

UNIVERZA V LJUBLJANI

Fakulteta za strojništvo

**2. seminar pri predmetu Dinamika strojev
in konstrukcij**

1. letnik študijskega programa II. stopnje Strojništvo

Jaša Šonc

Ljubljana, junij 2022

Kazalo

Kazalo slik	1
1 Modalna analiza	4
1.1 Diskretizacija	4
1.2 Robni pogoji	5
1.3 Lastne frekvence	6
1.4 Lastne oblike	6
2 Harmonska analiza	9
2.1 Priprava volumskega modela	9
2.2 Diskretizacija	10
2.3 Robni pogoji	11
2.4 Modalna analiza	12
2.5 Določitev vzbujanja	13
2.6 Amplitudni in fazni spektri	13
3 Balansiranje	15
3.1 Merilna veriga	15
3.2 Obdelava podatkov	15
3.2.1 Filtriranje	16
3.2.2 Določitev amplitud in faznih zamikov	17
3.2.3 Balansiranje v imaginarni ravnini	17
4 Zagonski diagram	19
4.1 Analitični preračun lastnih frekvenc	19
4.2 Zagonski diagram	20

Kazalo slik

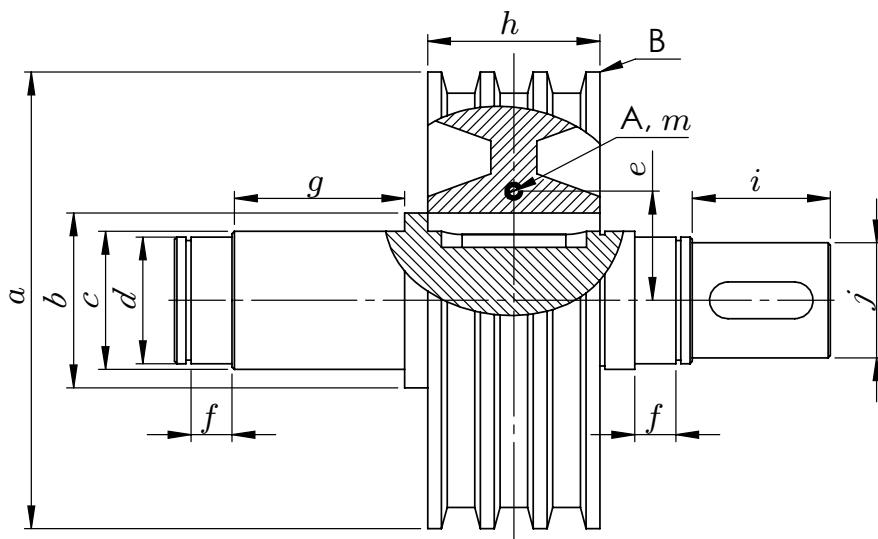
Slika 1.1:	Prikaz mrež iz obeh programov	5
Slika 1.2:	Robni pogoji	6
Slika 1.3:	Prikaz prvih šestih lastnih oblik.	8
Slika 2.1:	Poenostavljen model s particijami	10
Slika 2.2:	Mreža končnih elementov	11
Slika 2.3:	Cilindrične podpore modela	12
Slika 2.4:	Amplitudni in fazni spektri odziva v točki B	14
Slika 3.1:	Amplitudni spekter	16
Slika 3.2:	Filtrirani signali	17
Slika 3.3:	Vektorji	18
Slika 4.1:	Zagonski diagram jalove veje	20
Slika 4.2:	Zagonski diagram delovne veje	21

Jaša Šonc

23212125

DSKM - navodila za izdelavo 2. seminarja pri predmetu:

- Modalna analiza: S pomočjo paketa Ansys APDL ali Ansys Workbench izvedite modalno analizo linjske konstrukcije, ki ste jo obravnavali v okviru 1. seminarja pri predmetu. Zagotovite enake geometrijske in materialne lastnosti ter primerljivo gostoto mreže. Za prvih pet nihajnih načinov prikažite primerjavo lastnih frekvenc in lastnih oblik z rezultati lastnega preračuna.
- Harmonska analiza: S pomočjo paketa Ansys APDL ali Ansys Workbench izvedite harmonsko analizo gredi z jermenico. Izvedite ustrezno poenostavitev geometrije in zagotovite ustrezno podprtje gredi, kontakte med komponentami sestava ter ustrezno kvaliteto mreže. Vse korake predstavite in komentirajte. Predpostavite, da do harmonskega vzbujanja prihaja zaradi ekscentrične mase na jermenici (točka A). Določite amplitudni in fazni spekter odziva v točki B (za vse tri smeri). Manjkajoče geometrijske podatke smiselno izberite sami.



Parameter	Vrednost	Enota
E	210	GPa
ρ	7850	kg/m ³
m	25	g
a	123	mm
b	45	mm
c	36	mm
d	21	mm
e	7	mm
f	17	mm
g	67	mm
h	73	mm
i	50	mm
j	21	mm

- Laboratorijska vaja - balansiranje: Predstavite merilno verigo za izvedbo balansiranja na laboratorijski vaji. Izračunajte povprečno frekvenco vrtenja rotorja na opazovanem časovnem intervalu. Filtrirajte časovni signal tako, da izolirate motjo, ki je posledica debalansa rotorja. Določite amplitudo signala in fazni zamik amplitude glede na referenčni položaj pri frekvenci vrtenja rotorja za potrebe izračuna debalansa. Na utež smo namestili testno maso $m=2,8g$. Za testni zagon določite amplitudo in fazni zamik amplitude glede na referenčni položaj pri frekvenci vrtenja rotorja. Izračunajte maso in položaj korekcijske uteži. Postopek ponovite za obe ležajni mestni in primerjajte

rezultate.

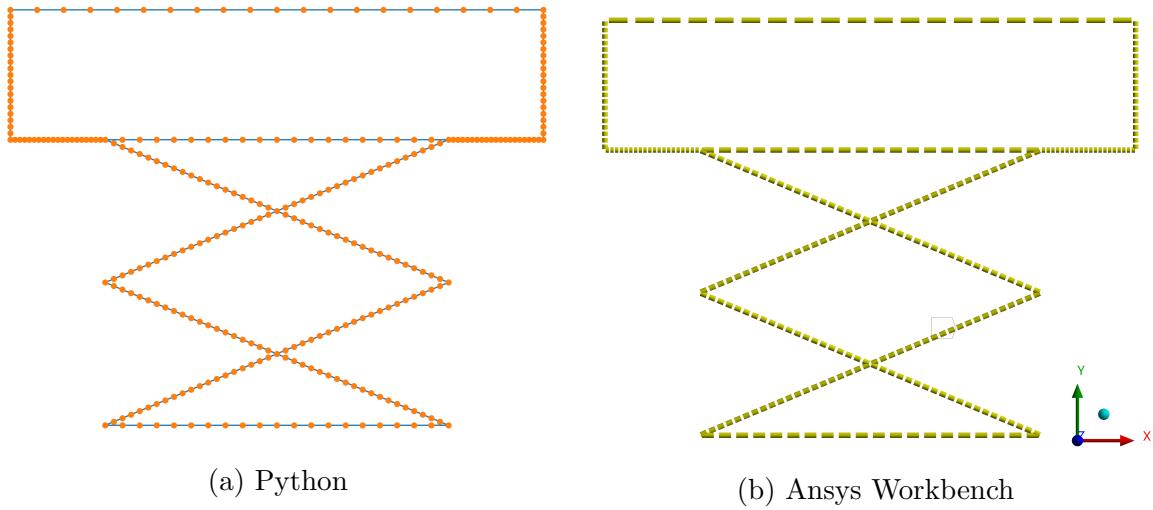
- Laboratorijska vaja - jermenska gonila: Izrišite zagonski diagam in na osnovi eksperimentalnih podatkov določite lastne frekvence jermenja. Pridobljene vrednosti primerjajte z rezultati analitičnega preračuna.

1 Modalna analiza

S pomočjo paketa Ansys Workbench izvedemo modalno analizo linijske konstrukcije, ki smo jo obravnavali že v okviru 1. seminarja pri predmetu. Za potrebe te primerjave sem nekoliko spremenil podatke pri izračunu v Pythonu, saj so bili v navodilih podani samo preseki in težiščni vztajnostni momenti prerezov. Zato sem namesto teh vrednosti vzel kvadratne profile, ki imajo vztrajnostni moment in presek podoben tistim v podatkih.

1.1 Diskretizacija

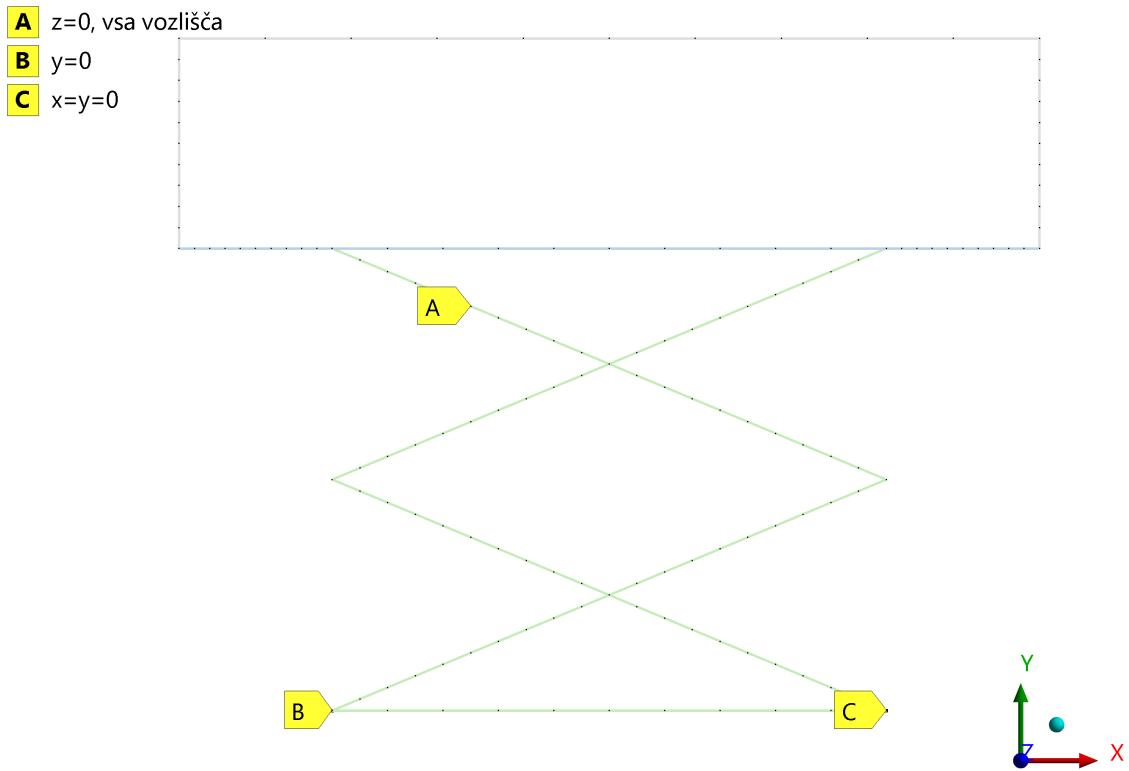
Linijski model je za preračun potrebno diskretizirati. Za ustrezno primerjavo rezultatov moramo v Ansys-u narediti čim bolj podobno mrežo tisti, ki smo jo naredili v Pythonu. Zaradi lažje implementacije je v Pythonu določeno konstantno število končnih elementov na posameznem konstrukcijskem elementu, ne glede na njegovo dolžino. Ansys v osnovni generira mrežo s konstantno velikostjo posameznega elementa, zato s pomočjo orodja 'Edge Sizing' določimo enako število elementov na vsakem delu konstrukcije. Obe mreži z 20 elementi na odsek, sta prikazani na sliki 1.1.



Slika 1.1: Prikaz mrež iz obeh programov

1.2 Robni pogoji

Za modalno analizo je potrebno določiti ustrezne robne pogoje. Ker je linijska konstrukcija v programskem okolju Ansys workbench v osnovi v 3D prostoru, nas pa zanima le dogajanje v x-y ravnini, najprej v vseh vozliščih na konstrukciji omejimo pomik v z-smeri. Nato določimo še robne pogoje na obeh podporah v spodnjih kotih konstrukcije. Na levi podpori skladno z navodili vpnemo samo pomike v y smeri, na desni podpori pa vpnemo pomike v x in y smeri. Robni pogoji so prikazani na sliki 1.2:



Slika 1.2: Robni pogoji

1.3 Lastne frekvence

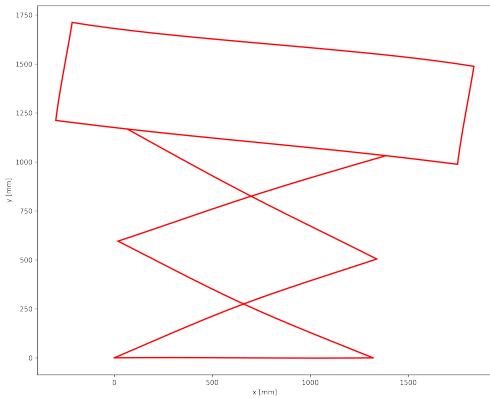
Ko določimo vse potrebne podatke, poženemo preračun in dobimo lastne frekvence, prikazane v 1.1. Primerjamo lastne frekvence, dobljene s Pythonom in Ansysom in ugotovimo, da dobro sovpadajo. pride le do manjših odstopanj na drugi ali tretji decimalki.

Lastna frekvencia:	Python	Ansys
1.	5,731 Hz	5,725 Hz
2.	9,823 Hz	9,820 Hz
3.	13,001 Hz	13,997 Hz
4.	17,877 Hz	17,845 Hz
5.	18,344 Hz	18,333 Hz

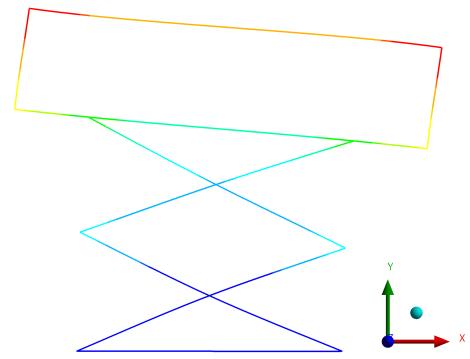
Preglednica 1.1: Primerjava lastnih frekvenc, dobljenih z obema programoma

1.4 Lastne oblike

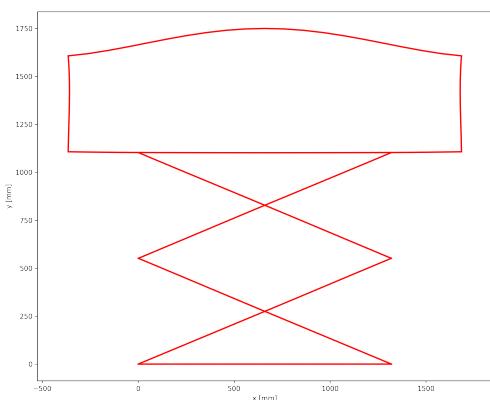
Za prvih pet nihajnih načinov določimo lastne oblike. Prikazane so na sliki 1.3. Pomike za prikaz skaliramo enako. Vidimo, da rezultati dobro sovpadajo.



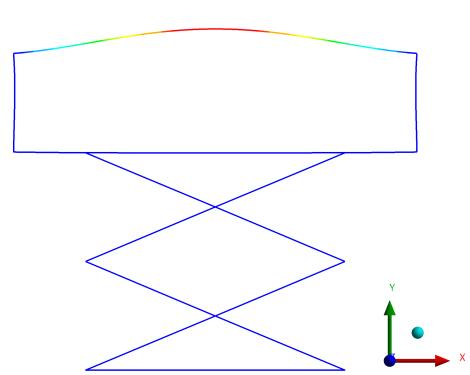
(a) 1. lastna oblika (Python)



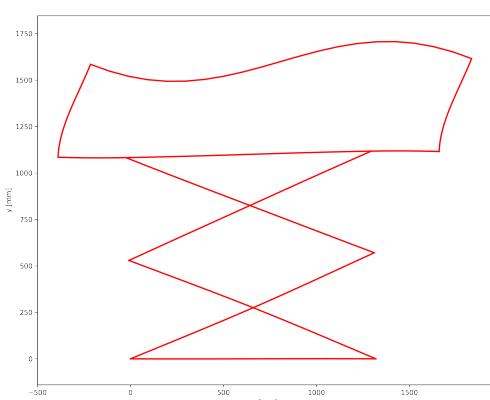
(b) 1. lastna oblika (Ansys)



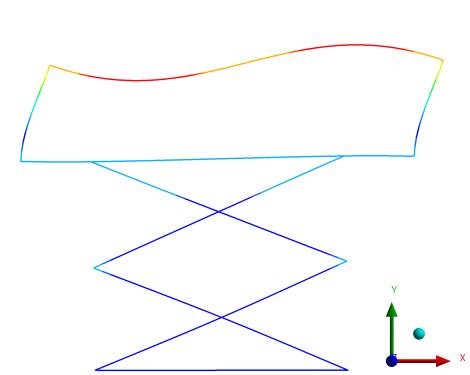
(c) 2. lastna oblika (Python)



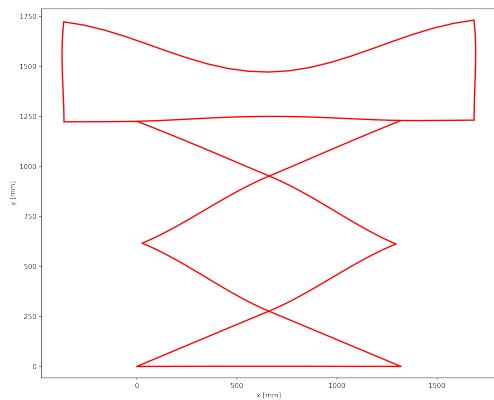
(d) 2. lastna oblika (Ansys)



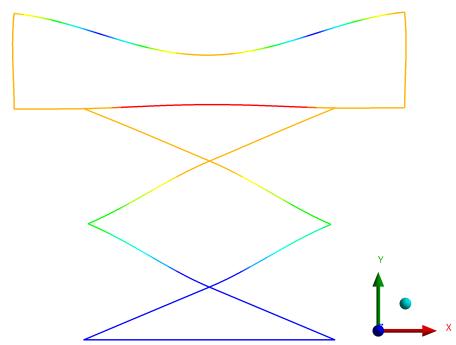
(e) 3. lastna oblika (Python)



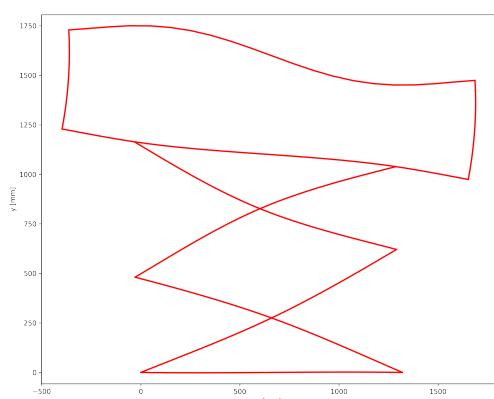
(f) 3. lastna oblika (Ansys)



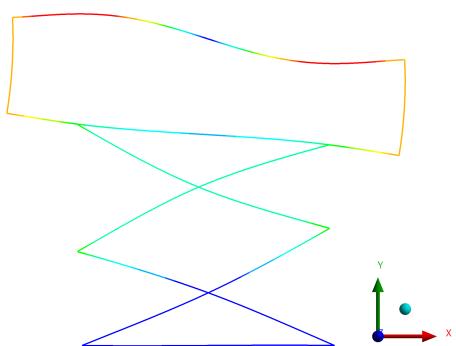
(g) 4. lastna oblika (Python)



(h) 4. lastna oblika (Ansys)



(i) 5. lastna oblika (Python)



(j) 5. lastna oblika (Ansys)

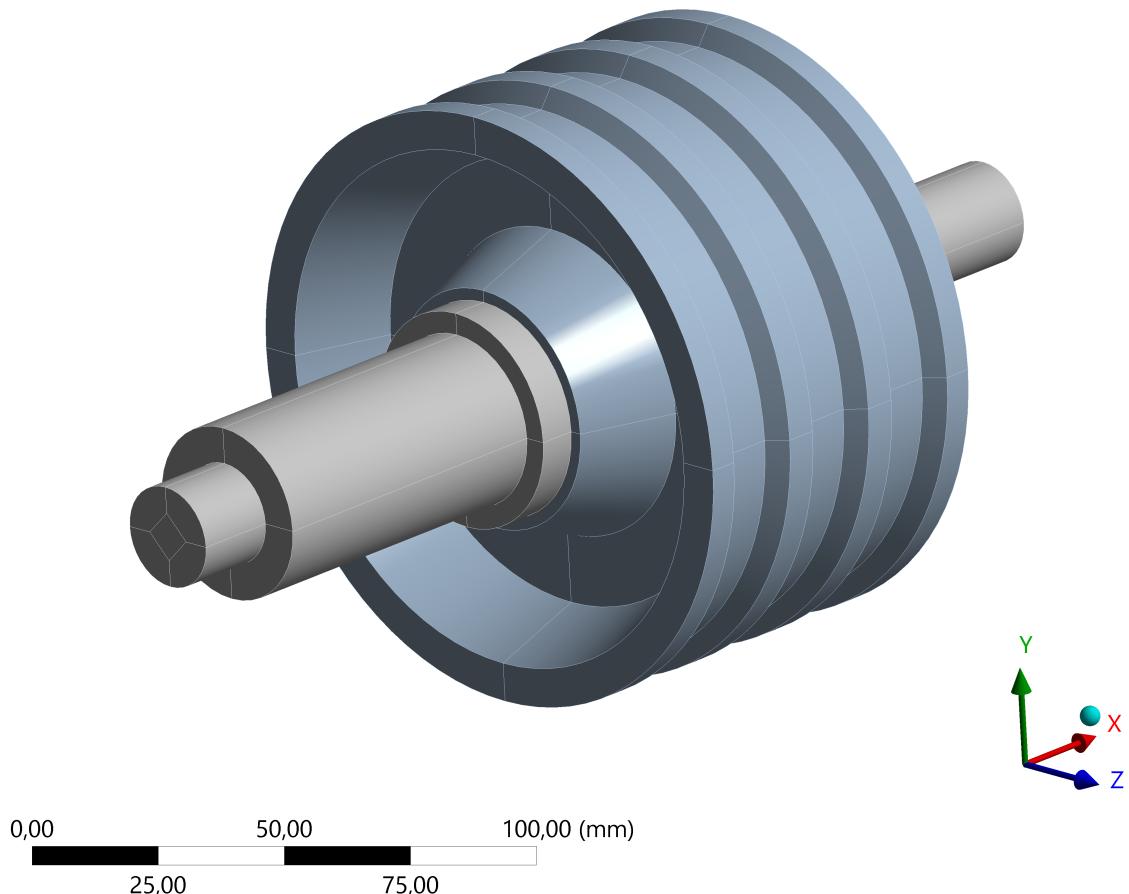
Slika 1.3: Prikaz prvih šestih lastnih oblik.

2 Harmonika analiza

S pomočjo programa Ansys Workbench izvedemo harmonsko analizo gredi z jermenoico. Analizo bomo izvedli z volumskimi končnimi elementi, zato je potrebno najprej pripraviti model.

2.1 Priprava volumskega modela

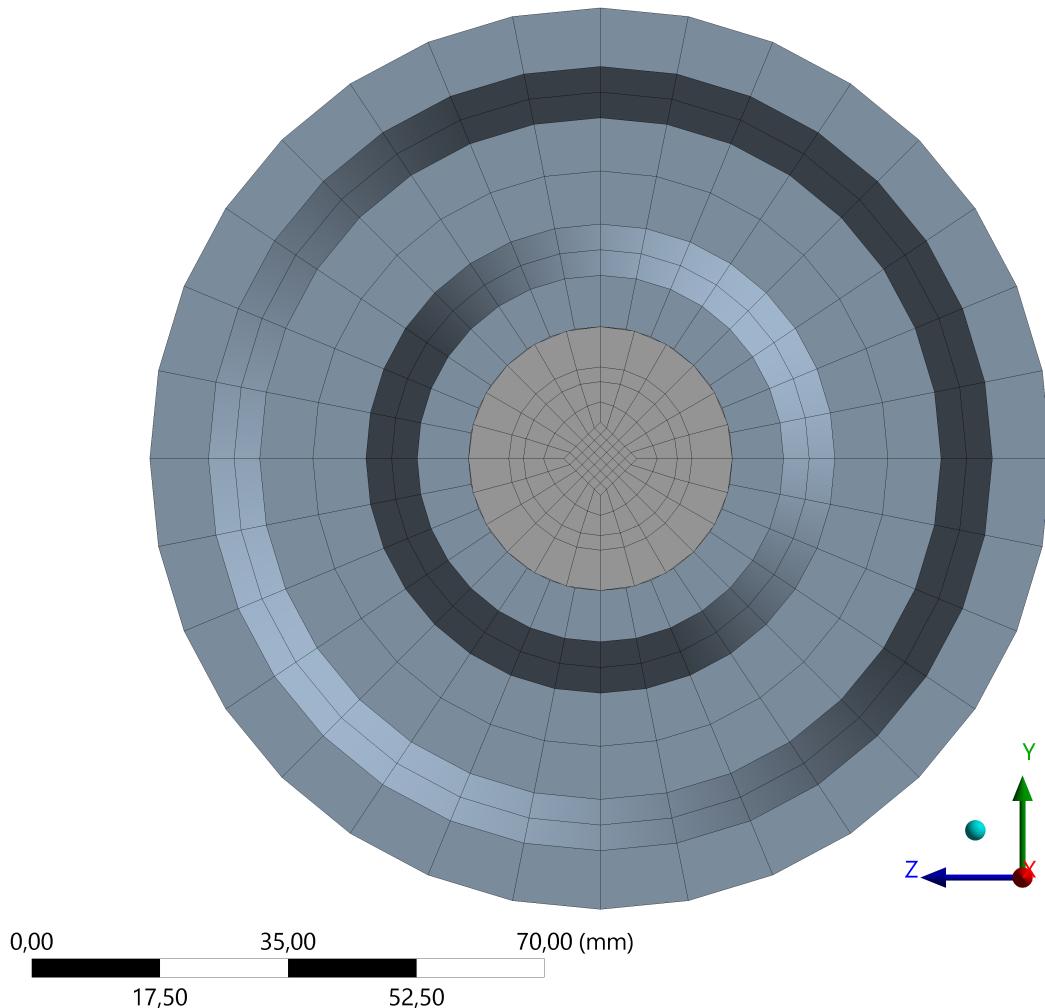
Geometrija, podana v navodilih vsebuje precej detajlov (utori, posnetja), ki ne igrajo ključne vloge pri dinamiki modela in jih zaradi lažjega mreženja zanemarimo. Model sem izdelal s pomočjo programskega okolja Solidworks, sestav v obliki datoteke .step sem uvozil v Ansys. Ker je model krožne geometrije, ga je za enakomerno, strukturirano mreženje potrebno najprej razdeliti na particije. Na določeni površini je mogoče generirati strukturirano mrežo s heksaedričnimi končnimi elementi, ko ima ta površina štiri robove. Zato model najprej prerežemo skozi center z x-y in x-z ravnino. Gred pa razdelimo na središčni kvadrat, in štiri izseke kroga. Poenostavljen model, razdeljen na particije je prikazan na sliki 2.1.



Slika 2.1: Poenostavljen model s particijami

2.2 Diskretizacija

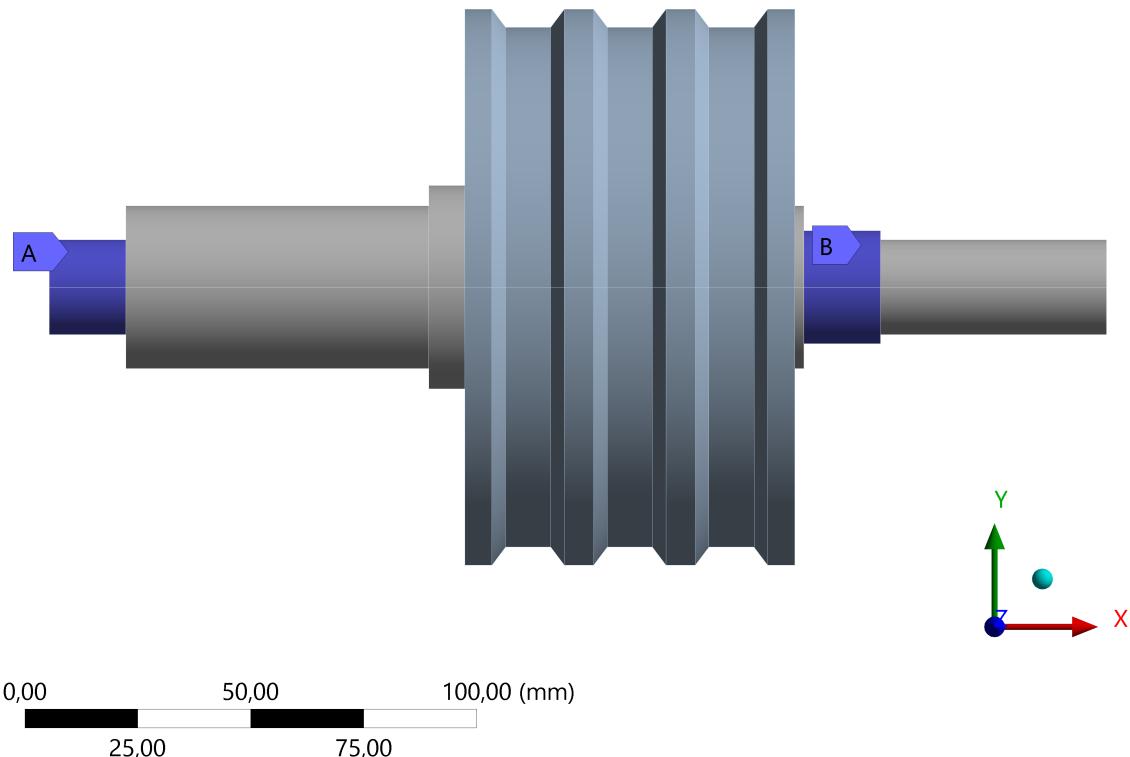
Model je najprej potrebno diskretizirati. Najlažje je uporabiti prosto mreženje, vendar so rezultati bojni, če uporabimo strukturirano mreženje z izključno heksaedričnimi elementi. Pri tem je pomembno, da imajo ti notranje kote čim bližje 90° , in razmerje stranic čim bližje 1. Glede na geometrijo modela je najboljši način mreženja v obliki torte, pri katerem je na posameznih koncentričnih robovih na različnih radijih enako število elementov. To določimo z orodjem 'Edge Sizing'. Kvadratna particija na sredini gredi služi temu, da tam ni potrebno uporabljati trikotnih končnih elementov, ki so manj natančni. Mreža modela prikazana na sliki 2.2.



Slika 2.2: Mreža končnih elementov

2.3 Robni pogoji

Za izvedbo modalne in harmonske analize je potrebno določiti robne pogoje modela. Gred z jermenico je v ohišje vpeta preko ležajev na dveh ležajnih mestih. Pri tem je tipično na enem mestu vpeta v x in y-smeri, na drugem pa je pomik v x-smeri prost, saj s tem gred lahko kompenzira temperaturne raztezke med obratovanjem. Določimo tudi povezavo med gredjo in jermenico. V našem primeru je toga povezava, ki jo avtomatsko generira Ansys ustrezna. Robni pogoji so prikazani na siki 2.3.



Slika 2.3: Cilindrične podpore modela

2.4 Modalna analiza

Izvedemo modalno analizo. Določimo lastne frekvence modela, ki so prikazane v preglednici 2.1. Pri tem ugotovimo, da je lastna oblika pri prvem nihajnjem načinu torzijska, zaradi tega lahko pričakujemo, da je ekscenter, ki deluje radialno, ne bo vzbujal.

Nihajni način	f [Hz]
1	1644,6
2	2201,0
3	2202,0
4	3164,5
5	4431,8
6	4434,1
7	6171,8
8	6173,4
9	8523,7
10	8524,2

Preglednica 2.1: Lastne frekvence prvih 10 nihajnih načinov

2.5 Določitev vzbujanja

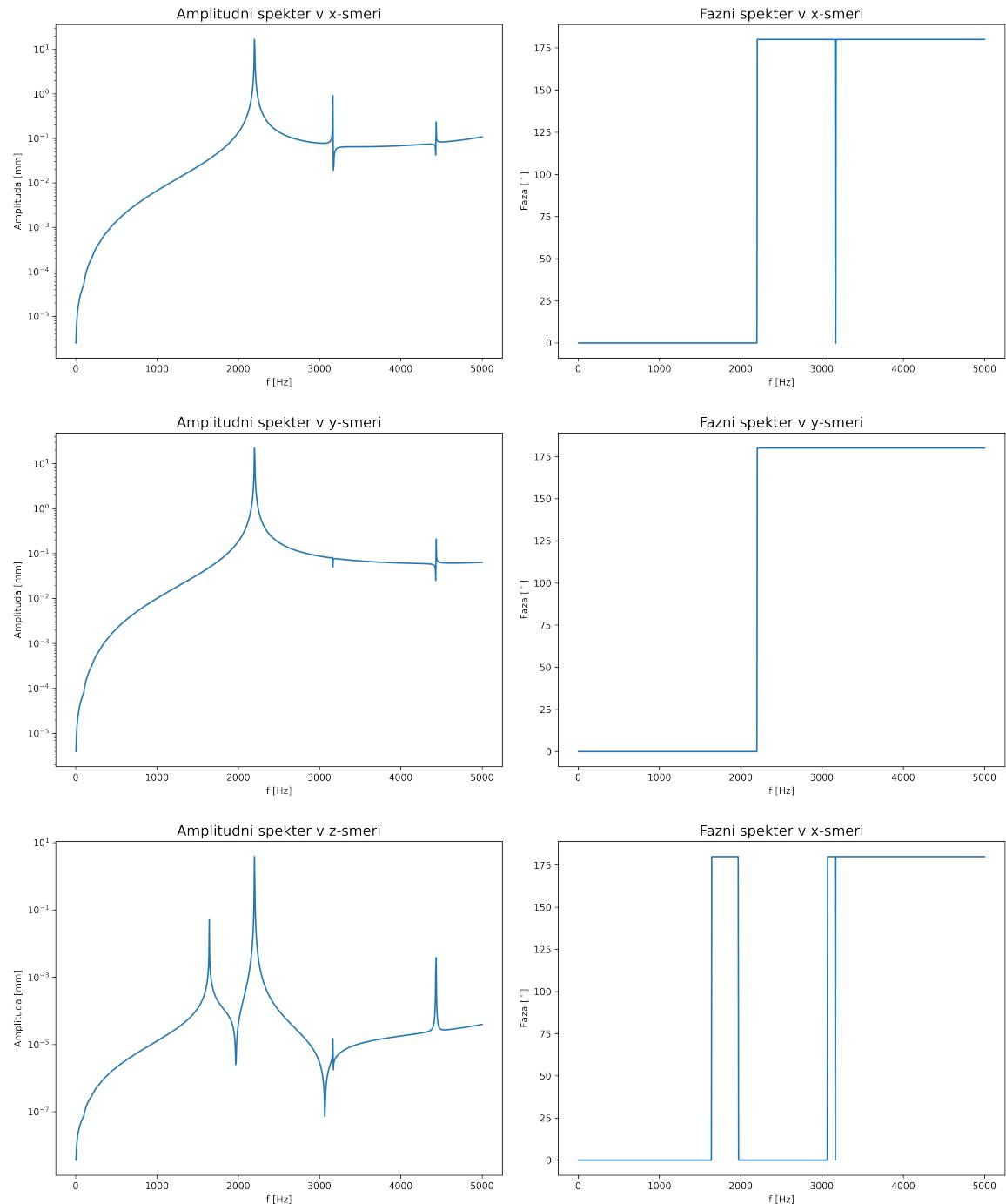
Za harmonsko analizo je potrebno na modelu predpisati vzbujanje, ki ga povzroča ekscenter z maso $m = 25\text{ g}$ in na razdalji $e = 7\text{ mm}$. Za določitev sile, ki ga povzroči ekscenter uporabimo enačbo:

$$F_{ekc} = m e (2\pi f)^2 \quad (2.1)$$

Analizo izvajamo na območju $0 - 5000\text{ Hz}$, zato izdelamo tabelo, v kateri izračunamo sile ekscentra v tem območju, s korakom 5 Hz . Sila deluje radialno, apliciramo jo lahko enostavno na presek na jermenici, ki smo ga naredili s particijami z y-x ravnino.

2.6 Amplitudni in fazni spektri

S harmonsko analizo izračunamo amplitudne in fazne spektre v točki B, podani v navodilih. Podatke iz Ansysa izvozimo v Python, kjer s pomočjo paketa Matplotlib izrišemo grafe, prikazane na sliki 2.4. Kot smo pričakovali, prve lastne frekvence v grafih x in y ne opazimo, saj gre za torzijski način nihanja. Prva lastna frekvenca, ki jo opazimo je druga, s 2201 Hz . Na amplitudnem spektru v z smeri so amplitude pričakovano precej manjše, saj vzbujanja v tej smeri ni.



Slika 2.4: Amplitudni in fazni spektri odziva v točki B

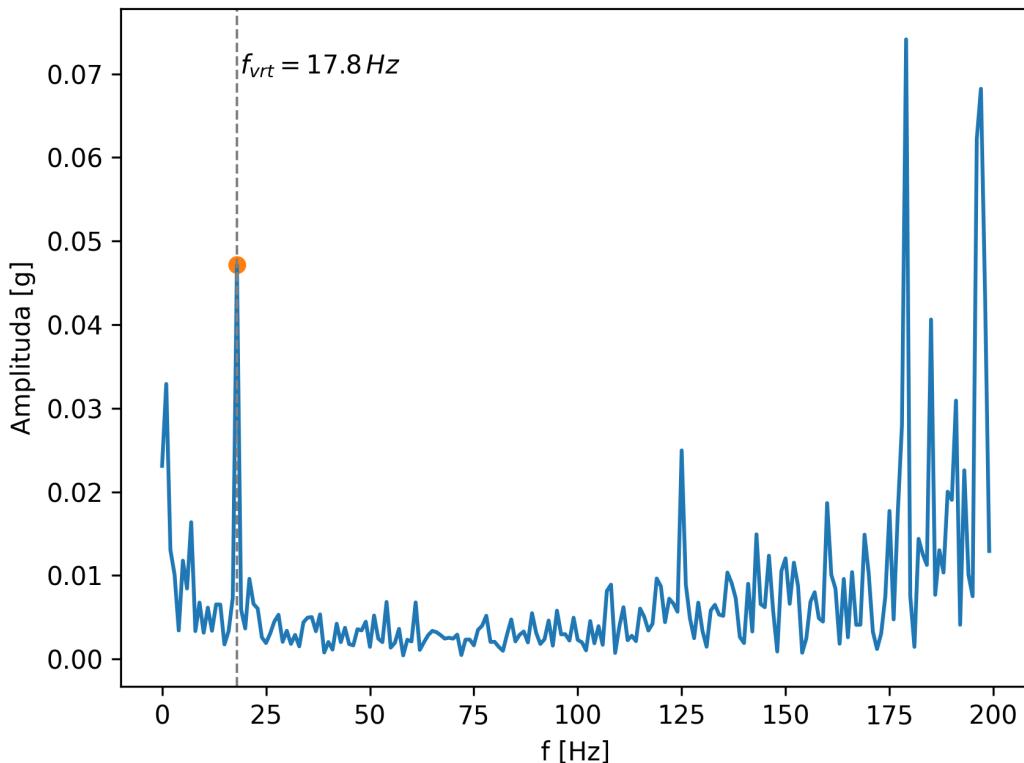
3 Balansiranje

3.1 Merilna veriga

Meritev smo izvajali na preizkuševalnišču, na katerem je bila montirana gred z debalansom. Na obeh ležajih je bil nameščen enoosni pospeškomer. Poleg tega smo imeli na preizkuševalnišču tudi svetlobno sondo, s katero merimo obrate rotorja. Vsi senzorji so bili povezani na merilno kartico, katera je prek USB kabla povezana z računalnikom. Na računalniku s pomočjo programskega paketa NI MAX in knjižnice PyDAQmx meritev izvajamo v programskem okolju Jupyter Notebook.

3.2 Obdelava podatkov

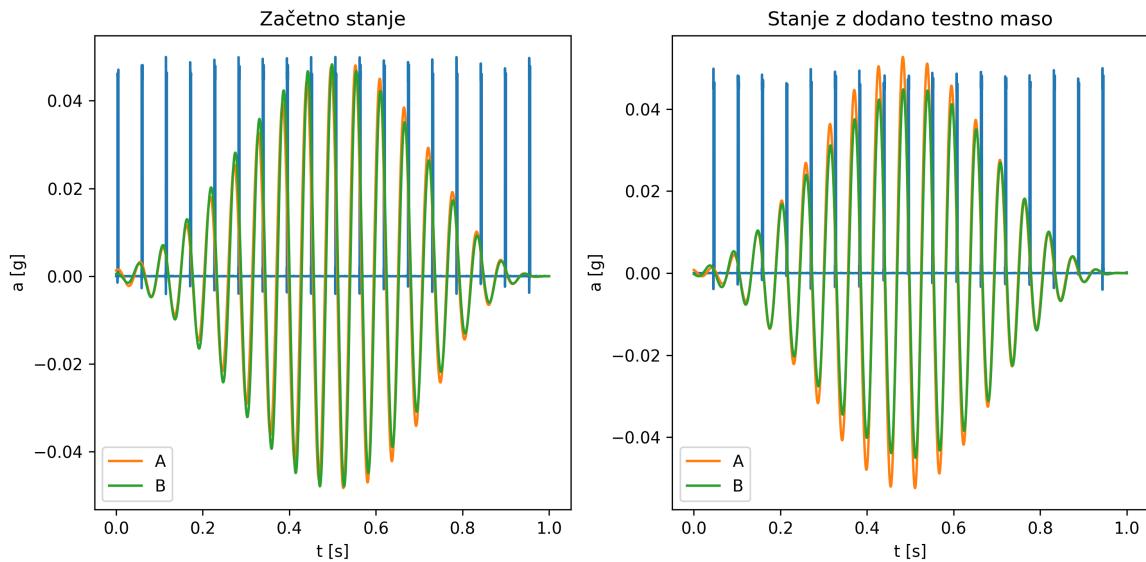
Za balansiranje je najprej potrebno določiti povprečno vrtilno frekvenco rotorja. To sem naredil na način, da sem vzel prvi in zadnji impulz svetlobne sonde v signalu in časovno razliko med njima delil s številom impulzov med njima. Tako dobimo $f_{vrt} = 17,8 \text{ Hz}$. Ko poznamo frekvenco vrtenja lahko s pomočjo Fourierjeve transformacije preverimo, če je v amplitudnem frekvenčnem spektru jasno viden debalans, ki bi se moral pojaviti pri frekvenci vrtenja. Amplitudni spekter je prikazan na sliki 3.1. Vidimo jasen vrh pri vrtilni frekvenci. Naslednji vrhovi se pojavijo na okoli 180 Hz in so najverjetnejše posledica ležajev.



Slika 3.1: Amplitudni spekter

3.2.1 Filtriranje

V naslednjem koraku signal filtriramo v frekvenčni okolici vrtilne frekvence. Za to uporabimo 'bandpass' filter znotraj paketa SciPy, ki ohrani frekvence med $0,9f_{vrt}$ in $1,1f_{vrt}$, signale s frekvencami izven tega intervala pa poreže. Pred filtriranjem signal pomnožimo še s 'Hanning' oknom, da dobimo lepo obliko. Filtriramo signala v obeh točkah v začetnem in testnem stanju in jih prikažemo na sliki 3.2, v graf pa dodamo še impulze iz svetlobne sonde, ki nam bodo služili za določitev faze.



Slika 3.2: Filtrirani signali

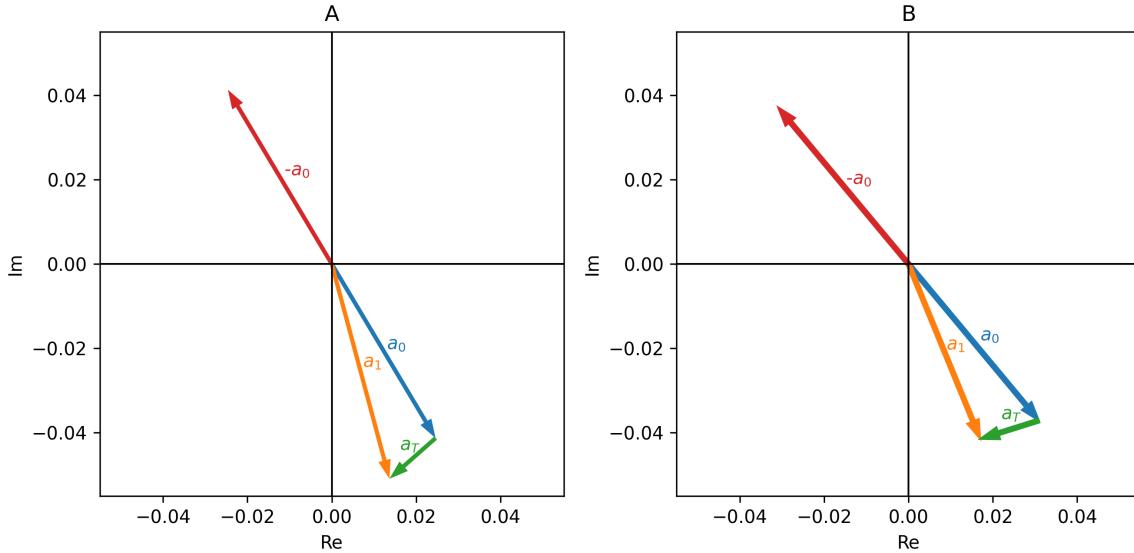
3.2.2 Določitev amplitud in faznih zamikov

Iz grafov, prikazanih na sliki 3.2 razberemo maksimalne amplitude in fazne zamike glede na referenčno lego (impulzni signal). Dobimo naslednje podatke, pri čemer 'A' in 'B' predstavljata maksimalne amplitude v obeh točkah, indeksa 'z' in 't' pa začetno in testno stanje:

- $A_z = 0,0481 \text{ g}$
- $B_z = 0,0483 \text{ g}$
- $A_t = 0,0527 \text{ g}$
- $B_t = 0,0448 \text{ g}$
- $\phi_{A,z} = -1,033 \text{ rad}$
- $\phi_{B,z} = -0,876 \text{ rad}$
- $\phi_{A,t} = -1,308 \text{ rad}$
- $\phi_{B,t} = -1,182 \text{ rad}$

3.2.3 Balansiranje v imaginarni ravnini

Balansiranja se lotimo v imaginarni ravnini. Iz amplitud in kotov, ki smo jih določili, generiramo imaginarna števila, ki imajo absolutno vrednost enako amplitudi, kot od realne osi pa enake faznemu zamiku. Prikazana so na sliki 4.2, pri čemer a_0 predstavlja začetno stanje, a_1 testno stanje, a_T pa dobimo po formuli $a_T = a_1 - a_0$ in predstavlja vpliv, ki ga ima dodana testna masa na rotor.



Slika 3.3: Vektorji

V naslednjem koraku določimo imaginarni operator $Q = -a_0/a_T$, s pomočjo katerega lahko izračunamo korekcijsko maso in njeno lokacijo pa naslednjih enačbah, pri čemer $m_T = 2.8 \text{ g}$ predstavlja testno maso, ki smo jo dodali na rotor:

$$m_k = \text{abs}(Q) m_T \quad (3.1)$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\text{Im}(Q)}{\text{Re}(Q)}\right) \quad (3.2)$$

Izračunamo korekcijske mase in kote, na katere jih moram postaviti za obe točki:

- $m_{k,A} = 9,22 \text{ g}$
- $m_{k,B} = 9,28 \text{ g}$
- $\alpha_{k,A} = -100,58^\circ$
- $\alpha_{k,B} = -67,62^\circ$

4 Zagonski diagram

4.1 Analitični preračun lastnih frekvenc

Lastno frekvenco veje jermenja analitično določimo po enačbi 4.1, pri čemer moramo poznati naslednje podatke, ki smo jih določili na vaji:

- $L = 1,26 \text{ m}$
- $m = 0,052 \text{ kg}$
- $\mu = 0,041 \text{ kg/m}$
- $N_j = 230 \text{ N}$
- $N_d = 481 \text{ N}$
- $n = 1800 \text{ obr/min}$
- $v = 2\pi r n / 60$

$$\omega_0 = \frac{\pi}{L} * \frac{N - \mu v^2}{\sqrt{F_n \mu}} \quad (4.1)$$

Za določitev lastne frekvence delovne in jalove veje pa moramo najprej izračunati sile preko momenta:

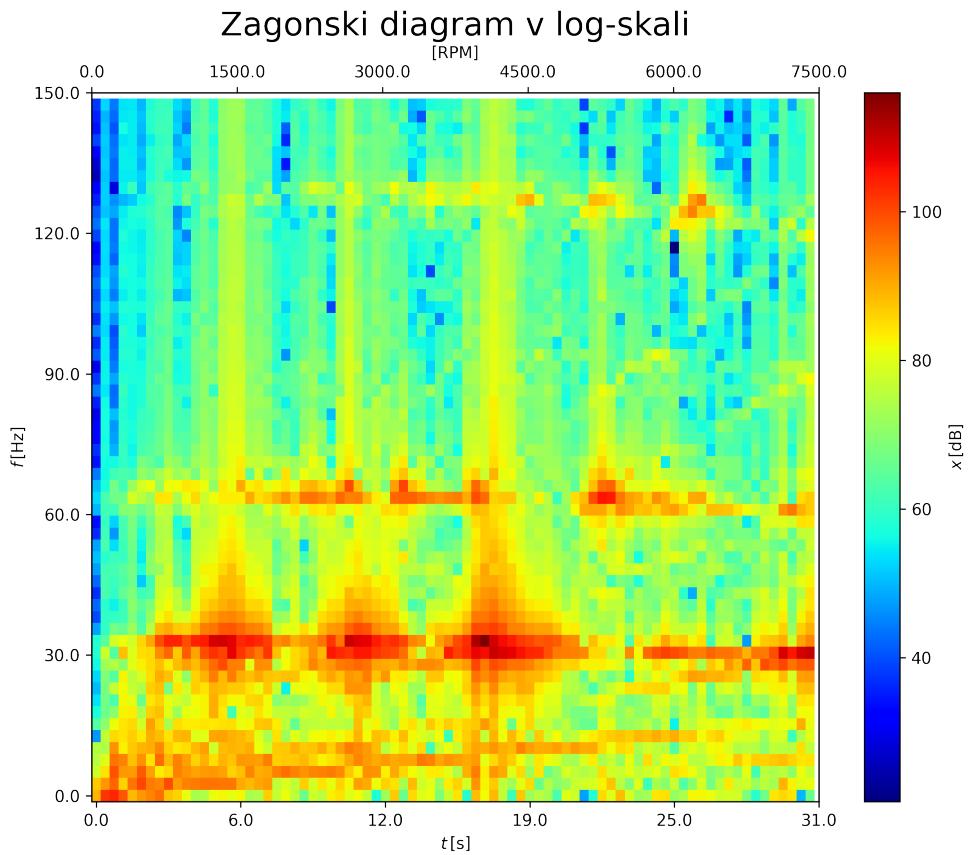
$$N_{delovna} - M + N_{jalova} = 0 \quad (4.2)$$

Lastne frekvence vej:

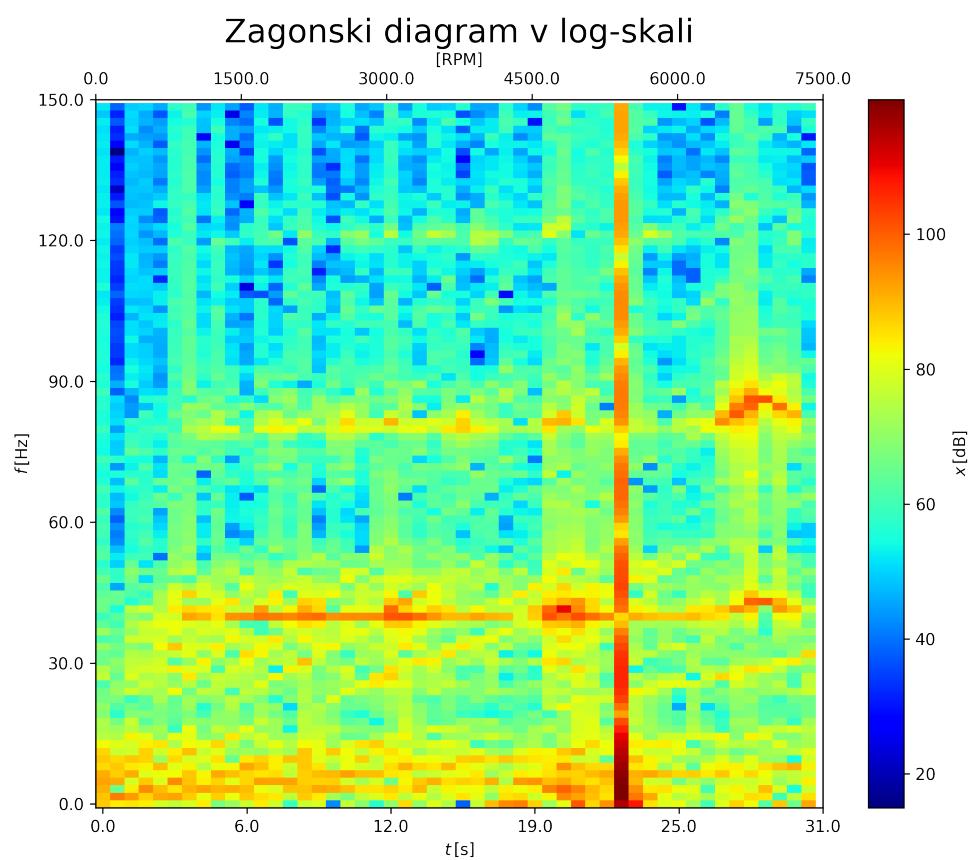
- $\omega_{0j} = 29,15 \text{ Hz}$
- $\omega_{0d} = 42,85 \text{ Hz}$

4.2 Zagonski diagram

Izrišemo zagonski diagram za delovno in jalovo vejo. Vidimo da se rezultati precej dobro ujemajo z analitičnimi. Vodoravne črte v diagramu predstavljajo lastne frekvence, te pa pri višjih hitrostih nekoliko padajo, kar je posledica vztrajnosti. Prav tako je smiselno, da ima delovna veja višjo lastno frekvenco, saj je zaradi svoje funkcije bolj prednapeta kot jalova.



Slika 4.1: Zagonski diagram jalove veje



Slika 4.2: Zagonski diagram delovne veje