25 |
| 4.8  | Motorski del sesalne enote . . . . .                                                               | 26 |
| 4.9  | Blokovna shema merilnega mesta za merjenje samodržnega momenta.                                    | 27 |
| 4.10 | Primerjava potekov samodržnega momenta med meritvijo in<br>izračunom z MKE. . . . .                | 28 |
| 4.11 | Primerjava potekov medfazne inducirane napetosti pri 3000<br>obrt/min. . . . .                     | 28 |
| 5.1  | Podrobne dimenzije statorskih lamel [10]. . . . .                                                  | 31 |
| 5.2  | Presek strukturnega modela. . . . .                                                                | 31 |
| 5.3  | Prva in druga modalna oblika hrupnega statorskega paketa . . . .                                   | 34 |
| 5.4  | Lastne oblike in frekvence tišjega statorskega paketa . . . . .                                    | 35 |
| 5.5  | Tretja modalna oblika pri 652 Hz. . . . .                                                          | 38 |
| 5.6  | Četrta modalna oblika pri 754 Hz. . . . .                                                          | 38 |
| 5.7  | Šesta modalna oblika pri 1065 Hz. . . . .                                                          | 38 |
| 5.8  | Osma modalna oblika pri 1531 Hz. . . . .                                                           | 39 |
| 5.9  | Blokovna shema EMA . . . . .                                                                       | 40 |
| 5.10 | EMA statorskega paketa. . . . .                                                                    | 44 |
| 5.11 | EMA celotnega sestava. . . . .                                                                     | 44 |
| 5.12 | Frekvenčna prenosna funkcija tišjega statorskega paketa. . . . .                                   | 45 |
| 5.13 | Podrobnejši pogled na frekvenčno prenosno funkcijo. . . . .                                        | 46 |
| 5.14 | Barvni prikaz rezultatov izračuna vibracij pri resonančni frekvenci<br>statorskega paketa. . . . . | 47 |
| 5.15 | Pozicija senzorjev v 3D modelu in prototipu . . . . .                                              | 48 |

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.16 Izračun vibracij sesalne enote s hrupnim statorskim paketom v x-smeri. . . . .    | 49 |
| 5.17 Meritev vibracij na sesalni enoti s hrupnim statorskim paketom v x-smeri. . . . . | 49 |
| 5.18 Izračun vibracij sesalne enote s tišjim statorskim paketom v x-smeri. . . . .     | 50 |
| 5.19 Meritev vibracij na sesalni enoti s tišjim statorskim paketom v x-smeri. . . . .  | 51 |
|                                                                                        |    |
| A.1 Izhodiščna geometrija . . . . .                                                    | 57 |
| A.2 Sprememba št. 1 . . . . .                                                          | 57 |
| A.3 Sprememba št. 2 . . . . .                                                          | 58 |
| A.4 Sprememba št. 3 . . . . .                                                          | 58 |
| A.5 Sprememba št. 4 . . . . .                                                          | 58 |
| A.6 Sprememba št. 5 . . . . .                                                          | 59 |
| A.7 Sprememba št. 6 . . . . .                                                          | 59 |
| A.8 Sprememba št. 7 . . . . .                                                          | 59 |
| A.9 Sprememba št. 8 . . . . .                                                          | 59 |

## Seznam tabel

|     |                                                                                      |    |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1   | Veličine in simboli . . . . .                                                        | xi |
| 4.1 | Nastavitve izračuna 3D modela. . . . .                                               | 21 |
| 5.1 | Mehanske lastnosti uporabljenih materialov . . . . .                                 | 33 |
| 5.2 | Rezultati izračunov ter meritev statorskega paketa z navitjem. . .                   | 34 |
| 5.3 | Mehanske lastnosti uporabljenih materialov . . . . .                                 | 35 |
| 5.4 | Rezultati izračunov MKE ter meritev EMA tišjega statorskega paketa. . . . .          | 35 |
| 5.5 | Tabelarična primerjava vpliva ohišja na lastne frekvence statorskega paketa. . . . . | 36 |
| 5.6 | Tabelarična primerjava modalnih oblik in lastnih frekvenc . . . .                    | 37 |

## Seznam uporabljenih simbolov

V pričujočem zaključnem delu so uporabljene naslednje veličine in simboli:

| Veličina / oznaka                                  |            | Enota             |
|----------------------------------------------------|------------|-------------------|
| Ime                                                | Simbol     | Simbol            |
| Sila                                               | $F$        | N                 |
| Magnetna koenergija                                | $W_k$      | W                 |
| Magnetna energija                                  | $W_{mag}$  | W                 |
| Tok                                                | $i$        | A                 |
| Magnetni pretok                                    | $\phi$     | Wb                |
| Tlak v radialni smeri                              | $p_{rad}$  | N/m <sup>2</sup>  |
| Tlak v tangencialni smeri                          | $p_{tan}$  | N/m <sup>2</sup>  |
| Gostota magnetnega pretoka                         | $B$        | T                 |
| Permeabilnost praznega prostora                    | $\mu_0$    | Vs/Am             |
| Radialna komponenta gostote magnetnega pretoka     | $B_{rad}$  | T                 |
| Tangencialna komponenta gostote magnetnega pretoka | $B_{tan}$  | T                 |
| Površina                                           | $S$        | m <sup>2</sup>    |
| Samodržni moment                                   | $M_{cogg}$ | Nm                |
| Inducirana napetost                                | $U_{ind}$  | V                 |
| Čas                                                | $t$        | s                 |
| Faktor dušenja                                     | $\zeta$    | -                 |
| Lastna frekvenca                                   | $f_m$      | Hz                |
| Modul elastičnosti                                 | $E$        | Pa                |
| Gostota                                            | $\rho$     | kg/m <sup>3</sup> |
| Poissonovo število                                 | $\nu$      | -                 |
| Frekvenca                                          | $f_1$      | Hz                |
| Frekvenca                                          | $f_2$      | Hz                |
| Resonančna frekvenca                               | $f_{res}$  | Hz                |

Tabela 1: Veličine in simboli

## Povzetek

V magistrskem delu je opisan proces modeliranja elektromagnetnih vibracij elektronsko komutirane sesalne enote z metodo končnih elementov. V začetnem poglavju so opisani različni viri in mehanizmi nastanka vibracij in hrupa pri električnih strojih. V nadaljevanju je na splošno opisano delovanje sinhronskih motorjev s trajnimi magneti, ter proces generiranja elektromagnetnih sil. Glavni del naloge predstavlja opis izgradnje sklopljenega numeričnega modela, ki je sestavljen iz 3D elektromagnetnega modela ter 3D strukturnega modela. Posamezen model je bil verificiran na podlagi meritev vzorca elektronsko komutirane sesalne enote. Verificiran sklopljen model je bil uporabljen na rešitvi s katero je bil v praksi odpravljen hrup elektronsko komutirane sesalne enote.

**Ključne besede:** elektronsko komutirana sesalna enota, EC sesalna enota elektromagnetne vibracije, metoda končnih elementov

# Abstract

The thesis describes the process of modeling electromagnetic vibrations of an electronically commutated vacuum motor using a finite element method. The initial chapter describes the various sources and mechanisms for creating vibrations and noise in electrical machines. The following chapter describes the operation of synchronous permanent magnet motors and also the process of generating electromagnetic forces. The main part of this thesis is the description of the construction of a coupled numerical model consisting of a 3D electromagnetic model and a 3D structural model. Each model was verified on the basis of the measurements of an electronically commutated vacuum motor sample. The verified coupled model was used on a solution that in practice eliminated the noise of an electronically commutated vacuum motor.

**Key words:** electronically commutated vacuum motor, EC vacuum motor, electromagnetic vibration, finite element method

# 1 Uvod

Sinhronski motorji s trajnimi magneti (SMTM) zadnja leta vse bolj prodirajo v aplikacije, kjer je zahtevan visok izkoristek, dolga življenska doba, kompaktna oblika, ter zanesljivo in tiho delovanje. Trend se kaže tudi na področju sesalnih enot, kjer SMTM, zaradi vse strožje zakonodaje na področju učinkovite rabe električne energije, zahtev po daljši življenski dobi ter zahtev po tišjem delovanju vse pogostejše nadomeščajo klasične univerzalne kolektorske motorje.

Omejevanje hrupa v aplikacijah kot so npr. gospodinjski aparati je nujno, predvsem z vidika ugodnega in zdravega bivalnega okolja. Z namenom zmanjševanja hrupa so bili sprejeti tudi predpisi in standardi, ki urejajo to področje [1]. Konstruiranje tišjih motorjev predstavlja tudi konkurenčo prednost končnega izdelka na trgu, saj je vse več kupcev in končnih uporabnikov pozornih na podatek o ravni zvočne moči, ki se nahaja tudi na energijski nalepki.

Zaradi zahtev po vedno večjem razmerju moč/teža postaja hrup v SMTM vse bolj problematičen, kljub temu da so ti električni stroji v primerjavi z univerzalnimi kolektorskimi motorji že v osnovi tišji. Povečanje razmerja moč/teža je posledica uporabe magnetov iz redkih zemelj, ki omogočajo visoke gostote magnetnega pretoka v zračni reži električnega stroja. Posledično nastanejo velike radialne sile, ki vodijo v povečanje vibracij in hrupa [2].

Napovedovanje vibracij in hrupa v električnih strojih je lahko ključnega pomena za hiter in ekonomsko učinkovit razvoj novega izdelka. Pri tem so nam kot orodje v pomoč numerične simulacije, ki omogočajo simulacije večfizikalnih problemov kot so npr. vibracije in hrup. Kljub pomoči računalniške tehnologije pa

je napovedovanje vibracij in hrupa precej težavno in manj natančno v primerjavi z določanjem klasičnih karakterističnih veličin električnih strojev. To je posledica pretvorbe neznatnega deleža električne energije v akustično, ter problema pravilne ocene nekaterih mehanskih in akustičnih parametrov.

## 1.1 Predstavitev naloge

Naloga temelji na realnem problemu hrupa, ki je nastal med razvojem nove sesalne enote s SMTM v podjetju Domel. Tekom razvoja je bil hrup motorja sesalne enote uspešno odpravljen na podlagi meritev vibracij, hrupa ter lastnih frekvenc statorskega paketa. Ugotovljeno je bilo, da so vir hrupa motorja sesalne enote elektromagnetne sile, katerih frekvenca se ujema z eno izmed lastnih frekvenc statorskega paketa. Hrup je bil odpravljen s spremembo geometrije statorske lamele in posledično dvigom lastnih frekvenc statorja.

V splošnem delimo hrup električnih strojev glede na način njegovega nastanka; magnetni, mehanski in aerodinamični. Magnetni in mehanski hrup spadata v tako imenovani strukturni hrup, ki je posledica strukturnih vibracij. Aerodinamični hrup pa nastane kot posledica delovanja aerodinamičnih sil, katere povzročijo nihanje zračnega tlaka. Hrup povzročen zaradi učinka magnetostrikcije prav tako spada med magnetne vire hrupa, vendar ga v našem primeru ne smatramo kot glavnega povzročitelja elektromagnetnega hrupa, saj hrup povzročen zaradi magnetostrikcije običajno ni prevladujoč v električnih strojih [2].

Cilj zaključnega dela je zgraditi simulacijski model motorja sesalne enote, s katerim želimo preveriti strukturni odziv kot posledico vzbujevalnih elektromagnetnih sil, ki delujejo na statorski paket. Model je potrebno verificirati na podlagi meritev prototipa hrupnega motorja. Verificiran model v nadaljevanju uporabimo kot osnovo za predlagano rešitev problema hrupa. Na ta način se v simulacijskem okolju preveri rešitev, ki je bila za zmanjševanje hrupa uporabljena v praksi.

## 1.2 Proces modeliranja elektromagnetnih vibracij

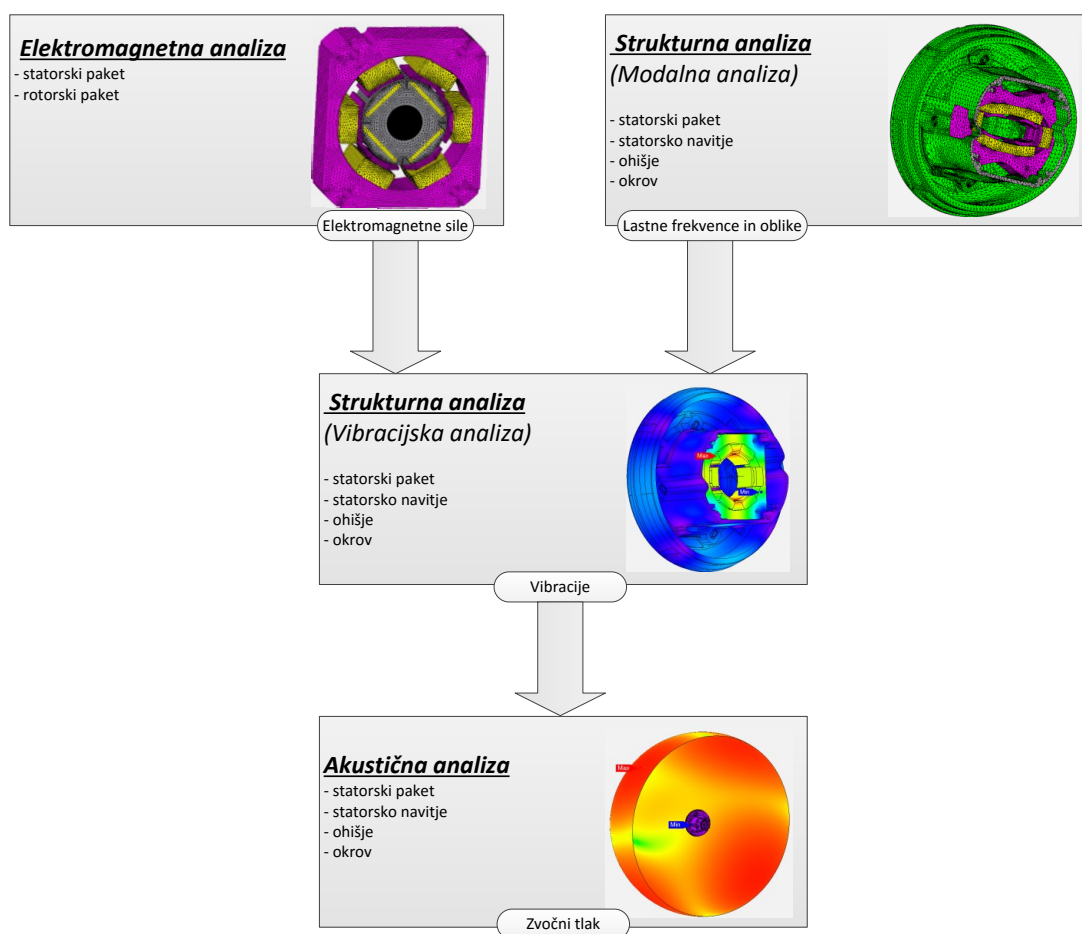
V zaključnem delu je za simulacije vibracij uporabljeno programsko orodje JMAG - Designer, Japonske korporacije JSOL. Omenjeno programsko orodje omogoča simulacije elektromagnetnih naprav z metodo končnih elementov (MKE). Poleg simulacije magnetnega in električnega polja, JMAG - Designer omogoča tudi simulacijo večfizikalnih problemov, kot je npr. vibroakustična analiza električnega stroja.

Prvi korak v procesu modeliranja elektromagnetnega hrupa je izgradnja dvodimenzionalnega (2D) ali tridimenzionalnega (3D) modela električnega stroja. Izbiro nam določa predvsem sama geometrija električnega stroja saj nekatere 3D geometrijske lastnosti ni mogoče opisati z 2D modelom. Prav tako 2D model ni primeren za opis kratkih električnih strojev saj robnih efektov ne moremo zanemariti. S pomočjo elektromagnetne analize z MKE, izračunamo porazdelitev gostote magnetnega pretoka v zračni reži, ki je podlaga za izračun magnetnih sil s pomočjo Maxwellovega napetostnega tenzorja. Dobljena porazdelitev in velikost magnetnih sil v električnem stroju v nadaljevanju služi kot vzbujanje strukturnega modela pri analizi strukturnega odziva (vibracijska analiza).

Drugi korak v procesu je izgradnja 3D strukturnega modela. Strukturni model je zgrajen korakoma, ter na koncu združen v celoto. Strukturna analiza z MKE nam kot rešitev poda lastne frekvence ter lastne oblike posameznih sklopov električnega stroja. Posebna pozornost je namenjena verifikaciji strukturnega modela, saj je realen strukturni model ključen za uspešno modeliranje elektromagnetnega hrupa. Zgrajen strukturni model se primerja z rezultati eksperimentalno modalne analize (EMA), in se ga v primeru večjih odstopanj ustrezno korigira.

V zadnjem koraku strukturnemu modelu dodamo vzbujanje. Vzbujanje je opisano s harmonskimi komponentami magnetnih sil, katere smo izračunali v prvem koraku s pomočjo elektromagnetnega modela. Tako pripravljen model nam služi za izračun strukturnega odziva oz. vibracijsko analizo.

Nadaljni možni korak je analiza zvočnega polja kot posledica strukturnega odziva. Zvočna analiza je izračunana z metodo robnih elementov (MRE) in nam kot taka da rešitev v obliki zvočnega tlaka. Potek modeliranja elektromagnetnega hrupa je prikazan na sliki 1.1.



Slika 1.1: Proces modeliranja elektromagnetnega hrupa.

## 2 Splošno o hrupu električnih strojev

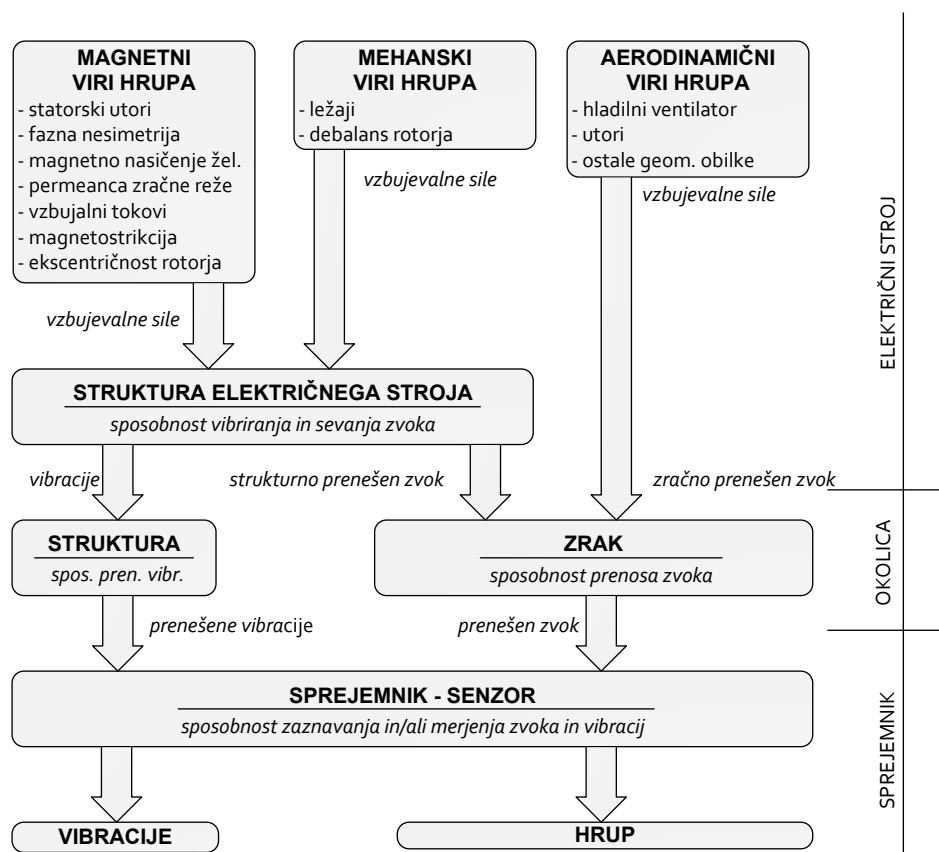
Hrup je ena izmed oblik zvoka, največkrat človeku nezaželena. Opredelitev hrupa je subjektivne narave, in je odvisna od poslušalca samega. Definicija je odvisna od njegovega trenutnega razpoloženja, starosti, spola, zdravstvenega stanja itd. in ni odvisna od frekvence ali jakosti [3].

### 2.1 Proces generiranja vibracij in hrupa električnih strojev

Na splošno lahko generiranje zvočnega valovanja (v nadaljevanju hrup) obravnavamo kot zaključen prenosni sistem, ki ga sestavljajo tri osnovne komponente: vir (emisija), pot širjenja (transmisija) in sprejemnik (imisija). Pod pojmom vir razumemo mehanizme za nastanek hrupa oz. vzroke za njegov nastanek. Člen v sistemu, ki zaznava hrup, je sprejemnik. To je lahko človeško uho ali pa merilni inštrument. Da pa se zvočno valovanje lahko prenese od vira do sprejemnika pa je potrebna pot širjenja ali medij, ki ima sposobnost prenašanja zvoka [3].

Na sliki 2.1 je podrobneje prikazan proces generiranja hrupa in vibracij v električnem stroju. Parametre, ki oblikujejo mehanizem generiranja hrupa, lahko razdelimo v dve skupini, na pasivne in aktivne. Pasivni parametri so časovno neodvisni in določajo odzivnost sistema. Aktivni parametri pa izkazujejo časovno spreminjajoč značaj, ki deluje na pasivne parametre. Na sliki 2.1 so pasivni parametri označeni v blokih pod črto, aktivni pa ob puščicah katere kažejo smer njihovega učinka [4].

Glavni vzrok za nastanek hrupa in vibracij električnega stroja so vzbujevalne sile. Vzbujevalne sile lahko vzbujajo strukturo električnega stroja, v tem primeru govorimo o strukturno prenešenem zvoku (ang. structure borne noise). V primeru, ko vzbujevalne sile vzbujajo direktno akustični medij - zrak pa govorimo o zračno prenešenem zvoku (ang. air borne noise). Glede na naravo nastanka vzbujevalnih sil, ki delujejo direktno na strukturo električnega stroja, delimo vzbujevalne sile na magnetne in mehanske. Vibracije, ki se kot posledica vzbujevalnih sil pojavijo na strukturi električnega stroja, so odvisne od sposobnosti vibriranja same strukture, vzbujevalnih sil in njihovih frekvenc [4].



Slika 2.1: Shema nastajanja hrupa in vibracij v električnem stroju [4].

Glavna funkcija električnega stroja je spreminjanje električne energije v mehansko (motor) ali obratno (generator). Del energije pri pretvorbi se porabi za izgube kot so ohmske, histerezne, vrtnične, mehanske itd. Mednje uvrščamo tudi neznamen del energije, ki se odraža v obliki vibracij in zvoka. Proces generiranja hrupa v električnem stroju je zelo odvisen od sposobnosti vibriranja in sevanja strukture električnega stroja. Večina vibracijske energije se na okolico prenese preko mehansko povezanih struktur stroja in okolice. Tako prenešene vibracije imenujemo strukturno prenešen zvok. Majhen del vibracijske energije, ki se ne spremeni v zvočno energijo in se ne prenese na okoliško strukturo, predstavlja potrebno energijo za premagovanje notranjih izgub (dušenja) strukture električnega stroja [4].

## 2.2 Elementarni viri hrupa električnih strojev

### 2.2.1 Aerodinamični hrup

Glavni vir aerodinamičnega hrupa je običajno hladilni ventilator. Tako nastali hrup imenujemo ventilatorski hrup. Poleg ventilatorskega hrupa je eden od virov aerodinamičnega hrupa tudi hrup povzročen zaradi vrtničenja zraka med rotorjem in statorjem, vendar je v primerjavi z ostalimi viri hrupa zanemarljiv. Za oba vira je značilen t.i. efekt sirene, ki nastane pri periodičnem vzbujujanju zvočnega tlaka. Do spremembe zvočnega tlaka pride zaradi interakcije zračnega toka med lopaticami ventilatorja ter stacionarnih ovir, rotorskih utorov ali zračnih tokov, ki se pretakajo po kanalih med rotorjem in statorjem [2],[4].

### 2.2.2 Mehanski hrup

Mehanski hrup je običajno povzročen zaradi vrtenja ali drugega gibanja mehanskih delov električnega stroja. Običajno je povezan z vrsto uležajenja, drsnimi kontakti ter statično in dinamično neuravnoteženostjo rotorja. Poznamo več vrst uležajenja (drsno, kotalno ali magnetno uležajenje), od katerih je ma-

gnetno uležajenje najprimernejša izbira z vidika hrupa in vibracij. Pogost vzrok mehanskega hrupa je neuravnoteženost rotorja, ki lahko izhaja iz neenakomerne porazdelitve materiala, asimetrične oblike rotorja, asimetrične elastične deformacije zaradi centrifugalnih sil, napake pri uležajenju, asimetričnih termičnih raztezkov in magnetnega neuravnoteženja. Pri rotorjih kateri niso masno in magnetno uravnoteženi, prihaja do centrifugalnih sil, ki preko gredi in ležajev vzbujajo celotno strukturo električnega stroja. Pri takem stroju se lahko pojavi visok nivo strukturnega hrupa, kot posledica povečanih vibracij [4].

### 2.2.3 Magnetni hrup

Magnetni hrup lahko razdelimo na dva dela; hrup, ki je povzročen zaradi magnetostrikcije ter hrup, ki je posledica vzbujanja strukture električnega stroja z magnetnimi silami. Magnetostrikcija je lastnost feromagnetnega materiala, ki se ob prisotnosti magnetnega polja deformira. Pri izmeničnih električnih strojih tako prihaja do periodičnega spreminjanja magnetnega pretoka, ki ima za posledico t.i. hrup magnetostrikcije. V električnih strojih je hrup magnetostrikcije v primerjavi s hrupom povzročenim zaradi vzbujanja z magnetnimi silami manjši in ga lahko zanemarimo [2].

Drugi del magnetnega hrupa, ki je povzročen s periodičnim vzbujanjem strukture električnega stroja, je posledica periodičnega spreminjanja magnetnega polja v zračni reži. Spreminjanje magnetnih sil v zračni reži kot posledica spreminjanja gostote magnetnega pretoka, je posledica dveh vzrokov. Prvi vzrok je zunanje napajanje električnega stroja. Večina sodobnih električnih strojev je napajanih preko pretvornikov s pulzno širinsko modulacijo, ki vplivajo na spreminjanje gostote magnetnega pretoka v zračni reži. Omenjeno spreminjanje gostote magnetnega pretoka oz. magnetnih sil opišemo s t.i. časovnimi harmoniki. Drugi vzrok spreminjanja gostote magnetnega pretoka v zračni reži pa je posledica vrtenja rotorja, geometrijskih lastnosti električnega stroja, kot so npr. utori, izraženi poli in eksentričnost ter lokalnega nasičenja feromagnetnega materiala in vzbujalnih

tokov. Tako spreminjanje gostote magnetnega pretoka opišemo s t.i. prostorskimi harmoniki [2],[4].

V nadaljevanju se bomo torej omejili le na vir magnetnega hrupa, ki je povzročen z magnetnimi silami v zračni reži, od tega bomo vpliv ekscentričnosti rotorja in pulzno širinske modulacije zanemarili. Podrobnejši opis generiranja magnetnih sil v električnem stroju je opisan v poglavju 3.

## 3 Magnetne sile v sinhronskem stroju s trajnimi magneti

### 3.1 Delovanje sinhronskega stroja s trajnimi magneti

Sinhronski stroj s trajnimi magneti lahko deluje kot motor ali generator. Njegova lastnost je, da se vrti v sinhronizmu s statorskim vrtilnim magnetnim poljem. Vrtilno magnetno polje se ustvari zaradi večfaznega statorskega navitja, kjer so posamezne faze prostorsko zamaknjene po obodu statorja. Ker pa ta pogoj ni zadosten za ustvarjanje vrtilnega polja, morajo po posameznih faznih navitjih steči še tokovi enakih frekvenc vendar med seboj fazno zamaknjeni. Sinhronsko hitrost vrtenja rotorja  $n$  lahko izračunamo po enačbi:

$$n = \frac{f}{p} \quad (3.1)$$

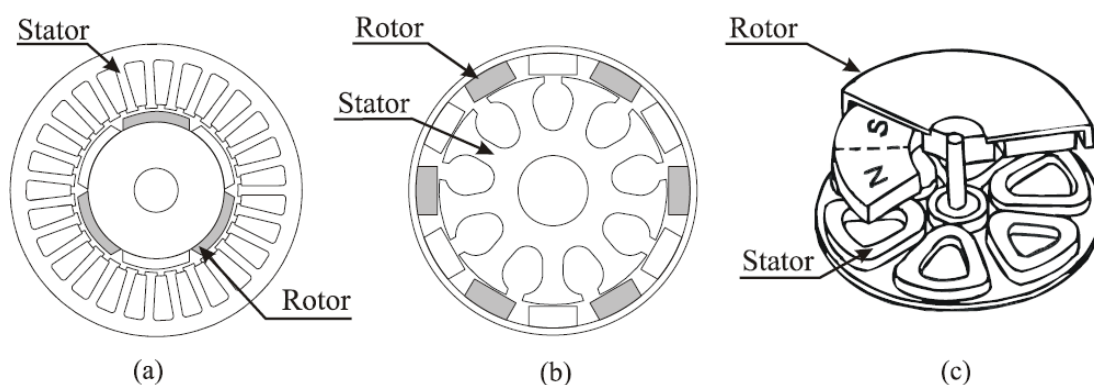
kjer je  $f$  frekvenca vzbujalnega toka,  $p$  pa število polovih parov na rotorju [5].

### 3.2 Konstrukcija sinhronskega stroja s trajnimi magneti

Sinhronski stroj s trajnimi magneti sestavljata dva aktivna dela; stator, ki je fiksen in na katerem je nameščeno navitje, ter rotor, ki se vrti in na katerem so nameščeni trajni magneti.

Poznamo več konstrukcijskih oblik PMSM-jev. Med seboj se razlikujejo glede na položaj rotorja (zunaj in notranj), ter na smer magnetnega pretoka v zračni

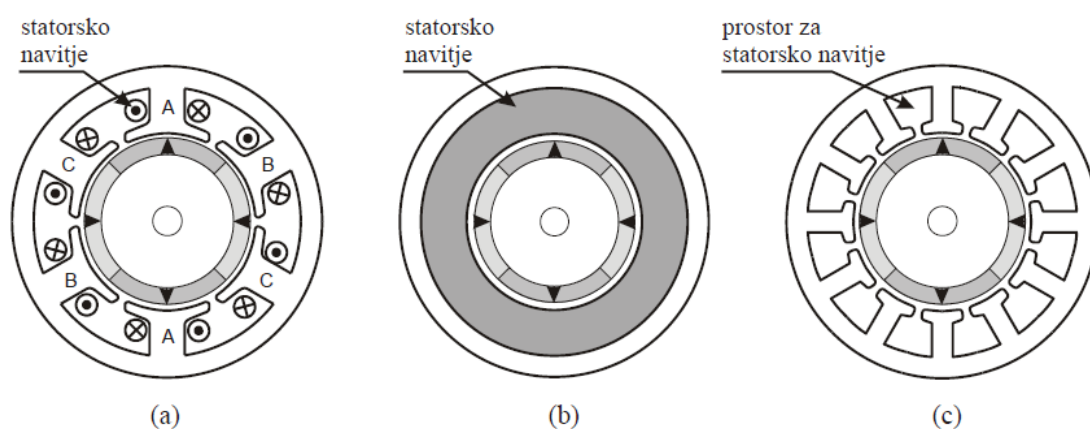
reži (radialni in aksialni). Najpogostejša oblika stroja je cilindrična z notranjim rotorjem (slika 3.1 a). Prednost te konfiguracije je v manjšem vztrajnostnem momentu rotorja, ki je še posebno primerna za hitro odzivne aplikacije npr. robotska roka. Druga možna oblika stroja je z zunanjim rotorjem (slika 3.1 b). Takšna oblika pogosto nastopa za pogon ventilatorjev. Za obe omenjeni konfiguraciji je značilen radialen magnetni pretok v zračni reži. V aplikacijah kjer so strožje zahteve glede dolžine stroja je primerna diskasta konfiguracija stroja (slika 3.1 c). Smer magnetnega pretoka v zračni reži je v tem primeru v aksialni smeri.



Slika 3.1: Različne konstrukcijske oblike sinhronskih strojev s trajnimi magneti [6].

### 3.2.1 Konstrukcija statorja

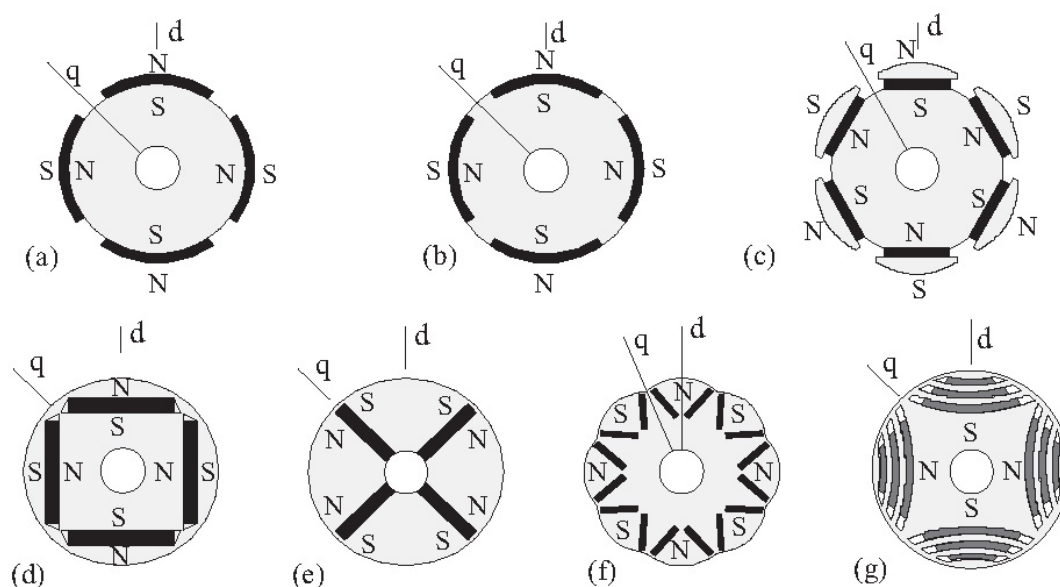
Primarna naloga statorja je vodenje magnetnega pretoka skozi ovoje statorskega navitja. Pri konstruiranju statorske lamele je največ pozornosti namenjeno izbiri števila statorskih utorov, oblikovanju statorskih utorov in zob, debelini statorskega jarma, obliki navitja in izbiri feromagnetnega materiala.



Slika 3.2: Različne konfiguracije statorjev sinhronskih strojev [6].

### 3.2.2 Konstrukcija rotorja

Pri konstrukciji rotorja smo največkrat pozorni na izbiro števila trajnih magnetov ter postavitev le teh, saj s tem vplivamo na karakteristiko samega električnega stroja. Obstaja veliko število različnih možnih postavitve trajnih magnetov, nekaj jih je prikazanih na sliki 3.3.



Slika 3.3: Različne konfiguracije rotorjev sinhronskih strojev [7].

### 3.3 Generiranje magnetnih sil

V električnem stroju se generirajo tri vrste sil. Reluktančna sila ki deluje na robove materialov z različnimi magnetnimi lastnostmi, Lorentz-ova sila, ki deluje na navitja izpostavljena magnetnemu polju, ter sila povzročena zaradi efekta magnetostrikcije, ki se generira znotraj feromagnetnega materiala. Najpomembnejša sila, ki je odgovorna za nastanek vibracij in hrupa je reluktančna sila.

Reluktančna sila v električnem stroju nastopa z dvema komponentama, radialno in tangencialno komponento. Tangencialna komponenta je odgovorna za nastanek vrtilnega momenta, radialna komponenta pa deluje kot privlačna sila med dvema feromagnetnima materialoma, to je med statorjem in rotorjem. Najpogostejši metodi za izračun magnetnih sil v električnem stroju sta:

- metoda navideznega dela in
- metoda Maxwellovih napetosti

Metoda navideznega dela temelji na spremembi magnetne energije oz. magnetne koenergije, ki je shranjena v magnetnem polju. Silo izračunamo kot spremembo magnetne energije pri spremembi kota vrtenja, pri čemer mora biti premik kota diferencialno majhen in magnetni pretok nespremenjen. Prav tako lahko silo izračunamo iz magnetne koenergije pri spremembi kota vrtenja, pri čemer mora biti premik kota diferencialno majhen in tok konstanten [8]:

$$F = \left( \frac{dW_k}{d\theta} \right)_{i=kons.} = - \left( \frac{dW_{mag}}{d\theta} \right)_{\Phi=kons.} \quad (3.2)$$

Metoda navideznega dela nam poda informacijo o rezultirajoči magnetni sili na feromagnetik, ki jo s pridom izkoriščamo pri izračunu rezultirajoče sile oz. navora, ki deluje na rotor električnega stroja. Manj uporabna pa je v primerih, ko želimo informacijo o krajevni razporeditvi magnetnih sil.

Za določanje krajevne razporeditve magnetnih sil se uporablja metoda Maxwellovih napetosti. V primerjavi s prejšnjo metodo, ta metoda omogoča

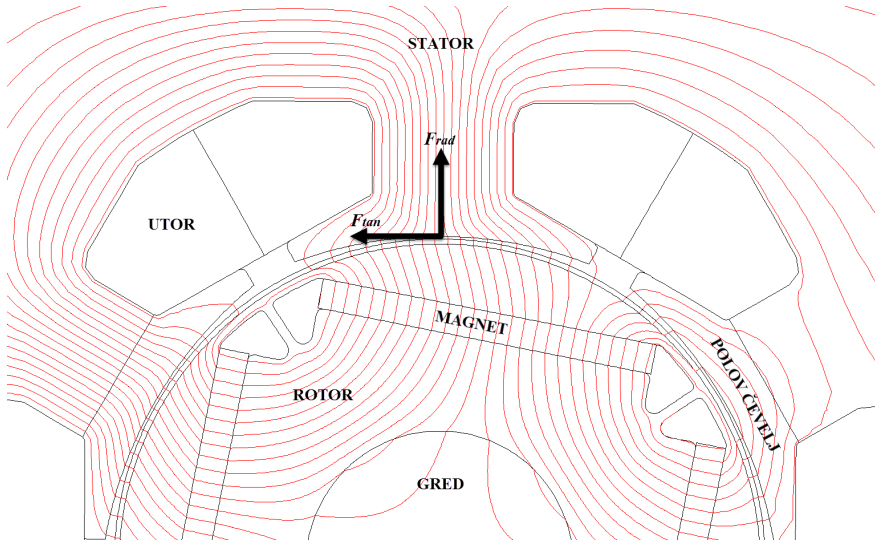
izračun magnetnih sil na podlagi poznavanja elektromagnetnega polja. Rezultirajočo silo na feromagnetik dobimo z integracijo površinskih napetosti na meji feromagnetik – zrak (enačba 3.5 in 3.6).

$$p_{rad} = \frac{1}{2\mu_0}(B_{rad}^2 - B_{tan}^2) \quad (3.3)$$

$$p_{tan} = \frac{1}{\mu_0}(B_{rad}B_{tan}) \quad (3.4)$$

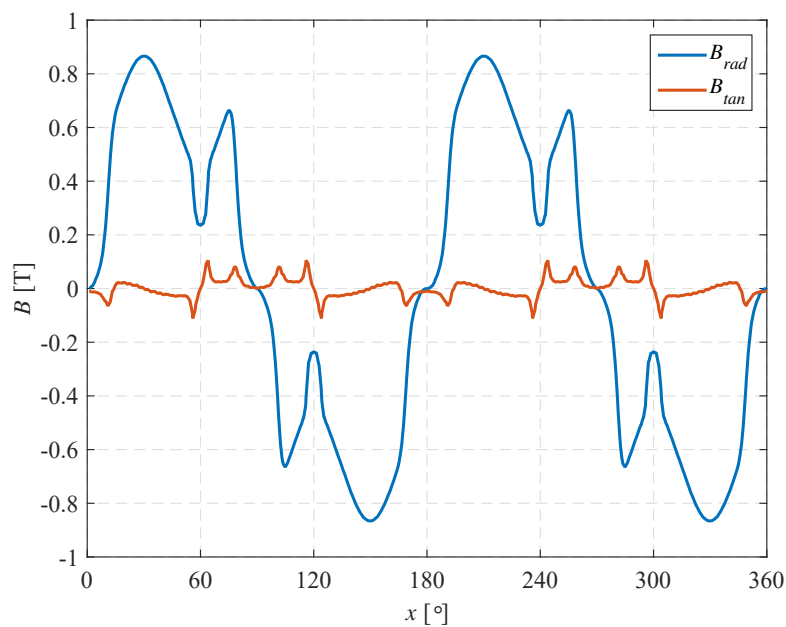
$$F_{rad} = \int_S p_{rad} dS \quad (3.5)$$

$$F_{tan} = \int_S p_{tan} dS \quad (3.6)$$

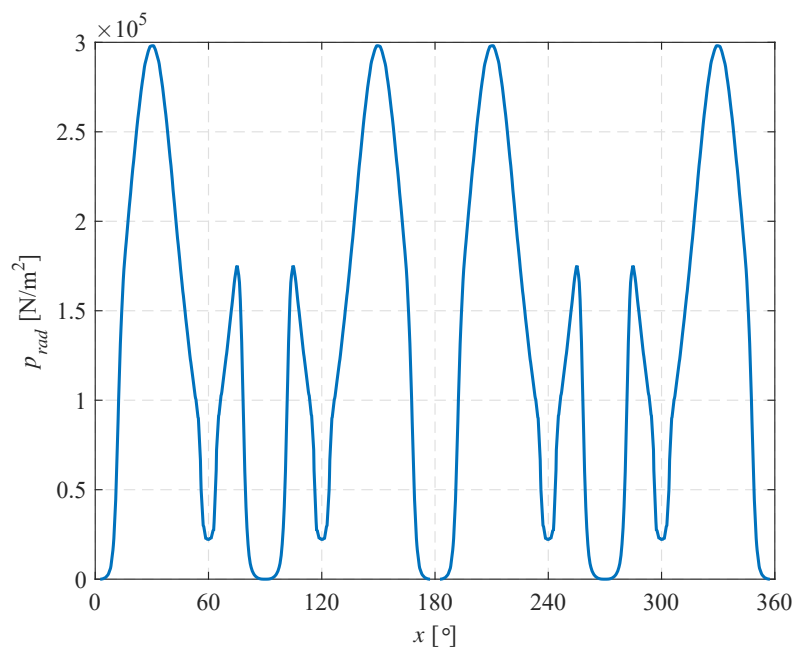


Slika 3.4: Radialna in tangencialna komponenta magnetnih sil.

Metodo Maxwellovih napetosti smo preizkusili na praktičnem primeru. Na sliki 3.5 sta prikazani radialna in tangencialna komponenta gostote magnetnega pretoka v zračni reži. S pomočjo enačbe 3.3 smo izračunali potek tlaka v zračni reži. Opazimo lahko, da ima tlak oz. sila enosmeren značaj kljub izmeničnemu značaju gostote magnetnega pretoka.



Slika 3.5: Porazdelitev radialne in tangencialne komponente gostote magnetnega pretoka v zračni reži.

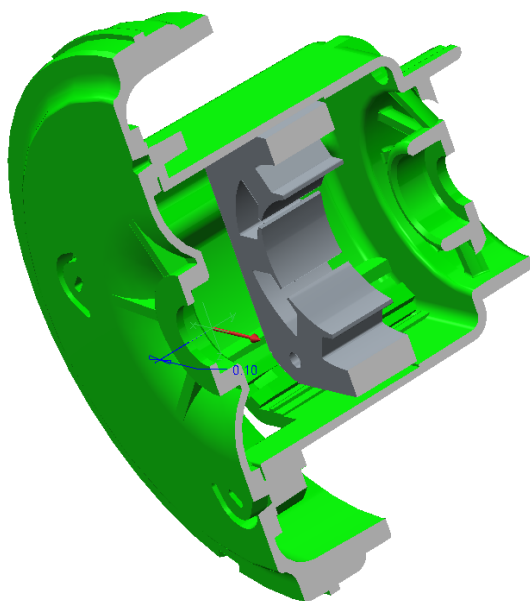


Slika 3.6: Porazdelitev radialne komponente tlaka vzdolž zračne reže.

## 4 Elektromagnetna analiza

V prvem koraku modeliranja elektromagnetnih vibracij je potrebno določiti magnetne sile, ki delujejo znotraj električnega stroja in so uporabljene kot vzbujaalne sile v strukturnem modelu. Ovrednotenje magnetnih sil v sinhronskem motorju s trajnimi magneti smo izvedli z metodo končnih elementov. Izračun je bil opravljen na 3D modelu stroja. S tem smo zajeli t.i. robni efekt stroja, ter poenostavili prenos magnetnih sil iz elektromagnetnega modela na strukturni model. Zaradi zahtevnosti modela, ter velikega števila končnih elementov se je močno podaljšal čas izračuna v primerjavi z 2D modelom. V nadaljevanju je podrobneje opisan postopek izgradnje modela.

Pri modeliranju elektromagnetnih vibracij je potrebno v modelu poleg statorja in rotorja upoštevati tudi ohišje in jarem. Ker je ohišje in jarem dotične sesalne enote dokaj kompleksno, izgradnja same geometrije v programu JMAG - Designer ne bi bila smiselna, zato je bila geometrija ohišja in jarma uvožena iz namenskega programa za tehnično risanje (CAD - angl. Computer Aided Design). CAD modela ohišja in jarma sta bila izrisana že tekom razvoja nove sesalne enote, zato jih je bilo pred uvozom v program JMAG - Designer potrebno poenostaviti in prilagoditi. Odstraniti je bilo potrebno vse geometrijske podrobnosti, ki na samo analizo hrupa in vibracij ne vplivajo, npr. razne zaokrožitve na robovih ohišja in jarma. Poleg ohišja in jarma je bil dodan še statorski paket, ki je bil pravilno pozicioniran glede na položaj ohišja (slika 4.1). S tem smo se izognili kasnejšim problemom pravilnega pozicioniranja statorskega paketa in mreženja modela zaradi netočnosti same geometrije.



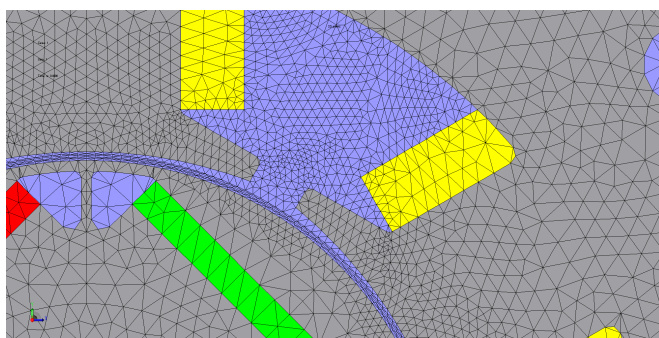
Slika 4.1: CAD model (prerez) pred uvozom v JMAG - Designer.

## 4.1 Priprava 3D modela

Po uvozu CAD modela v programski paket JMAG - Designer, je bilo potrebno pripraviti geometrijo za elektromagnetno analizo. JMAG - Designer omogoča, da tekom priprave 3D modelov za različne več fizikalne analize, enostavno izberemo katere dele CAD modela bomo uporabili za posamezno analizo. V našem primeru smo za potrebe elektromagnetne analize ohišje in jarem začasno odstranili. Tako pripravljen model je vseboval samo statorski paket. V namenskem urejevalniku geometrije (Geometry editor) smo statorskemu paketu dodali še rotorski paket z vstavljenimi trajnimi magneti ter statorsko navitje. Ko je bila geometrija v celoti zgrajena, je bilo potrebno definirati še posamezne materiale in vzbujanja. Za definicijo materialov elektro pločevine in trajnih magnetov smo uporabili karakteristike, ki jih podajajo proizvajalci. Magnetno vzbujanje na rotorju je izvedeno s trajnimi magneti iz redkih zemelj (NdFeB), vzbujanje na statorju pa je izvedeno s tokovodniki, ki so porazdeljeni v obliki koncentriranega navitja. Modelu je potrebno definirati tudi robne pogoje, s katerimi določimo smer toka v navitju, definiramo vrteči se del modela - rotor ter definiramo morebitne simetrije, v

primeru delnega modela stroja.

Zadnja faza priprave 3D modela je diskretizacija s pomočjo mreže končnih elementov. Program omogoča samodejno diskretizacijo modela, vendar je potrebno na področjih, kjer prihaja do velikih sprememb gostote magnetnega pretoka, mrežo končnih elementov še dodatno zgostiti, predvsem v območju zračne reže. Za natančnejši izračun magnetnih sil je bila zračna reža definirana kot tri slojna. Razporeditev mreže končnih elementov v območju zračne reže je prikazana na sliki 4.2.



Slika 4.2: Podroben pogled na mrežo končnih elementov v območju zračne reže - presek 3D modela.

Izračun smo izvedli za eno električno periodo, to je ekvivalent polovici mehanskega obrata. Velikost koraka smo določili na podlagi želene frekvence, do katere še želimo opazovati vibracije. Za zadostitev Nyquistovemu pogoju, ter priporočilom [9], smo periodo maksimalne opazovane frekvence magnetnih sil razdelili na osem razdelkov. Nastavitve, ki so bile uporabljene za izračun 3D modela so prikazane v tabeli 4.1.

Tabela 4.1: Nastavitve izračuna 3D modela.

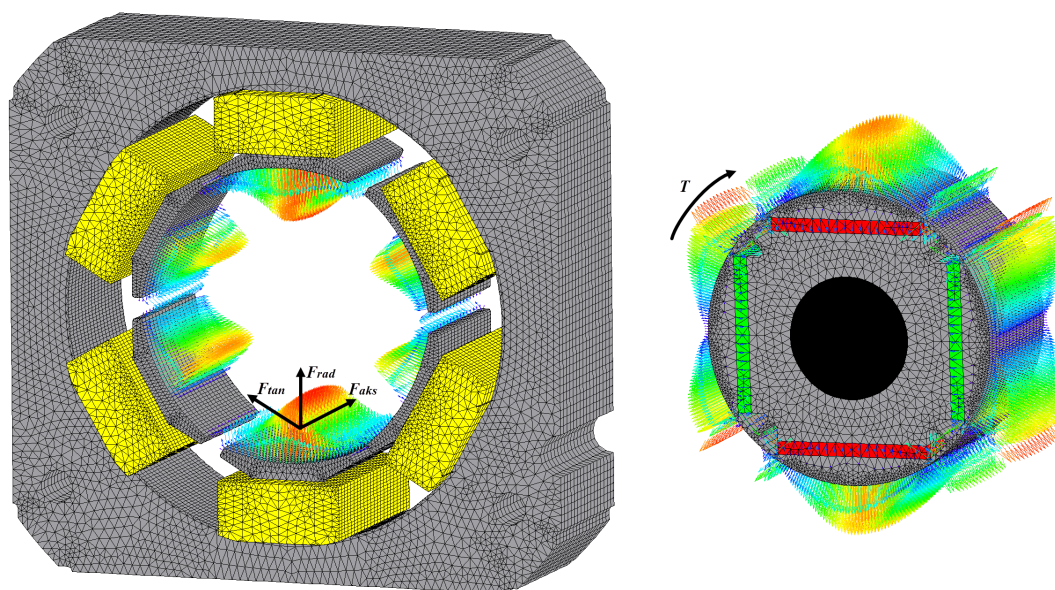
|                           |                         |
|---------------------------|-------------------------|
| Vrtilna hitrost           | 25000 min <sup>-1</sup> |
| Električna frekvenca      | 833, 33 Hz              |
| Fazni premik toka         | -30°                    |
| Število razdelkov         | 50                      |
| Maks. opazovana frekvenca | 5208 Hz                 |

## 4.2 Rezultati simulacije

Elektromagnetni izračun z MKE, nam poleg informaciji o silah in momentih na rotorju in statorju, omogoča vpogled tudi v magnetne in električne razmere v stroju. Le tem v našem primeru nismo posvečali posebne pozornosti, saj sta bili tako statorska kot rotorska lamela že analizirani in optimirani tako z magnetnega vidika kot tudi z vidika zmanjševanja samodržnega momenta.

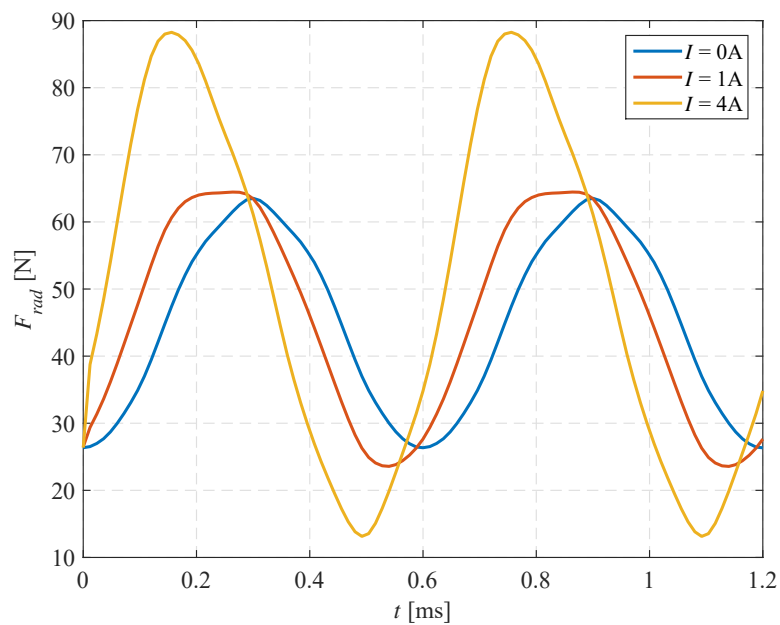
Vsi izračuni, ki zajemajo elektromagnetno analizo, so bili opravljeni v stacionarnem stanju pri nespremenljivi vrtilni hitrosti. Opravljenih je bilo več iteracij izračunov, pri katerih smo spreminjali amplitudo vsiljenega toka. Na ta način smo spreminjali obratovalne pogoje, ki lahko nastanejo med obratovanjem sesalne enote. Meritev vibracij in hrupa sesalne enote so bile opravljene brez bremena, to je v prostem teku. Da smo v našem modelu zagotovili enake obratovalne razmere, smo vsiljevali tok amplitude 1A, kateri je bil izmerjen med obratovanjem v prostem teku. Ti rezultati izračuna so bili v nadaljevanju uporabljeni kot vzbujevalne sile v strukturnem modelu.

Na sliki 4.3 so prikazani vektorji magnetnih sil pri izbranem položaju rotorja. Opazimo lahko ciklično simetrično razporeditev magnetnih sil. Zradi omenjene lastnosti lahko značaj magnetnih sil določimo na enem statorskem polu. V nadaljevanju smo opazovali rezultirajočo silo, ki deluje na statorski pol. Razdelili smo jo na dve komponenti, na radialno in tangencialno. Komponenta rezultirajoče sile v aksialni smeri ni prisotna, kar je posledica same geometrije stroja.

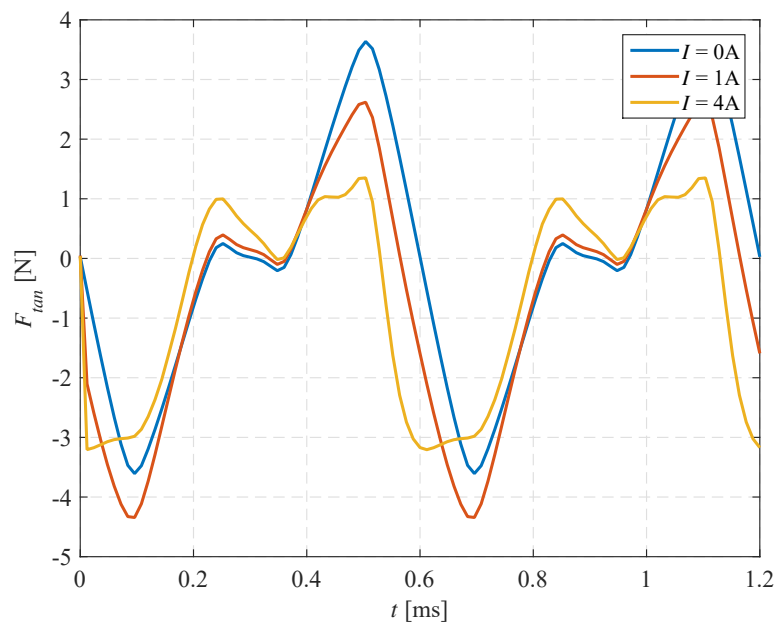


Slika 4.3: Magnetne sile na statorju in rotorju.

V nadaljevanju smo podrobneje analizirali rezultirajoče sile na polov čevelj. V analizi so bile vključene tri delovne točke, idealni prosti tek, kjer ni prisotnih kakršnih koli izgub, realni prosti tek pri toku 1A in nazivna delovna točka pri toku 4A. Iz rezultatov simulacij je opaziti, da ima rezultirajoča radialna sila statično in dinamično komponento. Statična komponenta, ki v večini ne vpliva na nastanek hrupa se giblje med 40 in 50 N in ni odvisna od vzbujačnega toka. V nasprotju z dinamično komponento, ki je glavni provzročitelj magnetnega hrupa in je močno odvisna od toka, ki teče skozi navitje. Na sliki 4.5 je prikazana rezultirajoča tangencialna komponenta sile v odvisnosti od vzbujačnega toka. Iz poteka je razvidno, da je rezultirajoča tangencialna komponenta izmeničnega značaja, brez prisotnosti enosmerne komponente. Lahko trdimo, da je rezultirajoča tangencialna komponenta sile odgovorna za nihanje statorskih polov. Opaziti je, da se s povečevanjem statorskega toka, amplituda sile zmanjšuje in postaja vse bolj enosmerne narave, kar je posledica delovanja nasprotnega momenta na statorske pole.

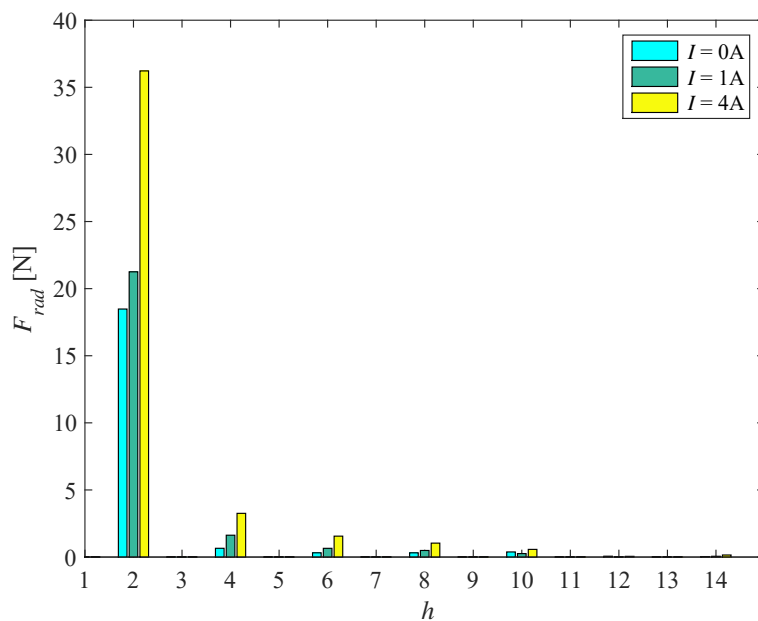


Slika 4.4: Rezultirajoča radialna komponenta sile na polov čevljev.

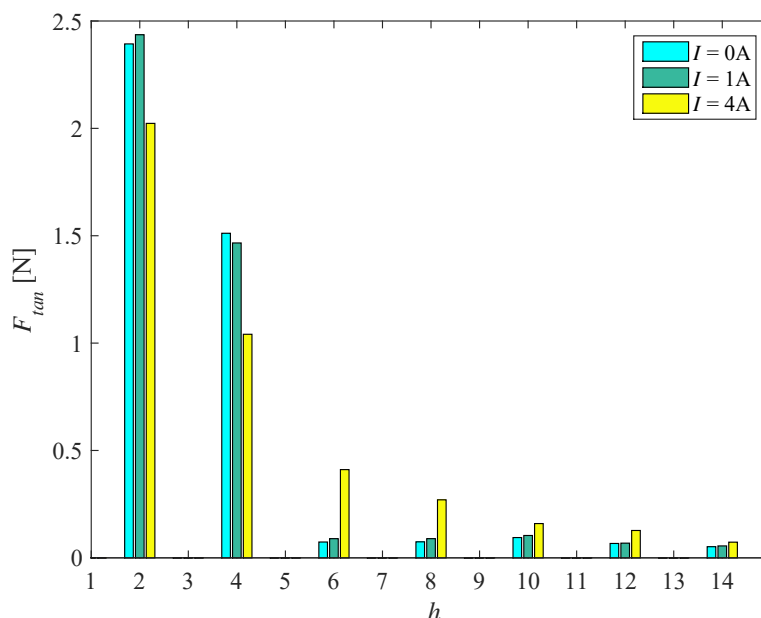


Slika 4.5: Rezultirajoča tangencialna komponenta sile na polov čevljev.

Na sliki 4.6 in 4.7 sta prikazana frekvenčna spektra posamezne komponente rezultirajoče sile na polov čevelj. Pri radialni sil opazno izstopa druga harmonska komponenta, ki je tudi močno odvisna od statorskega toka.



Slika 4.6: Harmonske komponente radialne sile v odvisnosti od toka.



Slika 4.7: Harmonske komponente tangencialne sile v odvisnosti od toka.

### 4.3 Verifikacija 3D modela

Rezultate izračunov 3D modela je bilo potrebno pred naslednjim korakom preveriti. Na ta način smo zagotovili kredibilnost zgrajenega modela in dobljenih rezultatov. S tem smo se poskušali izogniti kasnejšim problemom iskanja napak v verigi modeliranja hrupa in vibracij.

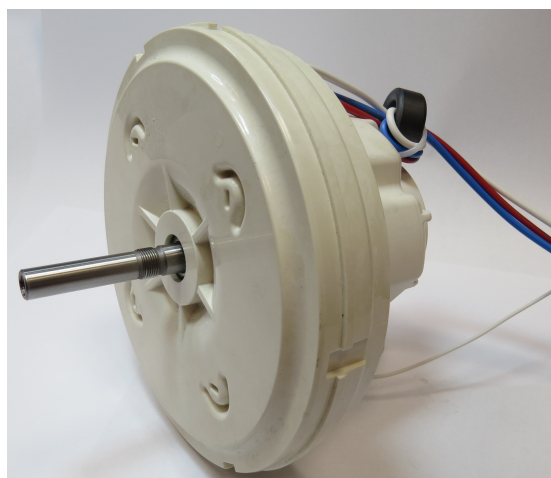
Neposredna meritev magnetnih sil v električnih strojih praktično ni mogoča. Edini način neposrednega merjenja magnetnih sil je preko vrtilnega momenta na rotorju. V tem primeru izmerjen moment zajema samo tangencialne komponente magnetnih sil, ki delujejo na rotor. Meritev vrtilnega momenta na rotorju lahko izvedemo na dva načina. Prvi je z meritvijo karakteristike električnega stroja, s katero dobimo informacijo o vrtilnem momentu na gredi, mehanski in električni moči, toku ter izkoristku. Drugi način pa je z meritvijo samodržnega momenta (angl. Cogging torque). V našem primeru smo za verifikacijo modela uporabili drugi način, z meritvijo samodržnega momenta.

#### 4.3.1 Meritev samodržnega momenta

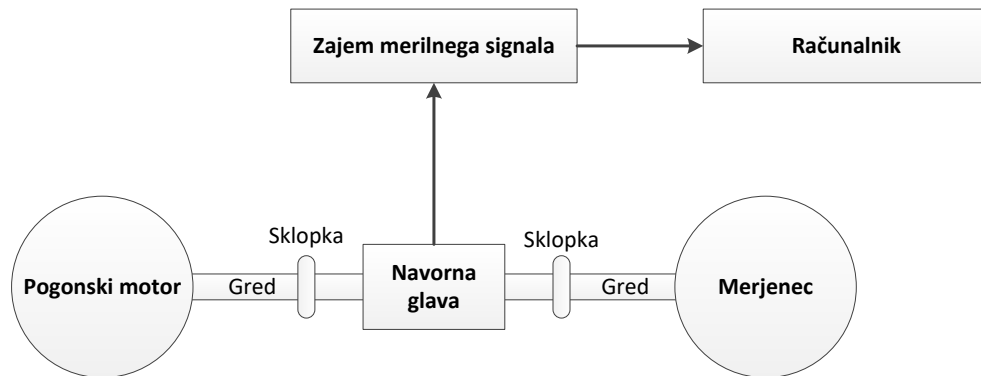
Meritev samodržnega momenta je bila izvedena na prototipnem motorju sesalne enote (slika 4.8). Celotna meritev je potekala na merilnem mestu v podjetju Domel. Za zajem podatka o vrednosti vrtilnega momenta je bila uporabljena momentna glava z območjem merjenja 1 Nm. Merjenec je bil preko gredi, sklopke in navorne glave gnan s pogonskim motorjem.

##### Seznam merilne opreme:

- Merilnik vrtilnega momenta: MAGTROL TM 204/HS
- Krmilnik dinamometra: MAGTROL DSP6001
- Pogonski motor: Rexroth MSK070

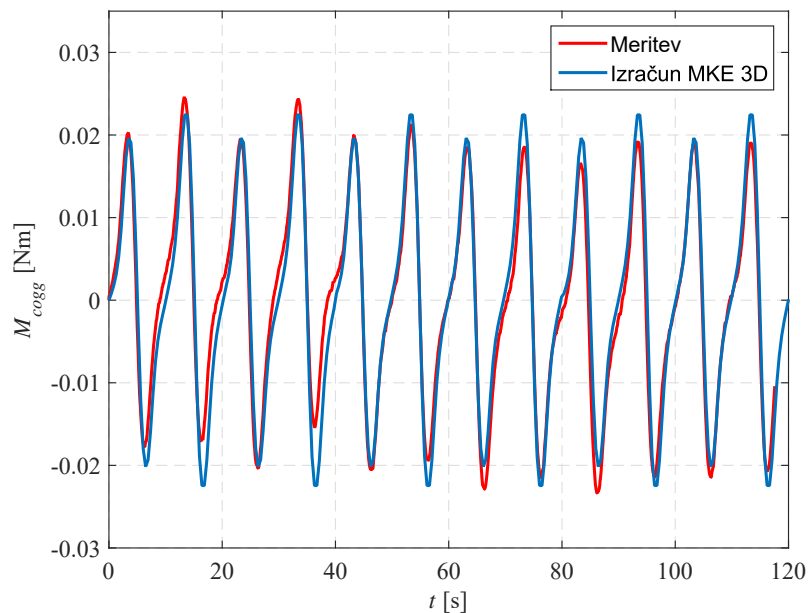


Slika 4.8: Motorski del sesalne enote

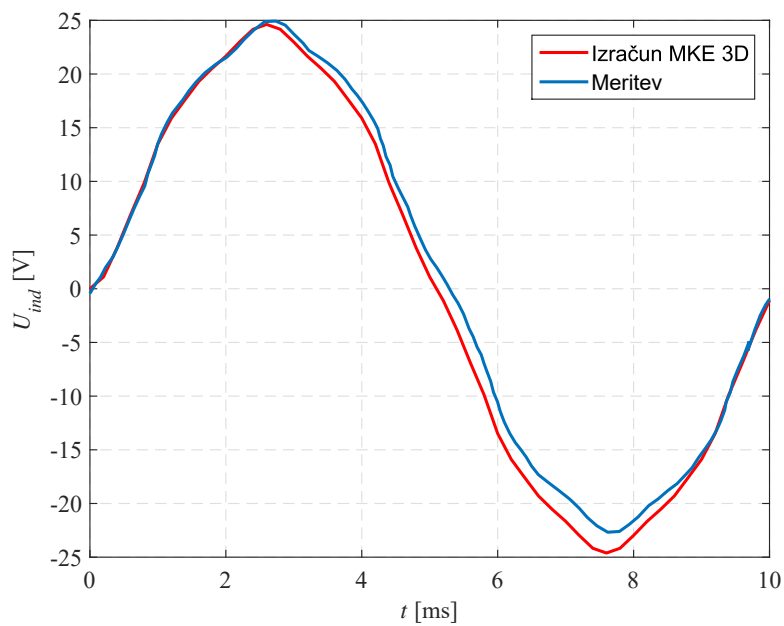


Slika 4.9: Blokovna shema merilnega mesta za merjenje samodržnega momenta.

Meritev samodržnega momenta je bila izvedena pri nizki vrtilni hitrosti, in sicer pri 0,5 vrt/min. Motor smo zavrteli za celoten obrat. Enake obratovalne pogoje smo nastavili tudi v našem 3D modelu, na ta način smo omogočili prikaz meritev in izračunov na skupnem grafu. Primerjava potekov samodržnega momenta med meritvijo in izračunom je prikazan na sliki 4.10. Iz potekov samodržnega momenta vidimo dobro ujemanje izračuna z meritvijo. Ker smo imeli na voljo tudi rezultate meritve inducirane napetosti, smo te meritve prav tako primerjali z izračunom. Primerjava potekov medfazne inducirane napetosti med meritvijo in izračunom pri 3000 vrt/min je prikazana na sliki 4.11. Iz slike je razvidno dobro ujemanje izračuna z meritvijo. Na podlagi rezultatov lahko sklepamo, da je 3D elektromagnetni model stroja ustrezen, in da je izračun magnetnih sil dovolj natančen.



Slika 4.10: Primerjava potekov samodržnega momenta med meritvijo in izračunom z MKE.



Slika 4.11: Primerjava potekov medfazne inducirane napetosti pri 3000 obrt/min.

## 5 Strukturna analiza

V prvem koraku smo uspešno ovrednotili magnetne vzbujevalne sile in jih tudi uspešno verificirali. Sledil je drugi korak, v katerem je bilo potrebno zgraditi strukturni model sesalne enote, sestavljen iz statorskega paketa z navitjem, rotorja, ohišja in okrova. Zgrajen strukturni model je bil najprej uporabljen za modalno analizo, kjer smo dobili podatek o lastnih frekvencah in modalnih oblikah, kasneje pa tudi za analizo vibracij.

Pri procesu modeliranja elektromagnetnih vibracij je ključnega pomena pravilno vrednotenje lastnih frekvenc in modalnih oblik. Pri tem so nam v pomoč programi, ki omogočajo izračun lastnih frekvenc z metodo končnih elementov (MKE). Do izraza pridejo predvsem takrat, ko je model kompleksnih oblik in sestavljen iz večih različnih materialov. Kljub temu pa moramo pri gradnji strukturnega modela upoštevati določene poenostavitve, ki jih v modelu ni mogoče dobro opisati. Ena izmed njih je, da stator ni sestavljen iz lamelirane elektro pločevine, temveč je v modelu definiran iz enega kosa pločevine. Zaradi omenjene poenostavitve je pri izračunu lastnih frekvenc prišlo do odstopanj v primerjavi z rezultati opravljene eksperimentalne modalne analize (EMA). Druga večja poenostavitev je definicija statorskega navitja. Praktično nemogoče je v modelu zajeti vpliv utorske izolacije ter posameznih ovojev statorskega navitja. Zato smo v našem modelu statorsko navitje modelirali kot specifično maso, ki je enakomerno porazdeljena okoli statorskih polov. Težava pri gradnji modela, ki je sestavljen iz različnih komponent je tudi določanje spojev med njimi. Program JMag - Designer sicer omogoča povezavo elementov preko vzmeti, vendar se jih v našem

primeru nismo poslužili, saj modeliranje spojev presega okvir tematike te naloge.

Pri analizi strukturnega odziva je faktor dušenja eden iz med parametrov, ki ga je potrebno pred reševanjem strukturnega modela pravilno definirati. Ker je analitičen izračun faktorja dušenja kompleksnih struktur praktično nemogoč, lahko le tega določimo s pomočjo empirične enačbe 5.1, ki velja za električne stroje malih do srednjih moči [2].

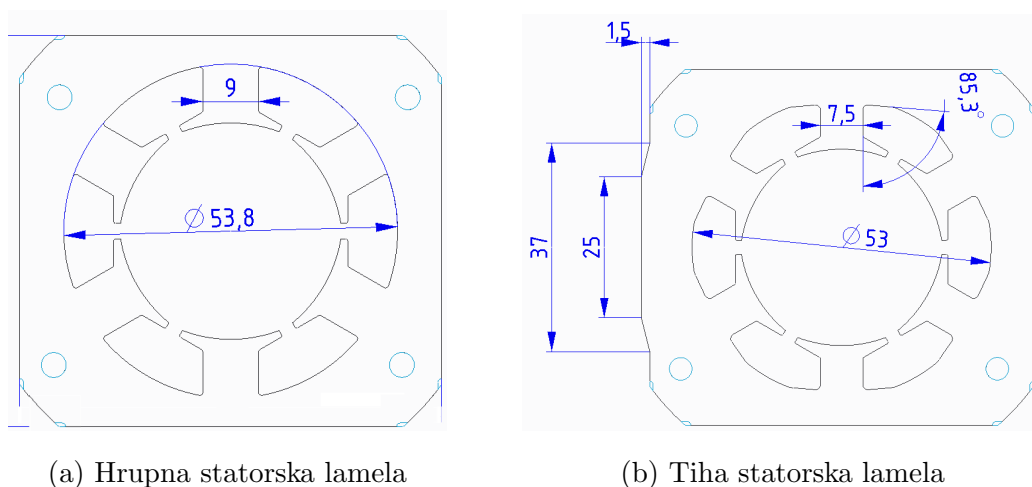
$$\zeta = \frac{1}{2\pi}(2,76 \times 10^{-5}f_m + 0,062) \quad (5.1)$$

Druga možnost določitve faktorja dušenja pa je iz opravljene EMA. Poleg informacij o lastnih frekvencah in modalnih oblikah, je moč izluščiti tudi podatek o faktorju dušenja. Postopek določitve faktorja dušenja je podrobneje opisan v poglavju 5.2.4.

## 5.1 Modalna analiza

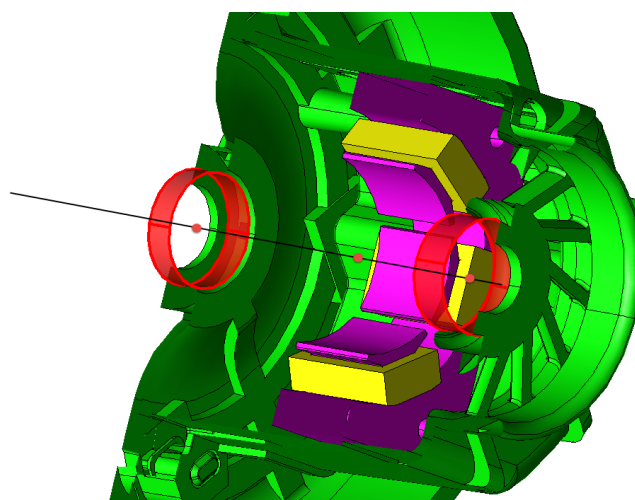
Že pred pričetkom nastajanja tega dela, med identifikacijo hrupa sesalne enote, je bil zgrajen strukturni model prototipnega statorja. Modalna analiza je bila opravljena v programskem paketu Ansys. Dvig lastnih frekvenc je bil dosežen z večimi iterativnimi izračuni z MKE pri čemer se je postopoma spreminjala geometrija statorske lamele. Spremembe so bile v smeri dosega čim višjih lastnih frekvenc. S ciljem, da se karakteristika sesalne enote ohrani, se dimenzije v območju zračne reže niso bistveno spremenile, prav tako se je ohranila površina statorskih utorov, s čimer so se ohranile električne in magnetne lastnosti stroja. Koraki sprememb geometrije statorskega paketa s pripadajočimi izračuni lastnih frekvenc so podrobneje prikazani v dodatku A.

V nadaljevanju bomo podrobneje analizirali dve izvedenki statorskih paketov, hrupno in optimirano - tišjo verzijo (slika 5.1), ter poskušali rešitev iz prakse dokazati tudi v simulacijskem okolju.



Slika 5.1: Podrobne dimenzije statorskih lamel [10].

Gradnja strukturnega modela je potekala postopoma. Najprej smo analizirali statorski paket s pripadajočim navitjem. Rotorski paket z vstavljenimi magneti, ki je nasajen na gredi smo po navodilih programskega paketa definirali kot točkasto maso. Model gredi smo definirali z elementom 'beam', kateri je podprt z ležajema z obeh strani. S tem smo poenostavili ter posledično pohitrili izračun lastnih frekvenc in oblik, ne da bi bistveno poslabšali natančnost samega izračuna. Prerez strukturnega modela z rotorjem in gredjo je prikazan na sliki 5.2.



Slika 5.2: Presek strukturnega modela.

### 5.1.1 Hrupen stator

V prvem delu modalne analize smo analizirali sesalno enoto s hrupno geometrijo statorskega paketa. Geometrijo statorja z navitjem smo uvozili iz 3D modela elektromagnetne analize. Na ta način se je ohranil položaj geometrije v prostoru, ki je pomemben v nadaljevanju pri prenosu magnetnih sil iz elektromagnetnega modela na strukturni model. Po uvozu geometrije je modelu potrebno definirati robne pogoje ter materiale. Strukturni model smo definirali, kot da lebdi v zraku, torej brez omejitev v prostostnih stopnjah. Večji poudarek smo namenili definiranju materialov. Iz literature je moč zaslediti več načinov definiranja mehanskih lastnosti za statorski paket iz lamelirane pločevine. Prvi način je z uporabo ortotropnih lastnosti, ki označuje šest modelov elastičnosti. Drugi način pa je z uporabo isotropnih lastnosti. Slednjega smo uporabili tudi v našem modelu, saj se je tekom EMA izkazalo, da s tem načinom pravilno definiramo mehanske lastnosti v smeri nihanja. Vrednosti mehanskih lastnosti materialov, ki so bili uporabljeni pri hrupnem modelu statorja, so prikazani v tabeli 5.1. Gostoto statorskega paketa smo določili na podlagi znane gostote valjanega jekla, ki znaša  $7850 \text{ kg/m}^3$ , ter faktorja polnitve lameliranja jedra (angl. Stacking factor), ki znaša v našem primeru približno 0,97. Gostoto navitja smo določili na podlagi tehtanja navitja prototipne verzije statorskega paketa. Ker so tuljave v modelu drugih dimenzij, je bilo potrebno definirati specifično gostoto glede na dimenzije tuljav v modelu in mase prototipnega navitja. Na ta način smo dosegli enakomerno razporeditev mase po obodu statorskega paketa. Podatke o ostalih parametrih pa smo dobili iz tehničnih listov.

Tabela 5.1: Mehanske lastnosti uporabljenih materialov .

|                 | Gostota [kg/m <sup>3</sup> ] | Modul elastičnosti [GPa] | Poissonovo število |
|-----------------|------------------------------|--------------------------|--------------------|
| Statorski paket | 7615                         | 200                      | 0,30               |
| Navitje         | 7357                         | 9,4                      | 0,35               |
| Ohišje in okrov | 1950                         | 5,7                      | 0,39               |
| Gred            | 7850                         | 210                      | 0,30               |

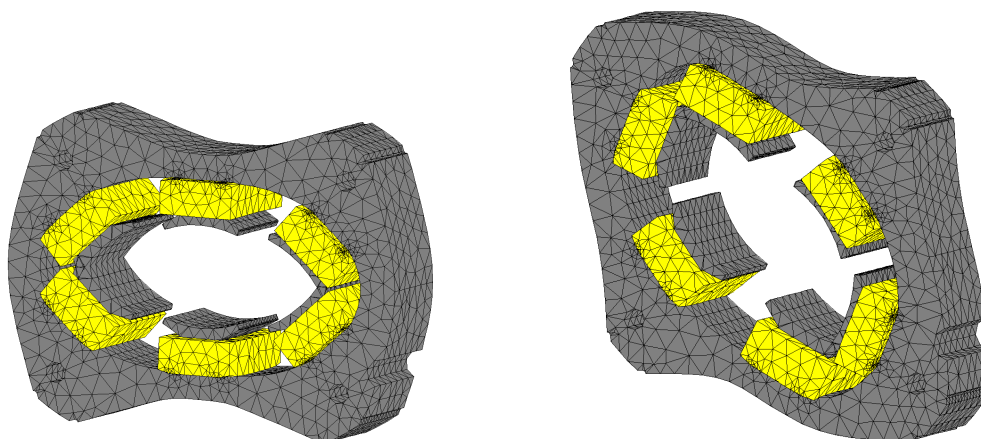
Prvi izračun zgrajenega strukturnega modela je pokazal rahlo odstopanje izračunanih vrednosti lastnih frekvenc v primerjavi z rezultati EMA. Prva lastna frekvenca je odstopala za 8,2 %, druga pa za 5,7 %. Ker smo želeli strukturni model statorskega paketa z navitjem kar najbolj približati realnemu, je bilo model potrebno korigirati. Korigiranje strukturnega modela smo poskušali izvesti s sledečimi načini:

- s spremembo vrednosti gostote statorskega paketa
- s spremembo vrednosti modula elastičnosti statorskega paketa
- s spremembo vrednosti specifične gostote statorskega navitja

Najboljše ujemanje smo dosegli s spreminjanjem specifične gostote statorskega navitja. Na ta način smo spreminjali maso, ki je enakomerno razporejena po obodu statorskega paketa. Po večih iterativnih izračunih, kjer smo primerjali rezultate izračunov z meritvami, smo prišli do vrednosti specifične gostote 14000 kg/m<sup>3</sup>. Fiktivno maso navitja smo tako povečali za 47,4% iz začetnih 60g na končnih 88,4g. Dosegli smo zelo dobro ujemanje rezultatov in meritev lastnih frekvenc. Prva lastna frekvenca je odstopala za 0,25 %, druga lastna pa za 1,6 %. Lastne oblike hrupnega statorskega paketa so vidne na sliki 5.3.

Tabela 5.2: Rezultati izračunov ter meritev statorskega paketa z navitjem.

| Izhodiščni model    | Meritev EMA | Izračun 3D MKE | Odstopanje |
|---------------------|-------------|----------------|------------|
| 1. lastna frekvenca | 3236 Hz     | 3524 Hz        | +8,2 %     |
| 2. lastna frekvenca | 3968 Hz     | 4208 Hz        | +5,7 %     |
| Korigiran model     |             |                |            |
| 1. lastna frekvenca | 3236 Hz     | 3228 Hz        | -0,25 %    |
| 2. lastna frekvenca | 3968 Hz     | 3905 Hz        | -1,6 %     |



(a) Prva modalna oblika pri 3228 Hz.

(b) Druga modalna oblika pri 3905 Hz

Slika 5.3: Prva in druga modalna oblika hrupnega statorskega paketa

### 5.1.2 Tišji stator

Drugi tišji statorski paket smo prav tako predhodno uporabili za 3D elektromagnetno analizo, v kateri smo izračunali magnetne sile, ki delujejo na statorski paket. Nato smo geometrijo statorskega paketa z navitjem prenesli in jo uporabili v strukturnem modelu. Podobno kot pri hrupnem statorskem paketu, smo tudi tukaj določili robne pogoje ter uporabljene materiale. Edina razlike se je pojavila pri definiranju gostote statorskega navitja. Ker se volumen tuljav v tišjem modelu razlikuje od tuljav v hrupnem modelu, je bilo potrebno prilagoditi specifično gostoto statorskega navitja. Seveda smo za izhodiščno vrednost vzeli korigirano

specifično gostoto hrupnega statorskega navitja  $14000 \text{ kg/m}^3$ .

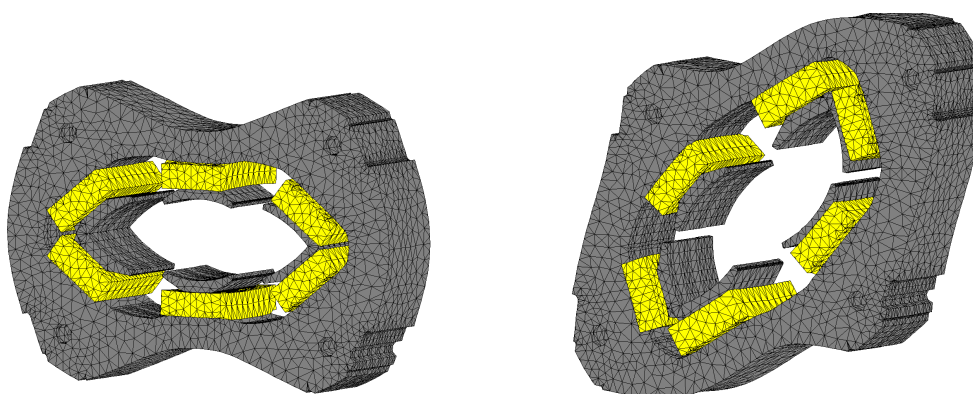
Tabela 5.3: Mehanske lastnosti uporabljenih materialov .

|                 | Gostota [ $\text{kg/m}^3$ ] | Modul elastičnosti [GPa] | Poissonovo število |
|-----------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------|
| Statorski paket | 7615                        | 200                      | 0,30               |
| Navitje         | 21268,6                     | 9,4                      | 0,35               |

Rezultati izračunov so pokazali odlično ujemanje z meritvami EMA, brez dodatnega korigiranja modela. Primerjava druge lastne frekvence tukaj ni bila mogoča, saj se pri meritvi z EMA, ta frekvenca ni izrazila. Lastne oblike tišjega statorskega paketa so vidne na sliki 5.4.

Tabela 5.4: Rezultati izračunov MKE ter meritev EMA tišjega statorskega paketa.

|                     | Meritev EMA | Izračun 3D MKE | Odstopanje |
|---------------------|-------------|----------------|------------|
| 1. lastna frekvenca | 4228 Hz     | 4220 Hz        | -0,2 %     |
| 2. lastna frekvenca | —           | 4528 Hz        | —          |



(a) Prva modalna oblika pri 4220 Hz.

(b) Druga modalna oblika pri 4528 Hz

Slika 5.4: Lastne oblike in frekvence tišjega statorskega paketa

### 5.1.3 Ohišje in okrov

Struktura, ki daje celotnemu električnemu stroju trdnost in stabilnost je sestavljena iz ohišja in okrova. Izdelana sta iz materiala BMC (angl. Bulk Moulding Compound), ki bazira na poliestrskih vlaknih. Osnovna funkcija ohišja je fiksiranje statorskega paketa. Poleg tega ima ohišje na eni strani ležajni sedež, ki je namenjen pravilnemu pozicioniranju rotorja z gredjo. Okrov služi za ločevanje hladilnega zraka od delovnega, ki je mešanica zraka in vode, ter pozicioniranju rotorja.

V nadaljevanju je bila izvedena modalna analiza za ohišje in okrov. Parametri, ki so bili uporabljeni za material BMC so:  $E = 15,7 \text{ GPa}$ ,  $\rho = 1950 \text{ kg/m}^3$  in  $\nu = 0,39$ .

Ker EMA ni bila opravljena na posamezni strukturi ohišja in okrova, ni bilo mogoče validirati strukturnega modela. Namesto tega smo pri analizi z MKE poskušali ugotoviti vpliv prisotnosti ohišja in okrova na vrednost lastnih frekvenc statorskega paketa z navitjem. Izračuni so bili opravljeni z obema statorskima paketoma. Rezultati izračunov so prikazani v tabeli 5.5. Iz rezultatov je moč sklepati, da ohišje in okrov bistveno ne pripomoreta k spremembi statorskega paketa z navitjem, večja sprememba se je pojavila le pri 2. lastni frekvenci hrupnega statorskega paketa.

Tabela 5.5: Tabelarična primerjava vpliva ohišja na lastne frekvence statorskega paketa.

| Hrupen stator       | Izračun brez ohišja | Izračun z ohišjem | Sprememba |
|---------------------|---------------------|-------------------|-----------|
| 1. lastna frekvenca | 3228 Hz             | 3234 Hz           | +0,2 %    |
| 2. lastna frekvenca | 3901 Hz             | 3707 Hz           | -4,9 %    |
| Tišji stator        |                     |                   |           |
| 1. lastna frekvenca | 4220 Hz             | 4199 Hz           | -0,5 %    |
| 2. lastna frekvenca | 4528 Hz             | 4565 Hz           | +0,8 %    |

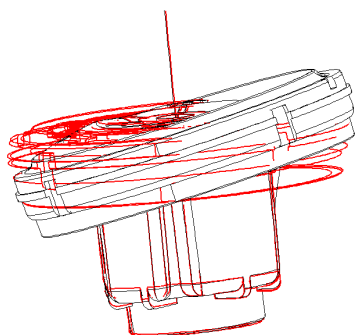
#### 5.1.4 Sestav

Ko smo uspešno izdelali in ovrednotili posamezne strukturne modele je bil naslednji korak združitev v celoto, v en sam strukturni model. Poleg statorskega paketa z navitjem, ohišja in okrova je bil v celoten sestav vključen tudi rotor z gredjo ter togostni elementi, ki predstavljajo togo povezavo med ležajnama sedežema z gredjo. Spoji med statorskim paketom in ohišjem ter spoji med ohišjem in okrovom so bili v strukturnem modelu definirani kot togi, to pomeni, da so povezani preko skupnih vozlišč na mreži končnih elementov.

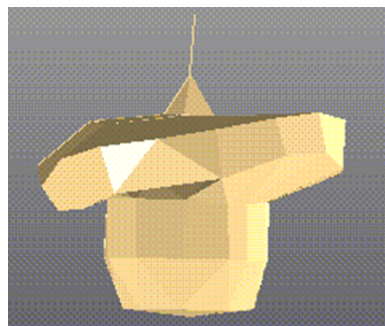
Posebna pozornost je bila namenjena verifikaciji strukturnega modela celotnega sestava. Izvedena je bila EMA celotnega sestava z vizualizacijo in animacijo posameznih modalnih oblik. Na ta način smo enostavneje primerjali posamezne lastne frekvence dobljene z analizo MKE. Primerjava je pokazala, da se strukturni model zelo dobro ujema z lastnimi frekvencami katere ustrezajo posameznim modalnim oblikam. Iz tabele 5.6 je razvidno, da sta se pri meritvi EMA dodatno pojavile prva in druga modalna oblika, ki jih pri rešitvi modela z MKE nismo zaznali. Podrobnejši opis postopka eksperimentalne modalne analize je opisan v poglavju 5.2.

Tabela 5.6: Tabelarična primerjava modalnih oblik in lastnih frekvenc

| Modalna oblika | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6    | 7    | 8    |
|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
| EMA [Hz]       | 205 | 463 | 652 | 754 | 899 | 1065 | 1190 | 1531 |
| MKE [Hz]       | /   | /   | 652 | 754 | 868 | 1062 | 1079 | 1529 |

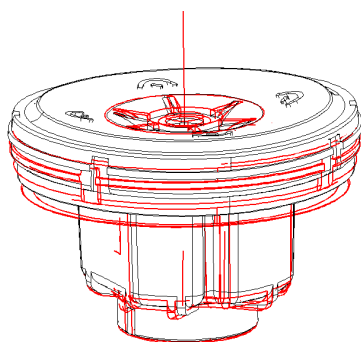


(a) FEM izračun.

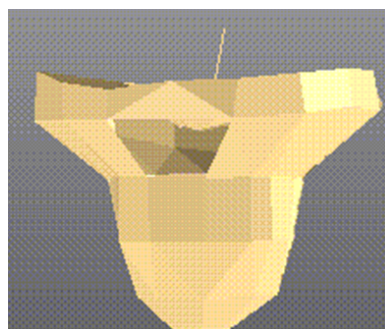


(b) EMA

Slika 5.5: Tretja modalna oblika pri 652 Hz.

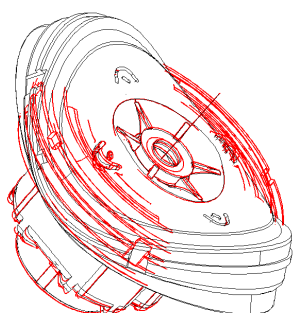


(a) FEM izračun.

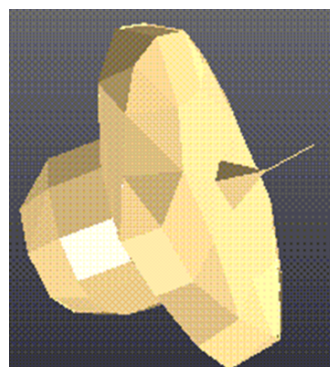


(b) EMA

Slika 5.6: Četrta modalna oblika pri 754 Hz.

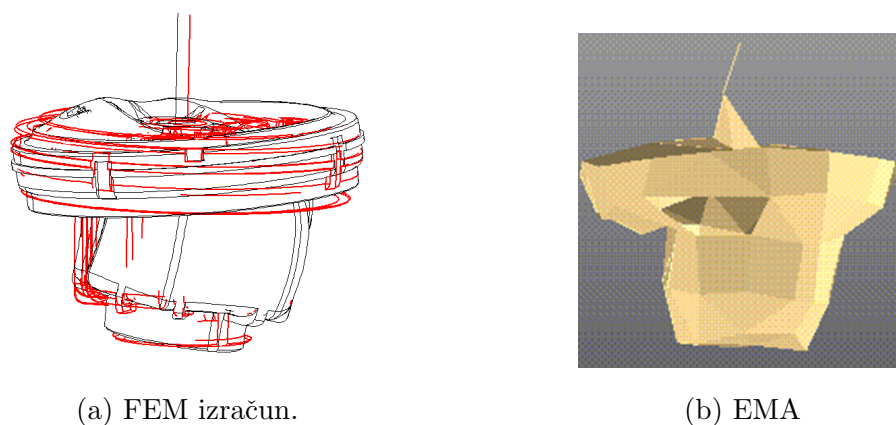


(a) FEM izračun.



(b) EMA

Slika 5.7: Šesta modalna oblika pri 1065 Hz.



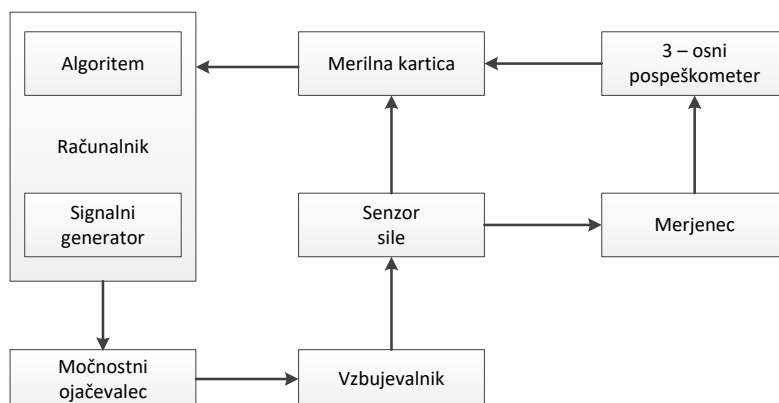
Slika 5.8: Osmo modalna oblika pri 1531 Hz.

## 5.2 Modalno testiranje

Modalno testiranje je postopek pridobitve dinamskega modela, pri katerem določimo dinamske parametre kot so lastne frekvence, modalne oblike in modalno dušenje. Eksperimentalna modalna analiza (EMA) temelji na eksperimentalni določitvi frekvenčnih prenosnih funkcij iz katerih so dinamski parametri določeni z identifikacijskimi metodami. Najpogostejša identifikacijska metoda je SISO (angl. Single-Input Single-Output), pri kateri je struktura vzbuja na enem mestu in tudi meritev odziva je na enem mestu. V primerih, ko je struktura kompleksnejša in visoko dušena, SISO metoda ni primerna. V takšnih primerih je potrebno uporabiti MIMO metode (angl. Multi-Input Multi-Output) pri katerih je struktura vzbuja na več lokacijah hkrati [11].

### 5.2.1 Način merjenja

Za izvedbo eksperimentalne modalne analize potrebujemo ustrezno merilno opremo, katera nam omogoča generiranje in zajem potrebnih signalov. Splošna blokovna shema merilne verige za EMA je prikazana na sliki 5.9. Blokovna shema je sestavljena iz treh sklopov.



Slika 5.9: Blokovna shema EMA

Prvi sklop predstavlja vzbujevalni mehanizem, ki služi vzburjanju merjene strukture. Za vzburjanje je najpogostejše uporabljen elektromagnetni ali elektrohidravlični stresalnik, ki omogoča vzburjanje strukture s poljubno amplitudo in frekvenco. Stresalnik uporabljamo za vzburjanje večjih kompleksnejših struktur pri katerih moramo zaradi povečanega dušenja dovesti dovolj energije, da dosežemo zadovoljiv odziv. Pri strukturah, ki so enostavnejše lahko za vzburjanje uporabimo modalno kladivo.

Drugi sklop imenujemo zaznavalni mehanizem, katerega sestavljajo senzorji, ki zaznavajo odziv merjene strukture. Za zajem signalov so najpogostejše uporabljeni piezoelektrični senzorji, ki so namenjeni merjenju sil in pospeškov.

Zadnji sklop je namenjen zajemu in obdelavi zajetih signalov. Signale senzorjev s pomočjo merilne kartice zajamemo in jih s pomočjo računalniškega algoritma (hitre Fourierove transformacije FFT) obdelamo [12].

### 5.2.2 Vpetje merjenja

Eksperimentalna modalna analiza omogoča, da lahko izbiramo med tremi vrstami vpetja. Izbira vpetja nam določa kompleksnost oz. enostavnost analize ter ka-

sneje primerjavo z numeričnim modelom. Merjenec lahko obesimo na zelo prožne vzmeti, ga pritrdimo na togo podlago ali ga vgradimo v operativno okolje. Vsak način vpetja ima svoje prednosti in slabosti.

Vgradnja merjenja v operativno okolje je priročna takrat, ko nam zunanji gabariti merjenja ne omogočajo izvedbe EMA v laboratoriju ali ko želimo izvesti testiranje v realnih pogojih. Slaba stran te metode je kompleksnejši numerični model in zahtevno definiranje robnih pogojev.

Pritrditev merjenja na togo podlago je uporabna v primeru, ko želimo testirati vpliv togega vpetja na vrednosti lastnih frekvenc in modalnih oblik. Nastavitev togih robnih pogojev v numeričnem modelu je enostavna, vendar je v obzir potrebno vzeti dejstvo, da v realnosti ni nobena podlaga idealno toga.

Najpogosteje se za vpetje merjenja uporabi prožne vzmeti ali vrvice, na katerih je obešena merjena struktura. Na ta način so doseženi t. i. prosto-prosti robni pogoji, ki jih enostavno definiramo tudi v numeričnem modelu. Vpliv vzmeti ali vrvic je najpogosteje zanemarljiv, čeprav lahko v manjši meri vplivajo na izmerjene dinamske parametre [12].

### 5.2.3 Vzbujanje merjenja

Merjene strukture lahko vzbujaamo na več načinov. Prvi način je z vzbujanjem, ki nastane med obratovanjem strukture v njenem delovnem okolju. Struktura je na ta način vzbujaana s periodičnim signalom, ki vsebuje naključen šum. Drugi način je z uporabo t. i. modalnega kladiva. To je kladivu podobna naprava, na katero je pritrjen silomer, ki meri časoven potek sile v konici kladiva. Modalno kladivo je namenjeno impulznemu vzbujanju merjene strukture. Tretji način vzbujanja je izveden z uporabo stresalnika, ki omogoča vzbujanje sistema s harmonično ali naključno motnjo. Glede na območje v katerem želimo vzbuditi strukturo, izberemo ustrezen signal vzbujanja:

- Kadar nas zanima odziv strukture pri točno določeni frekvenci, izberemo

vzbujanje s harmoničnim signalom z vnaprej definirano frekvenco. Ta način nam omogoča, da v strukturo vnesemo dovolj energije, ki je potrebna za vzbujanje struktur, ki so visoko dušena.

- Pri začetnih testiranjih, ko lastnosti strukture še niso znane, uporabimo vzbujanje s harmoničnim signalom s preletom frekvenčnega intervala. Na ta način vzbudimo strukturo na širšem frekvenčnem območju in dobimo jasen odziv pri določenih frekvencah. Slabost te metode je, da zaradi kratkega vnosa energije pri določeni frekvenci lahko ne pride do odziva.

- Kadar želimo vzbuditi vse frekvence hkrati in jim dovesti dovolj energije, uporabimo vzbujanje z naključnim signalom (beli šum). Pomembno je, da se signal ne spreminja tekom meritve [12].

Za prenos vibracij iz stresalnika na merjeno strukturo se uporablja kovinska ali plastična palica, lahko pa tudi jeklena pletenica s plastičnim ovojem. Glavna funkcija prenosnika vibracij je dinamska razklopitev stresalnika od merjene strukture. Prenosnik vibracij mora biti tog v aksialni smeri, ker lahko s senzorjem sile merimo sile samo v aksialni smeri in pa mora imeti majhno upogibno togost, saj s tem zmanjšamo vpliv prečnih sil in momentov na samo meritev [12].

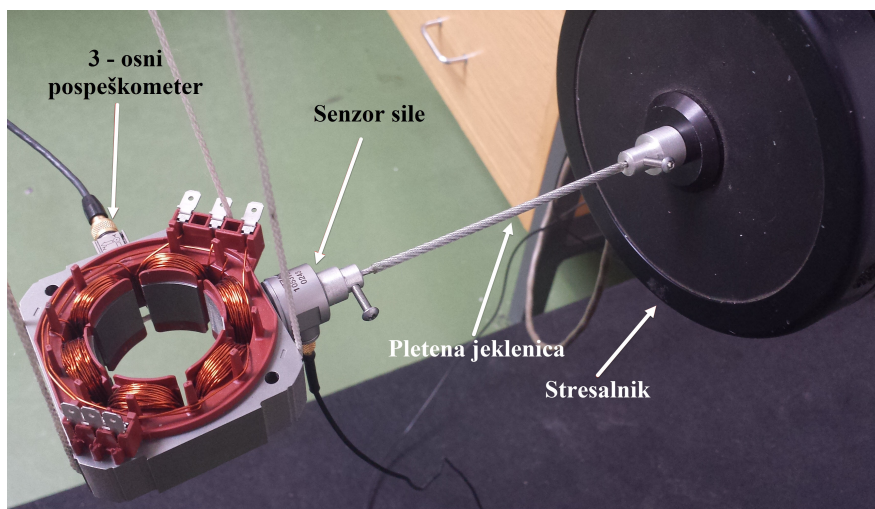
#### **5.2.4 Validacija strukturnega modela z eksperimentalno modalno analizo**

Vse EMA, ki so bile opravljene za potrebe validacije strukturnega modela sesalne enote, so bile opravljene po metodi SISO. Vse analizirane strukture so bile v eni točki preko prenosnika vibracij (jeklene pletenice) vzbujane z elektromagnetnim stresalnikom, pri čemer se je odziv s pomočjo 3-osnega pospeškometra opazoval v posameznih točkah na strukturi. Posamezne merjene strukture in elektromagnetni stresalnik so bili obešeni na vrvicah, s tem smo zagotovili prosto-proste robne pogoje, katere smo nastavili tudi v našem numeričnem modelu. Postavitev merjenja in stresalnika je prikazana na sliki 5.10. Meritev se je nadzorovala z namensko izdelanim programom za zajem in obdelavo podatkov v okolju LabVIEW,

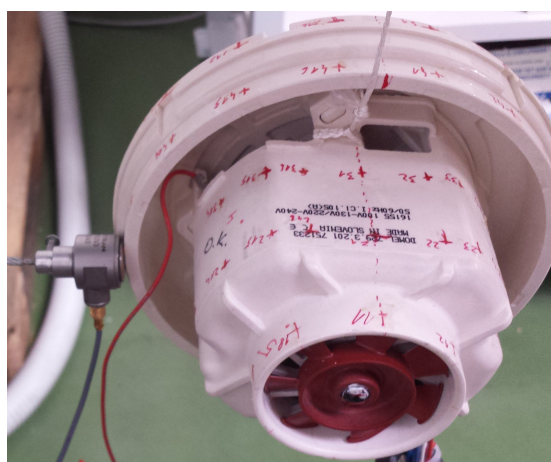
ki skrbi za generiranje vzbujačnega signala za stresalnik. Poleg tega, program zajema signala iz pospeškometra in senzorja sile, ki ju v nadaljevanju algoritem uporabi za izračun frekvenčne prenosne funkcije. Za potrebe vizualizacije modalnih oblik, smo frekvenčne prenosne funkcije pomerili v naprej določenih točkah na strukturi (5.11). Za obdelavo podatkov in vizualizacijo je bil uporabljen namenski program, v katerega vnesemo meritve frekvenčnih prenosnih funkcij v posameznih točkah. Posameznim prenosnim funkcijam je potrebno definirati koordinate, ki opisujejo mesto pospeškometra med meritvijo. Program glede na odzive, ki so prisotni v posameznih točkah na strukturi izdela animacijo modalnih oblik.

Seznam merilne opreme, ki je bila uporabljena pri EMA:

- Prenosni računalnik s programsko opremo.
- Močnostni ojačevalec Bruel & Kjaer Type 2706
- Elektromagnetni stresalnik Bruel & Kjaer Type 4809
- Senzor sile Dytran instruments 1053V3
- 3-osni pospeškometer Teds
- Izhodni modul National Instruments NI-9263
- Vhodni modul National Instruments NI-9230



Slika 5.10: EMA statorskega paketa.

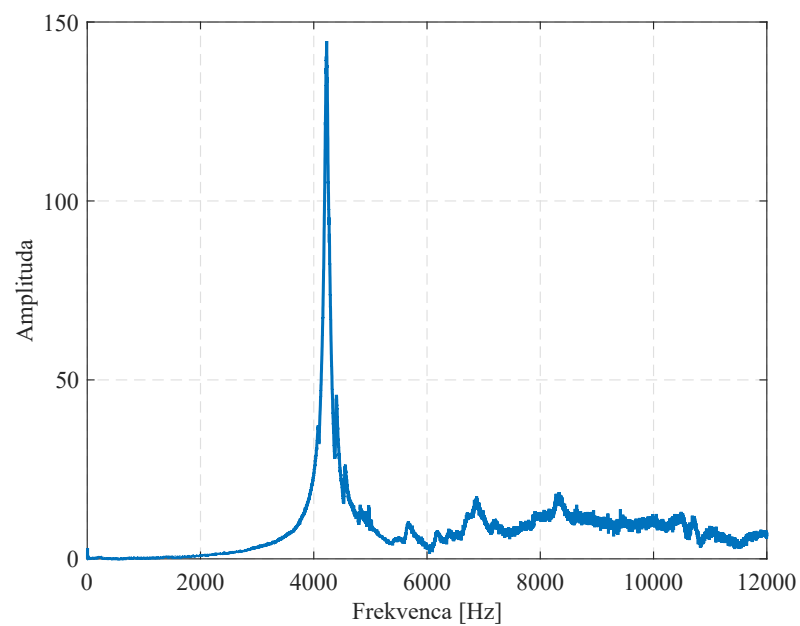


Slika 5.11: EMA celotnega sestava.

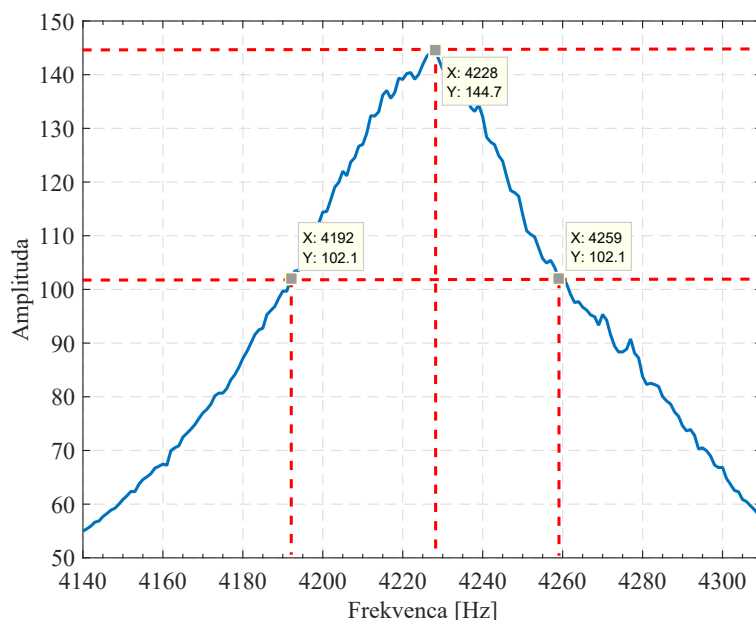
Na sliki 5.12 je prikazan primer izmerjene prenosne funkcija tišjega statorskega paketa. Iz meritev je jasno vidna vrednost prve lastne frekvence pri 4228 Hz. Poleg lastnih frekvenc smo iz meritev določili tudi faktor dušenja, ki smo ga potrebovali pri izračunu vibracij. Faktor dušenja smo določili s t.i. 3 dB metodo, ki je bila uporabljena tudi v članku [13]. Faktor dušenja izračunamo po enačbi 5.2, pri čemer vrednosti frekvenc  $f_1$ ,  $f_2$  in  $f_{res}$  razberemo iz pomerjene prenosne funkcije (Slika 5.12 in 5.13). Faktor dušenja za statroski paket z navitjem znaša

0,79%. Če primerjamo faktor dušenja, ki je izračunan iz empirične enačbe 5.1 in za resonančno frekvenco 4228 Hz znaša 2,8%, ter faktor dušenja dobljen iz EMA, vidimo opazno razliko med vrednostima.

$$\zeta = \frac{f_2 - f_1}{2f_{res}} \quad (5.2)$$



Slika 5.12: Frekvenčna prenosna funkcija tišjega statorskega paketa.

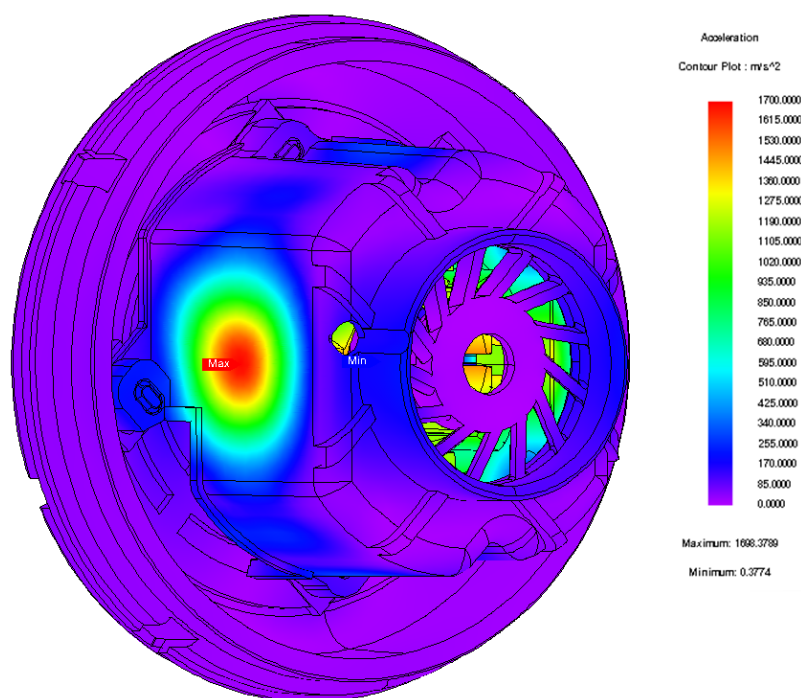


Slika 5.13: Podrobnejši pogled na frekvenčno prenosno funkcijo.

### 5.3 Vibracijska analiza

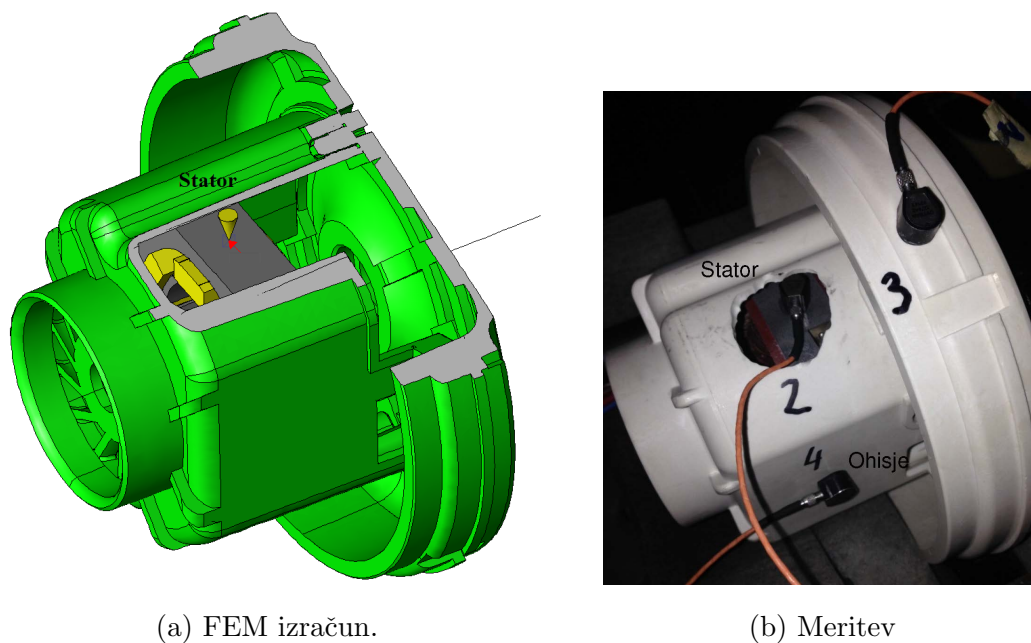
Naslednji korak v strukturni analizi je izračun strukturnega odziva. V tem koraku je bilo najprej potrebno prenesti magnetne vzbujevalne sile iz elektromagnetnega modela na strukturni model. Pred prenosom je potrebno definirati mesto v strukturnem modelu kamor se bodo prenesle magnetne sile. Prenos magnetnih sil program izvede avtomatsko, pri čemer jih pretvori iz časovne domene v frekvenčno domeno. Po končanem prenosu je potrebno nastaviti še reševalnik (ang. Solver). Definirati je potrebno korak ter frekvenčno območje v katerem se izvede izračun. V programu je potrebno nastaviti tudi vrednost dušenja, ki ga lahko definiramo različno za posamezne diskretne frekvence oz. konstantno za celotno frekvenčno območje. Ker smo v našem primeru imeli podatek o dušenju samo za eno resonančno frekvenco statorskega paketa smo nastavili konstantno vrednost dušenja za celotno frekvenčno območje izračuna. Na sliki 5.14 je prikazan rezultat izračuna strukturnega odziva. Prikazan je primer pri resonančni frekvenci statorskega paketa. Rdeča barva označuje območje z najvišjimi amplitudami vi-

bracij, vijolična barva pa območje z najnižjimi amplitudami vibracij. Rezultat se ujema s pričakovanjem, da so največje amplitude vibracij prisotne na območju stika ohišja s statorskim paketom.



Slika 5.14: Barvni prikaz rezultatov izračuna vibracij pri resonančni frekvenci statorskega paketa.

Ker se meritev vibracij razlikuje glede na pozicijo senzorja na merjencu, smo v našem modelu postavili senzor na identično mesto kot je bil pozicioniran pri meritvi na prototipu (slike 5.15). Na ta način smo lahko neposredno primerjali rezultate izračuna in meritev. Obratovalni pogoji v modelu so bili nastavljeni že pri elektromagnetni analizi, kjer smo nastavili vrtilno hitrost na  $25000 \text{ min}^{-1}$ , ter tok prostega teka na 0,71A. Ti obratovalni pogoji so bili definirani na podlagi meritev prototipa.

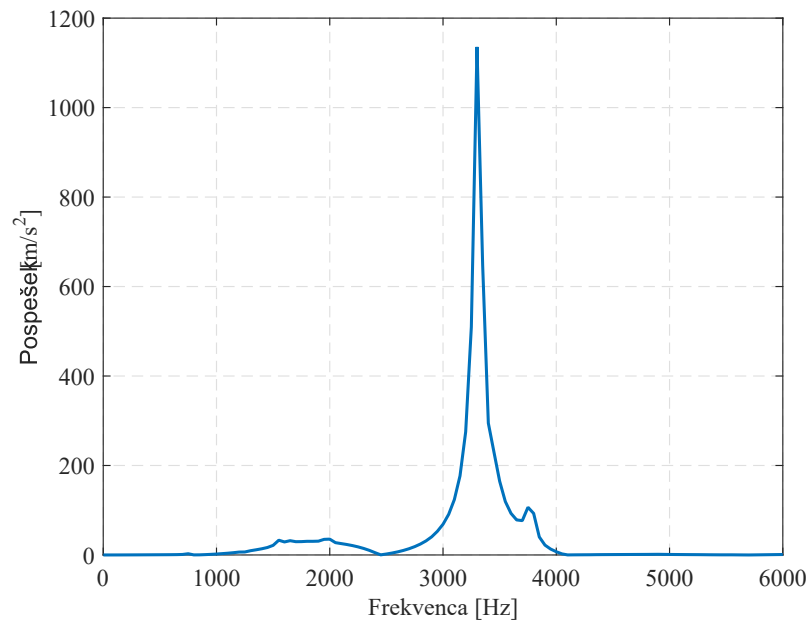


(a) FEM izračun.

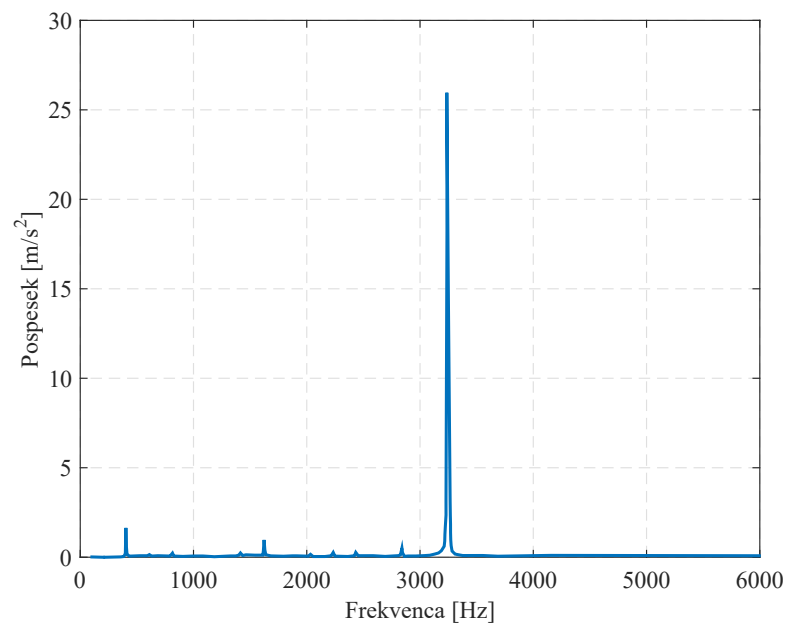
(b) Meritev

Slika 5.15: Pozicija senzorjev v 3D modelu in prototipu

Rezultat simulacije je prikazan na sliki 5.16. Razvidno je, da pri frekvenci 3300 Hz pride do resonance, saj amplituda vibracij močno naraste. Ugotovimo lahko, da se resonančna frekvenca satorja nahaja ravno v območju osmega večkratnika vrtilne frekvence, kar privede do močnega odziva. Podoben odziv se je pokazal tudi pri meritvi vibracij na prototipu. Frekvenčni spekter meritve vibracij na statorskem paketu je prikazan na sliki 5.17. Viden je močen odziv pri frekvenci 3332 Hz.

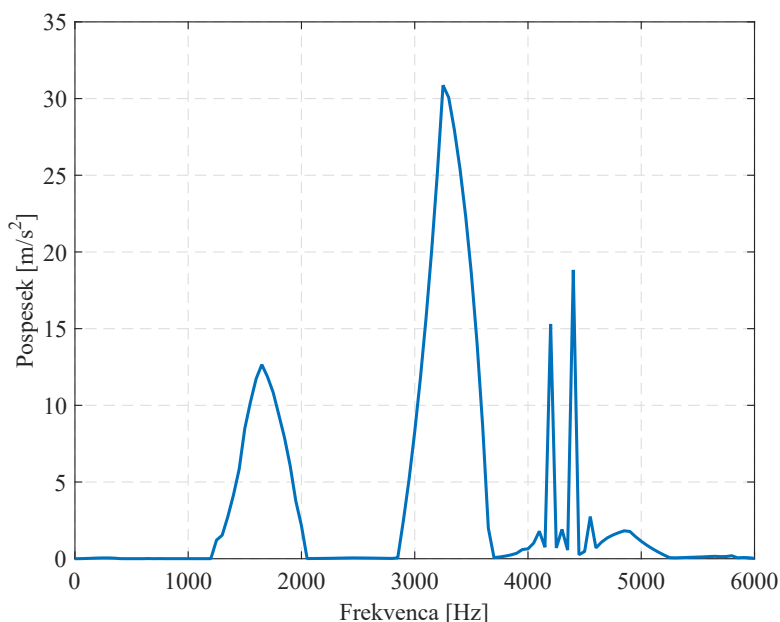


Slika 5.16: Izračun vibracij sesalne enote s hrupnim statorskim paketom v x-smeri.



Slika 5.17: Meritev vibracij na sesalni enoti s hrupnim statorskim paketom v x-smeri.

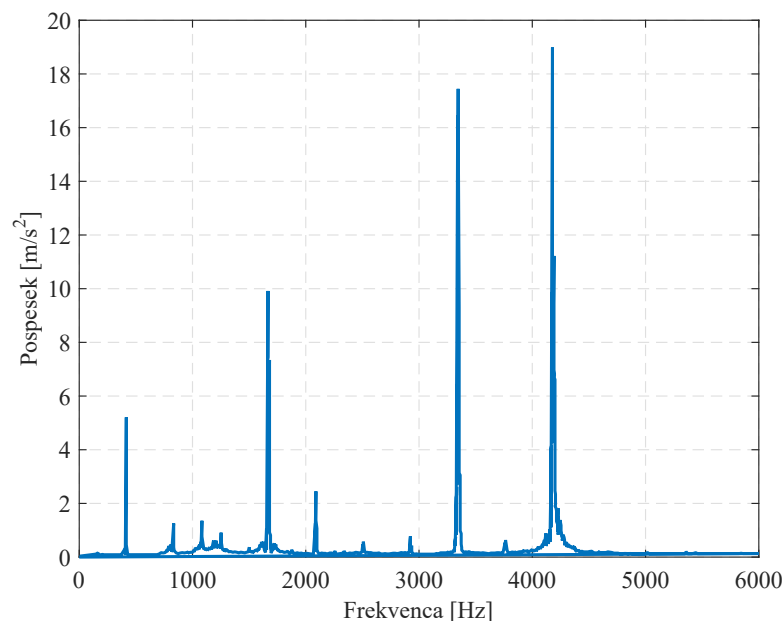
Enako simulacijo smo izvedli za primer sesalne enote s tišjim statorskim paketom. Tukaj je bila prav tako predhodno izvedena elektromagnetna analiza pri  $25000 \text{ min}^{-1}$  vrtljajih ter toku prostega teka  $0,71 \text{ A}$ . Pri vibracijski analizi smo prav tako nastavili konstantno dušenje čez celotno frekvenčno področje. Rezultat analize je prikazan na sliki 5.18. Opaziti je, da je odziv pri osmem večkratniku vrtilne frekvenca ( $3332 \text{ Hz}$ ), znatno manjši, kar je posledica dviga lastnih frekvenc statorskega paketa. Dodatno so se pojavile vibracije v območju lastnih frekvenc statorskega paketa, vendar po amplitudi ne izstopajo.



Slika 5.18: Izračun vibracij sesalne enote s tišjim statorskim paketom v x-smeri.

Slika 5.19 prikazuje izmerjene vrednosti vibracij na statorskem paketu tišje sesalne enote. V primerjavi z rezultati meritev vibracij sesalne enote s hrupnim statorskim paketom (Slika 5.17), kjer je nastopal izrazit vrh vibracij pri  $3332 \text{ Hz}$ , v tem primeru spekter vibracij vsebuje več izrazitih vrhov, ki se nahajajo pri  $416,6 \text{ Hz}$  (vrtilna frekvenca),  $1666 \text{ Hz}$  (4 kratnik vrtilne frekvenca),  $3332 \text{ Hz}$  (8 kratnik vrtilne frekvenca) in  $4178 \text{ Hz}$  (resonančna frekvenca statorskega paketa). Kljub temu, da frekvenčni spekter vibracij vsebuje nekaj izrazitih vrhov, pri obratovanju

sesalne enote ni slišen kakršen koli izrazit pisk, kakor je bilo v primeru sesalne enote s hrupnim statorskim paketom.



Slika 5.19: Meritev vibracij na sesalni enoti s tišjim statorskim paketom v x-smeri.

Iz zadnjih primerjav izračunov in meritev je razvidno relativno dobro ujemanje izračunov z meritvami vibracij na statorskem paketu. S tem lahko potrdimo, da je sklopljen model ustrezen z vidika direktne primerjave vpliva konstrukcijskih rešitev na frekvenčni spekter vibracij. V kolikor bi model v nadaljevanju uporabili še za akustično analizo, bi bilo potrebno najprej ustrezno definirati koeficiente dušenj posameznim konstrukcijskim elementom, kateri v veliki meri vplivajo na amplitude vibracij pri morebitnih resonančnih frekvencah.

## 6 Zaključek

Na področju vibroakustičnih simulacij se v zadnjih letih pojavlja vse več programskih paketov, ki se med seboj razlikujejo glede na fizikalno območje, ki ga pokrivajo. Nekateri iz med njih pokrivajo samo del več-fizikalnega problema vibroakustike električnih strojev. Na trgu tako najdemo kar nekaj programov, ki so specializirani za elektromagnetne simulacije. Večina njih že omogoča sklopitev oz. izvoz fizikalnih količin v ustrezni obliki v programe, ki so v prvi vrsti namenjeni strukturnim oz. vibroakustičnim simulacijam. Na trgu tako najdemo tudi ponudnike programskih paketov, ki omogočajo izračun več-fizikalnih problemov in omogočajo enostaven prehod med fizikalnimi problemi, kar pripomore k hitrejši poti do želenih rezultatov.

Program JMAG Designer, katerega smo uporabili za izračun elektromagnetnih vibracij omogoča analizo več-fizikalnega problema vibroakustike električnih strojev. Omogoča enostaven in zanesljiv prehod med različnimi fizikalnimi analizami, kar je tudi nas brez večjih težav pripeljalo do želenih rezultatov.

Cilj magistrskega dela je bil, v večji meri, dosežen. Rezultati izračunov kažejo na relativno dobro ujemanje rezultatov, ki so bili v praksi dokazani na primeru EC sesalne enote. Seveda pa moramo v obzir vzeti dejstvo, da je bilo tekom gradnje sklopljenega modela sprejetih kar nekaj poenostavitev, ki v končni fazi vplivajo na rezultate izračuna vibracij. Ena iz med poenostavitev je, da program ne omogoča definiranja več koeficientov dušenja glede na posamezen sklop modela, temveč ga lahko definiramo samo celotnemu sestavu. Zaradi tega pride do odstopanj pri vrednotenju vibracij, katera pravilnost je ključna za pravilno napovedovanja

nivoja hrupa.

Največ možnosti za nadaljnje delo vidimo v izboljšanju strukturnega modela, ki je pomemben člen v verigi napovedovanja vibracij in hrupa. Šele z ustreznim strukturnim modelom se lahko bolj natančno posvetimo raziskovanju vpliva nekaterih električnih, magnetnih in mehanskih lastnosti, kot so npr. pulzno širinska modulacija, magnetne nesimetrije, ekscentričnost itd.

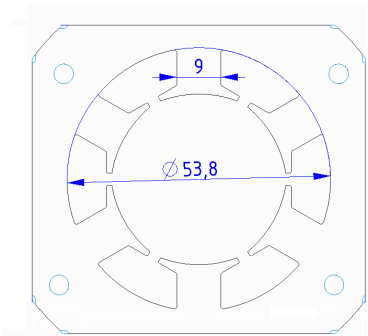
## Literatura

- [1] “Pravilnik o emisiji hrupa gospodinjskih strojev UL RS št. 13/2001 (28.2.2001). *Uradni List [Online]*.” Dosegljivo: <http://www.uradni-list.si/1/content?id=29824>. [Dostopano: 22.8.2016].
- [2] J. F. Gieras, C. Wang in J. C. Lai, *Noise of polyphase electric motors*. Boca Raton, FL: Taylor & Francis/CRC Press, 2005.
- [3] M. Čudina, *Tehnična akustika*. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo, 2014.
- [4] M. Furlan, “Karakterizacija magnetnega hrupa enosmernega elektromotorja,” doktorska dizertacija, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, 2003.
- [5] D. Miljavec in P. Jereb, *Električni stroji: temeljna znanja*. Ljubljana: Založba FE in FRI, 2008.
- [6] A. Černigoj, “Minimizacija nihanja vrtilnega momenta sinhronskega motorja s trajnimi magneti,” magistrsko delo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, 2006.
- [7] J. Pyrhonen, T. Jokinen in V. Hrabovcova, *Design of rotating electrical machines*. United Kongdom: John Wiley & Sons, druga izd., 2014.
- [8] P. Jereb in D. Miljavec, *Vezna teorija električnih strojev*. Ljubljana: Fakulteta za elektrotehniko, 2009.

- 
- [9] T. Hattori, "Starting with vibration wise analyses Vol. 1." Dosegljivo: <https://www.jmag-international.com/newsletter/201401/05.html>. [Dostopano: 23.9.2015].
- [10] M. Tadina, "Analiza ojačitev statorskega paketa. *Interno gradivo podjetja Domel*." [3.4.2015].
- [11] "Eksperimentalna modalna analiza z več vzbujanj in več meritev odziva hkrati. *Laboratorij za dinamiko strojev in struktur [Online]*." Dosegljivo: LADISK, <http://lab.fs.uni-lj.si/ladisk/?what=abstract&ID=89>. [Dostopano: 23.9.2017].
- [12] B. Lampič, "Numerična in eksperimentalna modalna analiza elektromotorja spoke 240," magistrsko delo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, 2017.
- [13] H. Yang in Y. Chen, "Influence of Radial Force Harmonics With Low Mode Number on Electromagnetic Vibration of PMSM. *IEEE Transactions on Energy Conversion [Online]*." Dosegljivo: IEEE Xplore, <http://www.ieeeexplore.ieee.org>. [Dostopano: 20.1.2016].

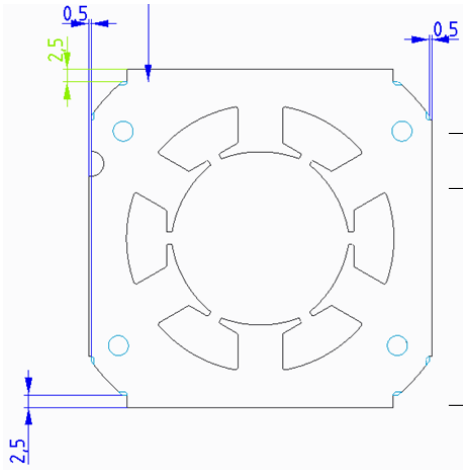
# Dodatek

# A Lastne frekvence



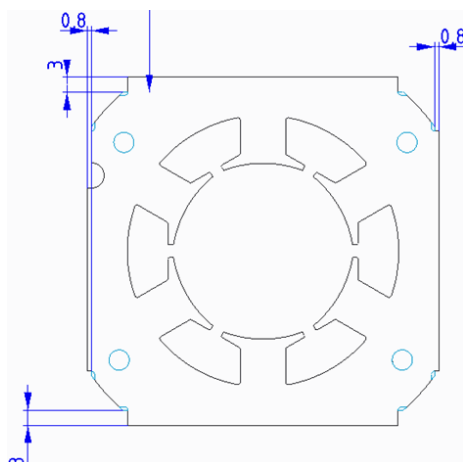
| Modalna oblika | Lastna frekvenca [Hz] |
|----------------|-----------------------|
| 1              | 3239                  |
| 2              | 3924                  |
| 3              | 4707                  |
| 4              | 7792                  |

Slika A.1: Izhodiščna geometrija



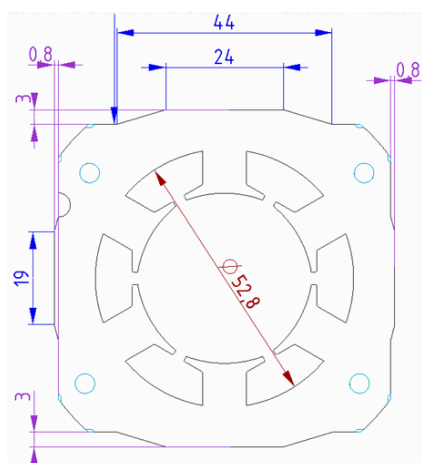
| Modalna oblika | Lastna frekvenca [Hz] |
|----------------|-----------------------|
| 1              | 3795                  |
| 2              | 4752                  |
| 3              | 5225                  |
| 4              | 8422                  |

Slika A.2: Sprememba št. 1



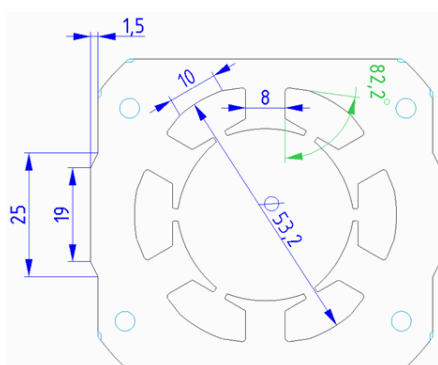
| Modalna oblika | Lastna frekvenca [Hz] |
|----------------|-----------------------|
| 1              | 3952                  |
| 2              | 4887                  |
| 3              | 5346                  |
| 4              | 8354                  |

Slika A.3: Sprememba št. 2



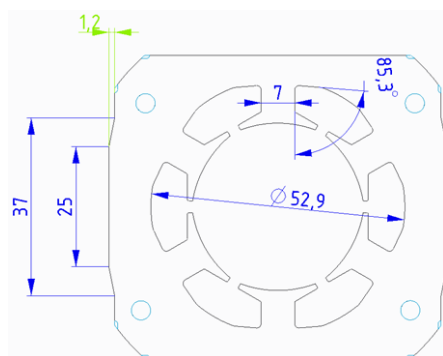
| Modalna oblika | Lastna frekvenca [Hz] |
|----------------|-----------------------|
| 1              | 3935                  |
| 2              | 4672                  |
| 3              | 5609                  |
| 4              | 8329                  |

Slika A.4: Sprememba št. 3



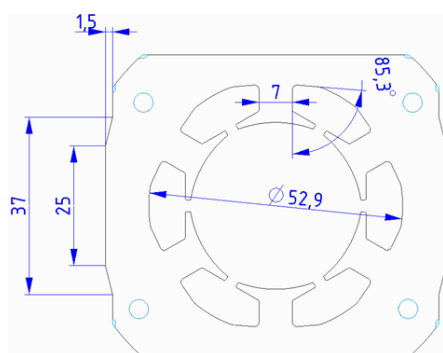
| Modalna oblika | Lastna frekvenca [Hz] |
|----------------|-----------------------|
| 1              | 4022                  |
| 2              | 4350                  |
| 3              | 5304                  |
| 4              | 8403                  |

Slika A.5: Sprememba št. 4



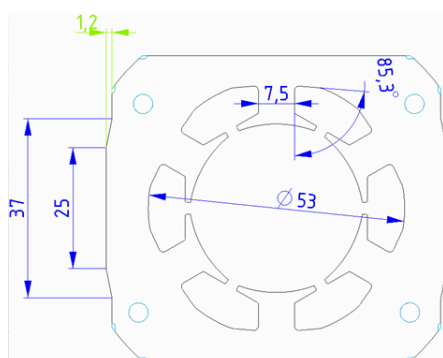
| Modalna oblika | Lastna frekvenca [Hz] |
|----------------|-----------------------|
| 1              | 4178                  |
| 2              | 4594                  |
| 3              | 5316                  |
| 4              | 8582                  |

Slika A.6: Sprememba št. 5



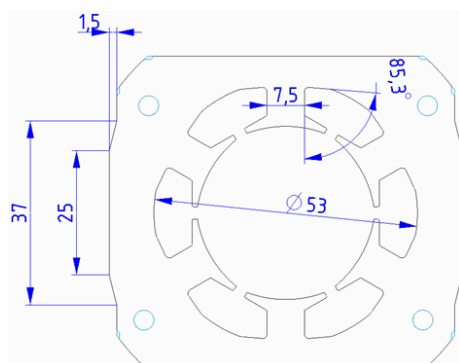
| Modalna oblika | Lastna frekvenca [Hz] |
|----------------|-----------------------|
| 1              | 4265                  |
| 2              | 4604                  |
| 3              | 5376                  |
| 4              | 8519                  |

Slika A.7: Sprememba št. 6



| Modalna oblika | Lastna frekvenca [Hz] |
|----------------|-----------------------|
| 1              | 4150                  |
| 2              | 4556                  |
| 3              | 5317                  |
| 4              | 8564                  |

Slika A.8: Sprememba št. 7



| Modalna oblika | Lastna frekvenca [Hz] |
|----------------|-----------------------|
| 1              | 4237                  |
| 2              | 4566                  |
| 3              | 5376                  |
| 4              | 8501                  |

Slika A.9: Sprememba št. 8