Analiza vlastitih frekvencija prednapregnutog senzora sile

Božičević, Dorotea

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:190:189048

Rights / Prava: Attribution 4.0 International/Imenovanje 4.0 međunarodna

Download date / Datum preuzimanja: 2025-03-28



Repository / Repozitorij:

Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering





SVEUČILIŠTE U RIJECI **TEHNIČKI FAKULTET**

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

ANALIZA VLASTITIH FREKVENCIJA PREDNAPREGNUTOG SENZORA SILE

Rijeka, rujan 2022.

Dorotea Božičević 0316000935

SVEUČILIŠTE U RIJECI **TEHNIČKI FAKULTET**

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

ANALIZA VLASTITIH FREKVENCIJA PREDNAPREGNUTOG SENZORA SILE

Mentor: Prof. dr. sc. Marko Čanađija

Komentor: Izv. prof. dr. sc. Marin Karuza

Rijeka, rujan 2022.

Dorotea Božičević 0316000935

Rijeka, 11. ožujka 2022.

Zavod:Zavod za tehničku mehanikuPredmet:Osnove primjene metode konačnih elemenataGrana:2.11.01 opće strojarstvo (konstrukcije)

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik:Dorotea Božičević (0316000935)Studij:Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Zadatak: Analiza vlastitih frekvencija prednapregnutog senzora sile/Eigenvalue analysis of a prestressed force sensor

Opis zadatka:

Odrediti vlastite frekvencije membranskog senzora sile koji nije prednapregnut, sa i bez dodatnog sloja platine. Odrediti vlastite frekvencije prednapregnutog senzora sile, sa i bez dodatnog sloja platine. Istražiti utjecaj različitih razina prednaprezanja na vlastite frekvencije, sa i bez dodatnog sloja platine. Istražiti utjecaj nesimetrične raspodjele platine na vlastite frekvencije. Dimenzije, materijal i opterećenja odabrati prema dostavljenom predlošku. Proračun provesti metodom konačnih elemenata. Komentirati rezultate

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Bozieni

Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:

Pr∮f. dr. sc. Marko Čanađija

Izv. prof. dr. sc. Marin Karuza (komentor)

Predsjednik povjerenstva za završni ispit:

Prof. dr. sc. Kristian Lenić

IZJAVA

Izjavljujem da sam završni rad "Analiza vlastitih frekvencija prednapregnutog senzora sile" izradila samostalno prema "Uputama za izradu i samoarhiviranje završnog/diplomskog rada" i prema "Pravilniku o završnom radu, završnom ispitu i završetku preddiplomskih sveučilišnih studija" Tehničkog fakulteta u Rijeci.

Rijeka, rujan 2022.

Dorotea Božičević

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Marku Čanađiji i komentoru izv. prof. dr. sc. Marinu Karuzi što su mi pomogli sa svojim savjetima i znanjem pri izradi ovog završnog rada i što su uvijek imali strpljenja i vremena za moje brojne upite.

Posebno sam zahvalna svom dečku Karlu na razumijevanju, ljubavi i podršci prilikom moje odluke o ponovnom studiranju i stjecanju još jedne diplome.

I na kraju, posebnu i najveću zahvalnost iskazujem svojoj majci Senki koja je uvijek bila uz mene, koja me uvijek podržavala i upućivala na pravi put.

0		Т		×		٠
S	ิด	A	r	7	я	1
	u	u			щ	. J

1	Uvo	d		1
2	Senz	zor sile		2
3	Mat	ematičk	a pozadina vibracije pločastog elementa	4
	3.1	Što je	mod?	7
4	Izra	da geon	netrijskog modela u FEMAP-u	8
	4.1	Geome	etrija	8
	4.2	Materi	jal	9
	4.3	Definit	ranje značajki konačnih elemenata	10
	4.4	Kreira	nje sloja drugog materijala	11
	4.5	Omrež	ivanje geometrijskog modela	12
	4.6	Rubni	uvjeti	12
	4.7	Optere	ćenja	13
	4.8	Analiz	a	13
		4.8.1	Statička analiza	13
		4.8.2	Modalna analiza	15
5	Rezu	ultati i d	liskusija	16
	5.1	Senzoi	sile koji nije prednapregnut	16
		5.1.1	Si_3N_4 membrana 2x2 mm debljine 50 nm	16
		5.1.2	Si_3N_4 membrana 2x2 mm debljine 50 nm sa slojem platine 10 nm	20
	5.2	Predna	pregnuti senzor sile	23
		5.2.1	Si_3N_4 membrana 2x2 mm debljine 50 nm $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	23
		5.2.2	Si_3N_4 membrana 2x2 mm debljine 50 nm sa slojem platine 10 nm	26

	5.3	Različi	te razine prednaprezanja	30
		5.3.1	Naprezanje 0 GPa	31
		5.3.2	Naprezanje 0,2 GPa	32
		5.3.3	Naprezanje 0,4 GPa	33
		5.3.4	Naprezanje 0,6 GPa	34
		5.3.5	Naprezanje 0,8 GPa	35
		5.3.6	Naprezanje 1 GPa	36
		5.3.7	Naprezanje 1,2 GPa	37
	5.4	Nesim	etrična raspodjela platine	40
6	Zakl	ljučak		43
	Lite	ratura		44
	Рорі	s slika		45
	Popi	s tablic	a	48
	Saže	tak		50
	Abst	tract		51

1 Uvod

Činjenica je da sve što nas okružuje vibrira, odnosno da svaki objekt ima prirodnu frekvenciju, tj. vlastitu frekvenciju, na kojoj može vibrirati. Kada objekt vibrira na određenoj vlastitoj frekvenciji, njegova se struktura deformira u odgovarajući oblik, tj. svojstveni mod. Vlastite frekvencije kao i svojstveni modovi mogu se odrediti modalnom analizom, odnosno analizom vlastitih frekvencija. Modalna analiza uvelike se koristi za analizu i provjeru dizajna poput dijelova okvira zrakoplova, lopatica vjetroturbina ili plinskih turbina, šasija vozila i bilo koje kritične strukture koja je izložena silama koje bi mogle izazvati štetne ili čak destruktivne rezonantne frekvencije bez prigušenja. [1]

U ovom završnom radu napravljena je analiza vlastitih frekvencija prednapregnutog senzora sile metodom konačnih elemenata, odnosno uz pomoć programskog paketa FEMAP (*eng. Finite Element Modeling and Postprocessing*). Pomoću FEMAP-a napravljen je konačno-elementni geometrijski model, a za izvođenje proračuna korišten je NX Nastran. Kao senzor sile korištena je kvadratna membrana od silicijevog nitrida čiji je proizvođač kanadska tvrtka *Norcada* koja je specijalizirana za razvoj i proizvodnju mikro-elektromehaničkih sustava (*eng. MEMS*). Senzori osjetljivi na silu zanimljivi su u više područja znanosti i tehnologije zato što mjerenje sila s visokom osjetljivošću predstavlja tehnološki iskorak koji omogućava uvid u još neistraženo područje sila i međudjelovanja što je omogućilo nova saznanja i primjene u mnogim područjima znanosti i tehnologije. Neki od primjera su karakterizacija površina kroz mikroskopiju atomskih sila, mjerenje Casimirove sile (odnosno fluktuacija kvantnog vakuuma) ili detekcija pojedinačnih molekula. Također, sve veća upotreba pločastih elemenata, u koje svrstavamo i senzor sile, u raznim industrijskim sektorima, pokazuje potrebu za proučavanjem njihovog vibracijskog ponašanja koje stoga postaje od velike važnosti kako bi se pomoglo inženjerima da konstruiraju bolje strukture. Analiza vlastitih frekvencija važna je aktualna tema, kako s akademske tako i s industrijske točke gledišta.

2 Senzor sile

Kako je u uvodu rečeno da su senzori sile zanimljivi u više područja znanosti i tehnologije, također se pokazalo da se senzori za mjerenje sila mogu koristiti i u potrazi za tamnom materijom i tamnom energijom što bi moglo dati odgovore na pitanja o sastavu svemira koji je još uvijek u velikoj mjeri nepoznat. U CERN-u je izveden eksperiment za otkrivanje čestica kandidata tamne energije interakcijom sa senzorom sile. Budući da njihova interakcija sa senzorom ovisi o gustoći materijala od kojeg se izrađuje senzor, ispitivanje se izvode na Fakultetu za fiziku Sveučilišta u Rijeci gdje se površina senzora premazuje s različitim metalnim slojevima. Senzor sile temelji se na tankoj kvadratnoj membrani od silicijevog nitrida (Si_3N_4) rastegnutoj na okvir od silicija kako je prikazano na slici 2.1.



Slika 2.1: Membrana 2x2 mm² debljine 50 nm zalijepljena na držač.

Kako bi se povećala osjetljivost senzora, na njega se nanosi metalizirani sloj kako je prikazano na slici 2.2.



Slika 2.2: Poprečni presjek okvira membrane gdje se mogu vidjeti slojevi silicijevog nitrida i platine.

Da bi senzor sile bio osjetljiv na silu te da bi mjerio istu potreban je mjerni sustav sa slike 2.3 koji se sastoji od sljedećih elemenata: mjerna komora koja sadrži najmanje jednu membranu koja vibrira na najmanje jednoj rezonantnoj frekvenciji; pobudni laserski uređaj konfiguriran za ubrizgavanje pobudne monokromatske laserske zrake; mjerni laserski uređaj konfiguriran za ubrizgavanje mjerne monokromatske laserske zrake; piezo-električni element zajedno s magnetskom oprugom; i dvije fotodiode koje generiraju strujni signal koji sadrži informaciju o razlici optičkih puteva monokromatskih laserskih zraka i informaciju o pomacima fleksibilne mehaničke strukture (membrane).



Slika 2.3: Sustav za mjerenje sila.

Nadalje, očitanje vrijednosti vanjskog utjecaja zasnovano je na promjeni vlastitih frekvencija membrane. Promjene vlastitih frekvencija membrane mjere se pomoću Michelsonovog interferometra gdje je jedno zrcalo zamijenjeno membranom (Slika 2.4).



Slika 2.4: Michelsonov interferometar s membranom.

Dakle, prva analiza vlastitih frekvencija napravljena je pomoću mjernog sustava za mjerenje sile prikazanom na slici 2.3. Druga analiza vlastitih frekvencija senzora sile napravljena je metodom konačnih elemenata koristeći softver FEMAP te je objašnjena u narednim poglavljima.

3 Matematička pozadina vibracije pločastog elementa

Membrana definirana s $\{0 < x < a, 0 < y < b\}$ i prikazana na slici 3.1 je pločasti element, odnosno dvodimenzionalni mehanički oscilator koji titra određenim vlastitim frekvencijama. Poprečni pomak *w* membrane zadovoljava klasičnu diferencijalnu jednadžbu gibanja [2] :

$$D\nabla^4 w(x, y, t) + \rho h \frac{\partial^2 w(x, y, t)}{\partial t^2} = 0$$
(3.1)

gdje je D krutost na savijanje koja je definirana kao:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-v^2)}$$
(3.2)

E je modul elastičnosti, *h* je debljina membrane, *v* je Poissonov koeficijent, ρ je gustoća membrane, *t* je vrijeme i $\nabla^4 = \nabla^2 \nabla^2$, gdje je ∇^2 Laplaceov operator.

Laplaceov operator u pravokutnim koordinatama:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$$
(3.3)



Slika 3.1: Pravokutna membrana.

Budući da je membrana uklještena na rubovima, moraju biti zadovoljeni sljedeći rubni uvjeti: - da nema pomaka:

$$w(x, y, t) = 0$$
 za $x = 0, x = a$
 $w(x, y, t) = 0$ za $y = 0, y = b$

- da nema rotacije:

$$\frac{\partial^2 w(x, y, t)}{\partial x^2} = 0$$
$$\frac{\partial^2 w(x, y, t)}{\partial y^2} = 0$$

Nadalje, osim što pomak ploče *w* mora zadovoljiti rubne uvjete na rubu ploče, tako mora zadovoljiti i početne uvjete koji se u trenutku *t*=0 sastoje od početnog pomaka w_0 i početne brzine v_0 gdje je $w = w_0(x, y)$ te $\frac{\partial w}{\partial t} = v_0(x, y)$. [3]

Jednadžba 3.1 je homogena parcijalna diferencijalna jednadžba četvrtog reda te da bismo ju riješili možemo pretpostaviti sljedeće rješenje [4]:

$$w(x, y, t) = X(x)Y(y)T(t) = w(x, y)e^{j\omega t}$$
(3.4)

X(x)Y(y) = w(x,y) opisuje modove titranja neke harmonijske funkcije ovisne o vremenu, dok je ω vlastita frekvencija na kojoj vibrira membrana i koja je povezana s frekvencijom i periodom titranja preko sljedeće relacije:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \tag{3.5}$$

Supstitucijom jednadžbe (3.4) u jednadžbu (3.1), jednadžba (3.1) postaje:

$$X^{(4)}(x)Y(y)T(t) + 2X^{(2)}(x)Y^{(2)}(y)T(t)X(x)Y^{(4)}(y)T(t) = \frac{-\rho h}{D} \cdot X(x)Y(y)T^{(2)}(t)$$
(3.6)

Ako postavimo da je $\frac{D}{\rho h} = \mu^2$, a β nepoznanica, onda dobivamo izraz:

$$\frac{X^{(4)}(x)}{X(x)} + 2\frac{X^{(2)}(x)}{X(x)}\frac{Y^{(2)}(y)}{Y(y)} + \frac{Y^{(4)}(y)}{Y(y)} = -\frac{1}{\mu^2}\frac{T^{(2)}(t)}{T(t)} = \beta^4$$
(3.7)

pomoću kojeg dolazimo do sustava jednadžbi:

$$\begin{cases} T^{(2)}(t) + \mu^{2} \beta^{4} T(t) = 0\\ \frac{X^{(4)}(x)}{X(x)} + 2 \frac{X^{(2)}(x)}{X(x)} \frac{Y^{(2)}(y)}{Y(y)} + \frac{Y^{(4)}(y)}{Y(y)} - \beta^{4} = 0 \end{cases}$$
(3.8)

Nadalje, kako bismo pronašli rješenje sustava jednadžbi (3.8), pretpostaviti ćemo sljedeće rješenje:

$$w(x,y,t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left(A_{mn} \cos \omega_{mn} t + B_{mn} \sin \omega_{mn} t \right) \phi_{mn}(x,y)$$
(3.9)

gdje koeficijenti A_{mn} i B_{mn} ovise o početnim uvjetima, a modovi titranja dani su sljedećim izrazom:

$$X_m(x)Y_n(y) = A_{mn} \cdot \phi_{mn}(x, y) \tag{3.10}$$

Za slučaj membrane uklještene na rubovima, funkcija koja opisuje poprečni pomak membrane, odnosno oblik modova titranja dana je sljedećim izrazom:

$$w(x,y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} C_{mn} \phi_{mn}(x,y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} C_{mn} \sin \frac{m\pi}{a} x \sin \frac{n\pi}{b} y$$
(3.11)

gdje su a i b dimenzije membrane, a C_{mn} je amplituda vibracija za svaku vrijednost m i n.

Nadalje, supstitucijom jednadžbe (3.11) u jednadžbu (3.1) dobivamo homogenu algebarsku jednadžbu:

$$\frac{m^4\pi^4}{a^4} + 2\frac{m^2\pi^2}{a^2}\frac{n^2\pi^2}{b^2} + \frac{n^4\pi^4}{b^4} - \frac{\omega^2\rho h}{D} = 0$$
(3.12)

čije rješenje daje vrijednost prirodne, tj. vlastite frekvencije u rad/s:

$$\omega_{mn} = \pi^2 \left[\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 \right] \sqrt{\frac{D}{\rho h}}$$
(3.13)

Također valja naglasiti da su parametri *a* i *b* u ovom završnom radu jednaki jer je površina membrane kvadratna, a ne pravokutna. Za kvadratne membrane neke funkcije $X_m(x)Y_n(y)$ mogu odgovarati istoj svojstvenoj vrijednosti (degenerirani modovi). To znači da različiti modovi titranja titraju na istoj svojstvenoj frekvenciji.

3.1 Što je mod?

Mod je kombinacija deformiranog oblika u kojemu struktura kontinuirano izmjenjuje kinetičku i gravitacijsko potencijalnu energiju na vlastitoj frekvenciji na kojoj se i javlja isti. Drugim riječima, ako strukturu deformiramo u bilo koji od njezinih modova i pustimo je, ona će kontinuirano oscilirati od početnog oblika i natrag, u pozitivnom i u negativnom smjeru i to na vlastitoj frekvenciji određenog moda. Valja naglasiti da, bez prigušenja, nije potrebno vanjsko opterećenje kako bi se održala konstantna amplituda osciliranja. Iako struktura apsorbira svu raspoloživu energiju iz opterećenja, da nema prigušenja oscilacija bi rasla do beskonačnosti, odnosno do popuštanja strukture. Dakle, mod je oblik s odgovarajućom vlastitom frekvencijom pri kojoj će struktura apsorbirati svu raspoloživu energiju koju stvara pobuda, stoga treba biti oprezan jer i male pobudne sile mogu dovesti do velikih oscilacija ako se opterećenje pojavi u rezonanciji s vlastitom frekvencijom strukture. [5]

Na slici 3.2 prikazani su modovi titranja $\omega_{11}, \omega_{12}, \omega_{21}, \omega_{22}, \omega_{13}$ te ω_{31} , kvadratne membrane.



Slika 3.2: Modovi titranja kvadratne membrane.

4 Izrada geometrijskog modela u FEMAP-u

4.1 Geometrija

Geometrija senzora spada u kategoriju površina, stoga je ista napravljena naredbom **Geometry** — **Surface** — **Corners** (slika 4.1).



Slika 4.1: Naredbe za izradu geometrije senzora sile.

Redom su upisivane koordinate točaka u kutevima pravokutnika: (X=0, Y=0, Z=0), (X=0.002, Y=0, Z=0), (X=0.002, Y=0.002, Z=0), (X=0, Y=0.002, Z=0). Važno je napomenuti da su dimenzije senzora uvrštene u metrima.



Slika 4.2: Geometrija senzora sile.

4.2 Materijal

Nakon što je izrađena geometrija, definirane su materijalne značajke. Senzor je napravljen od silicijevog nitrida (Si_3N_4) čije su karakteristike prikazane u tablici 4.1:

Youngov modul, E	300 GPa
Poissonov broj, v	0.25
Gustoća, <i>ρ</i>	3260 kg/m ³
Koeficijent toplinskog širenja, α	$3,3 \cdot 10^{-6} \circ C$

Tablica 4.1: Mehanička svojstva silicijevog nitrida.[6]

Nadalje, s obzirom da se senzor metalizira, odnosno nanosi mu se sloj platine, potrebno je definirati još jedan materijal čije su karakteristike prikazane u tablici 4.2:

Youngov modul, E	171 GPa
Poissonov broj, v	0.39
Gustoća, <i>ρ</i>	21450 kg/m ³
Koeficijent toplinskog širenja, α	$9,1 \cdot 10^{-6} \circ C$

Na slici 4.3 prikazan je način definiranja materijala-silicijevog nitrida u FEMAP-u pomoću naredbe **Model** — **Material**. Bitno je da su sve mjerne jedinice uvrštene u osnovnim mjernim jedinicama. Na isti je način definiran i drugi materijal, tj. platina.

Define Material - ISOT	ROPIC		×
ID 1 Titl	e Si3N4	Layer 1	Material Type
General Function Refere	ences Nonlinear Ply/Bond Fi	ailure Creep Electri Limit Stress	ical/Optical Phase
Youngs Modulus, E Shear Modulus, G	300e9	Tension	0,
Poisson's Ratio, nu	0,25	Shear	0,
Thermal Expansion Coeff, a Conductivity, k Specific Heat, Cp	3,3e-6 0, 0,	Mass Density Damping, 2C/Co Reference Temp	3260 0, 0,
Heat Generation Facto	r 0,		
Sxy Load	Save	Сору	OK Cancel

Slika 4.3: Definiranje materijala.

4.3 Definiranje značajki konačnih elemenata

Pomoću naredbe **Model** — **Property** otvara se prozor prikazan na slici 4.4 koji služi za definiranje značajki konačnih elemenata. Klikom na **Elem/Property Type** odabrana je vrsta konačnih elemenata - **Plate**. Odabran je materijal **Material** - Si_3N_4 te je upisana debljina ploče (senzora) Thickness, Tavg or T1 = $50 \cdot 10^{-9}$ m.

Define Property - PLATE Element Type	Х
ID 1 Title 2x2x50	Material 1513114
Color 110	Layer 1 Elem/Property Type
Property Values	Additional Options
Thicknesses, Tavg or T1 50e-9	Bend Stiffness, 12I/T**3 0,
blank or T2 0,	TShear/Mem Thickness,ts/t 0,
blank or T3 0,	Bending 0Plate Material ~
blank or T4 0,	Transverse Shear 0Plate Material \sim
Nonstructural mass/area 0,	Memb-Bend Coupling 0None - Ignore V
Stress Recovery (Default=T/2)	
Top Fiber 0,	Load Save OK
Bottom Fiber 0,	Copy Cancel

Slika 4.4: Značajke ploče.

4.4 Kreiranje sloja drugog materijala

Pomoću naredbe **Model** — **Layup** otvara se prozor prikazan na slici 4.5 koji služi za definiranje modela koji se sastoji od više slojeva različitih materijala kao što je senzor kada mu se nanosi sloj platine. Klikom na naredbu **New Ply** odabrana su oba materijala, i silicijev nitrid i platina. Za slicijev nitrid upisana je debljina od 50 nm, a za platinu 10 nm. Za oba materijala vrijednost kuta upisana je 0. Izgled napravljenog sloja platine na membrani vidljiv je na slici 4.6.

🔳 Layup Edi	itor					_	
ID 1	Title n	nembrana sa pla	tinom				
Global Ply ID (o 0None	ptional)	AutoCreate	Material 2platina		Thickness	Angle	Ply Failure Theory 0From Property \sim
Тор о	f Layup		Total Thickness = 6	5,E-8		New P	ly 💕
Ply ID 2	Global Ply	Material 2platina	Thickness 1,E-8	Angle 0,	Failure Theory 0From Prop	Update Global Ply	Update Material
1		1Si3N4	5,E-8	0,	0From Prop	Update Thickness	Update Angle
						Update Ply FT	
						Duplicate	Symmetric
						Delete	Reverse
						Move Up	Move Down
						Rotate	Compute
						Load	Сору
						Save	🔁 🚖 🔩
Bottom	of Layup					ОК	Cancel

Slika 4.5: Kreiranje sloja platine.



Slika 4.6: Membrana sa slojem platine.

Nakon kreiranja sloja platine, potrebno je dodati još jednu značajku konačnih elemenata na način kako je objašnjeno u poglavlju 4.3. Klikom na **Elem/Property Type** odabrana je vrsta konačnih elemenata - **Laminate**. Odabran je **Layup** - membrana sa platinom.

4.5 Omreživanje geometrijskog modela

Definiranje gustoće mreže napravljeno je pomoću naredbe **Mesh** — **Mesh Control** — **Size on Surface**. Odabrana je nacrtana površina i na prozoru koji se pojavio pod Element Size upisano je $3,33333 \cdot 10^{-5}$. Nakon što je definirana gustoća mreže, moguće je omrežiti model pomoću naredbe **Mesh** — **Geometry** — **Surface**. Dobivena mreža ima 3721 čvor i 3600 elemenata.



Slika 4.7: Omreženi model.

4.6 Rubni uvjeti

S obzirom da je membrana rastegnuta na okvir od silicija za rubne uvjete je odabrano uklještenje po rubu. Rubni uvjeti se postavljaju pomoću naredbe **Model — Constraint — On curve**. Budući da su na rubnim linijama spriječeni svi stupnjevi slobode može se kliknuti na Fixed u sljedećem prozoru.



Slika 4.8: Uklještenje po rubu omreženog modela.

4.7 Opterećenja

Budući da je membrana prednapregnuta, što s obzirom na uklještenja nije moguće postaviti u modelu, namještati ćemo temperaturu dok ne postignemo Von Mises naprezanje do 1 GPa na gornjoj strani senzora što je jednako naprezanju deklariranom od strane proizvođača. Klikom na naredbu **Model** — **Load** — **On surface** odabrana je površina senzora. Zatim je na sljedećem prozoru pod **Temperature** upisana proizvoljna vrijednost temperature kako je prikazano na slici 4.9.

			\times
Layer 1	Definition Coord Sys	0Global Rectangular	~
Direction Magnitude Only Vector Along Curve Normal to Plane Normal to Surface Load Value Temperature -805	Specify Time/Freq Depende	Method Constant Variable Data Surface Advanced ence Data Surface	
×		OK Cancel	
	Layer 1 Direction Magnitude Only Vector Along Curve Normal to Plane Normal to Surface Load Value Temperature -805	Definition Coord Sys Layer 1 Direction Magnitude Only Vector Along Curve Normal to Plane Normal to Surface Load Value Time/Freq Depend Temperature -805 0None	Definition Coord Sys 0Global Rectangular Layer 1 Method Magnitude Only Vector Along Curve Normal to Plane Normal to Surface Load Value Time/Freq Dependence Data Surface Temperature -805 0None 0None OK Cancel

Slika 4.9: Kreiranje opterećenja.

4.8 Analiza

Nakon što je model potpun potrebno je provesti dvije analize, jednu statičku te drugu modalnu.

4.8.1 Statička analiza

Najprije je napravljena statička analiza radi postizanja Von Mises naprezanja od 1 GPa na gornjoj strani senzora pomoću naredbe **Model — Analysis — New — 1..Static**. Na slici 4.10 možemo vidjeti da vrijednost temperature od -805 °C odgovara naprezanju od 1062600000 Pa \approx 1 GPa. Nadalje, i negativn i pozitivan predznak određene temperature odgovara istom naprezanju, tj. i za tempereturu od 805 °C vrijednost naprezanja iznosi 1062600000 Pa \approx 1 GPa.

ducational License - For Educational and Tra	ining Use Only		106260
Analysis Set Manager (Active: 1Simcenter N			
Hanalysis Set : 1Simcenter Nastran Static Analysis Set	Analyze		
	Analyze Multiple		106260
	Export		106260
	Active		
	Preview Input		
	MultiSet	F -805; -805, -805, F	
	Сору		
	Delete	-805, -805, -805,	
	Renumber		
	Load	-805. (-805.) F	1062600
	Save		1062600
			1062600
	Edit		1062600
2	Done		1062600
I	S		1062600

Slika 4.10: Statička analiza membrane.

S obzirom da je tek nakon provedene statičke analize poznata vrijednost naprezanja za određenu temperaturu, odnosno opterećenje, stoga je potrebno mijenjati vrijednost temperature (slika 4.11) kako bi se odredile vlastite frekvencije senzora sile koji nije prednapregnut te istražio utjecaj različitih razina prednaprezanja na vlastite frekvencije.



Slika 4.11: Naredba za promjenu opterećenja (temperature).

4.8.2 Modalna analiza

Nakon statičke analize napravljena je modalna analiza radi određivanja vlastitih frekvencija senzora sile pomoću naredbe **Model — Analysis — New — 2..Normal Modes/Eigenvalue** (slika 4.12). Nakon što je provedena modalna analiza potrebno je u naredbi **Boundary Conditions** pod opcijama **Constraints** i **Loads** odabrati vrijednosti koje su prethodno postavljene statičkom analizom kako je prikazano na slici 4.13.

ig use only		1062600001,
		1062600001,
Analyze		1062600001,
nalyze Multiple	SOLÊ	1062600001,
Export		1062600001,
Active	F(805,	1062600001.
Preview Input		1062600001,
MultiSet	-805, -805, -805,	1062600001,
Сору		1062600000,
Delete	805 - 805	1062600000,
Renumber	F CONSTRUCTION	1062600000,
Load		1062600000.
Save		1062600000.
		1062600000
New		1062600000,
Done		1062600000,
		1062600000,
	Analyze Analyz	Analyze alyze Multiple Export Active Preview Input MultiSet Copy Delete Renumber Load Save New Edit Done

Slika 4.12: Modalna analiza membrane.

Analysis Set Manager (Active: 2Simcenter N		Boundary Conditions		×
The Asselution Carton 1. Comparation Manthema Charling Assolution Cart		Primary Sets		
Analysis Set : 1Simcenter Nastran Static Analysis Set	Ana	Constraints	1ukljestenje	~
Solver : Simcenter Nastran	Analyze	Loads	1pritisak	~
- Integrated Solver : Simcenter Nastran	Ev	Temperatures	0From Load Set	~
- Options - Master Requests and Conditions - Case: 1Untitled	Act	Initial Conditions	0None	~
	Previe	Constraint Equations	0From Constraint Set	~
	Mult	Bolt Preloads	0From Load Set	~
	C	Other DOF Sets		
	De	Master (ASET)	0None	\sim
	Renu	Kinematic (SUPORT)	0None	\sim
		SUPORT1	0None	~
	LO	OMIT	0None	~
	30	QSET	0None	~
		CSET	0None	\sim
	Ne	BSET	0None	~
	Ec			
	D	Prev Next	OK Car	icel

Slika 4.13: Odabir rubnih uvjeta te opterećenja za modalnu analizu.

5 Rezultati i diskusija

Nakon što je završena analiza u FEMAP-u, dobivene vrijednosti vlastitih frekvencija senzora sile prikazane su u narednim poglavljima.

5.1 Senzor sile koji nije prednapregnut

Za senzor sile koji nije prednapregnut postavljeno je opterećenje od 0°C što odgovara naprezanju od 0 GPa, tj.na njega djeluje samo vlastita težina. Određene su vlastite frekvencije senzora koji nije prednapregnut bez i s dodatnim slojem platine koje su prikazane u poglavljima 5.1.1. i 5.1.2.

5.1.1 Si₃N₄ membrana 2x2 mm debljine 50 nm

U tablici 5.1 prikazane su vrijednosti vlastitih frekvencija senzora koji nije prednapregnut i bez dodatnog sloja platine. Modovi titranja prikazani su na slikama 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9 i 5.10.

Mod titranja	Frekvencija, [Hz]
ω_{11}	204,6
$\boldsymbol{\omega}_{12+21} = \boldsymbol{\omega}_{12-21}$	417,2
ω_{22}	614,4
ω_{13+31}	751,5
$\omega_{23+32} = \omega_{23-32}$	936,2
ω_{14+41}	1196,8

Tablica 5.1: Vlastite frekvencije senzora koji nije prednapregnut dobivene pomoću softvera FEMAP.



Slika 5.1: Mod titranja ω_{11} senzora koji nije prednapregnut i bez platine.



Slika 5.2: Mod titranja ω_{12+21} senzora koji nije prednapregnut i bez platine.



Slika 5.3: *Mod titranja* ω_{12-21} *senzora koji nije prednapregnut i bez platine*.



Slika 5.4: Mod titranja ω_{22} senzora koji nije prednapregnut i bez platine.



Slika 5.5: Mod titranja ω_{13+31} senzora koji nije prednapregnut i bez platine.



Slika 5.6: *Mod titranja* ω_{13+31} *senzora koji nije prednapregnut i bez platine*.



Slika 5.7: Mod titranja ω_{23-32} senzora koji nije prednapregnut i bez platine.



Slika 5.8: Mod titranja ω_{23+32} senzora koji nije prednapregnut i bez platine.



Slika 5.9: Mod titranja ω_{14+41} senzora koji nije prednapregnut i bez platine.



Slika 5.10: Mod titranja ω_{14+41} senzora koji nije prednapregnut i bez platine.

5.1.2 Si_3N_4 membrana 2x2 mm debljine 50 nm sa slojem platine 10 nm

U tablici 5.2 prikazane su vrijednosti vlastitih frekvencija senzora koji nije prednapregnut, ali ima dodatni sloj platine od 10 nm. Modovi titranja prikazani su na slikama 5.11, 5.12, 5.13, 5.14, 5.15, 5.16, 5.17 i 5.18.

Tablica 5.2: Vlastite frekvencije senzora koji nije prednapregnut, ali ima sloj platine 10 nm dobivene pomoću softvera FEMAP.

Mod titranja	Frekvencija, [Hz]
ω_{11}	164,0
$\omega_{12+21} = \omega_{12-21}$	334,5
ω_{22}	492,6
ω_{13+31}	599,6
$\omega_{23+32} = \omega_{23-32}$	750,6
ω_{14+41}	959,5



Slika 5.11: Mod titranja ω_{11} senzora koji nije prednapregnut sa slojem platine 10nm.



Slika 5.12: Mod titranja ω_{12+21} senzora koji nije prednapregnut sa slojem platine 10nm.



Slika 5.13: Mod titranja ω_{12-21} senzora koji nije prednapregnut sa slojem platine 10nm.



Slika 5.14: Mod titranja ω_{22} senzora koji nije prednapregnut sa slojem platine 10nm.



Slika 5.15: Mod titranja ω_{13+31} senzora koji nije prednapregnut sa slojem platine 10nm.



Slika 5.16: Mod titranja ω_{23+32} senzora koji nije prednapregnut sa slojem platine 10nm.



Slika 5.17: Mod titranja ω_{23-32} senzora koji nije prednapregnut sa slojem platine 10nm.



Slika 5.18: Mod titranja ω_{14+41} senzora koji nije prednapregnut sa slojem platine 10nm.

Iz dobivenih rezultata možemo uočiti da omjer vlastitih frekvencija svih modova titranja senzora koji nije prednapregnut s platinom (ω_{pt}) i bez platine (ω) iznosi 0,8, tj. da vrijedi:

$$\frac{\omega_{pt}}{\omega} = \frac{164,0}{204,6} = \frac{334,5}{417,2} = \frac{492,6}{614,4} = \frac{599,6}{751,5} = \frac{750,6}{936,2} = \frac{959,5}{1196,8} = 0,8$$

Možemo zaključiti da su vlastite frekvencije membrane koja ima dodatni sloj platine 20% niže od vlastitih frekvencije membrane bez platine, odnosno da se s nanošenjem metalnog sloja na membranu povećava njezina osjetljivost.

5.2 Prednapregnuti senzor sile

Za prednapregnuti senzor sile postavljeno je opterećenje od -805°C što odgovara naprezanju od 1062600001 Pa \approx 1 GPa. Određene su vlastite frekvencije prednapregnutog senzora bez i s dodatnim slojem platine koje su prikazane u poglavljima 5.2.1. i 5.2.2.

5.2.1 Si₃N₄ membrana 2x2 mm debljine 50 nm

U tablici 5.3 prikazane su vrijednosti vlastitih frekvencija prednapregnutog senzora bez dodatnog sloja platine. Modovi titranja prikazani su na slikama 5.19, 5.20, 5.21, 5.22, 5.23, 5.24 i 5.25.

Mod titranja	Frekvencija, [Hz]
ω_{11}	201 783,3
$\boldsymbol{\omega}_{12+21} = \boldsymbol{\omega}_{12-21}$	318 916,3
ω_{22}	403 152,1
ω_{13+31}	450 748,1
$\omega_{23+32} = \omega_{23-32}$	513 536,6
ω_{14+41}	587 228,4

Tablica 5.3: Vlastite frekvencije prednapregnutog senzora dobivene pomoću softvera FEMAP.



Slika 5.19: Mod titranja ω_{11} prednapregnutog senzora bez platine.



Slika 5.20: Mod titranja ω_{12+21} prednapregnutog senzora bez platine.



Slika 5.21: Mod titranja ω_{12-21} prednapregnutog senzora bez platine.



Slika 5.22: Mod titranja ω_{22} prednapregnutog senzora bez platine.



Slika 5.23: Mod titranja ω_{13+31} prednapregnutog senzora bez platine.



Slika 5.24: Mod titranja ω_{23+32} prednapregnutog senzora bez platine.



Slika 5.25: Mod titranja ω_{14+41} prednapregnutog senzora bez platine.

5.2.2 Si_3N_4 membrana 2x2 mm debljine 50 nm sa slojem platine 10 nm

U tablici 5.4 prikazane su vrijednosti vlastitih frekvencija prednapregnutog senzora koji ima dodatni sloj platine od 10 nm. Modovi titranja prikazani su na slikama 5.26, 5.27, 5.28, 5.29, 5.30, 5.31, 5.32, 5.33 i 5.34.

Tablica 5.4: Vlastite frekvencije prednapregnutog senzora sa slojem platine 10 nm dobivene pomoću softvera FEMAP.

Mod titranja	Frekvencija, [Hz]
ω_{11}	156 128,7
$\omega_{12+21} = \omega_{12-21}$	246 759,7
ω_{22}	311 936,6
ω_{13+31}	348 763,8
$\omega_{23+32} = \omega_{23-32}$	397 346,0
ω_{14+41}	454 364,7



Slika 5.26: Mod titranja ω_{11} prednapregnutog senzora sa slojem platine 10 nm.



Slika 5.27: Mod titranja ω_{12+21} prednapregnutog senzora sa slojem platine 10 nm.



Slika 5.28: Mod titranja ω_{12-21} prednapregnutog senzora sa slojem platine 10 nm.



Slika 5.29: Mod titranja ω_{22} prednapregnutog senzora sa slojem platine 10 nm.



Slika 5.30: Mod titranja ω_{13+31} prednapregnutog senzora sa slojem platine 10 nm.



Slika 5.31: Mod titranja ω_{13+31} prednapregnutog senzora sa slojem platine 10 nm.



Slika 5.32: Mod titranja ω_{23+32} prednapregnutog senzora sa slojem platine 10 nm.



Slika 5.33: Mod titranja ω_{23-32} prednapregnutog senzora sa slojem platine 10 nm.



Slika 5.34: Mod titranja ω_{14+41} prednapregnutog senzora sa slojem platine 10 nm.

Iz dobivenih rezultata možemo uočiti da omjer vlastitih frekvencija svih modova titranja prednapregnutog senzora s platinom (ω_{pt}) i bez platine (ω) iznosi 0,77, tj. da vrijedi:

Možemo zaključiti da su vlastite frekvencije membrane koja ima dodatni sloj platine 23% niže od vlastitih frekvencije membrane bez platine, odnosno da se s nanošenjem metalnog sloja na membranu povećava njezina osjetljivost.

5.3 Različite razine prednaprezanja

U ovom je poglavlju ispitan utjecaj različitih razina prednaprezanja na vlastite frekvencije senzora. Na slici 5.35 prikazana je ovisnost naprezanja o opterećenju. Možemo zaključiti da se s povećanjem opterećenja linearno povećava i naprezanje koje podnosi senzor.



Slika 5.35: Graf ovisnosti naprezanja o opterećenju.

Nadalje, za svako naprezanje od 0 GPa, 0,2 GPa, 0,4 GPa, 0,6 GPa, 0,8 GPa, 1 GPa i 1,2 GPa prikazane su vrijednosti vlastitih frekvencija senzora bez i s dodatnim slojem platine.

5.3.1 Naprezanje 0 GPa

Za naprezanje od 0 GPa postavljeno je opterećenje od 0°C. U tablici 5.5. prikazane su vlastite frekvencije senzora bez dodatnog sloja platine, dok su u tablicama 5.6 i 5.7 prikazane vlastite frekvencije senzora sa slojem platine 5 nm, odnosno 10 nm.

Mod titranja	Frekvencija, [Hz]
ω_{11}	204,6
$\omega_{12+21} = \omega_{12-21}$	417,2
ω_{22}	614,4
ω_{13+31}	751,5
$\omega_{23+32} = \omega_{23-32}$	936,2
ω_{14+41}	1196,8

Tablica 5.5: Vlastite frekvencije senzora bez dodatnog sloja platine prilikom naprezanja od 0 GPa.

Tablica 5.6: Vlastite frekvencije senzora sa slojem platine od 5 nm prilikom naprezanja od 0 GPa.

Mod titranja	Frekvencija, [Hz]
ω_{11}	175,2
$\omega_{12+21} = \omega_{12-21}$	357,3
ω_{22}	526,1
ω_{13+31}	643,6
$\omega_{23+32} = \omega_{23-32}$	801,7
ω_{14+41}	1024,8

Tablica 5.7: Vlastite frekvencije senzora sa slojem platine od 10 nm prilikom naprezanja od 0 GPa.

Mod titranja	Frekvencija, [Hz]
ω_{11}	164,0
$\omega_{12+21} = \omega_{12-21}$	334,5
ω_{22}	492,6
ω_{13+31}	599,6
$\omega_{23+32} = \omega_{23-32}$	750,6
ω_{14+41}	959,5

5.3.2 Naprezanje 0,2 GPa

Za naprezanje od 0,2 GPa postavljeno je opterećenje od 155°C. U tablici 5.8 prikazane su vlastite frekvencije senzora bez dodatnog sloja platine, dok su u tablicama 5.9 i 5.10 prikazane vlastite frekvencije senzora sa slojem platine 5 nm, odnosno 10 nm.

Mod titranja	Frekvencija, [Hz]
ω_{11}	88 545,3
$\omega_{12+21} = \omega_{12-21}$	139 945,0
ω_{22}	176 909,0
ω_{13+31}	197 794,9
$\omega_{23+32} = \omega_{23-32}$	225 347,8
ω_{14+41}	257 685,1

Tablica 5.8: Vlastite frekvencije senzora bez dodatnog sloja platine prilikom naprezanja od 0,2 GPa.

Tablica 5.9: Vlastite frekvencije senzora sa slojem platine od 5 nm prilikom naprezanja od 0,2 GPa.

Mod titranja	Frekvencija, [Hz]
ω_{11}	75112,6
$\omega_{12+21} = \omega_{12-21}$	118 714,4
ω ₂₂	150 070,3
ω_{13+31}	167 787,5
$\omega_{23+32} = \omega_{23-32}$	191 159,6
ω_{14+41}	218 590,4

Tablica 5.10: Vlastite frekvencije senzora sa slojem platine od 10 nm prilikom naprezanja od 0,2 GPa.

Mod titranja	Frekvencija, [Hz]
ω_{11}	68 511,5
$\boldsymbol{\omega}_{12+21} = \boldsymbol{\omega}_{12-21}$	108 281,8
ω_{22}	136 882,7
ω_{13+31}	153 043,0
$\omega_{23+32} = \omega_{23-32}$	174 362,0
ω_{14+41}	199 382,9

5.3.3 Naprezanje 0,4 GPa

Za naprezanje od 0,4 GPa postavljeno je opterećenje od 305°C. U tablici 5.11 prikazane su vlastite frekvencije senzora bez dodatnog sloja platine, dok su u tablicama 5.12 i 5.13 prikazane vlastite frekvencije senzora sa slojem platine 5 nm, odnosno 10 nm.

Mod titranja	Frekvencija, [Hz]
ω_{11}	124 205,8
$\omega_{12+21} = \omega_{12-21}$	196 306,0
ω_{22}	248 156,7
ω_{13+31}	277 454,0
$\omega_{23+32} = \omega_{23-32}$	316 103,2
ω_{14+41}	361 463,7

Tablica 5.11: Vlastite frekvencije senzora bez dodatnog sloja platine prilikom naprezanja od 0,4 GPa.

Tablica 5.12: Vlastite frekvencije senzora sa slojem platine od 5 nm prilikom naprezanja od 0,4 GPa.

Mod titranja	Frekvencija, [Hz]
ω_{11}	105 370,7
$\boldsymbol{\omega}_{12+21} = \boldsymbol{\omega}_{12-21}$	166 537,3
ω_{22}	210 525,2
ω_{13+31}	235 379,7
$\omega_{23+32} = \omega_{23-32}$	268 167,9
ω_{14+41}	306 649,8

Tablica 5.13: Vlastite frekvencije senzora sa slojem platine od 10 nm prilikom naprezanja od 0,4 GPa.

Mod titranja	Frekvencija, [Hz]
ω_{11}	96 103,6
$\omega_{12+21} = \omega_{12-21}$	151 890,8
ω_{22}	192 010,0
ω_{13+31}	214 678,7
$\omega_{23+32} = \omega_{23-32}$	244 583,3
ω_{14+41}	279 680,7

5.3.4 Naprezanje 0,6 GPa

Za naprezanje od 0,6 GPa postavljeno je opterećenje od 460°C. U tablici 5.14 prikazane su vlastite frekvencije senzora bez dodatnog sloja platine, dok su u tablicama 5.15 i 5.16 prikazane vlastite frekvencije senzora sa slojem platine 5 nm, odnosno 10 nm.

Mod titranja	Frekvencija, [Hz]
ω_{11}	152 534,6
$\omega_{12+21} = \omega_{12-21}$	241 079,3
ω_{22}	304 756,0
ω_{13+31}	340 735,4
$\omega_{23+32} = \omega_{23-32}$	388 199,4
ω_{14+41}	443 905,6

Tablica 5.14: Vlastite frekvencije senzora bez dodatnog sloja platine prilikom naprezanja od 0,6 GPa.

Tablica 5.15: Vlastite frekvencije senzora sa slojem platine od 5 nm prilikom naprezanja od 0,6 GPa.

Mod titranja	Frekvencija, [Hz]
ω_{11}	129 403,6
$\boldsymbol{\omega}_{12+21} = \boldsymbol{\omega}_{12-21}$	204 521,0
ω_{22}	258 541,5
ω_{13+31}	289 064,8
$\omega_{23+32} = \omega_{23-32}$	329 331,1
ω_{14+41}	376 589,8

Tablica 5.16: Vlastite frekvencije senzora sa slojem platine od 10 nm prilikom naprezanja od 0,6 GPa.

Mod titranja	Frekvencija, [Hz]
ω_{11}	118 022,8
$\boldsymbol{\omega}_{12+21} = \boldsymbol{\omega}_{12-21}$	186 533,8
ω_{22}	235 803,3
ω_{13+31}	263 642,2
$\omega_{23+32} = \omega_{23-32}$	300 367,2
ω_{14+41}	343 469,6

5.3.5 Naprezanje 0,8 GPa

Za naprezanje od 0,8 GPa postavljeno je opterećenje od 610°C. U tablici 5.17 prikazane su vlastite frekvencije senzora bez dodatnog sloja platine, dok su u tablicama 5.18 i 5.19 prikazane vlastite frekvencije senzora sa slojem platine 5 nm, odnosno 10 nm.

Mod titranja	Frekvencija, [Hz]
ω_{11}	175 652,0
$\omega_{12+21} = \omega_{12-21}$	277 616,1
ω_{22}	350 943,3
ω_{13+31}	392 375,5
$\omega_{23+32} = \omega_{23-32}$	447 032,8
ω_{14+41}	511 181,5

Tablica 5.17: Vlastite frekvencije senzora bez dodatnog sloja platine prilikom naprezanja od 0,8 GPa.

Tablica 5.18: Vlastite frekvencije senzora sa slojem platine od 5 nm prilikom naprezanja od 0,8 GPa.

Mod titranja	Frekvencija, [Hz]
ω_{11}	149 015,3
$\omega_{12+21} = \omega_{12-21}$	235 517,2
ω_{22}	297 724,7
ω_{13+31}	332 873,9
$\omega_{23+32} = \omega_{23-32}$	379 242,8
ω_{14+41}	433 663,7

Tablica 5.19: Vlastite frekvencije senzora sa slojem platine od 10 nm prilikom naprezanja od 0,8 GPa.

Mod titranja	Frekvencija, [Hz]
ω_{11}	135 909,8
$\omega_{12+21} = \omega_{12-21}$	214 803,9
ω_{22}	271 540,4
ω_{13+31}	303 598,3
$\omega_{23+32} = \omega_{23-32}$	345 889,2
ω_{14+41}	395 523,9

5.3.6 Naprezanje 1 GPa

Za naprezanje od 1 GPa postavljeno je opterećenje od 805°C. U tablici 5.20 prikazane su vlastite frekvencije senzora bez dodatnog sloja platine, dok su u tablicama 5.21 i 5.22 prikazane vlastite frekvencije senzora sa slojem platine 5 nm, odnosno 10 nm.

Mod titranja	Frekvencija, [Hz]
ω_{11}	201 783,3
$\omega_{12+21} = \omega_{12-21}$	318 916,3
ω_{22}	403 152,1
ω_{13+31}	450 748,1
$\omega_{23+32} = \omega_{23-32}$	513 536,6
ω_{14+41}	587 228,4

Tablica 5.20: Vlastite frekvencije senzora bez dodatnog sloja platine prilikom naprezanja od 1 GPa.

Tablica 5.21: Vlastite frekvencije senzora sa slojem platine od 5 nm prilikom naprezanja od 1 GPa.

Mod titranja	Frekvencija, [Hz]
ω_{11}	171 184,0
$\boldsymbol{\omega}_{12+21} = \boldsymbol{\omega}_{12-21}$	270 554,4
ω_{22}	342 016,3
ω_{13+31}	382 394,6
$\omega_{23+32} = \omega_{23-32}$	435 661,6
ω_{14+41}	498 178,5

Tablica 5.22: Vlastite frekvencije senzora sa slojem platine od 10 nm prilikom naprezanja od 1 GPa.

Mod titranja	Frekvencija, [Hz]
ω_{11}	156 128,7
$\boldsymbol{\omega}_{12+21} = \boldsymbol{\omega}_{12-21}$	246 759,7
ω_{22}	311 936,6
ω_{13+31}	348 763,8
$\omega_{23+32} = \omega_{23-32}$	397 346,0
ω_{14+41}	454 364,7

5.3.7 Naprezanje 1,2 GPa

Za naprezanje od 1,2 GPa postavljeno je opterećenje od 910°C. U tablici 5.23 prikazane su vlastite frekvencije senzora bez dodatnog sloja platine, dok su u tablicama 5.24 i 5.25 prikazane vlastite frekvencije senzora sa slojem platine 5 nm, odnosno 10 nm.

Mod titranja	Frekvencija, [Hz]
ω_{11}	214 539,7
$\omega_{12+21} = \omega_{12-21}$	339 077,6
ω_{22}	428 638,6
ω_{13+31}	479 243,5
$\omega_{23+32} = \omega_{23-32}$	546 001,4
ω_{14+41}	624 351,9

Tablica 5.23: Vlastite frekvencije senzora bez dodatnog sloja platine prilikom naprezanja od 1,2 GPa.

Tablica 5.24: Vlastite frekvencije senzora sa slojem platine od 5 nm prilikom naprezanja od 1,2 GPa.

Mod titranja	Frekvencija, [Hz]
ω_{11}	182 005,9
$\omega_{12+21} = \omega_{12-21}$	287 658,3
ω_{22}	363 637,9
ω_{13+31}	406 568,9
$\omega_{23+32} = \omega_{23-32}$	463 203,3
ω_{14+41}	529 672,3

Tablica 5.25: Vlastite frekvencije senzora sa slojem platine od 10 nm prilikom naprezanja od 1,2 GPa.

Mod titranja	Frekvencija, [Hz]
ω_{11}	165 998,8
$\omega_{12+21} = \omega_{12-21}$	262 359,4
ω_{22}	331 656,7
ω_{13+31}	370 811,9
$\omega_{23+32} = \omega_{23-32}$	422 465,5
ω_{14+41}	483 088,7

Nadalje, na grafovima na slikama 5.36, 5.37 i 5.38 možemo vidjeti promjenu vlastitih frekvencija titranja modova u ovisnosti o različitim vrijednostima naprezanja. Možemo zaključiti da se s povećanjem naprezanja povećavaju i vlastite frekvencije titranja senzora sile, i s platinom i bez platine. Međutim, vrijednosti vlastitih frekvencija opadaju s povećanjem dodatnog sloja platine.



Slika 5.36: Graf promjene vlastitih frekvencija senzora sile bez platine u ovisnosti o naprezanju.



Slika 5.37: Graf promjene vlastitih frekvencija senzora sile s platinom 5 nm u ovisnosti o naprezanju.



Slika 5.38: Graf promjene vlastitih frekvencija senzora sile s platinom 10 nm u ovisnosti o naprezanju.

Rezultati dobiveni metodom konačnih elemenata uspoređeni su s rezultatima dobivenim pomoću mjernog sustava prikazanog na slici 2.3. [8] Uočeno je da vlastite frekvencije senzora sile sa slojem platine od 5 nm dobivene eksperimentalnim mjerenjima (Tablica 5.26 (a)) odgovaraju vlastitim frekvencijama dobivenim metodom konačnih elemenata (Tablica 5.26 (b)) kada na senzor djeluje naprezanje od 0,396 GPa.

(a)		(b)		
	Mod titranja	Frekvencija, [Hz]	Mod titranja	Frekvencija, [Hz]
	ω_{11}	104 484	ω_{11}	104 503,5
ω	$\omega_{12+21} = \omega_{12-21}$	165 203	$\boldsymbol{\omega}_{12+21} = \boldsymbol{\omega}_{12-21}$	165 166,7
ω ₂₂	ω_{22}	208 968	ω_{22}	208 792,5
	ω_{13+31}	233 633	ω_{13+31}	233 442,5
ω	$\omega_{23+32} = \omega_{23-32}$	266 383	$\omega_{23+32} = \omega_{23-32}$	265 960,8
	ω_{14+41}	304 620	ω_{14+41}	304 126,0

(a)

Tablica 5.26: Senzor sile sa slojem platine 5 nm.

(1-)

Također je uočeno da vlastite frekvencije senzora sile sa slojem platine od 10 nm dobivene eksperimentalnim mjerenjima (Tablica 5.27 (a)) odgovaraju vlastitim frekvencijama dobivenim metodom konačnih elemenata (Tablica 5.26 (b)) kada na senzor djeluje naprezanje od 0,191 GPa.

Tablica 5.27: Senzor sile sa slojem platine 10 nm.

(a)		(b)	
Mod titranja	Frekvencija, [Hz]	Mod titranja	Frekvencija, [Hz]
ω_{11}	66 722	ω_{11}	66 720,2
$\omega_{12+21} = \omega_{12-21}$	105 256	$\omega_{12+21} = \omega_{12-21}$	105 450,7
ω_{22}	135 860	ω_{22}	133 303,7
ω_{13+31}	148 192	ω_{13+31}	149 041,6
$\omega_{23+32} = \omega_{23-32}$	173 188	$\omega_{23+32} = \omega_{23-32}$	169 803,1
ω_{14+41}	198 048	ω_{14+41}	194 169,8

Usporedbom dobivenih rezultata možemo primijetiti da se s povećanjem sloja platine smanjuje naprezanja koje membrana može podnijeti, odnosno da joj se smanjuju vrijednosti vlastitih frekvencija. Stoga možemo pretpostaviti da se nanošenjem sloja platine oštećuje površina membrane, odnosno da se stvaraju mikropukotine u čijoj se okolini javlja koncentracija naprezanja zbog čega se membrani smanjuje prednaprezanje.

5.4 Nesimetrična raspodjela platine

S obzirom da nismo sigurni da se platina nanosi jednoliko na površinu senzora sile, u ovom je poglavlju ispitan utjecaj nesimetrične raspodjele platine na vlastite frekvencije senzora na način da su naneseni slojevi platine različite debljine (kreiranjem grupe elemenata) u konačno-elementni geometrijski model kako je prikazano na slici 5.39. Svakom je sloju platine definirana značajka konačnih elemenata - Laminate.



Slika 5.39: Nesimetrična raspodjela platine na senzoru sile.

Modalnom analizom određene su vlastite frekvencije prednapregnutog senzora sile s nesimetričnom raspodjelom platine koje su prikazane u tablici 5.28.

Mod titranja	Frekvencija, [Hz]
ω_{11}	148 745,0
$\omega_{12+21} = \omega_{12-21}$	248 012,3
ω_{22}	324 349,5
ω_{13+31}	349 593,3
$\omega_{23+32} = \omega_{23-32}$	415 168,6
ω_{14+41}	460 478,7

Tablica 5.28: Vlastite frekvencije prednapregnutog senzora sile s nesimetričnom raspodjelom platine.

Usporedbom vlastitih frekvencija iz tablice 5.28 i vlastitih frekvencija iz tablica 5.21 i 5.22 možemo primijetiti da kod prednapregnutog senzora sile s nesimetričnom raspodjelom platine pojedini modovi titranja imaju višu, a pojedini nižu frekvenciju u odnosu na prednapregnuti senzor s jednolikim slojem platine od 5 nm, odnosno 10 nm.

Također, na slici 5.40 možemo uočiti da je vrh osnovnog moda titranja ω_{11} senzora sile s nesimetričnom raspodjelom platine puno oštriji u odnosu na osnovni mod titranja senzora sile s jednolikom raspodjelom platine koji je prikazan u poglavljima 5.1 i 5.2. Razlog tome je veća koncentracija mase platine na sredini senzora.



Slika 5.40: Mod titranja ω_{11} prednapregnutog senzora s nesimetričnom raspodjelom platine.

Nadalje, u konačno-elementnom modelu senzora sile s nesimetričnom raspodjelom platine smanjio se broj degeneriranih modova titranja, tako da na slici 5.41 možemo vidjeti mod titranja ω_{23} , dok na slici 5.42 možemo vidjeti mod titranja ω_{14} .



Slika 5.41: Mod titranja ω_{23} prednapregnutog senzora s nesimetričnom raspodjelom platine.



Slika 5.42: Mod titranja ω_{14} prednapregnutog senzora s nesimetričnom raspodjelom platine.

Iz navedenih rezultata možemo pretpostviti da se platina ne nanosi jednoliko na senzor, budući da eksperimentalno [8] nisu izmjerene vlastite frekvencije degeneriranih modova titranja senzora sile.

6 Zaključak

Metodom konačnih elemenata, koristeći softver FEMAP, napravljena je analiza vlastitih frekvencija kvadratne membrane 2x2 mm² debljine 50 nm (senzora sile) uklještene na sva četiri ruba, bez i s dodatnim slojem platine. Rezultati su pokazali da su vlastite frekvencije senzora s dodatnim slojem platine niže od vlastitih frekvencija senzora sile bez dodatnog sloja platine. Nadalje, ispitan je utjecaj različitih razina prednaprezanja na vlastite frekvencije senzora, što je pokazalo da se s povećanjem prednaprezanja povećavaju i frekvencije modova titranja senzora. Također su uspoređeni rezultati dobiveni eksperimentom [8] i metodom konačnih elemenata što je pokazalo da se nanošenjem platine na membranu smanjuje njezino prednaprezanje. Za membranu bez dodatnog sloja platine, eksperimentalno dobivene vlastite frekvencije i vlastite frekvencije dobivene metodom konačnih elemenata jednake su prilikom prednaprezanja od 0,396 GPa, a kod membrane sa slojem platine od 10 nm, eksperimentalno dobivene vlastite frekvencije i vlastite frekvencije odbivene vlastite frekvencije i vlastite frekvencije odbivene vlastite frekvencije i od 0,396 GPa.

S obzirom da je gustoća platine 6,5 puta veća od gustoće silicijevog nitrida od kojeg je napravljena membrana, možemo pretpostaviti da se prilikom nanošenja platine na senzor oštećuje površina membrane, odnosno da atomi platine stvaraju mikropukotine na površini membrane smanjujući prednaprezanje koje membrana može podnijeti. Zaključno, izmjerene frekvencije se ne može opisati samo jednim utjecajem, nego je potrebno uzeti u obzir kombinaciju mase i smanjenja prednaprezanja.

Literatura

- [1] "What is Modal Analysis: The Ultimate Guide", s Interneta, https://dewesoft.com/daq/what-ismodal-analysis, 19. srpanj 2022.
- [2] Leissa, A.W.: "Vibration of Plates", NASA SP-160, Washington D.C., 1969.
- [3] Reza Pouladkhan, A. i dr., "The Vibration of Thin Plates by using Modal Analysis, Conference: ICAMME 2011: International Conference on Applied Mechanics and Mechanical Engineering, Vol. 55, pp. 2880-2885, 2011.
- [4] Kaute Nkounhawa, P. i dr., "Analysis of the Behavior of a Square Plate in Free Vibration by FEM in Ansys", Scientific Research, World Journal of Mechanics, Vol.10 No.2, 2020.
- [5] Visser, G.: "Modal Analysis: What It Is and Is Not", s Interneta, https://simteq.co.za/blog/modal-analysis/, 16. kolovoz 2022.
- [6] "MTI Corporation", s Interneta, https://www.mtixtl.com/si3n4-3.aspx, 2. kolovoz 2022.
- [7] "AZO MATERIALS", s Interneta, https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9235, 2. kolovoz 2022.
- [8] Božičević, D. (2019), "Razvoj i karakterizacija senzora za Casimirovu silu" (Diplomski rad)

Popis slika

2.1	Membrana $2x2 mm^2$ debljine 50 nm zalijepljena na držač	2
2.2	Poprečni presjek okvira membrane gdje se mogu vidjeti slojevi silicijevog nitrida i platine.	2
2.3	Sustav za mjerenje sila	3
2.4	Michelsonov interferometar s membranom.	3
3.1	Pravokutna membrana.	4
3.2	Modovi titranja kvadratne membrane	7
4.1	Naredbe za izradu geometrije senzora sile	8
4.2	Geometrija senzora sile	9
4.3	Definiranje materijala	10
4.4	Značajke ploče	10
4.5	Kreiranje sloja platine	11
4.6	Membrana sa slojem platine	11
4.7	Omreženi model	12
4.8	Uklještenje po rubu omreženog modela.	12
4.9	Kreiranje opterećenja	13
4.10	Statička analiza membrane	14
4.11	Naredba za promjenu opterećenja (temperature)	14
4.12	Modalna analiza membrane	15
4.13	Odabir rubnih uvjeta te opterećenja za modalnu analizu	15
5.1	Mod titranja ω_{11} senzora koji nije prednapregnut i bez platine	16
5.2	Mod titranja ω_{12+21} senzora koji nije prednapregnut i bez platine	17
5.3	Mod titranja ω_{12-21} senzora koji nije prednapregnut i bez platine	17
5.4	Mod titranja ω_{22} senzora koji nije prednapregnut i bez platine	17

5.5	Mod titranja ω_{13+31} senzora koji nije prednapregnut i bez platine	18
5.6	Mod titranja ω_{13+31} senzora koji nije prednapregnut i bez platine	18
5.7	Mod titranja ω_{23-32} senzora koji nije prednapregnut i bez platine	18
5.8	Mod titranja ω_{23+32} senzora koji nije prednapregnut i bez platine	19
5.9	Mod titranja ω_{14+41} senzora koji nije prednapregnut i bez platine	19
5.10	Mod titranja ω_{14+41} senzora koji nije prednapregnut i bez platine	19
5.11	Mod titranja ω_{11} senzora koji nije prednapregnut sa slojem platine 10nm	20
5.12	Mod titranja ω_{12+21} senzora koji nije prednapregnut sa slojem platine 10nm	20
5.13	Mod titranja ω_{12-21} senzora koji nije prednapregnut sa slojem platine 10nm	21
5.14	Mod titranja ω_{22} senzora koji nije prednapregnut sa slojem platine 10nm	21
5.15	Mod titranja ω_{13+31} senzora koji nije prednapregnut sa slojem platine 10nm	21
5.16	Mod titranja ω_{23+32} senzora koji nije prednapregnut sa slojem platine 10nm	22
5.17	Mod titranja ω_{23-32} senzora koji nije prednapregnut sa slojem platine 10nm	22
5.18	Mod titranja ω_{14+41} senzora koji nije prednapregnut sa slojem platine 10nm. \ldots	22
5.19	Mod titranja ω_{11} prednapregnutog senzora bez platine	24
5.20	Mod titranja ω_{12+21} prednapregnutog senzora bez platine	24
5.21	Mod titranja ω_{12-21} prednapregnutog senzora bez platine	24
5.22	Mod titranja ω_{22} prednapregnutog senzora bez platine	25
5.23	<i>Mod titranja</i> ω_{13+31} <i>prednapregnutog senzora bez platine.</i>	25
5.24	Mod titranja ω_{23+32} prednapregnutog senzora bez platine	25
5.25	Mod titranja ω_{14+41} prednapregnutog senzora bez platine	26
5.26	Mod titranja ω_{11} prednapregnutog senzora sa slojem platine 10 nm	26
5.27	Mod titranja ω_{12+21} prednapregnutog senzora sa slojem platine 10 nm	27
5.28	Mod titranja ω_{12-21} prednapregnutog senzora sa slojem platine 10 nm	27
5.29	Mod titranja ω_{22} prednapregnutog senzora sa slojem platine 10 nm	27

5.30	Mod titranja ω_{13+31} prednapregnutog senzora sa slojem platine 10 nm	28
5.31	Mod titranja ω_{13+31} prednapregnutog senzora sa slojem platine 10 nm	28
5.32	Mod titranja ω_{23+32} prednapregnutog senzora sa slojem platine 10 nm	28
5.33	Mod titranja ω_{23-32} prednapregnutog senzora sa slojem platine 10 nm	29
5.34	Mod titranja ω_{14+41} prednapregnutog senzora sa slojem platine 10 nm	29
5.35	Graf ovisnosti naprezanja o opterećenju	30
5.36	Graf promjene vlastitih frekvencija senzora sile bez platine u ovisnosti o naprezanju.	38
5.37	Graf promjene vlastitih frekvencija senzora sile s platinom 5 nm u ovisnosti o napre- zanju	38
5.38	Graf promjene vlastitih frekvencija senzora sile s platinom 10 nm u ovisnosti o napre-	
	zanju	38
5.39	Nesimetrična raspodjela platine na senzoru sile	40
5.40	Mod titranja ω_{11} prednapregnutog senzora s nesimetričnom raspodjelom platine	41
5.41	Mod titranja ω_{23} prednapregnutog senzora s nesimetričnom raspodjelom platine	41
5.42	Mod titranja ω_{14} prednapregnutog senzora s nesimetričnom raspodjelom platine	42

Popis tablica

4.1	Mehanička svojstva silicijevog nitrida.[6]	9
4.2	Mehanička svojstva platine.[7]	9
5.1	Vlastite frekvencije senzora koji nije prednapregnut dobivene pomoću softvera FEMAP.	16
5.2	Vlastite frekvencije senzora koji nije prednapregnut, ali ima sloj platine 10 nm dobi- vene pomoću softvera FEMAP	20
5.3	Vlastite frekvencije prednapregnutog senzora dobivene pomoću softvera FEMAP	23
5.4	Vlastite frekvencije prednapregnutog senzora sa slojem platine 10 nm dobivene pomoćusoftvera FEMAP.	26
5.5	Vlastite frekvencije senzora bez dodatnog sloja platine prilikom naprezanja od 0 GPa.	31
5.6	Vlastite frekvencije senzora sa slojem platine od 5 nm prilikom naprezanja od 0 GPa.	31
5.7	Vlastite frekvencije senzora sa slojem platine od 10 nm prilikom naprezanja od 0 GPa.	31
5.8	Vlastite frekvencije senzora bez dodatnog sloja platine prilikom naprezanja od 0,2 GPa.	32
5.9	Vlastite frekvencije senzora sa slojem platine od 5 nm prilikom naprezanja od 0,2 GPa.	32
5.10	Vlastite frekvencije senzora sa slojem platine od 10 nm prilikom naprezanja od 0,2 GPa.	32
5.11	Vlastite frekvencije senzora bez dodatnog sloja platine prilikom naprezanja od 0,4 GPa.	33
5.12	Vlastite frekvencije senzora sa slojem platine od 5 nm prilikom naprezanja od 0,4 GPa.	33
5.13	Vlastite frekvencije senzora sa slojem platine od 10 nm prilikom naprezanja od 0,4 GPa.	33
5.14	Vlastite frekvencije senzora bez dodatnog sloja platine prilikom naprezanja od 0,6 GPa.	34
5.15	Vlastite frekvencije senzora sa slojem platine od 5 nm prilikom naprezanja od 0,6 GPa.	34
5.16	Vlastite frekvencije senzora sa slojem platine od 10 nm prilikom naprezanja od 0,6 GPa.	34
5.17	Vlastite frekvencije senzora bez dodatnog sloja platine prilikom naprezanja od 0,8 GPa.	35
5.18	Vlastite frekvencije senzora sa slojem platine od 5 nm prilikom naprezanja od 0,8 GPa.	35
5.19	Vlastite frekvencije senzora sa slojem platine od 10 nm prilikom naprezanja od 0,8 GPa.	35
5.20	Vlastite frekvencije senzora bez dodatnog sloja platine prilikom naprezanja od 1 GPa.	36
5.21	Vlastite frekvencije senzora sa slojem platine od 5 nm prilikom naprezanja od 1 GPa.	36

5.22	Vlastite frekvencije senzora sa slojem platine od 10 nm prilikom naprezanja od 1 GPa.	36
5.23	Vlastite frekvencije senzora bez dodatnog sloja platine prilikom naprezanja od 1,2 GPa.	37
5.24	Vlastite frekvencije senzora sa slojem platine od 5 nm prilikom naprezanja od 1,2 GPa.	37
5.25	Vlastite frekvencije senzora sa slojem platine od 10 nm prilikom naprezanja od 1,2 GPa	37
5.26	Senzor sile sa slojem platine 5 nm.	39
5.27	Senzor sile sa slojem platine 10 nm	39
5.28	Vlastite frekvencije prednapregnutog senzora sile s nesimetričnom raspodjelom platine.	40

Sažetak

U ovom završnom radu napravljena je analiza vlastitih frekvencija prednapregnutog senzora sile metodom konačnih elemenata pomoću softvera FEMAP. Kao senzor sile korištena je membrana od silicijevog nitrida dimenzije 2x2 mm² i debljine 50 nm, sa i bez dodatnog sloja platine. U FEMAP-u je napravljen konačno-elementni model kvadratne membrane uklještene na svim rubovima, a kao rješavač je korišten NX Nastran. Određene su vlastite frekvencije prednapregnutog senzora sile, sa i bez dodatnog sloja platine kao i senzora sile koji nije prednapregnut, sa i bez dodatnog sloja platine. Rezultati su pokazali da su kod prednapregnutog senzora sa slojem platine 10 nm vlastite frekvencije niže za 23% od vlastitih frekvencije prednapregnutog senzora bez platine, dok su kod senzora koji nije prednapregnut sa slojem platine 10 nm vlastite frekvencije niže za 20% od vlastitih frekvencije senzora koji nije prednapregnut bez platine, što je dovelo do zaključka da se metaliziranjem senzora povećava njegova osjetljivost. Također je istražen i utjecaj nesimetrične raspodjele platine na vlastite frekvencije prednapregnutog senzora sile što je pokazalo da se nesimetričnim nanošenjem platine na senzor smanjuje broj degeneriranih modova titranja membrane. I na kraju je ispitan utjecaj različitih razina prednaprezanja na vlastite frekvencije senzora sile, iz čega je zaključeno da se s povećanjem debljine platine smanjuje prednaprezanje koje membrana može podnijeti jer atomi platine oštećuju površinu senzora.

Ključne riječi: senzor sile, membrana od silicijevog nitrida, platina, analiza vlastitih frekvencija, modovi titranja, metoda konačnih elemenata

Abstract

In this paper, the finite element method is used for an eigenvalue analysis of a prestressed force sensor. The proposed force sensor is a $2x2 \text{ mm}^2$ silicon nitride membrane 50 nm thick, with and without an additional platinum layer. The study uses FEMAP software with NX Nastran solver to derive the finite element model of the square membrane clamped on all four edges. Eigenfrequencies of a prestressed force sensor, with and without an additional platinum layer are determined. Also, the eigenfrequencies of a stress-free force sensor, with and without an additional platinum layer are determined. Results showed that the eigenfrequencies of a prestressed force sensor with 10 nm platinum layer are 23% lower than the eigenfrequencies of a prestressed force sensor without platinum layer. Further, eigenfrequencies of a stress-free force sensor with 10 nm platinum layer are 20% lower than the eigenfrequencies of a stress-free force sensor without platinum layer, which led to the conclusion that platinum coating increases sensor's sensitivity. Also, the impact of the non-symmetrical distribution of platinum on the eigenfrequencies of a prestressed force sensor was investigated, which showed that the non-symmetrical application of platinum on the sensor reduces the number of degenerate vibration modes of the membrane. And finally, the influence of different levels of prestress on the eigenfrequencies of the force sensor was examined from which it was concluded that with an increase in the thickness of the platinum, the prestress that the membrane can withstand decreases because the platinum atoms damage the sensor's surface.

Keywords: force sensor, silicon nitride membrane, platinum, modal analysis, vibration modes, finite element method