

UNIVERZA V LJUBLJANI
Fakulteta za strojništvo

3D natisnjeni metamateriali za aplikacijo v dinamiki

Seminarska naloga pri predmetu Dinamika togih teles

Marko Zupan

Delovni mentor: asist. Tilen Košir
Mentor: prof. dr. Janko Slavič, univ. dipl. inž.

Ljubljana, januar 2023

Kazalo

Kazalo slik	iii
Kazalo preglednic	iv
Seznam uporabljenih simbolov	v
Seznam uporabljenih okrajšav	vi
1 Uvod	1
1.1 Cilji naloge	1
2 Teoretično ozadje	2
2.1 Uvod v metamateriale	2
2.2 Osnove lastnih nihanj sistemov z več prostostnimi stopnjami .	3
2.3 Metoda končnih elementov	4
2.4 Osnove neskončnih periodičnih struktur	4
2.4.1 Bloch-Floquetov teorem	4
2.4.2 Izračun disperzijskih krivulj	5
2.4.2.1 Brillouinove cone	6
2.4.2.2 Modeliranje osnovne celice	6
2.5 Izračun periodičnih struktur	8
2.5.1 Inverzni pristop	9
2.5.2 Direktni pristop	9
2.6 FFF tehnologija 3D tiska	9
2.6.1 Delovanje Fused Filament Fabrication (FFF) 3D tiskal- nika	9
2.6.2 Karakteristike 3D tiskalnika	11
2.6.2.1 Parametri 3D tiska	11
2.6.2.2 Adhezija	12
2.6.2.3 Podpore	13
2.6.2.4 Stopnja zapolnjenosti (ang. <i>Infill</i>)	13
2.6.3 Dimenzijska natančnost	13
3 Zasnova in preračun metamateriala	14
3.1 Zasnova oblike metamateriala	14
3.2 Izdelava numeričnega modela	17
3.2.1 Izračun lastnih frekvenc	17
3.2.2 Izračun disperzijskih krivulj	18

3.2.3	Simulacija odziva Metamateriali (MM)	19
4	Eksperimentalni del	22
4.1	Proces 3D tiska	22
4.2	Meritve	24
4.2.1	Meritev gostote	24
4.2.2	Meritev elastičnega modula	24
5	Zaključki	27
6	Literatura	28

Kazalo slik

Slika 2.1:	Prikaz 1D periodične strukture in njene bazne celice. . . .	5
Slika 2.2:	Bazna celica, njena recipročna celica v prostoru in Brillouinova cona (BZ).	6
Slika 2.3:	Transformacija Brillouinove cone iz valovnega prostora (k) v prostor širjenja valovanja (μ).	6
Slika 2.4:	Glava FFF 3D tiskalnika in njeni sestavni deli. [6]	11
Slika 3.1:	Končni koncept osnovna celica (OC) Metamateriali (MM). . . .	15
Slika 3.2:	Dimenzije osnovna celica (OC) Metamateriali (MM). . . .	16
Slika 3.3:	Disperzijske krivulje za Metamateriali (MM).	18
Slika 3.4:	Prva lastna oblika za $\mu = 0$	19
Slika 3.5:	Prva lastna oblika za $\mu = \frac{\pi}{6}$	19
Slika 3.6:	Prva lastna oblika za $\mu = \frac{\pi}{2}$	19
Slika 3.7:	Prva lastna oblika za $\mu = \pi$	20
Slika 3.8:	Druga lastna oblika za $\mu = 0$	20
Slika 3.9:	Druga lastna oblika za $\mu = \frac{\pi}{6}$	20
Slika 3.10:	Druga lastna oblika za $\mu = \frac{\pi}{2}$	21
Slika 3.11:	Druga lastna oblika za $\mu = \pi$	21
Slika 4.1:	Primer slabega mostiščenja.	23
Slika 4.2:	Dimenzije vzorca za določitev elastičnega modula.	25
Slika 4.3:	Rezultati meritev frekvenčne prenosne funkcije hitrosti in pospeška.	26

Kazalo preglednic

Preglednica 4.1:	Osnovni parametri za tisk.	22
Preglednica 4.2:	Izmerjena gostota PETG plastike.	24
Preglednica 4.3:	Izmerjena lastna frekvenca vzorcev.	25
Preglednica 4.4:	Izmerjen modul elastičnosti PETG plastike.	26

Seznam uporabljenih simbolov

Oznaka	Enota	Pomen
\mathbf{C}	N s m^{-1}	globalna dušilna matrika
\mathbf{d}	m	bazni translacijski vektor osnovne celice
$\mathbf{D}(\omega)$	N	dinamska matrika sistema
\mathbf{f}	N	vektor generaliziranih vozliščnih sil
\mathbf{I}	/	identična matrika
\mathbf{K}	N m^{-1}	globalna togostna matrika
\mathbf{K}_{red}	N m^{-1}	reducirana globalna togostna matrika
\mathbf{k}	m^{-1}	valovni vektor
\mathbf{M}	kg	globalna masna matrika
\mathbf{M}_{red}	kg	reducirana globalna masna matrika
\mathbf{q}	m	vektor generaliziranih vozliščnih pomikov
\mathbf{r}	m	krajevni vektor
\mathbf{t}	m	bazni translacijski vektor recipročne osnovne celice
A	m^2	površina prereza
E	GPa	elastični modul
I	m^4	vztrajnostni moment prereza
i	/	imaginarna komponenta
L	m	dolžina osnovne celice
l	m	dolžina končnega elementa
n	/	število baznih celice med točkama
t	s	čas
$\mathbf{\Lambda}_L$	/	leva reducirna matrika
$\mathbf{\Lambda}_R$	/	desna reducirna matrika
μ	m^{-1}	vektor širjenja valovanja
ω	rad s^{-1}	krožna kotna frekvenca
ρ	kg m^{-3}	gostota

Seznam uporabljenih okrajšav

Okrajšava	Pomen
EVP	problem lastnih vrednosti (ang. <i>Eigen Value Problem</i>)
FFF	Fused Filament Fabrication
MM	metamaterial
OC	osnovna celica
PZF	pasovno zavrnitveni filter

1 Uvod

1.1 Cilji naloge

Cilj naloge je izdelati numerični model in delujoč metamaterial, ki bo dušil vibracije v željenem frekvenčnem območju. Specifično smo v okviru naloge iskali območje dušenja znotraj intervala 0–1000 Hz. Proces je bil razdeljen na 3 glavne podsklope.

V poglavju 2 so predstavljene teoretične osnove, ki jih potrebujemo za fizikalno razumevanje problema in razvoj matematičnega modela, ki je osnova končnega numeričnega modela. Opisana je teorija nihanja sistemov z več prostostnimi stopnjami in teorija periodičnih struktur. V poglavju 3 je predstavljen proces konstrukcije bazne celice in izdelave numeričnega modela. Opisani so osnovni koraki izdelave numeričnega modela ter predstavljeni koraki konstrukcije osnovne celice. V poglavju 4 je predstavljen eksperimentalni del določanja elastičnega modula in gostote ter proces 3D tiska metamateriala.

2 Teoretično ozadje

2.1 Uvod v metamateriale

Metamateriali (MM) so na makro nivoju posebno načrtovane strukture, ki imajo zaradi posebne geometrije izboljšane mehanske lastnosti, kakršnih ne najdemo v naravi. MM se uprabljajo na različnih področjih, med njimi tudi v dinamiki. Na tem področju nas zanimajo MM, ki so sposobni tvoriti pasovno zavrnitveni filter (PZF). PZF predstavlja frekvenčno področje, v katerem MM teoretično ne dopušča prostega širjenja valovanja. Znotraj takih področij lahko zato pričakujemo močno slabljenje vibracij.

PZF lahko kreiramo prek dveh različnih mehanizmov. Prvi uporablja fizikalni princip Braggovega sipanja (*ang. Bragg Scattering*). Značilnost tovrstnega principa je periodična struktura MM iz osnovnih gradnikov, ki vsebujejo visoke impedančne spremembe. To povzroča sipanje valovnih dolžin, ki so primerljive karakteristični dolžini osnovnega gradnika. Pri Braggovem sipanju prihaja do destruktivne interference prihajajočega in odbitega vala, kar povzroči delno ali popolno izničenje valov. Ta princip je primeren le za tvorbo PZF pri višjih frekvencah, kar ne ustreza ciljem te naloge.

Drugi mehanizem deluje na principu lokalnih resonanc MM. V okviru tega mehanizma na strukturo periodično namestimo lokalne resonatorje. Resonančni PZF v tem primeru ni odvisen od periodičnosti, temveč geometrijskih lastnosti resonatorja. Pogoja za nastanek PZF sta majhna medsebojna oddaljenost resonatorjev (nekaj velikostnih razredov nižje od valovnih dolžin frekvenc, ki bi jih radi dušili) in ne-ničelna inducirana rezultatna sila na osnovno strukturo. Prednost tovrstnega pristopa je zmožnost kreiranja PZF tudi pri nižjih frekvencah, slabost pa, da lahko izven tega področja tudi

močno poslabšamo slabljenje vibracij [5].

V okviru te naloge se bomo osredotočili na konstruiranje 1D MM preko mehanizma lokalnih resonatorjev.

2.2 Osnove lastnih nihanj sistemov z več prostostnimi stopnjami

V okviru tega poglavja predpostavimo, da že poznamo enačbe opazovanega sistema z več prostostnimi stopnjami, kot je prikazano na enačbi (2.1), kjer upoštevamo viskozni model dušenja, čeprav bomo tega v nadaljevanju zane-marili.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{q}(t) = \mathbf{f}(t) \quad (2.1)$$

Kjer \mathbf{M} predstavlja masno matriko sistema, \mathbf{C} dušilno matriko sistema, \mathbf{K} togostno matriko sistema, $\mathbf{q}(t)$ in $\mathbf{f}(t)$ pa sta vektorja generaliziranih pomikov in vzbujevalnih sil. V nadaljevanju predpostavimo harmonski odziv, zato lahko vektor pomikov in vektor generaliziranih vzbujevalnih sil zapišemo po enačbi (2.2).

$$\mathbf{q}(t) = \mathbf{q} \sin(\omega t) = \mathbf{q}e^{i\omega t}; \quad \mathbf{f}(t) = \mathbf{f} \sin(\omega t) = \mathbf{f}e^{i\omega t} \quad (2.2)$$

Kjer \mathbf{q} predstavlja vektor amplitud generaliziranih pomikov, \mathbf{f} pa vektor generaliziranih vzbujevalnih sil. Če enačbo (2.1) preuredimo s pomočjo enačbe (2.2) dobimo sledečo enačbo (2.3).

$$(-\omega^2\mathbf{M} + \mathbf{K})\mathbf{q} = \mathbf{f} \quad (2.3)$$

V okviru naše naloge nas zanimajo lastne frekvence. Te dobimo iz netrivialne rešitve enačbe (2.3), ki jo dobimo z rešitvijo enačbe (2.4). Problem prevedemo na problem lastnih vrednosti, ki je numerično stabilnejši.

$$\det(-\omega^2\mathbf{M} + \mathbf{K}) = 0 \quad (2.4)$$

2.3 Metoda končnih elementov

Metoda končnih elementov je aproksimativna metoda za reševanje matematičnih modelov in je najbolj razširjena med vsemi aproksimativnimi metodami. S pomočjo te metode bomo pridobili globalno masno in togostno matriko \mathbf{M} in \mathbf{K} .

Osnovnih togostnih (2.5) in masnih (2.6) matrik za nosilec s štirimi prostostnimi stopnjami tu ne bomo izpeljevali, vendar jih pridobimo iz vira [4].

$$\mathbf{M} = \frac{\rho A l}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22l & 54 & -13l \\ 22l & 4l^2 & 13l & -3l^2 \\ 54 & 13l & 156 & -22l \\ -13l & -3l^2 & -22l & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$\mathbf{K} = \frac{EI}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l & -12 & 6l \\ 6l & 4l^2 & -6l & 2l^2 \\ -12 & -6l & 12 & -6l \\ 6l & 2l^2 & -6l & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Kjer je ρ gostota, A površina preseka, l dolžina elementa, E elastični modul materiala in I vztrajnostni moment prereza.

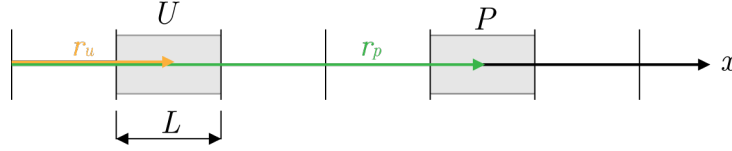
2.4 Osnove neskončnih periodičnih struktur

Metamateriali so zaradi njihove narave navadno periodične stukture, kjer se v intervalih ponavlja osnovna celica. Obravnavo problema si lahko olajšamo, kadar imamo neskončno periodično strukturo, saj takrat s pomočjo Bloch-Floquetovega teorema lahko preučujemo le odziv ene osnovne celice in tega generaliziramo na celotno strukturo.

2.4.1 Bloch-Floquetov teorem

V okviru te točke bomo predstavili osnove Bloch-Floquetovega teorema, ki ga potrebujemo za obravnavo našega problema. Teorem nam pove, na kakšen način smemo obravnavati osnovno celico, da s tem popišemo celotno neskončno periodično strukturo MM.

Omejimo se na 1D translatorno periodično strukturo z dolžino osnovne celice L . Za takšno periodično strukturo definiramo referenčni vektor \mathbf{r}_U , ki definira referenčno točko U, in referenčni vektor \mathbf{r}_P , ki definira poljubno točko P na periodični strukturi [2, 5]. Povezava je prikazana na sliki 2.1 in v enačbi (2.7).



Slika 2.1: Prikaz 1D periodične strukture in njene bazne celice.

$$\mathbf{r}_P = \mathbf{r}_U + nL \quad (2.7)$$

Kjer L ponazarja dolžino bazne celice, n pa celo število, ki pove število baznih celic med točkama U in P. Ponovno predpostavimo harmonsko nihanje in tako lahko enačbo preuredimo kot:

$$\mathbf{q}(r, k, t) = \tilde{\mathbf{q}}(r) e^{ikr} e^{i\omega t} \quad (2.8)$$

Kjer r predstavlja pozicijo na x poltraku, ω frekvenco valovanja, k valovno število v smeri širjenja valovanja, i kompleksno število, $\tilde{\mathbf{q}}(r)$ pa poljubna periodična funkcija. Na podlagi odziva referenčne celice v točki U lahko napovemo odziv v katerikoli točki. Prav tako definiramo še kompleksno število širjenja valovanja μ , ki nam fizikalno predstavlja fazni zamik. Preoblikovano enačbo zapišemo kot [5]:

$$\mathbf{q}(r_P, \mu, t) = \mathbf{q}_{\text{ref}}(r_U, \mu, t) e^{i\mu n} \quad (2.9)$$

Preko odziva osnovne celice lahko torej ob predpostavki neskončne periodične strukture modeliramo in napovemo odziv po celotni periodični strukturi.

2.4.2 Izračun disperzijskih krivulj

Osnova analize širjenja valovanja znotraj osnovne strukture MM je izračun disperzijskih krivulj. S konstrukcijo reprezentativne osnovne celice in uporabo Bloch-Floquetovega teorema pridobimo disperzijski problem lastnih vrednosti (EVP) za frekvenco ω in valovni vektor μ [2].

2.4.2.1 Brillouinove cone

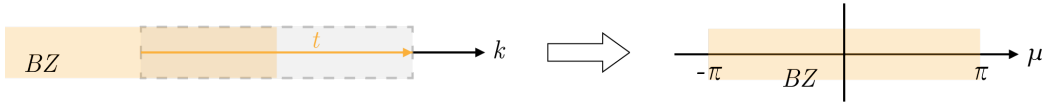
Da lahko iz ravnin preidemo v krivulje, izkoriščamo periodičnost in simetrijo. Ker analiziramo periodično strukturo lahko določimo periodo 2π za $\text{Re}(\mu)$ v recipročnem prostoru. Problem razdelimo v tako imenovane Brillouinove cone [2].

Brillouinova cona je definirana kot Wigner-Seitzova celica v recipročnem prostoru. Najmanjši prostor, ki ga definira Wigner-Seitzova celica imenujemo prva Brillouinova cona.[7] Prva Brillouinova cona je najmanjši osnovni gradnik, na podlagi katerega lahko popišemo celotno periodično strukturo. Če upoštevamo še simetrijo osnovne celice je možno slednjo cono še dodatno reducirati na nereducirno Brillouinovo cono. Ta predstavlja najmanjši prostor, ki ga je potrebno obravnavati, da popišemo celotni odziv osnovne celice in posledično celotnega MM [5].

V sklopu te naloge bomo obravnavali 1D strukturo, zato se problem močno poenostavi. V ravninskem primeru bazni vektor celice \mathbf{d} in bazni vektor recipročne celice \mathbf{t} sovpadata s koordinatno osjo x . Poznamo tudi periodičnost, ki je enaka 2π . Celico transformiramo na dimenzije $[-\pi, \pi]$ s koordinatnim sistemom μ , kot je prikazano na sliki 2.3.



Slika 2.2: Bazna celica, njena recipročna celica v prostoru in Brillouinova cona (BZ).



Slika 2.3: Transformacija Brillouinove cone iz valovnega prostora (k) v prostor širjenja valovanja (μ).

2.4.2.2 Modeliranje osnovne celice

V poglavju 2.2 smo izpeljali vodilno enačbo problema (2.3), kjer smo dobili dinamsko matriko:

$$\hat{\mathbf{D}}(\omega) = -\omega^2 \mathbf{M} + \mathbf{K} \quad (2.10)$$

Sledeča dinamska matrika zaenkrat še ne vključuje nobenih robnih pogojev. V nadaljevanju bomo z uporabo Blochovega teorema za našo dinamsko matriko določili periodične robne pogoje. Končna celica bo v numeričnem modelu imela več kot le dve vozlišči, zato v naslednjem koraku vektor pomikov \mathbf{q} razdelimo na pomike v levem vozlišču \mathbf{q}_L , pomike v sredini celice \mathbf{q}_I in pomike v skrajnem desnem vozlišču \mathbf{q}_R . Vektor generaliziranih vozliščnih pomikov \mathbf{q} je tako enak:

$$\mathbf{q} = \begin{Bmatrix} \mathbf{q}_L \\ \mathbf{q}_I \\ \mathbf{q}_R \end{Bmatrix} \quad (2.11)$$

Uporabimo enačbo (2.9) iz Bloch-Floquetovega teorema, ki povezuje skrajna vozlišča. Tako lahko zapišemo:

$$\mathbf{q}_R = \mathbf{q}_L e^{i\mu} \quad (2.12)$$

Desno vozlišče lahko izrazimo z levim, torej se lahko znebimo ene neznanke z uporabo desne reducirne matrike Λ_R :

$$\mathbf{q} = \Lambda_R \mathbf{q}_{\text{red}}; \quad \mathbf{q}_{\text{red}} = \begin{Bmatrix} \mathbf{q}_L \\ \mathbf{q}_I \end{Bmatrix}; \quad \Lambda_R = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{I}e^{i\mu} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Kjer \mathbf{I} predstavlja enotsko matriko, $\mathbf{0}$ pa matriko ničel.

Podobno naredimo tudi za vektor generaliziranih vozliščnih sil, kjer upoštevamo konsistentnost notranjih veličin:

$$\mathbf{f} = \begin{Bmatrix} \mathbf{f}_L \\ \mathbf{f}_I \\ \mathbf{f}_R \end{Bmatrix} \quad (2.14)$$

Ponovno uporabimo Bloch-Floquetov teorem in zapišemo:

$$\mathbf{f}_R = -\mathbf{f}_L e^{i\mu} \quad (2.15)$$

Desno vozlišče lahko izrazimo z levim, torej se lahko znebimo ene neznanke z uporabo leve reducirne matrike Λ_L :

$$\mathbf{f} = \Lambda_L \mathbf{f}_{\text{red}}; \quad \mathbf{f}_{\text{red}} = \begin{Bmatrix} \mathbf{f}_L \\ \mathbf{f}_I \end{Bmatrix}; \quad \Lambda_L = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{I}e^{-i\mu} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Kjer \mathbf{I} predstavlja enotsko matriko, $\mathbf{0}$ pa matriko ničel. Sledeče temu postopku lahko dobimo kondenzirano dinamsko matriko $\mathbf{D}(\omega)$ [5].

V nadaljevanju vpeljemo še reducirana vektorja generaliziranih pomikov in vozliščnih sil ter pripadajoči reducirni matriki:

$$\begin{aligned}\mathbf{D}(\omega)\mathbf{q} &= \mathbf{f} \\ \mathbf{D}(\omega)\mathbf{\Lambda}_R\mathbf{q}_{\text{red}} &= \mathbf{f} \\ \mathbf{\Lambda}_L\mathbf{D}(\omega)\mathbf{\Lambda}_R\mathbf{q}_{\text{red}} &= \mathbf{\Lambda}_L\mathbf{f} \\ \mathbf{\Lambda}_L\mathbf{D}(\omega)\mathbf{\Lambda}_R\mathbf{q}_{\text{red}} &= \mathbf{f}_{\text{red}}\end{aligned}$$

Zanimala nas bodo le lastna nihanja bazne celice, zato v nadaljevanju predpostavimo, da velja $\mathbf{f}_{\text{red}} = 0$. Končna enačba je torej:

$$\mathbf{\Lambda}_L\mathbf{D}(\omega)\mathbf{\Lambda}_R\mathbf{q}_{\text{red}} = \tilde{\mathbf{D}}(\omega, \mu)\mathbf{q}_{\text{red}} = 0 \quad (2.17)$$

V enačbi (2.17) imamo zajete tudi periodične robne pogoje strukture. Kot omenjeno v poglavju 2.2 sledi reševanje problema z uporabo problema lastnih vrednosti.

Ker bomo v numeričnem izračunu uporabljali masno in togostno globalno matriko, definiramo reducirano masno in togostno globalno matriko:

$$\begin{aligned}\mathbf{\Lambda}_L(-\omega^2\mathbf{M} + \mathbf{K})\mathbf{\Lambda}_R\mathbf{q}_{\text{red}} &= 0 \\ (-\omega^2\mathbf{\Lambda}_L\mathbf{M}\mathbf{\Lambda}_R + \mathbf{\Lambda}_L\mathbf{K}\mathbf{\Lambda}_R)\mathbf{q}_{\text{red}} &= 0 \\ \mathbf{\Lambda}_L\mathbf{M}\mathbf{\Lambda}_R &= \mathbf{M}_{\text{red}}; \quad \mathbf{\Lambda}_L\mathbf{K}\mathbf{\Lambda}_R = \mathbf{K}_{\text{red}}\end{aligned} \quad (2.18)$$

Pri čemer je \mathbf{M}_{red} reducirana globalna masna matrika in \mathbf{K}_{red} reducirana globalna togostna matrika.

2.5 Izračun periodičnih struktur

V tem poglavju bomo spoznali dva pristopa, ki jih uporabljamo za določitev PZF za naš MM. Rezultat obeh pristopov so disperzijske krivulje, ki popisujejo odvisnost lastne frekvence od valovnega števila za širjenje valovanja po neskončni periodični strukturi MM. Metodi, ki sta opredeljeni v naslednjih podpoglavjih sta inverzni pristop, ki ga bomo uporabili za naš MM in direktni pristop.

2.5.1 Inverzni pristop

Inverzni oz. $\omega(\mu)$ pristop privzame realni valovni vektor μ , torej privzamemo prosto širjenje valovanja in rešimo problem lastnih vrednosti za frekvence $\omega = \omega_{re} + i\omega_{im}$. Tak pristop ponavadi uporabljamo za nedušene sisteme [2]. Valovni vektor μ izberemo glede na Brillouinove cone, določene v poglavju 2.4.2.1. To območje diskretiziramo in rešimo EVP dinamske matrike $\tilde{\mathbf{D}}(\omega, \mu)$ za posamezne valovne vektorje μ . Kadar pristop uporabljamo za določanje PZF nedušениh struktur, pričakujemo tudi realne ω [5].

2.5.2 Direktni pristop

Direktni oz. $\mu(\omega)$ pristop pa privzame realne ω , torej privzamemo časovno harmonsko širjenje valovanja. Rezultat EVP dinamske matrike je krivulja odvisnosti valovnega vektorja μ od ω . Izračunamo valovne vektorje pri različnih ω . Rezultat so valovni vektorji $\mu = \mu_{re} + i\mu_{im}$, ki so lahko realni, imaginarni ali kompleksni. Imaginarni del predstavlja relativno spremembo amplitude, realni del pa spremembo faze [2, 5]. Kadar je μ odvisen od več dimenzij (2D ali 3D problem), moramo vpeljati smer širjenja valovanja, ki jo privzamemo.

V našem primeru direktnega pristopa ne bomo uporabili, vendar bomo preračun izvedli le z inverznim pristopom.

2.6 FFF tehnologija 3D tiska

Fused Filament Fabrication (FFF) je tehnologija, pri kateri izdelek dobimo s taljenjem termoplasta, ki ga nato skozi šobo po plasteh ekstrudiramo na podlago. Tehnika je bila razvita leta 1989 in se dandanes največ uporablja na področjih inženiringa, znanosti, hitrega prototipiranja, medicine in industrije [9].

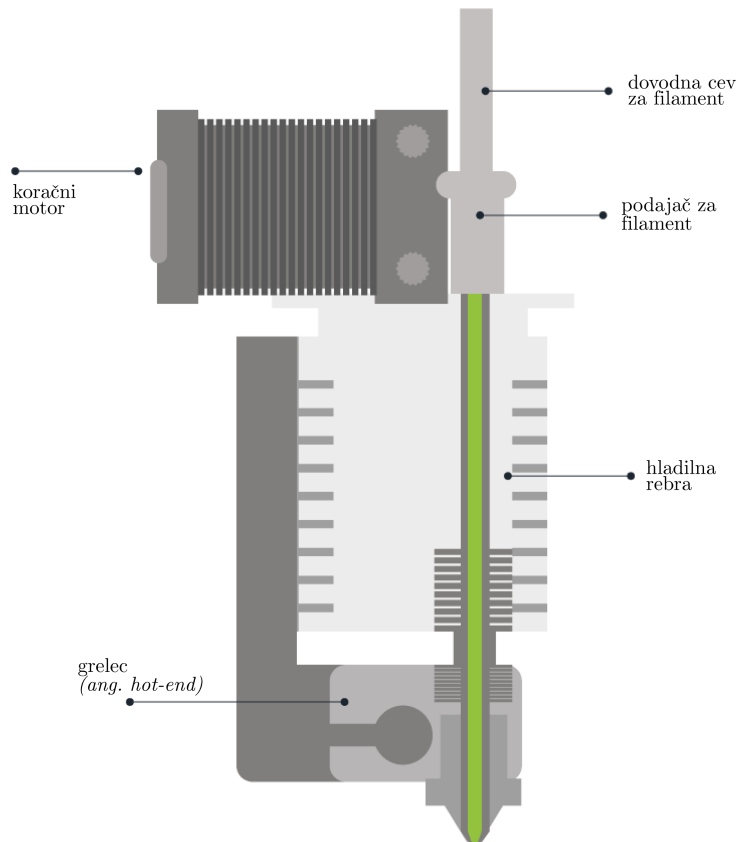
Velika prednost FFF metode je njena vsestranskost in cenovna dostopnost. V zadnjih letih so se na trgu pojavili FFF 3D tiskalniki, ki so dostopni tudi širši javnosti.

2.6.1 Delovanje FFF 3D tiskalnika

FFF 3D tiskalniki obstajajo v najrazličnejših velikostih in izvedbah, vendar si vsi delijo skupne dele, ki opravljajo proces 3D tiskanja. Tiskalnik ima

običajno 3 osi (x, y in z), pri čemer x- in y-os skrbita za premikanje glave po območju tiskanja, z-os pa skrbi za pomikanje plošče, na katero se nanašajo plasti. V ta namen se uporabljajo koračni motorji, ki preko jermenov ali navojnih palic premikajo sestavne dele tiskalnika. Plošča na katero se nanašajo plasti je običajno segreta iz spodnje strani na določeno temperaturo, s čemer zagotavljamo adhezijo ekstrudirane plasti na ploščo.

Najpomembnejši del tiskalnika predstavlja glava. Kot je razvidno na sliki (2.4), glavo sestavlja 5 sestavnih delov. Skozi dovodno cev dovajamo filament v trdni obliki, ki ga koračni motor s preciznim in nadzorovanim gibanjem poriva skozi podajač. Na koncu glave se nahaja šoba z grelnim elementom (*ang. hot-end*), ki filament tali s prednastavljeno temperaturo in ga ekstrudira skozi šobo. Nad šobo z grelnim elementom se nahajajo hladilna rebra, ki preprečujejo taljenje elementa višje po dovodni cevi. S tem preprečimo ohlajanje in ekspanzijo materiala višje v cevi, kar bi zmanjšalo ali povsem ustavilo tok filameta.



Slika 2.4: Glava FFF 3D tiskalnika in njeni sestavni deli. [6]

Za zagotavljanje najboljše kvalitete končnega izdelka, je pomemben konstanten in kontinuiran tok taljenega materiala. Za to skrbi koračni motor, ki filament potiska preko podajalca (zobnik). Ta mora imeti pravilno nastavljeno silo pritiska, da filament ne zdrsuje ali se lomi med podajanjem [9].

2.6.2 Karakteristike 3D tiskalnika

2.6.2.1 Parametri 3D tiska

Pred začetkom 3D tiska je potrebna priprava datotke z zapisom informacij o izdelavi modela. Gre za G-kodo, ki vključuje podatke o premikanju motorjev, hitrosti podajanja filameta, temperature plošče, temperature šobe in ogromno ostalih opsijskih parametrov. Izbira pravih parametrov 3D tiska

močno vpliva na uspešnost tiska in kvaliteto končnega izdelka.

Ločljivost končnega izdelka določimo z izbiro premera šobe in višino ekstrudirane plasti. Kljub temu, da lahko na dimenzijsko natančnost končnega izdelka vplivamo z veliko ostalimi parametri, sta debelina plasti in premer šobe ponavadi prva parametra, s katerima nadzorujemo omenjeno lastnost. Z zmanjšanjem premera šobe in tanjšanjem debeline plasti, izboljšamo kvaliteto površin in detajlov [8].

Zelo pomembna je predvsem pravilna izbira temperature šobe in plošče. Ti temperaturi se močno razlikujeta od filamenta do filamenta in sta ponavadi v območjih podani od proizvajalca filamenta. Končna določitev temperature je nato vedno rezultat izvedenih testnih izdelkov. Temperatura šobe je odvisna od temperature steklenja T_g polimernega materiala, ki ga uporabljamo kot filament. Pri tej temperaturi pride do razpada šibkih Van der Waalsovih vezi, ki med seboj držijo povezane polimerne verige. Takrat filament začne izkazovati manjšo viskoznost skupaj z ostalimi spremenjenimi visko-elastičnimi lastnostmi.

2.6.2.2 Adhezija

Med premikanjem plošče in glave je pomembno, da iztiskan material ostane na prvotnem mestu, drugače dobimo zamike med plastmi. To dosežemo s pravilno adhezijo prve plasti na ploščo. Dobro adhezijo lahko dosežemo na več načinov, ki pa so vsi povezani z lastnostmi podlage. Prvi parameter, ki vpliva na adhezijo prve plasti je temperatura plošče. S pravilno segreto podlago, zagotovimo dobro povezavo molekul, ki zagotovijo močno adhezijo. Pomagamo tudi s predpripravo plošče — v ta namen obstajajo različna sredstva in spreji, vendar zadostuje tudi lak za lase, kadar imamo stekleno ploščo, ali pa trdo “UHU” lepilo za druge podlage.

Tako kot adhezija prve plasti je pomembna tudi adhezija medsebojnih plasti. To dosežemo s pritiskom nove plasti na prejšnjo, pri čemer pomaga tudi delno ponovno taljenje predhodne plasti. Zaradi pritiska zgornje plasti se nalaganje dogaja v ovalni obliki, če bi opazovali presek. Stiki med dvema ovaloma predstavljajo mesta koncentracije napetosti, kjer najhitreje prihaja do loma [8]. Zaradi tega v smeri nalaganja plasti pričakujemo nizke mehanske lastnosti končnega izdelka.

2.6.2.3 Podpore

Čeprav je metoda FFF 3D tiska zelo vsestranska, ima svoje omejitve. Velik problem predstavljajo geometrije, kjer je naklon stene manjši od 45° glede na podlago. Nad to mejo se plasti ne sprimeta več dobro med seboj. Temu se lahko izognemo z uporabo podpornih struktur. Te strukture imajo majhno gostoto tiska in posebno geometrijo, ki porabi malo filamenta, a zagotavlja veliko podporno površino in lahko odstranjevanje. S tem dodamo podlago, na katero se naslednja plast lahko odloži. Podporne strukture po končanem tisku nato odstranimo. Zaradi stika s podpornim materialom je kvaliteta površine slabša, zato odstranjevanju podpornih struktur ponavadi sledi naknadna obdelava izdelka [8].

2.6.2.4 Stopnja zapolnjenosti (ang. *Infill*)

Z metodo FFF ponavadi ne tiskamo popolnoma polnih izdelkov. Da se izognemo dolгим časom tiska in večji porabi materiala ponavadi izdelek zapolnimo le deloma [8]. Med pripravo modela določimo debelino sten izdelka, ki so natisnjene polno in pa delež in geometrijo notranje zapolnitve. Geometrija je lahko heksagonalna, kvadratna, trikotna, itd. Z zmanjšanjem stopnje zapolnitve močno skrajšamo čas tiska, a hkrati tudi vplivamo na nižje mehanske lastnosti končnega izdelka.

2.6.3 Dimenzijska natančnost

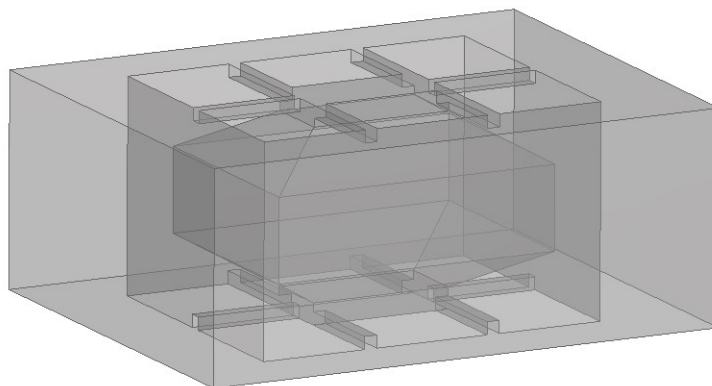
3D natisnjeni izdelki so vedno izpostavljeni dimenzijskim napakam. Med procesom tiska pri posameznih nanosenih plasteh prihaja najprej do raztezanja in nato krčenja materiala zaradi temperaturnih razlik. Pri tem se ustvarjajo notranje napetosti, ki vodijo do krčenja in krivljenja materiala [8]. Stopnja krčenja je neposredno odvisna od uporabljenega materiala. PLA filamenti so veliko bolj izpostavljeni krčenju kot PETG filamenti, slednji pa so veliko bolj dovzetni za krivljenje kot pa PLA filamenti. V kolikor je pomembno ujemanje med izdelki, je potrebno prilagajanje dimenzij pred tiskom.

3 Zasnova in preračun metamateriala

V tem poglavju je najprej predstavljena zasnovana osnovna celica (OC) MM. Sledi predstavitev izdelave programa za numerično simulacijo odziva MM in izris disperzijskih krivulj po inverzni metodi.

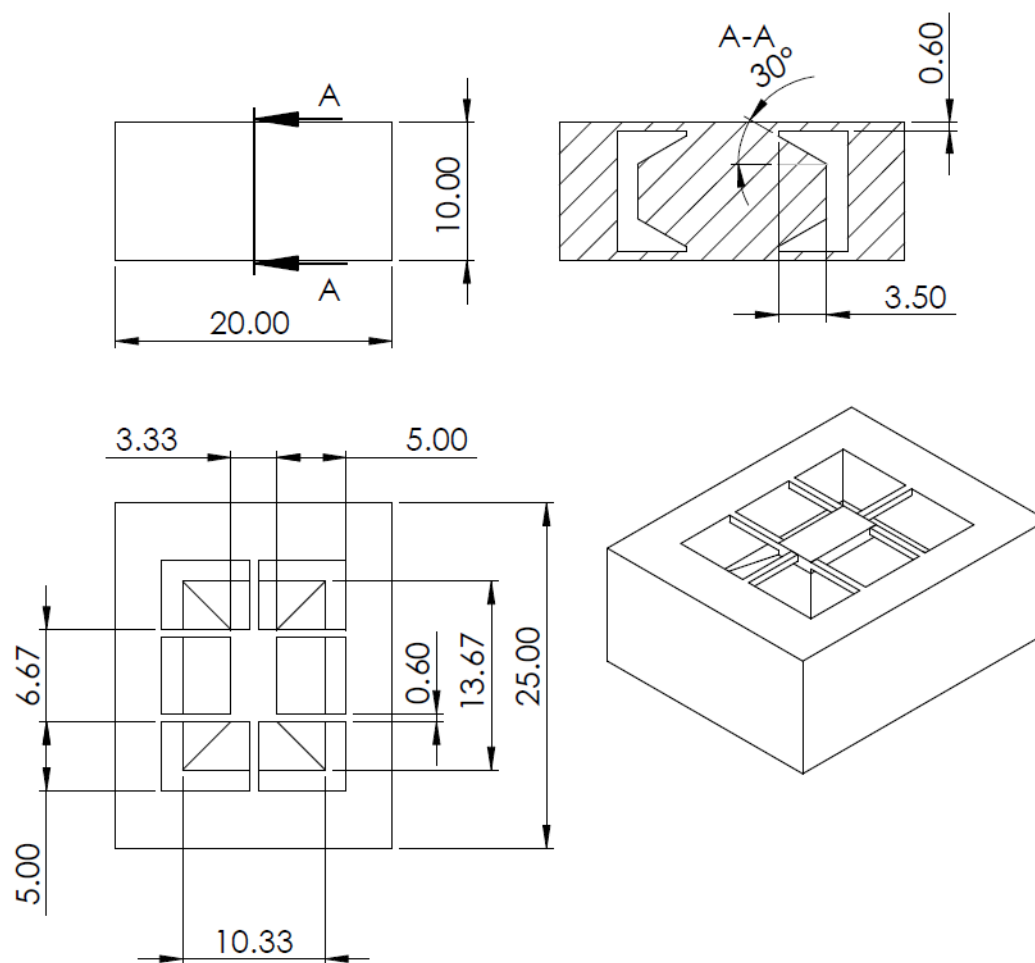
3.1 Zasnova oblike metamateriala

Cilj zasnove je bila konstrukcija OC MM, ki omogoča 1D periodičnost. Zaradi lažjega prilagajanja tekom preizkusov je OC zasnovana parametrično, kar omogoča hitre popravke tako na nivoju CAD modela, kot tudi numeričnega izračuna. Po veliko iteracijah smo se odločili za obliko OC, ki je prikazana na sliki 3.1. Zaradi parametričnosti lahko hitro spreminjamo 1. lastno frekvenco preko spreminjanja mase in togosti vzmeti resonatorja. Resonator se nahaja znotraj osnove strukture, saj tako ob nihanju strukture ne povzroča torzijskih obremenitev in resonator prisilimo, da v željenem frekvenčnem področju niha le prečno na strukturo, predvsem s 1. nihajno obliko.



Slika 3.1: Končni koncept OC MM.

Pri zasnovi so bile že upoštevane tudi omejitve izdelave OC s pomočjo FFF tehnike 3D tiska. Načrtovane vzmeti ne omogočajo visoko uspešnost dobrega tiska na dnu strukture in se zanašajo na pravilno izbrane parametre tiska pri zgornjih vzmetih. Slednje namreč uporabljajo posebno tehniko 3D tiska imenovano “mostiščenje” (ang. bridging). Takrat tiskalnik nanaša material čez večje vrzeli brez podpore. Na sliki 3.2 so prikazane končne mere OC, ki smo jih prilagajali dokler lastna frekvenca strukture ni bila med 0 in 1000 Hz. Dvojne vzmeti na straneh so načrtovane zaradi preprečevanja nihanja notranje mase okoli z osi. Pri debelinah vzmeti smo omejeni z zmožnostjo izdelave s tehnologijo 3D tiska – če bi vzmeti naredili preozke ali pretanke, bi prehitro prišlo do njihove porušitve.



Slika 3.2: Dimenzije OC MM.

Znotraj programskega paketa za CAD modeliranje Solidworks so za OC parametrizirane naslednje veličine:

- Širina, višina in dolžina OC;
- širina in debelina vzmeti.

3.2 Izdelava numeričnega modela

Dandanes imamo za numerične simulacije na voljo različne programske pakete, ki nam predvsem močno pomagajo pri analizi kompliciranih 2D ali 3D struktur. Ponavadi bi osnovne preračune naredili v omenjenih paketih in bi potem s pridobljenimi podatki znotraj ločenega programa izračunali še disperzijske krivulje. V našem primeru imamo relativno preprosto strukturo, zato je mogoče za vse narediti enoten program in se povsem izogniti uporabi programov drugih proizvajalcev.

V tem poglavju bo obrazložen postopek izdelave numeričnega modela v programskem jeziku Python.

3.2.1 Izračun lastnih frekvenc

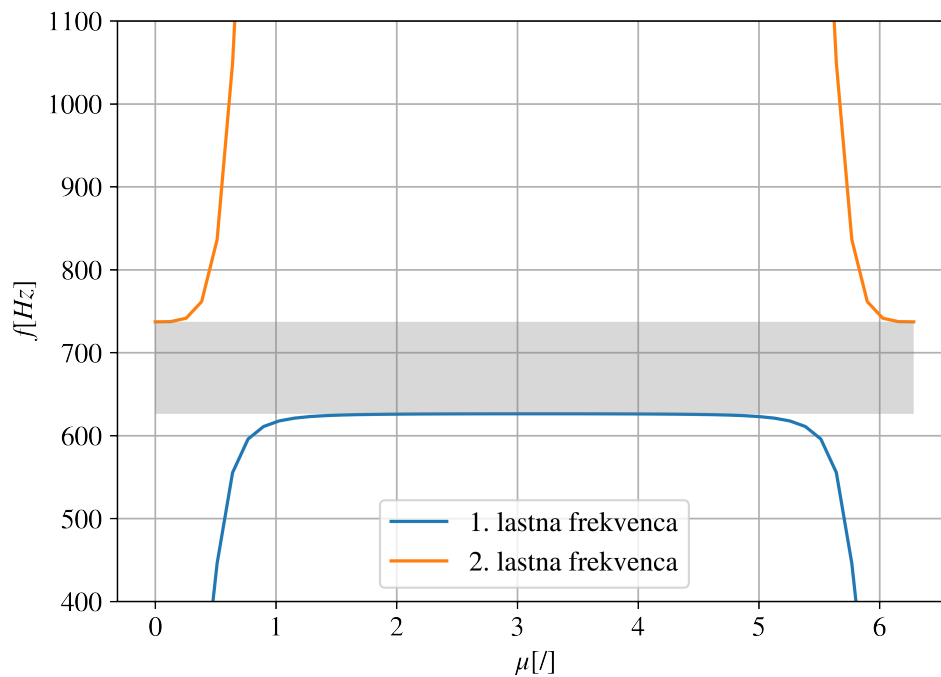
Program za analizo MM je spisan v obliki razreda, ki mu podamo naslednje vhodne podatke:

- elastični modul;
- širina, višina in dolžina OC;
- gostota;
- nadomestna togost vzmeti;
- masa resonatorja;
- število končnih elementov.

Nadomestno togost vzmeti pridobimo s pomočjo strukturne analize OC v programskem paketu Ansys [1], maso resonatorja pa iz CAD modela iz programskega paketa Solidworks [10]. Program v naslednjih korakih tvori globalno masno in togostno matriko sistema, pri čemer upošteva spremenljiv prerez, ki vpliva na površino prereza, vztrajnostni moment prereza in maso. Nato globalni matriki reducira v reducirano globalno masno in reducirano globalno togostno matriko. Vse te matrike so funkcije vektorja širjenja valovanja μ . Ko rešimo EVP, dobimo seznam lastnih frekvenc in lastnih oblik, katerega dolžina je enaka številu končnih elementov. Seznam prav tako pripada točno določenemu vektorju širjenja valovanja.

3.2.2 Izračun disperzijskih krivulj

V naslednjem koraku po inverznem pristopu izračunamo disperzijske krivulje za pripadajoči MM. Program to naredi tako, da za končno število vektorjev širjenja valovanja μ s postopkom iz poglavja 3.2.1 izračuna lastne frekvence in jih nariše na graf $\omega(\mu)$. Zaradi preglednosti v programu lahko izberemo koliko lastnih frekvenc prikažemo na grafu in omejimo njegovo območje frekvenc, da lažje določimo PZF. Program nato izračuna razliko med najmanjšo vrednostjo druge lastne frekvence in največjo vrednostjo prve lastne frekvence in izriše območje PZF. Disperzijska krivulja je razvidna iz slike 3.3.

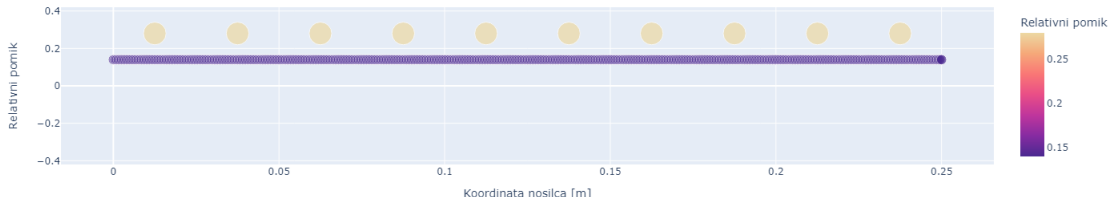


Slika 3.3: Disperzijske krivulje za MM.

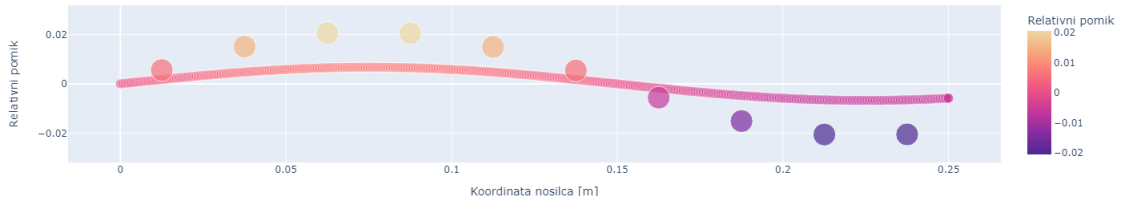
Iz diagrama je razvidno, da naj bi PZF bil med 625 in 740 Hz. Po analizah v programskem paketu Ansys [1], se v tem območju nahaja tudi prva lastna frekvenca OC, kjer resonator intenzivno niha navzgor in navzdol.

3.2.3 Simulacija odziva MM

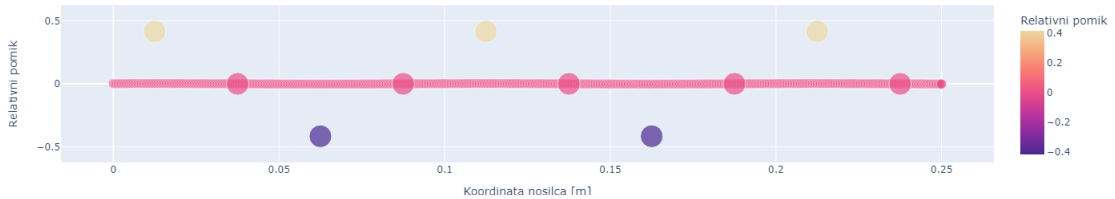
Da si je lažje predstavljati različno obnašanje strukture pri različnih vektorjih širjenja valovanja, program vsebuje tudi metodo za vizualizacijo relativnega gibanja osnovne strukture in resonatorja. Oblike lahko izrišemo s pomočjo vektorja lastnih oblik, ki ga dobimo poleg vektorja lastnih frekvenc kot rezultat rešive EVP. Preden pa obliko lahko izrišemo, moramo dodati manjkajoča vozlišča, saj smo matriko pred tem reducirali. Prav tako v tej stopnji v simulacijo dodamo več osnovnih celic, da dobimo obliko nosilca. V ta namen uporabimo Bloch-Floquetov teorem, ki povezuje skrajne točke OC. Vektor pomikov je kompleksen – realne komponente predstavljajo razmerje pomikov, imaginarne komponente pa fazni zamik, ki ga moramo prav tako upoštevati.



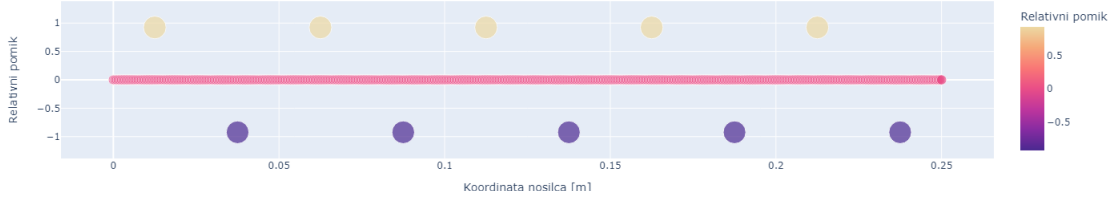
Slika 3.4: Prva lastna oblika za $\mu = 0$.



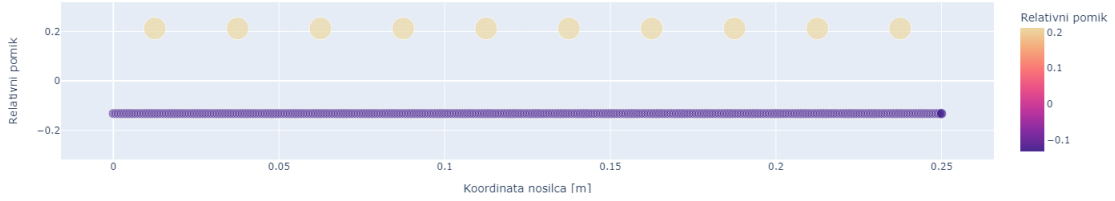
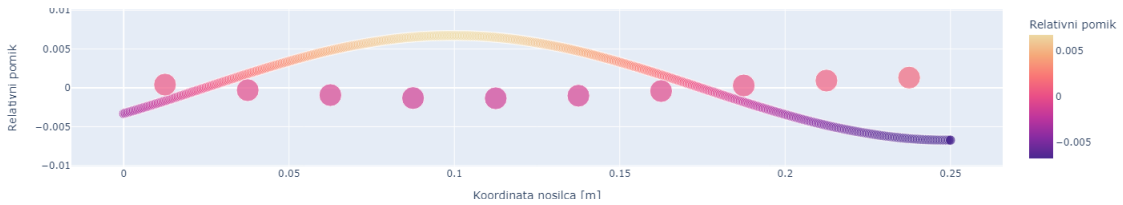
Slika 3.5: Prva lastna oblika za $\mu = \frac{\pi}{6}$.

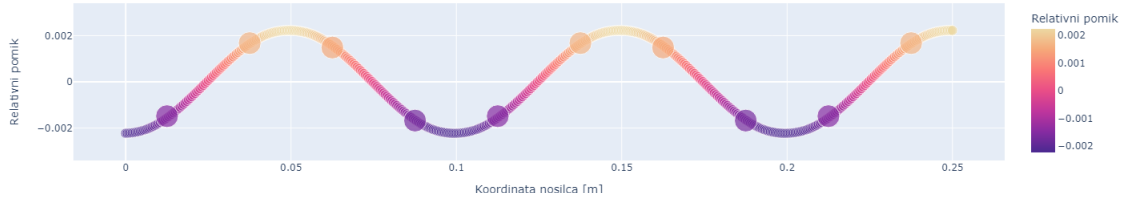


Slika 3.6: Prva lastna oblika za $\mu = \frac{\pi}{2}$.

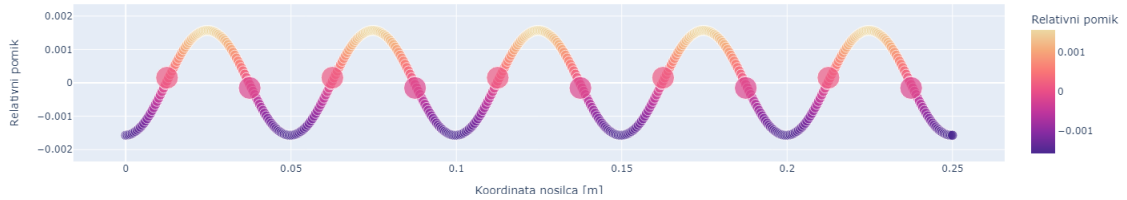

 Slika 3.7: Prva lastna oblika za $\mu = \pi$.

Na slikah 3.4—3.7 opazujemo lastne oblike med nihanjem s prvo lastno frekvenco. Velike pike ponazarjajo resonatorje, manjše pike pa vozlišča končnih elementov. Na sliki 3.4 lahko opazimo, da imamo pri vektorju širjenja valovanja $\mu = 0$ le toge premike, kar je povsem pričakovano, saj se nam vektor širjenja valovanja neposredno izkazuje v faznem zamiku levega in desnega vozlišča OC. V nadaljnjih strukturah se stanje nato spreminja, dokler ne dosežemo $\mu = \frac{\pi}{2}$ na sliki 3.6, ko sta sosednja resonatorja zamaknjena ravno toliko, da eden doseže skrajno lego, medtem ko je drugi v ravnovesni legi. Na sliki 3.7 lahko opazujemo stanje, ko se vsi resonatorji srečujejo v ravnovesnih legah, ker je fazni zamik takrat enak $\mu = \pi$. Opazimo, da imajo pri prvi lastni frekvenci večjo amplitudo nihanja resonatorji, medtem ko osnovna struktura večinoma miruje.


 Slika 3.8: Druga lastna oblika za $\mu = 0$.

 Slika 3.9: Druga lastna oblika za $\mu = \frac{\pi}{6}$.



Slika 3.10: Druga lastna oblika za $\mu = \frac{\pi}{2}$.



Slika 3.11: Druga lastna oblika za $\mu = \pi$.

Na slikah 3.8—3.12 pri istih vrednostih vektorja širjenja valovanja kot prej opazujemo še druge lastne oblike. Lastna oblika za $\mu = 0$ ni presenetljiva, saj gre ponovno za toge premike. Pri stanju na sliki 3.9 pa opazimo večje amplitude nihanja osnovne strukture in manjše amplitude resonatorjev. Pri vektorju širjenja valovanja $\mu = \frac{\pi}{2}$ se resonatorji gibljejo skupaj z osnovno strukturo in pri vektorju širjenja valovanja $\mu = \pi$ resonatorji večinoma le stojijo na miru in se skoraj v celoti giblje osnovna struktura.

4 Eksperimentalni del

V tem poglavju bomo predstavili postopek določanja materialnih lastnosti filamenta in 3D tiska MM.

4.1 Proces 3D tiska

Po končani konstrukciji OC MM, smo iz programskega paketa Solidworks [10] izvozili model v formatu STL. STL zapis model razdeli na trikotnike, s katerimi popiše površine izdelka. Naslednji korak je bil priprava G-kode za 3D tiskalnik. V ta namen obstaja več namenskih programskih paketov, ki model za dane parametre razreže na plasti (ang. *slicing*) in tvori G-kodo. Mi smo uporabili prosto dostopni program UltiMaker Cura [11].

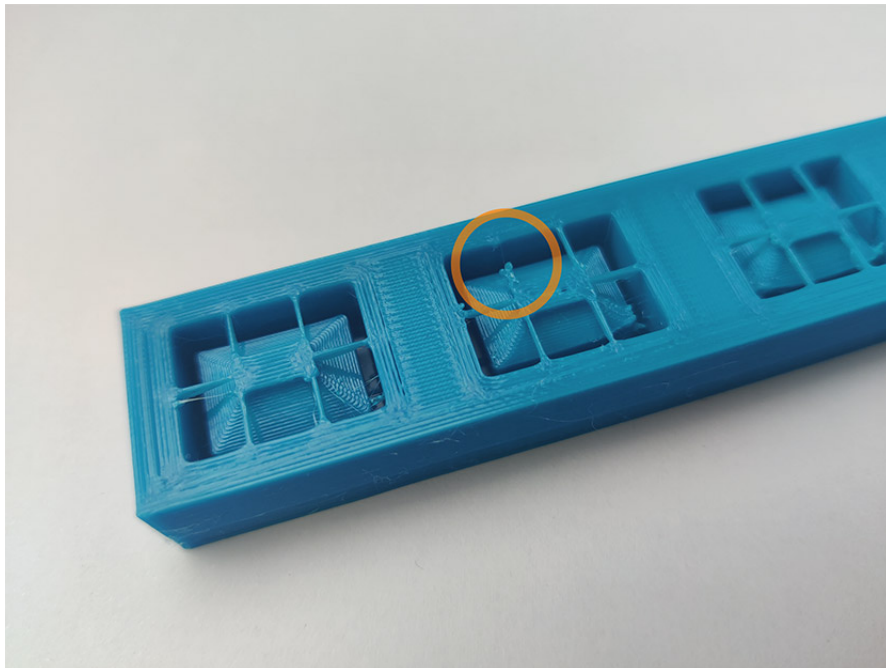
Za izdelavo MM smo uporabili PETG filament. V primerjavi z bolj razširjeno uporabljenim PLA filamentom ima PETG boljšo voljnost, kar potrebujemo za vzmetni del OC.

Preglednica 4.1: Osnovni parametri za tisk.

Temperatura šobe	240 °C
Temperatura podloge	82 °C
Delež zapolnitve	100 %
Hitrost tiska	50 mm s ⁻¹
Debelina plasti	0.15 mm
Hitrost mostiščenja	10 mm s ⁻¹

Posebej pozorni smo bili na vzmeti OC MM, saj so ključnega pomena za pravilno območje PZF. Vzmeti so izjemno majhnih dimenzij (0.6 mm x 0.6

mm) in se nahajajo na zgornjem in spodnjem delu OC. Na spodnjem delu OC vzmeti ležijo neposredno na plošči, kar ne predstavlja problema, medtem ko na zgornjem delu nimajo nobenega podpornega materiala. Praviloma bi v takem primeru uporabili podporne strukture, vendar je razdalja majhna, prav tako pa bi bilo po tisku podpore nemogoče odstraniti zaradi nedostopnosti. V takem primeru se poslužimo posebne tehnike “mostiščenja” (ang. *bridging*), kjer lahko material nanašamo med dvema stenama brez podpor. Da je to izvedljivo je potrebno na tem mestu prilagoditi parametre tiskanja — močno upočasniti hitrost tiska in povečati hlajenje na maksimalno raven, da se material v trenutku strdi. S tem močno izboljšamo uspešnost tiska brez podpor. Še vedno lahko pride do napak pri tisku, kot razvidno iz slike 4.1.



Slika 4.1: Primer slabega mostiščenja.

Tisk ene enote nosilca, ki je zaradi velikosti plošče tiskalnika omejen na 25 cm, je trajal 7 ur.

4.2 Meritve

V tem poglavju sta opisani meritvi gostote in Youngovega modula PETG filamenta. Ti vrednosti smo nato kot parametra uporabljali v numeričnem modelu, ki je opisan v 3. poglavju.

4.2.1 Meritev gostote

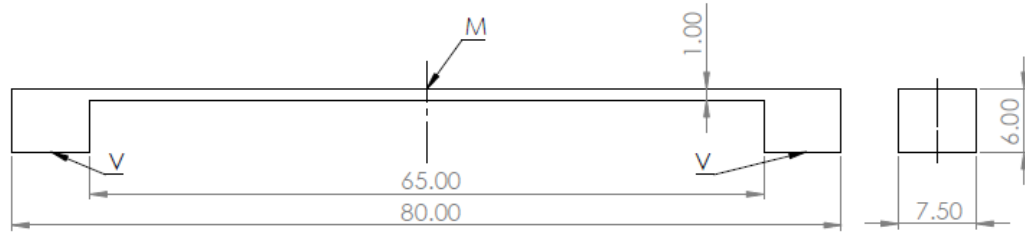
Gostota PETG je bila izmerjena preko treh kock, nastisnjenih iz PETG filamenta s 100% polnitvijo dimenzij 15x15x15 mm. Maso smo pomerili s tehniko Kern EMB 200-3, dimenzije posameznih kock pa s kljunastim merilom. Za vsako kocko je bilo izvedenih 5 ponovitev meritev. Iz izmerjenih vrednosti je bila izračunana gostota PETG plastike, ki je podana v preglednici 4.2.

Preglednica 4.2: Izmerjena gostota PETG plastike.

Parameter	ρ [kg/m ³]
Vrednost	1124 ± 8

4.2.2 Meritev elastičnega modula

Za popis disperzijskih krivulj smo uporabljali izotropni Hookov elastični zakon. Pri končnem MM pa so razmere anizotropne zaradi tehnologije 3D tiska. Zato je bil cilj določiti ekvivalenten elastični modul. Za določitev modula smo uporabili pristop z iskanjem lastne frekvence vzorca. Meritve smo izvajali na stresalniku, na katerega smo vpeli vzorce izdelane po načrtu na sliki 4.2. Vzorce smo na ploščo stresalnika vpeli na mestu V z uporabo sekundnega lepila in zaščitnega sloja lepilnega traku. Na sredini vzorca smo nato nalepili antirefleksivno nalepko in vanjo usmerili laserski snop iz laserja PDV 100, proizvajalca Polytec s katerim smo merili hitrost točke. Merilno mesto je na sliki 4.2 označeno s črko M. Stresalnik LDS V555 smo vezali na krmilnik Dactron, ki smo mu ukaze pošiljali iz nadzornega programa na računalniku. Na ploščo smo poleg vzorcev namestili tudi referenčni pospeškomer T333B30 proizvajalca PCB Piezotronics. Pospeškomer nam je služil kot povratni signal v krmilni program ter za pridobitev frekvenčne prenosne funkcije. Oba signala smo zajemali na merilni kartici NI-9232, ki je bila povezana na osebni računalnik s programom LabView [3].

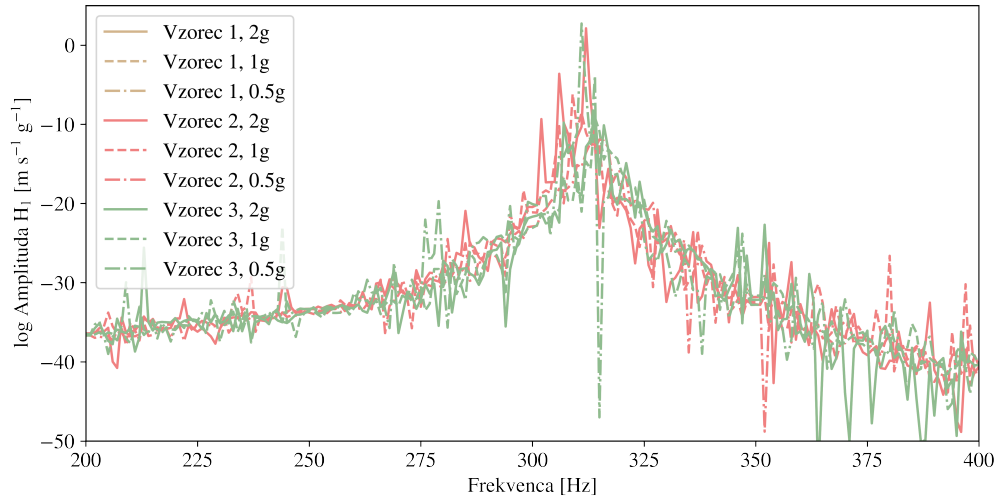


Slika 4.2: Dimenzije vzorca za določitev elastičnega modula.

Vsakega izmed treh vzorcev smo obremenili s sinusnim preletom (navzgor in navzdol) od 50 Hz do 1000 Hz, s hitrostjo 5 oktav na minuto. Vsak test smo ponovili pri amplitudah pospeška 0.5g, 1g in 2g. Rezultate smo izračunali preko frekvenčne prenosne funkcije. Iz rezultatov na sliki 4.3 lahko vidimo manjši raztros natisnjenih vzorcev. Določena lastna frekvenca je predstavljena v preglednici 4.3.

Preglednica 4.3: Izmerjena lastna frekvenca vzorcev.

Parameter	f_0 [Hz]
Vrednost	313 ± 4



Slika 4.3: Rezultati meritev frekvenčne prenosne funkcije hitrosti in pospeška.

Iskanje modula smo izvedli s pomočjo modalne analize v programskem okolju ANSYS. Na mestih V, označenih na sliki 4.2 smo nastavili fiksno vpetje. Za materialne lastnosti smo uporabili PET izotropen in idealno elastičen material, ki smo mu vrednost gostote spremenili na prej izmerjeno vrednost in uporabili teoretično Poissonovo število $\nu = 0.33$. Nato smo s pomočjo funkcije optimizacije (*ang. Direct optimization*) nastavili iskano lastno frekvenco ter označili prilagajanje modula E. Skozi več iteracij je nato ANSYS izračunal elastični modul PETG plastike, ki je podan v preglednici 4.4.

Preglednica 4.4: Izmerjen modul elastičnosti PETG plastike.

Parameter	E [MPa]
Vrednost	1904

5 Zaključki

V okviru seminarske naloge smo preučevali možnost uporabe MM kot eno izmed možnosti dušenja vibracij v strukturni dinamiki. Zasnovali smo obliko metamaterila in izračunali disperzijske krivulje po inverzni metodi. Iz disperzijskih krivulj smo prepoznali PZF frekvenčno območje MM. V okviru meritev smo določili materialne lastnosti PETG filamenta, ki jih potrebujemo za numerično določitev PZF MM.

Predlogi za nadaljnje delo

Zaradi časovih omejitev tekom projekta nismo uspeli pripraviti eksperimenta, v okviru katerega bi preverili ujemanje z numeričnim modelom. Želja je v okviru diplomskega dela pripraviti primeren eksperimentalni postopek za brezkontaktno določitev odziva strukture pri vzbujanju z različnimi frekvencami. Prav tako bi lahko problem razširili na spominski efekt ali temperaturno odvisno obnašanje strukture, pri čemer priporočamo slednjo možnost.

6 Literatura

- [1] Ansys. *Ansys programski paket*. 2007. URL: <https://www.ansys.com> (pridobljeno 26. 12. 2022).
- [2] Lucas Van Belle. “Vibro-acoustic performance of locally resonant metamaterials with damping”. Doktorska disertacija. Le Mans Universite, 2019.
- [3] National Instruments. *LabView Community*. 2023. URL: <https://www.ni.com/sl-si/support/downloads/software-products/download.labview-community.html#460309> (pridobljeno 13. 1. 2023).
- [4] Ville Jämsä. “Implementation of a 2D beam element to JuliaFEM”. Diplomsko delo. University of Oulu, TEKNILLINEN TIEDEKUNTA, 2018.
- [5] Tilen Košir. “Uporaba vibroakustičnih metamaterialov v strukturno dinamiki za nižanje ravni hrupa”. Magistrsko delo. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, 2020.
- [6] Leapfrog. *3D Printing Concepts and 3D Printer Parts*. 2020. URL: <https://www.lpfrg.com/guides/3d-printing-concepts-and-3d-printer-parts/> (pridobljeno 30. 12. 2022).
- [7] Abhijit Poddar. *Brillouin zones*. 2007. URL: http://www.abhipod.com/researchpage/UGCMRP_05_06_ForWeb/elearningnode14.html (pridobljeno 26. 12. 2022).
- [8] Ben Redwood, Filemon Schöffner in Brian Garret. *The 3D printing handbook: technologies, design and applications*. 3D Hubs, 2017.

- [9] Bahaa Shaqour in sod. “Gaining a better understanding of the extrusion process in fused filament fabrication 3D printing: A review”. V: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 114.5 (2021), str. 1279–1291.
- [10] Solidworks. *Solidworks programski paket*. 2007. URL: <https://www.solidworks.com> (pridobljeno 26.12.2022).
- [11] UltiMaker. *UltiMaker Cura 5.2.1*. 2022. URL: <https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura> (pridobljeno 30.12.2022).