

Analiza vlastitih frekvencija prednapregnutog senzora sile

Božičević, Dorotea

Undergraduate thesis / Završni rad (sveučilišni)

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:189048>

Rights / Prava: [Imenovanje 4.0 međunarodna](#) / [Attribution 4.0 International](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2026-07-30**



NACIONALNA
I SVEUČILIŠNA
KNJIŽNICA
U ZAGREBU



Repository / Repozitorij:

[Croatian Digital Theses Repository / Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR](#)



Dabar

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 mehaniku**
Predmet: **Osnove primjene metode konačnih elemenata**
Grana: **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

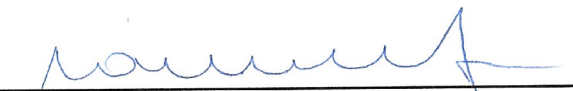
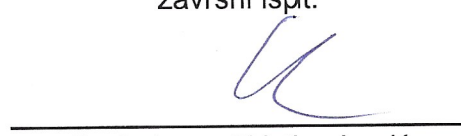
Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.



Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:


Prof. dr. sc. Marko Čanađija
Prof. dr. sc. Kristian Lenić
Izv. prof. dr. sc. Marin Karuza (komentor)

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 Čanadiji 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.

Sadržaj

1	Uvod	1
2	Senzor sile	2
3	Matematička pozadina vibracije pločastog elementa	4
3.1	Što je mod?	7
4	Izrada geometrijskog modela u FEMAP-u	8
4.1	Geometrija	8
4.2	Materijal	9
4.3	Definiranje značajki konačnih elemenata	10
4.4	Kreiranje sloja drugog materijala	11
4.5	Omreživanje geometrijskog modela	12
4.6	Rubni uvjeti	12
4.7	Opterećenja	13
4.8	Analiza	13
4.8.1	Statička analiza	13
4.8.2	Modalna analiza	15
5	Rezultati i diskusija	16
5.1	Senzor 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	Prednapregnuti senzor sile	23
5.2.1	Si_3N_4 membrana 2x2 mm debljine 50 nm	23
5.2.2	Si_3N_4 membrana 2x2 mm debljine 50 nm sa slojem platine 10 nm	26

5.3	Različite 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	Nesimetrična raspodjela platine	40
6	Zaključak	43
	Literatura	44
	Popis slika	45
	Popis tablica	48
	Sažetak	50
	Abstract	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 sile s visokom osjetljivošću predstavlja tehnološki iskorak koji omogućava uvid u još neistraženo područje sile 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.

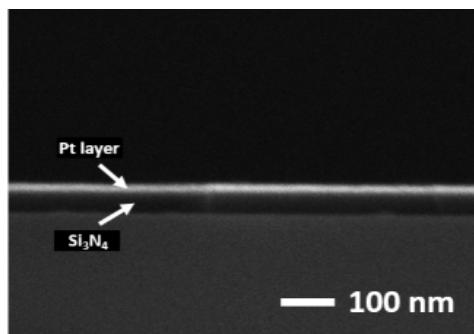
2 Senzor sile

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.



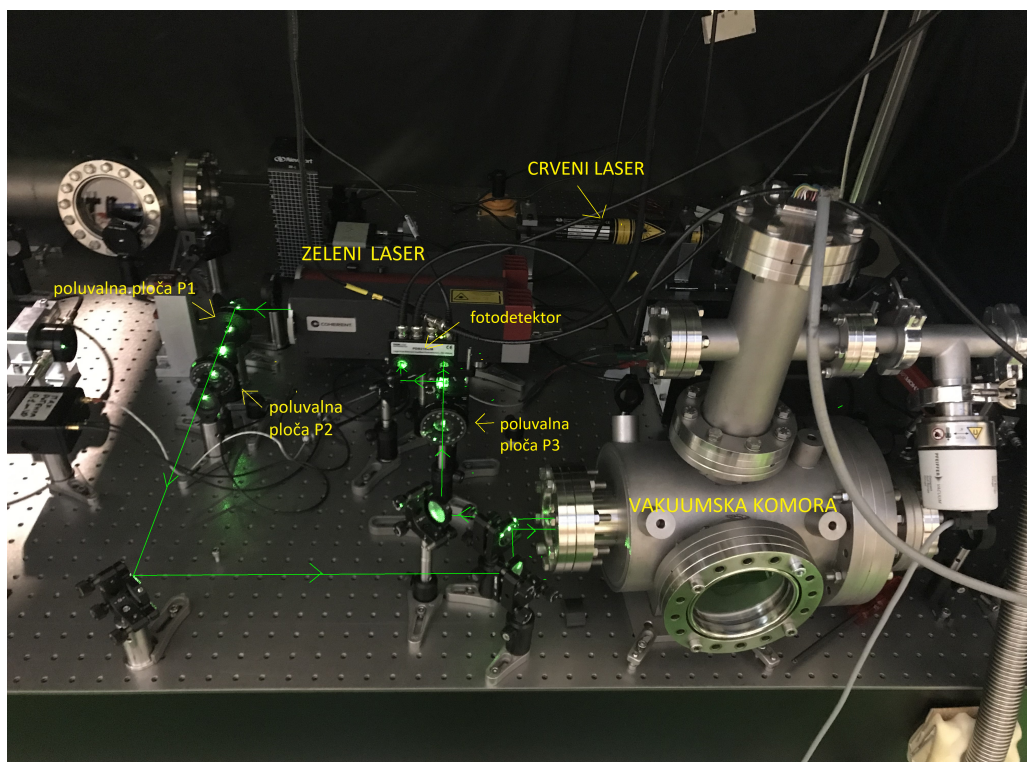
Slika 2.1: Membrana $2 \times 2 \text{ mm}^2$ debljine 50 nm zalijepljena na držač.

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



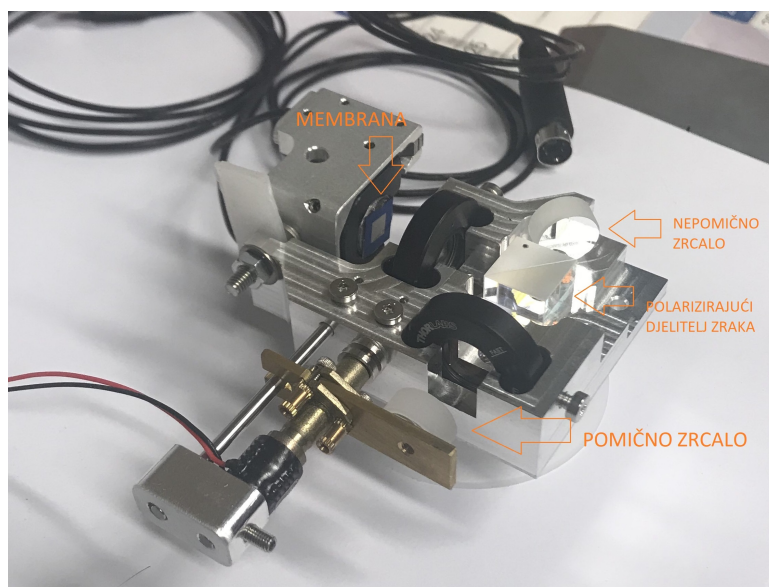
Slika 2.2: Poprečni presjek okvira membrane gdje se mogu vidjeti slojevi silicijevog nitrida i platine.

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 sile.

Nadalje, očitavanje 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] :

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

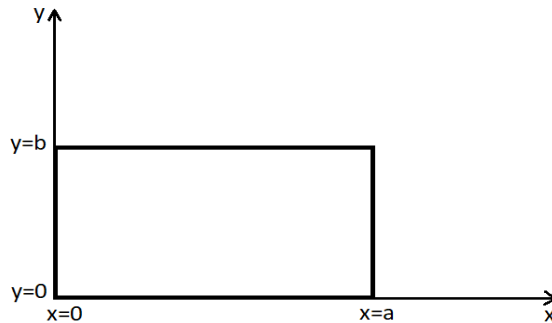
gdje je D krutost na savijanje koja je definirana kao:

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

E je modul elastičnosti, h je debljina membrane, ν 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:

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



Slika 3.1: Pravokutna membrana.

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

- da nema pomaka:

$$w(x,y,t) = 0 \text{ za } x = 0, x = a$$

$$w(x,y,t) = 0 \text{ za } y = 0, y = b$$

- 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]:

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

$X(x) Y(y) = w(x, y)$ 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:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (3.5)$$

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

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

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

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

pomoću kojeg dolazimo do sustava jednadžbi:

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

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

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

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

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

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

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

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:

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

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

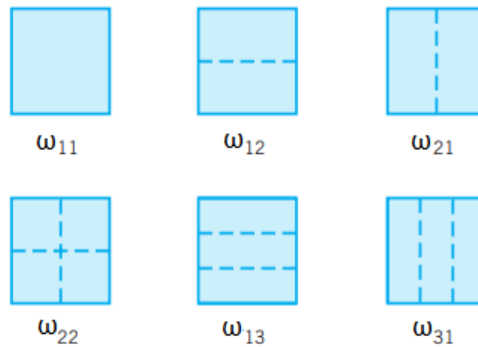
$$\omega_{mn} = \pi^2 \left[\left(\frac{m}{a} \right)^2 + \left(\frac{n}{b} \right)^2 \right] \sqrt{\frac{D}{\rho h}} \quad (3.13)$$

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 ω_{11} , ω_{12} , ω_{21} , ω_{22} , ω_{13} te ω_{31} , kvadratne membrane.

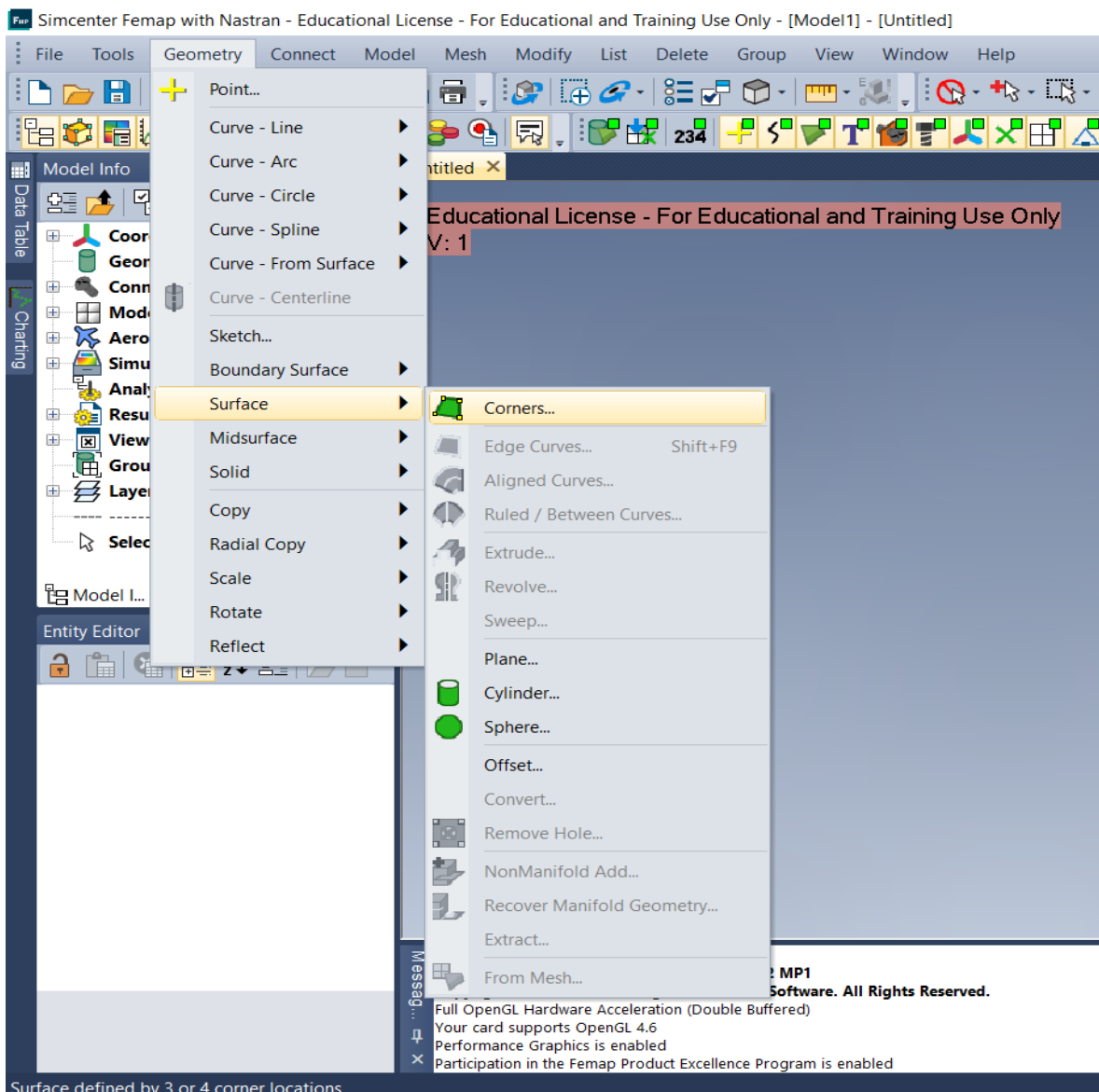


Slika 3.2: *Modovi titranja kvadratne membrane.*

4 Izrada geometrijskog modela u FEMAP-u

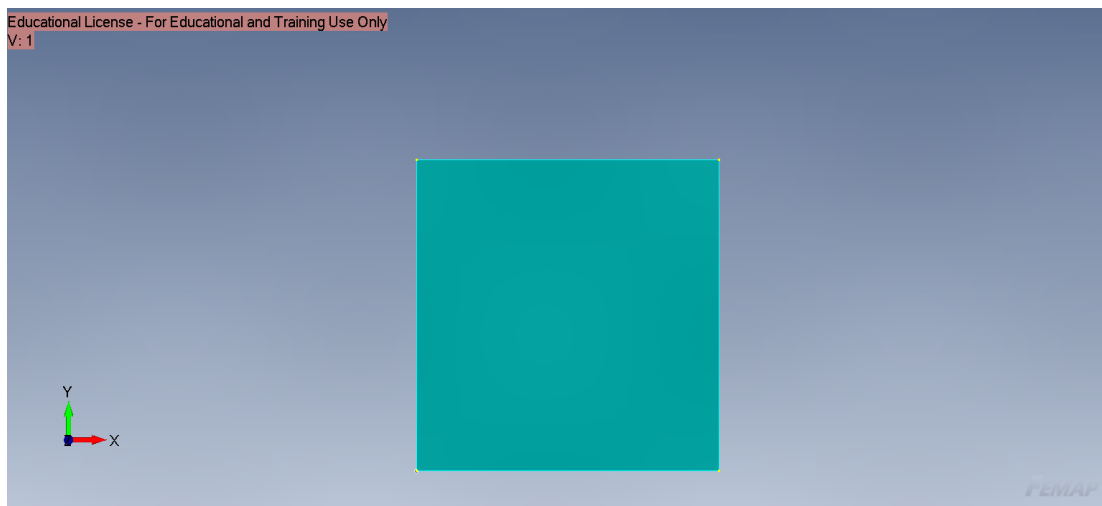
4.1 Geometrija

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:

Tablica 4.1: Mehanička svojstva silicijevog nitrida.[6]

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

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:

Tablica 4.2: Mehanička svojstva platine.[7]

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

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.

Slika 4.3: Definiranje materijala.

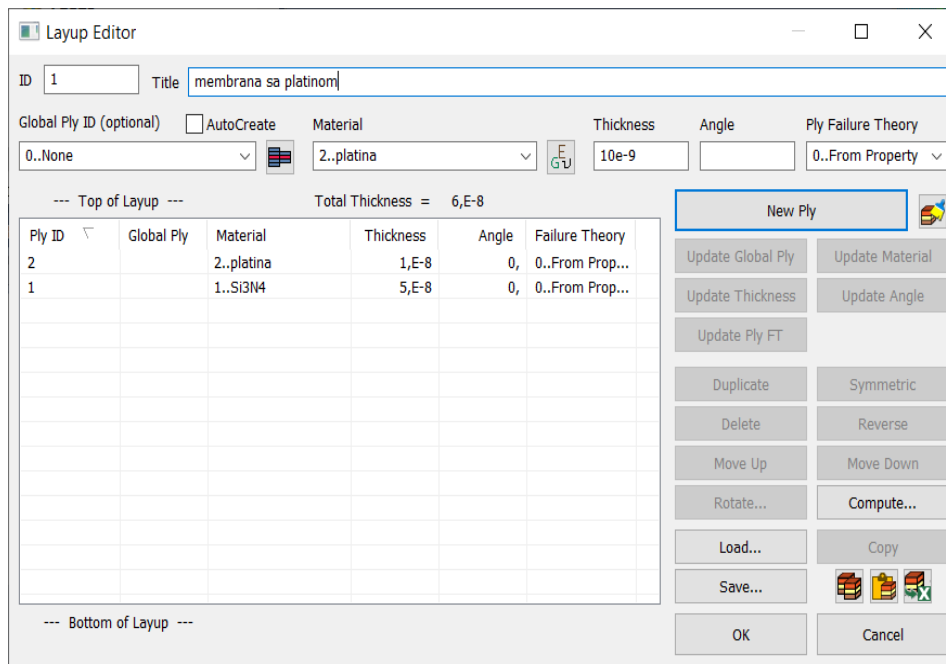
4.3 Definiranje značajki konačnih elemenata

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.

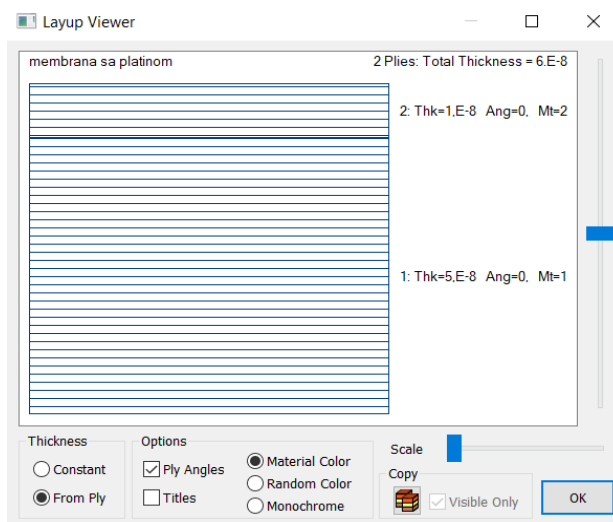
Slika 4.4: Značajke ploče.

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 silicijev 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.



Slika 4.5: Kreiranje sloja platine.

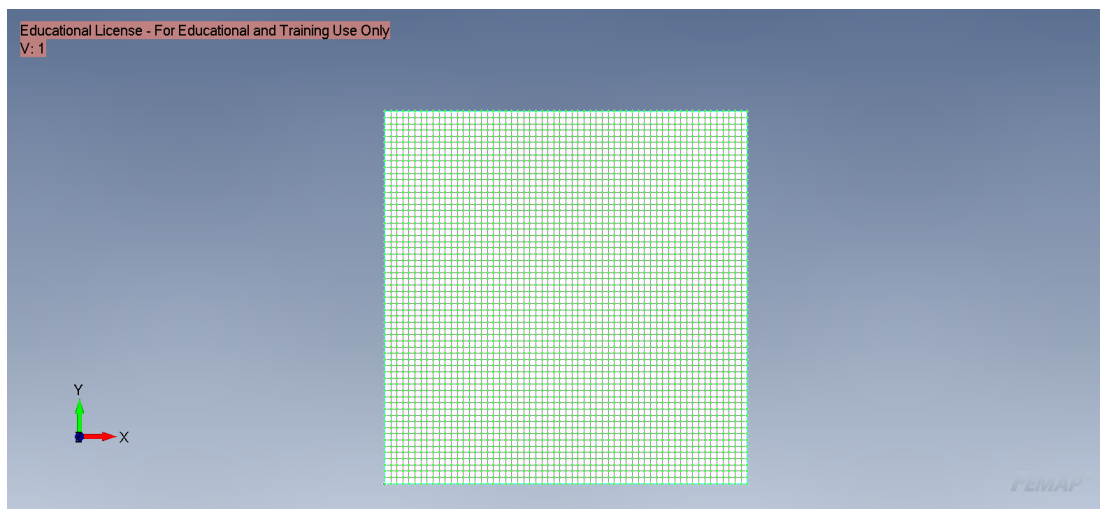


Slika 4.6: Membrana sa slojem platine.

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

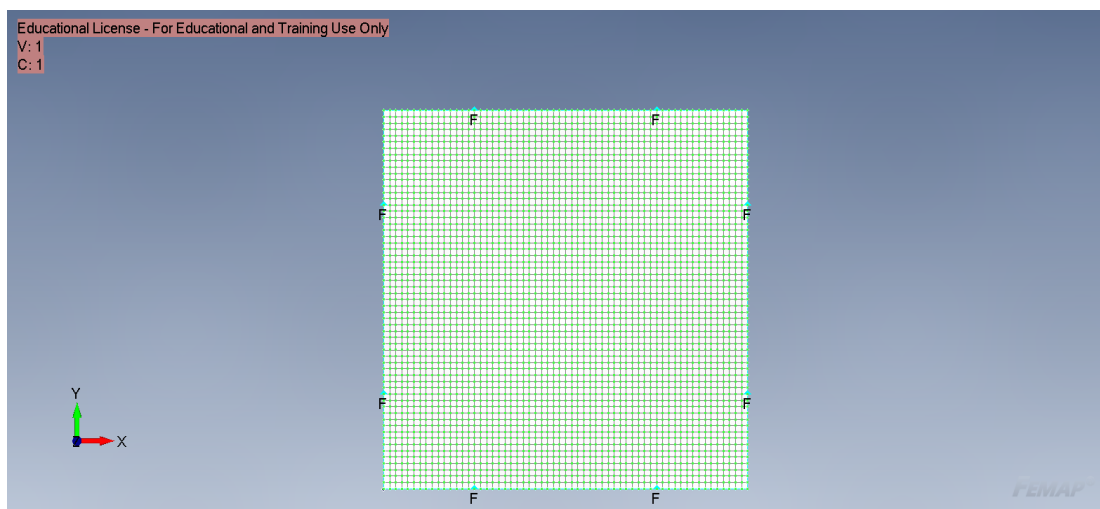
Definiranje gustoće mreže napravljeno je pomoću naredbe **Mesh — Mesh Control — Size on Surface**. Odabrana je nacrtana površina i na prozoru koji se pojavio pod Element Size upisano je $3,33333 \cdot 10^{-5}$. Nakon što je definirana gustoća mreže, moguće je omrežiti model pomoću naredbe **Mesh — Geometry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



Slika 4.7: *Omreženi model.*

4.6 Rubni uvjeti

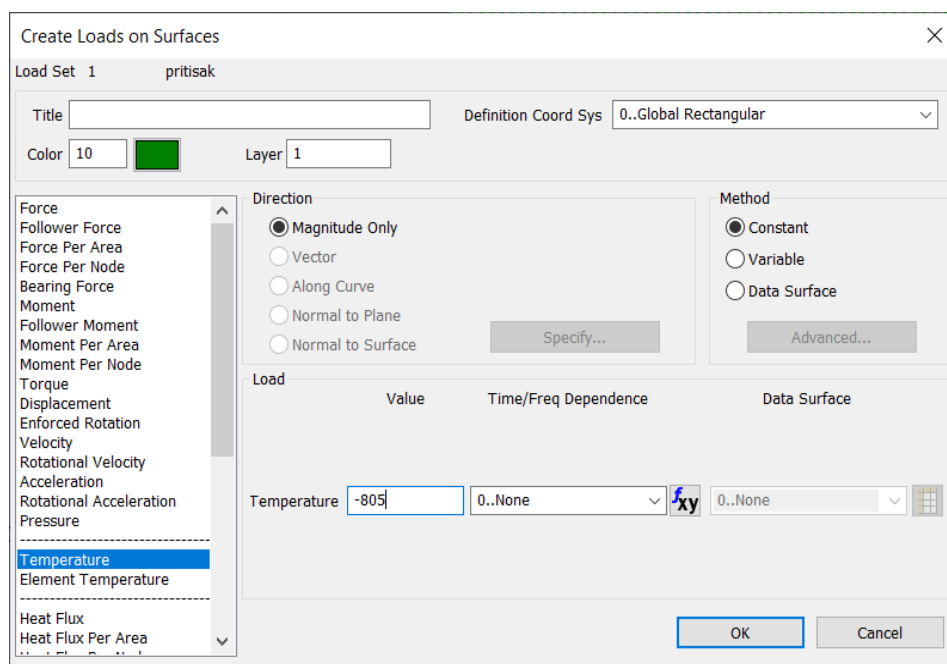
S obzirom da je membrana rastegnuta na okvir od silicija za rubne uvjete je odabrano uklještenje po rubu. Rubni uvjeti se postavljaju pomoću naredbe **Model — Constraint — On curve**. Budući da su na rubnim linijama spriječeni svi stupnjevi slobode može se kliknuti na Fixed u sljedećem prozoru.



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.



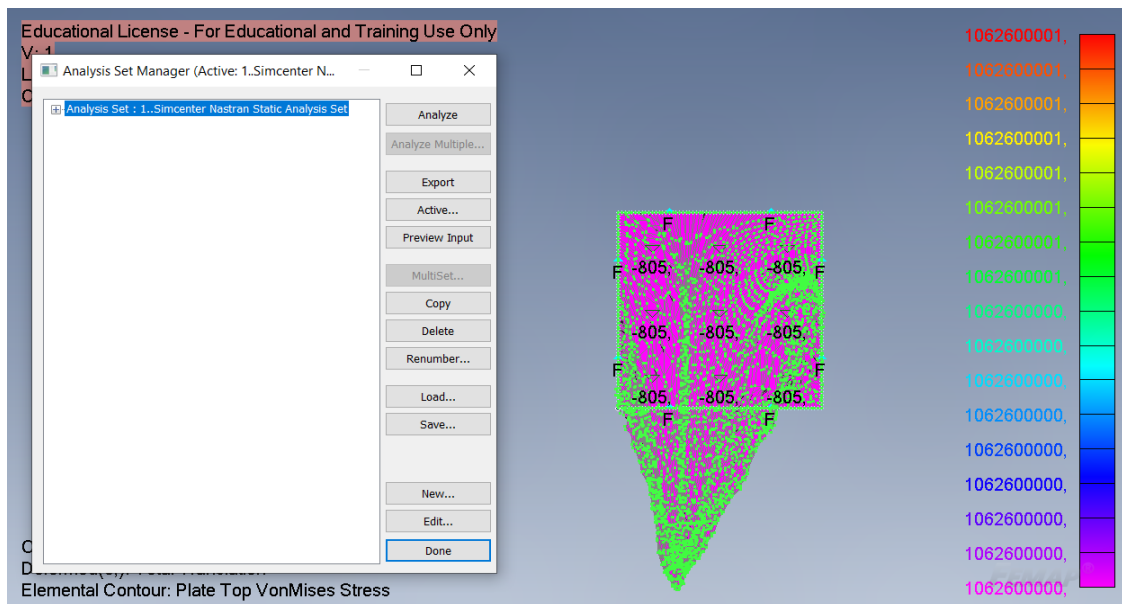
Slika 4.9: Kreiranje opterećenja.

4.8 Analiza

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

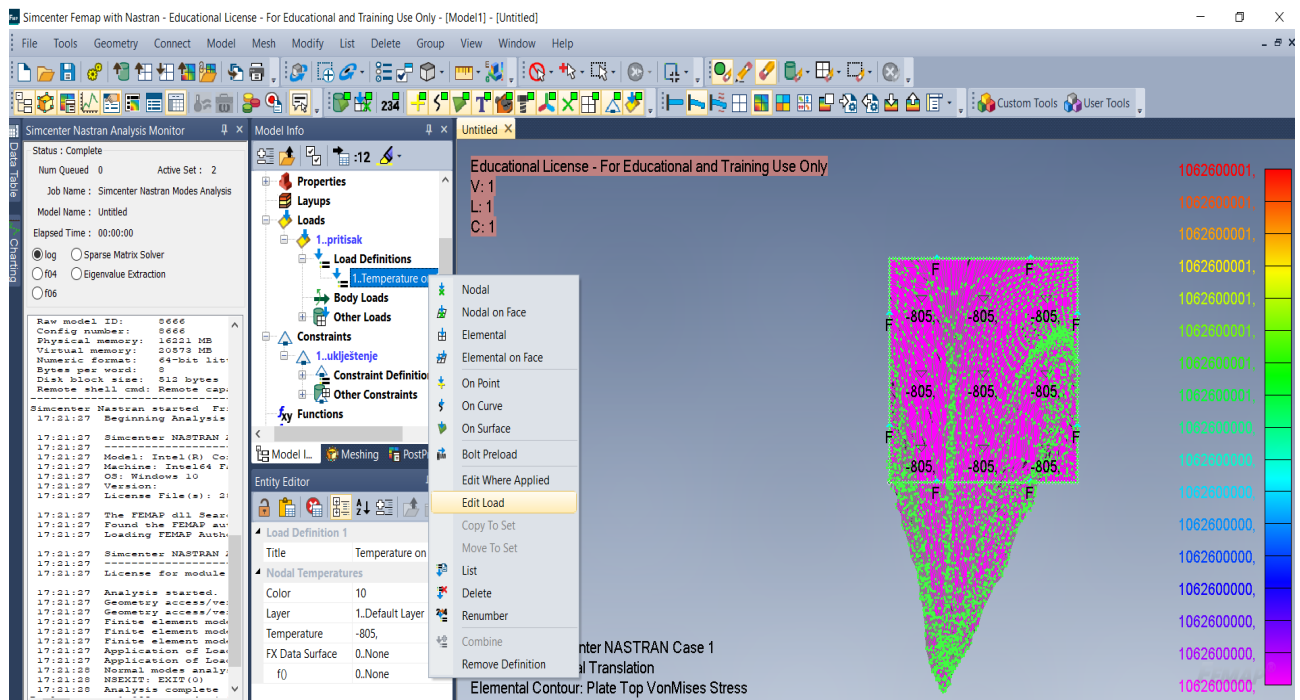
4.8.1 Statička analiza

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 temperaturu od 805 °C vrijednost naprezanja iznosi 1062600000 Pa $\approx$ 1 GPa.



Slika 4.10: Statička analiza membrane.

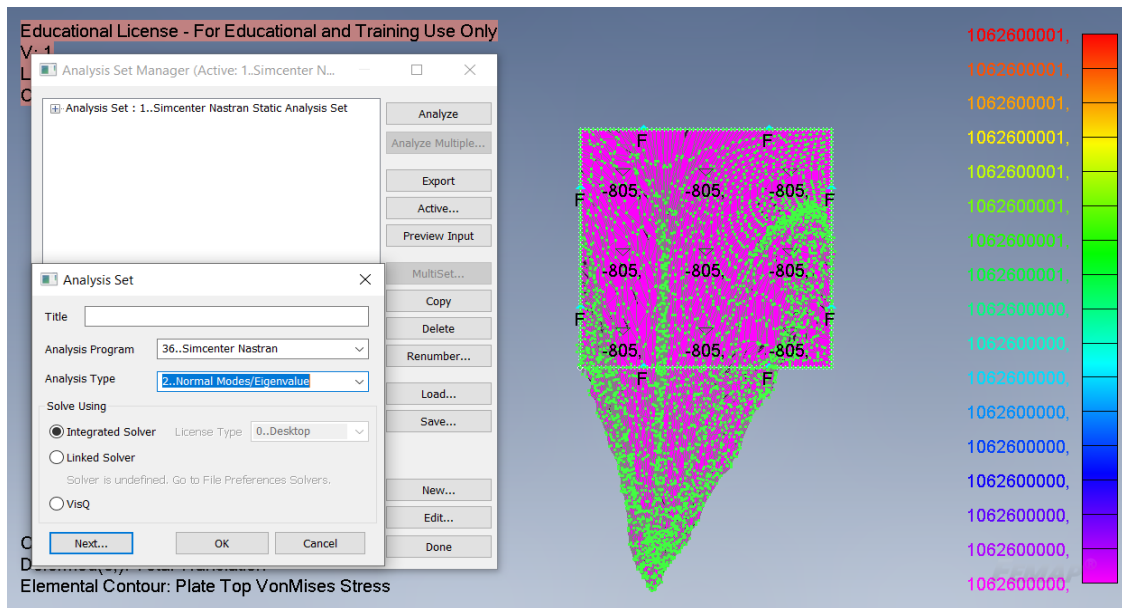
S obzirom da je tek nakon provedene statičke analize poznata vrijednost naprezanja za određenu temperaturu, odnosno opterećenje, stoga je potrebno mijenjati vrijednost temperature (slika 4.11) kako bi se odredile vlastite frekvencije senzora sile koji nije prednapregnut te istražio utjecaj različitih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



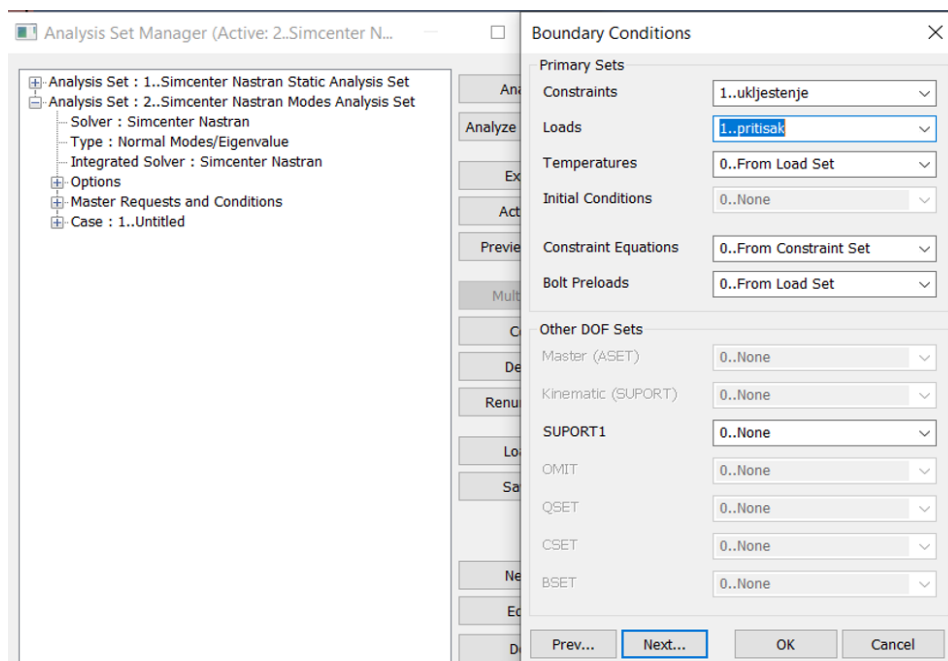
Slika 4.11: Naredba za promjenu opterećenja (temperature).

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.



Slika 4.12: Modalna analiza membrane.



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

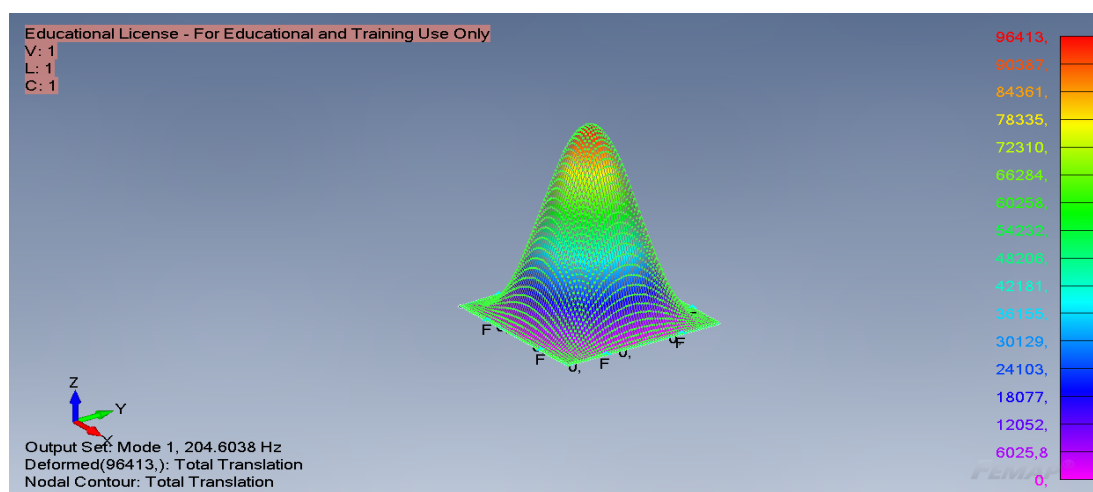
Za senzor sile koji nije prednapregnut postavljeno je opterećenje od 0°C što odgovara naprezanju od 0 GPa, tj. na njega djeluje samo vlastita težina. Određene su vlastite frekvencije senzora koji nije prednapregnut bez i s dodatnim slojem platine koje su prikazane u poglavljima 5.1.1. i 5.1.2.

5.1.1 Si_3N_4 membrana 2x2 mm debljine 50 nm

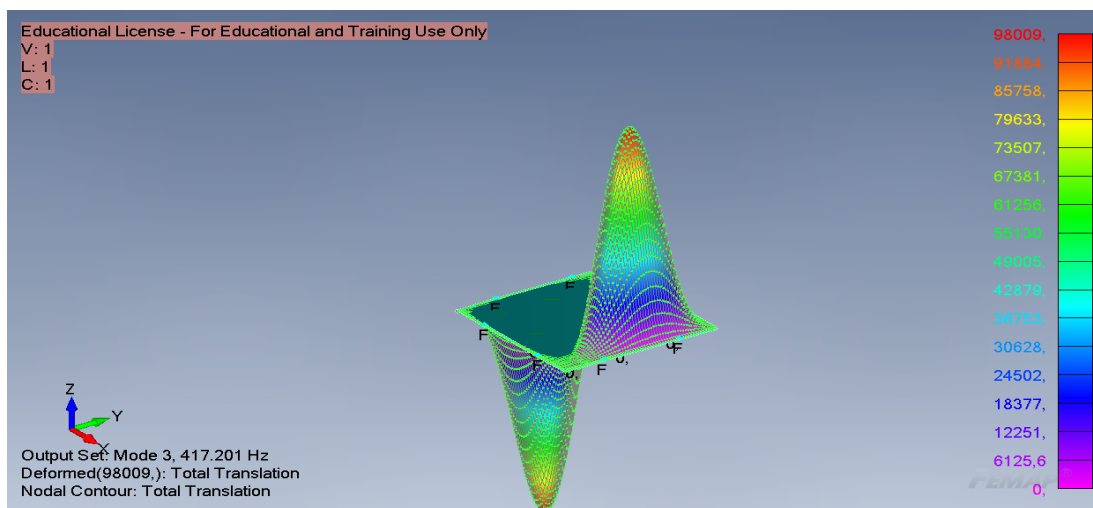
U tablici 5.1 prikazane su vrijednosti vlastitih frekvencija senzora koji nije prednapregnut i bez dodatnog sloja platine. Modovi titranja prikazani su na slikama 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9 i 5.10.

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

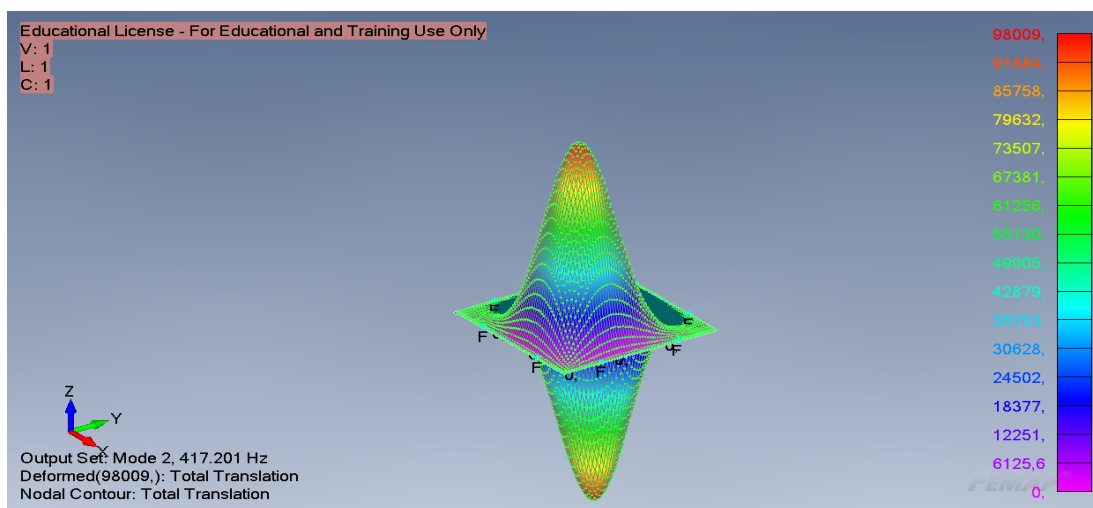
Mod titranja	Frekvencija, [Hz]
ω_{11}	204,6
$\omega_{12+21} = \omega_{12-21}$	417,2
ω_{22}	614,4
ω_{13+31}	751,5
$\omega_{23+32} = \omega_{23-32}$	936,2
ω_{14+41}	1196,8



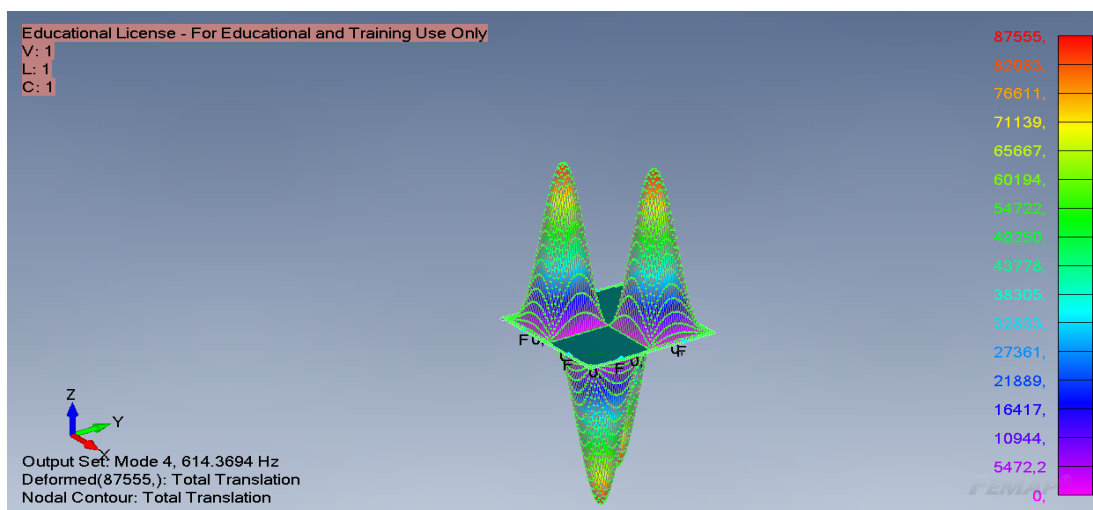
Slika 5.1: Mod titranja ω_{11} senzora koji nije prednapregnut i bez platine.



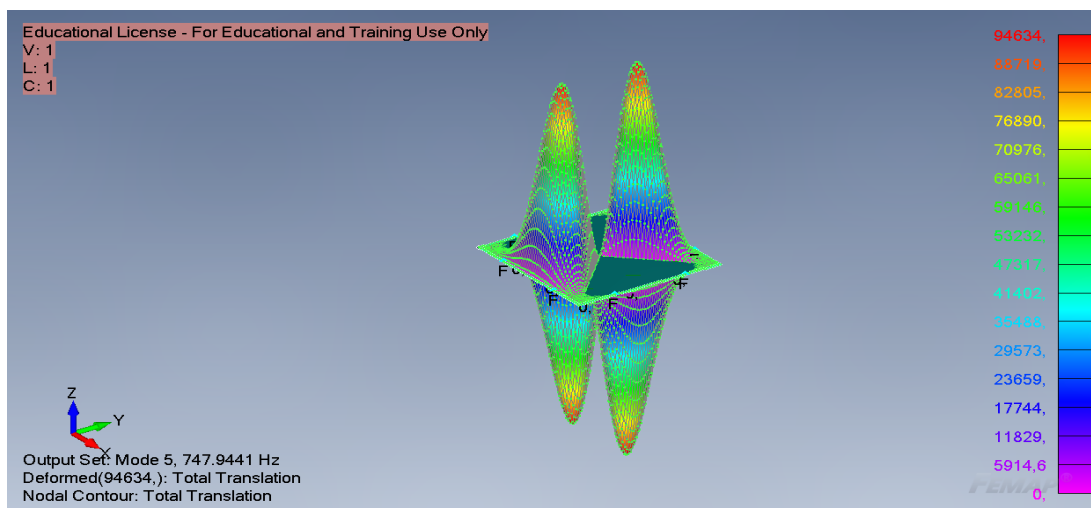
Slika 5.2: Mod titranja ω_{12+21} senzora koji nije prednapregnut i bez platine.



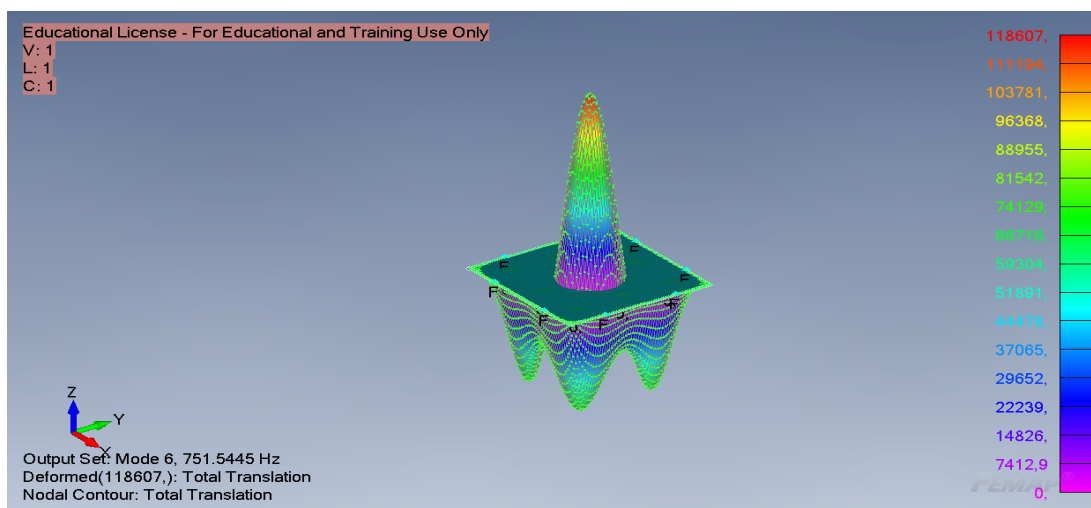
Slika 5.3: Mod titranja ω_{12-21} senzora koji nije prednapregnut i bez platine.



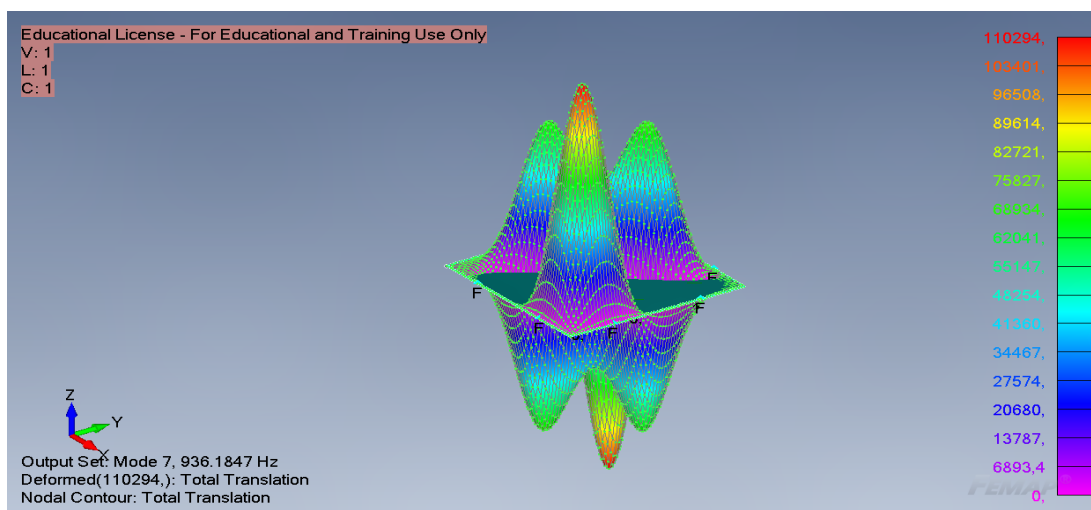
Slika 5.4: Mod titranja ω_{22} senzora koji nije prednapregnut i bez platine.



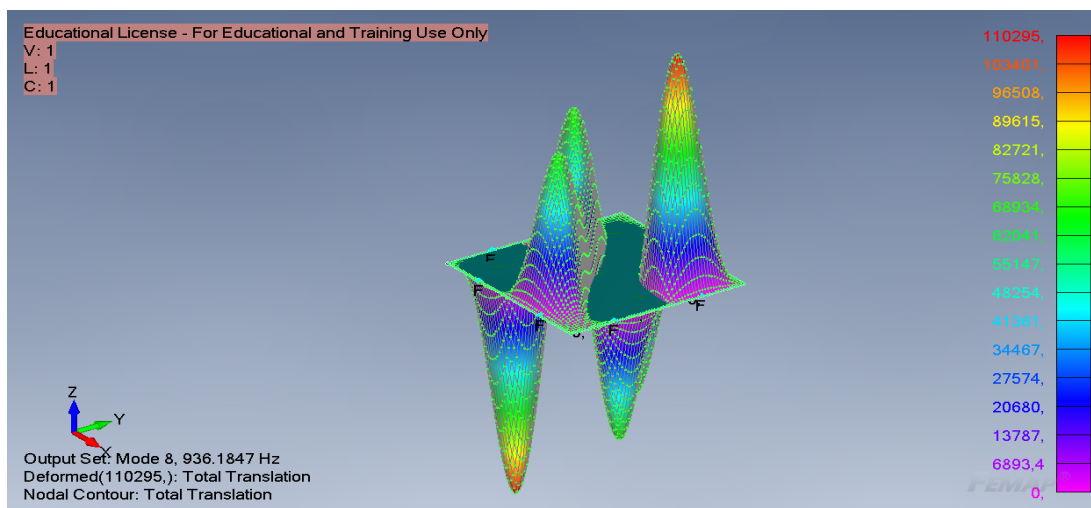
Slika 5.5: Mod titranja ω_{13+31} senzora koji nije prednapregnut i bez platine.



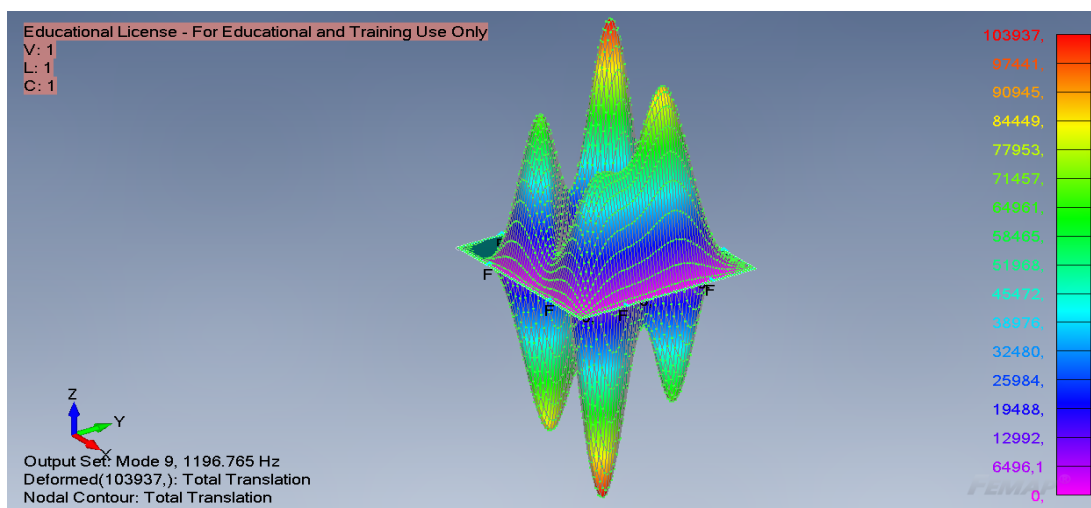
Slika 5.6: Mod titranja ω_{13+31} senzora koji nije prednapregnut i bez platine.



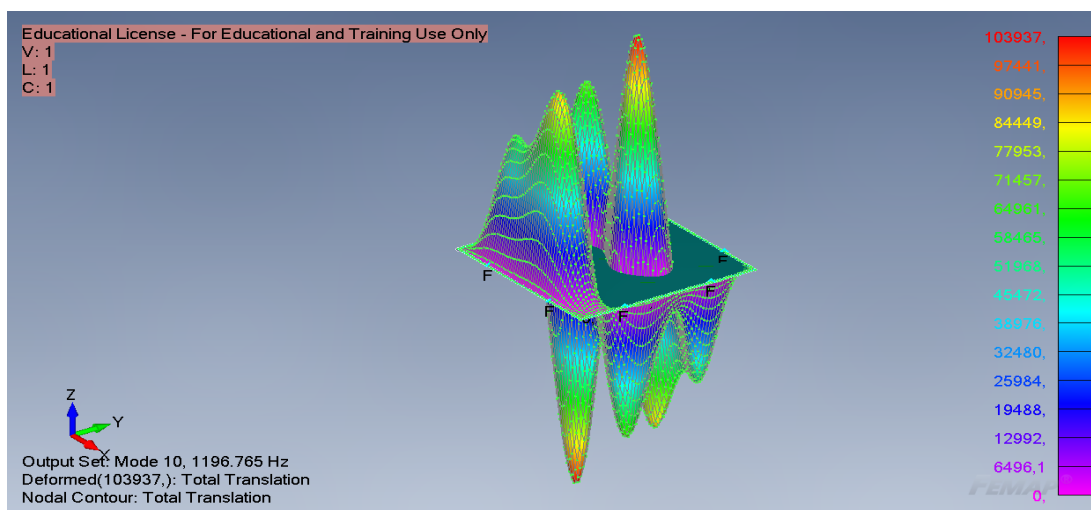
Slika 5.7: Mod titranja ω_{23-32} senzora koji nije prednapregnut i bez platine.



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.



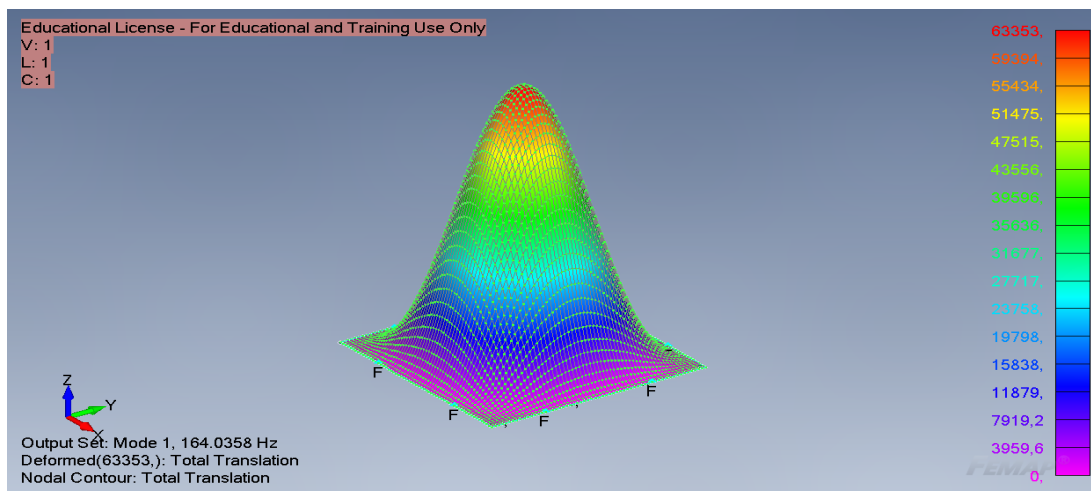
Slika 5.10: Mod titranja ω_{14+41} senzora koji nije prednapregnut i bez platine.

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

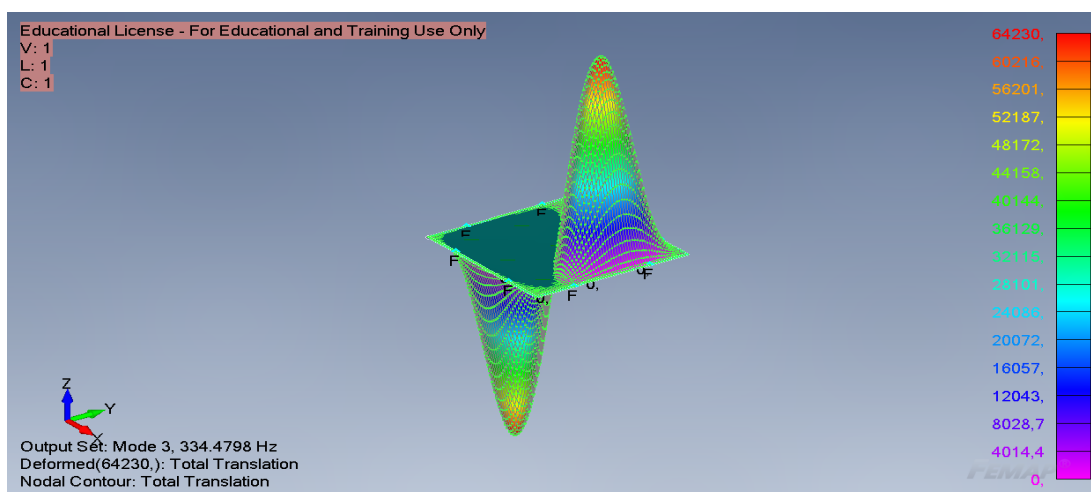
U tablici 5.2 prikazane su vrijednosti vlastitih frekvencija senzora koji nije prednapregnut, ali ima dodatni sloj platine od 10 nm. Modovi titranja prikazani su na slikama 5.11, 5.12, 5.13, 5.14, 5.15, 5.16, 5.17 i 5.18.

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

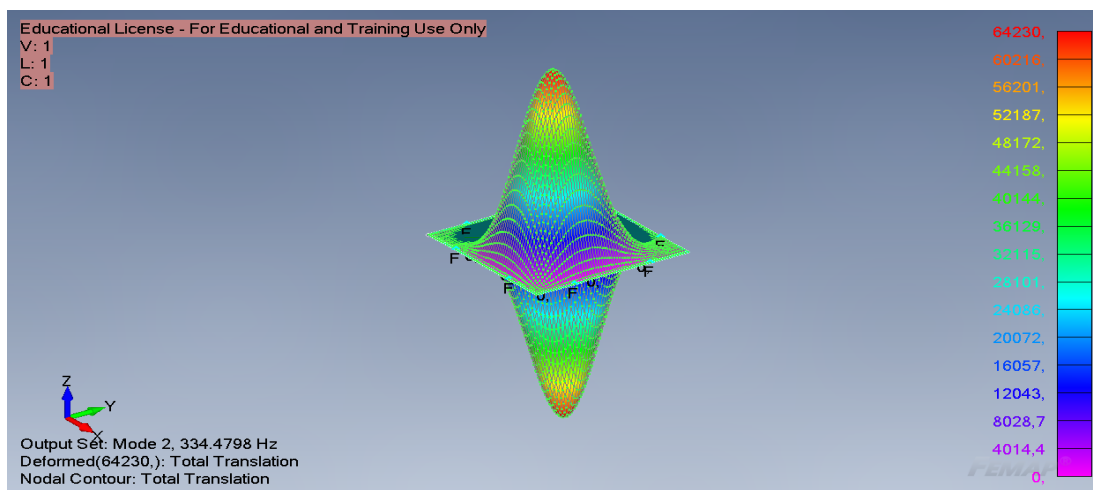
Mod titranja	Frekvencija, [Hz]
ω_{11}	164,0
$\omega_{12+21} = \omega_{12-21}$	334,5
ω_{22}	492,6
ω_{13+31}	599,6
$\omega_{23+32} = \omega_{23-32}$	750,6
ω_{14+41}	959,5



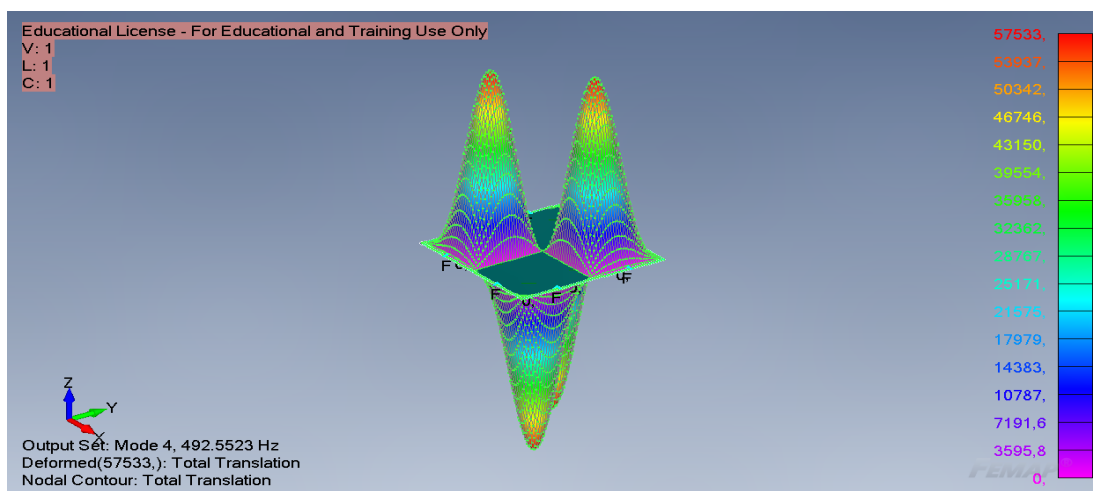
Slika 5.11: *Mod titranja ω_{11} senzora koji nije prednapregnut sa slojem platine 10nm.*



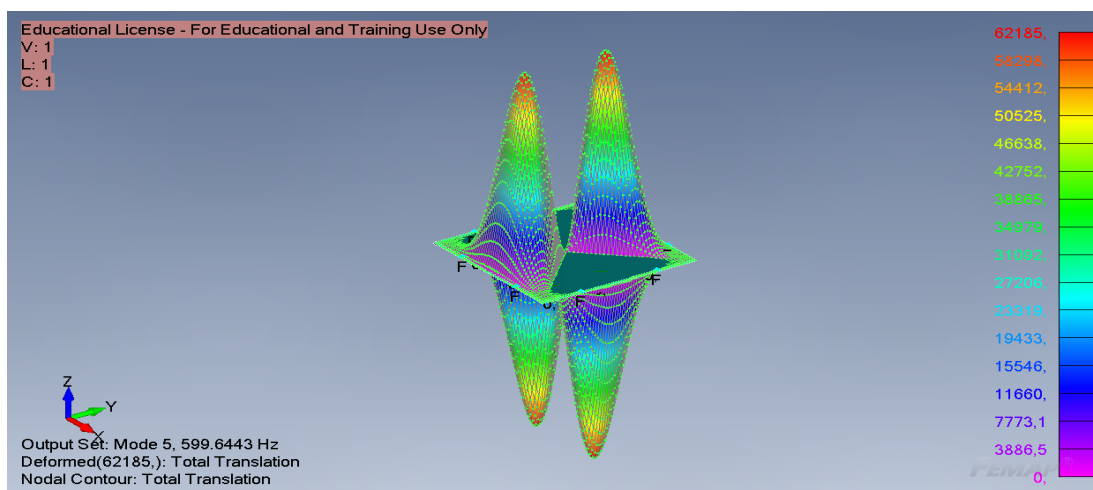
Slika 5.12: *Mod titranja ω_{12+21} senzora koji nije prednapregnut sa slojem platine 10nm.*



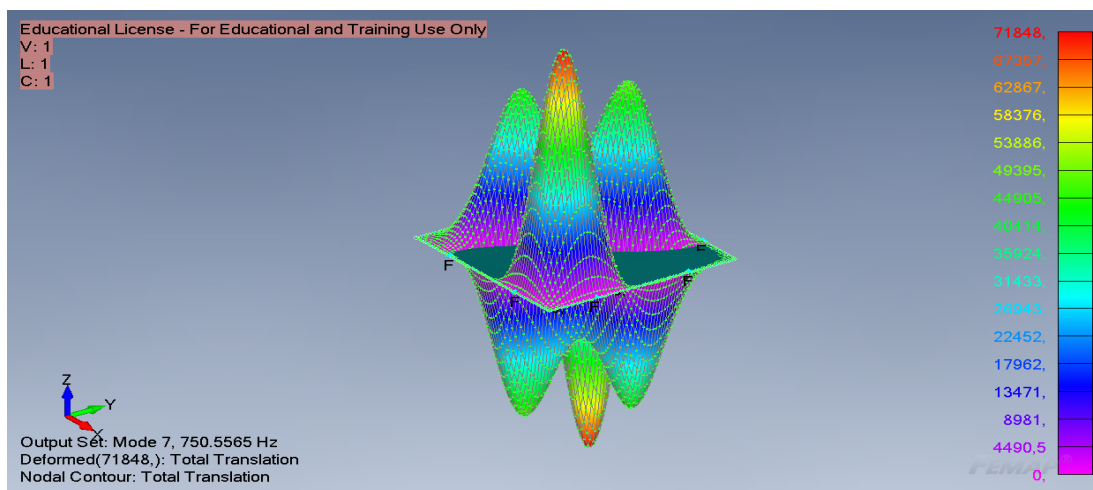
Slika 5.13: Mod titranja ω_{12-21} senzora koji nije prednapregnut sa slojem platine 10nm.



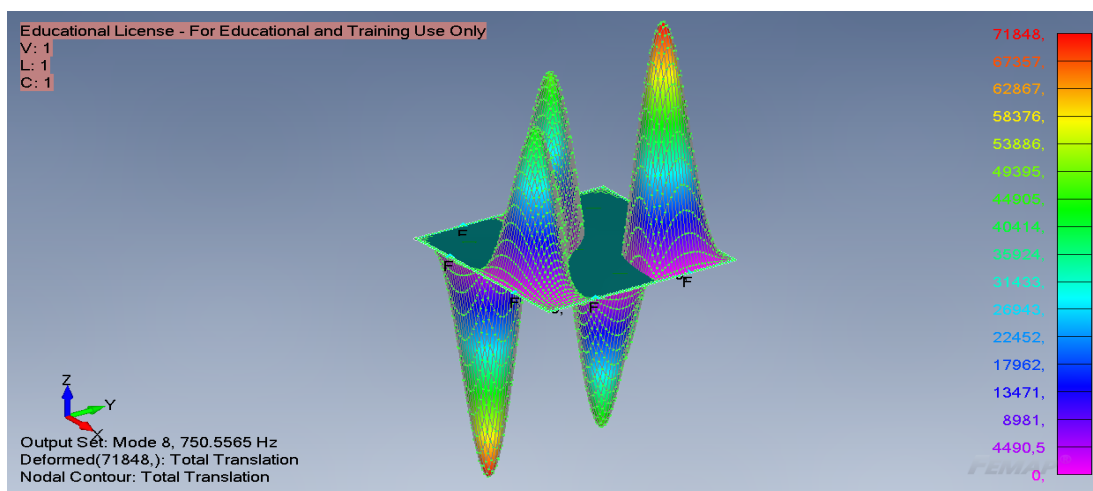
Slika 5.14: Mod titranja ω_{22} senzora koji nije prednapregnut sa slojem platine 10nm.



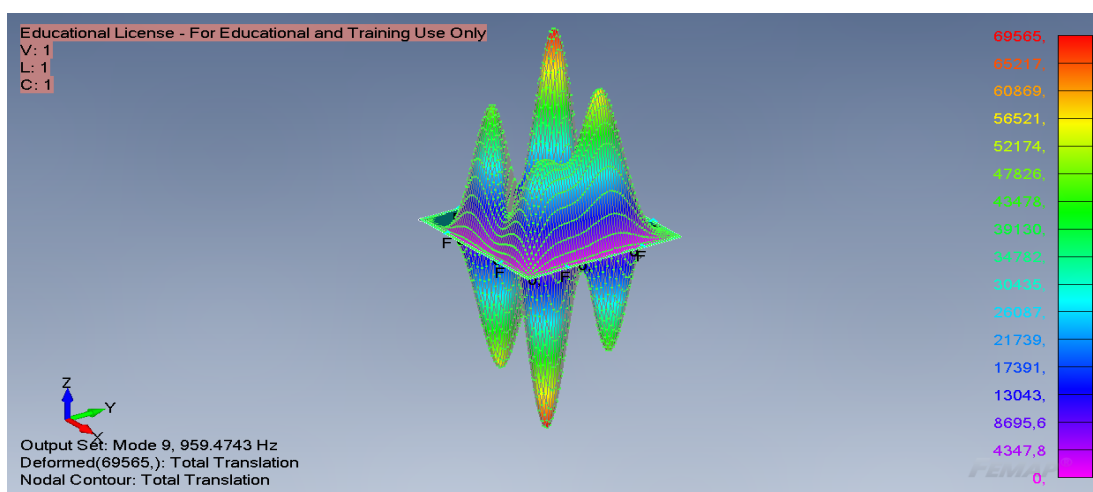
Slika 5.15: Mod titranja ω_{13+31} senzora koji nije prednapregnut sa slojem platine 10nm.



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

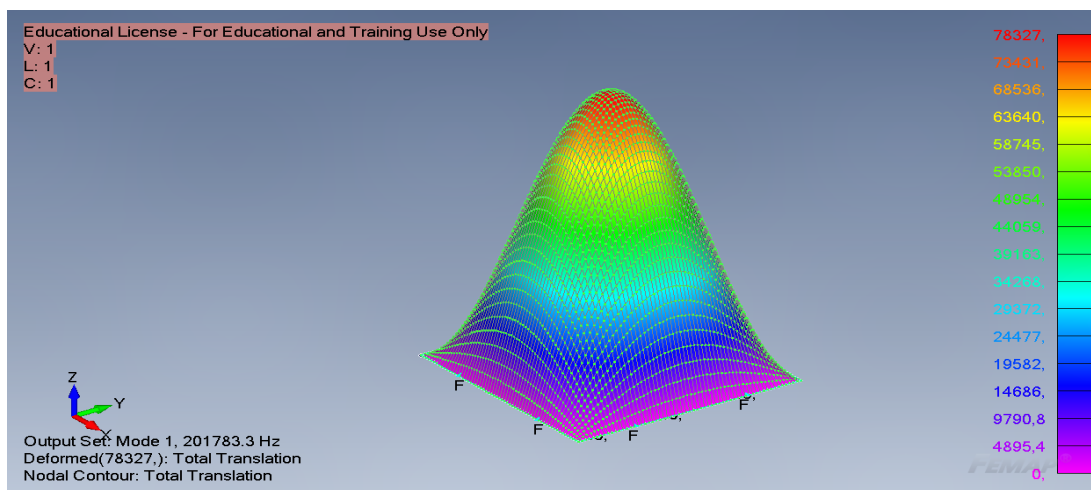
Za prednapregnuti senzor sile postavljeno je opterećenje od -805°C što odgovara naprezanju od $1062600001 \text{ Pa} \approx 1 \text{ GPa}$. Određene su vlastite frekvencije prednapregnutog senzora bez i s dodatnim slojem platine koje su prikazane u poglavljima 5.2.1. i 5.2.2.

5.2.1 Si_3N_4 membrana 2x2 mm debljine 50 nm

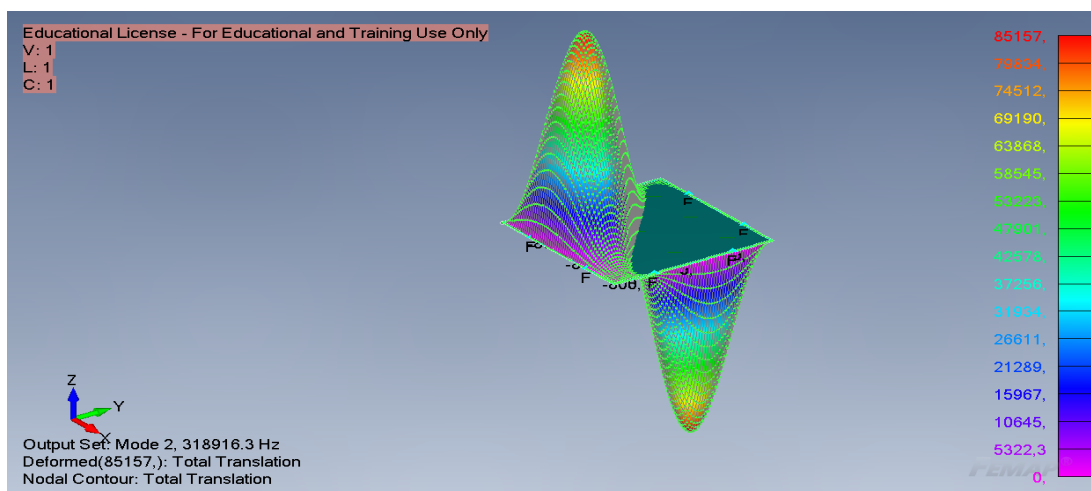
U tablici 5.3 prikazane su vrijednosti vlastitih frekvencija prednapregnutog senzora bez dodatnog sloja platine. Modovi titranja prikazani su na slikama 5.19, 5.20, 5.21, 5.22, 5.23, 5.24 i 5.25.

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

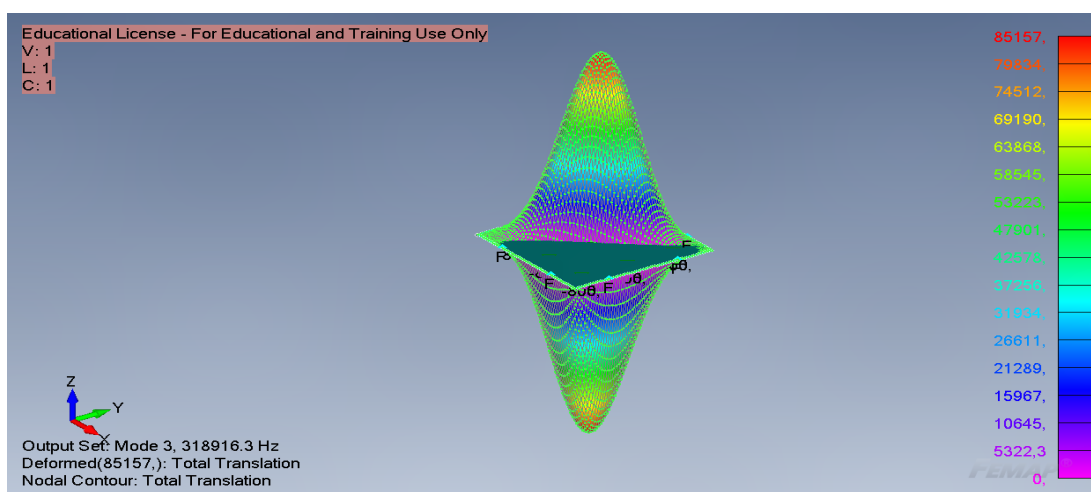
Mod titranja	Frekvencija, [Hz]
ω_{11}	201 783,3
$\omega_{12+21} = \omega_{12-21}$	318 916,3
ω_{22}	403 152,1
ω_{13+31}	450 748,1
$\omega_{23+32} = \omega_{23-32}$	513 536,6
ω_{14+41}	587 228,4



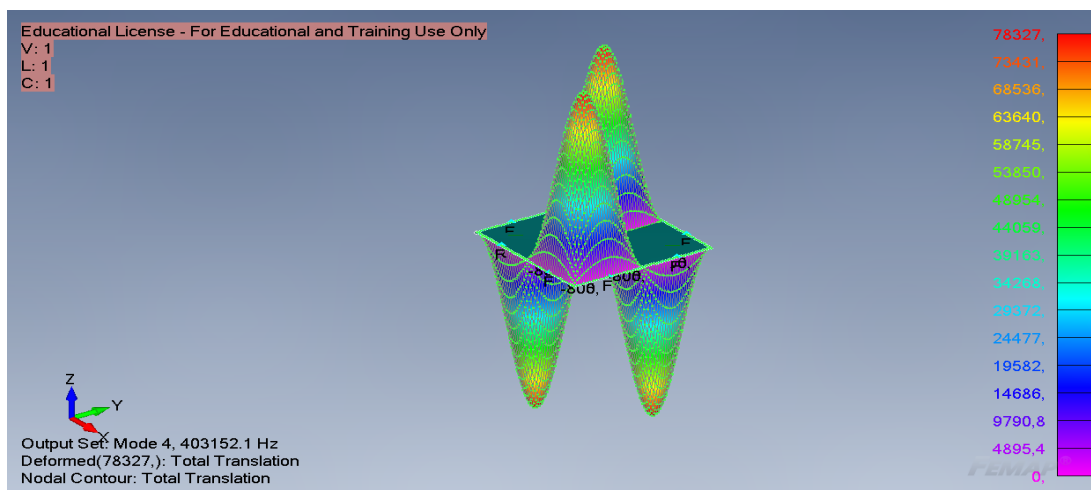
Slika 5.19: *Mod titranja ω_{11} prednapregnutog senzora bez platine.*



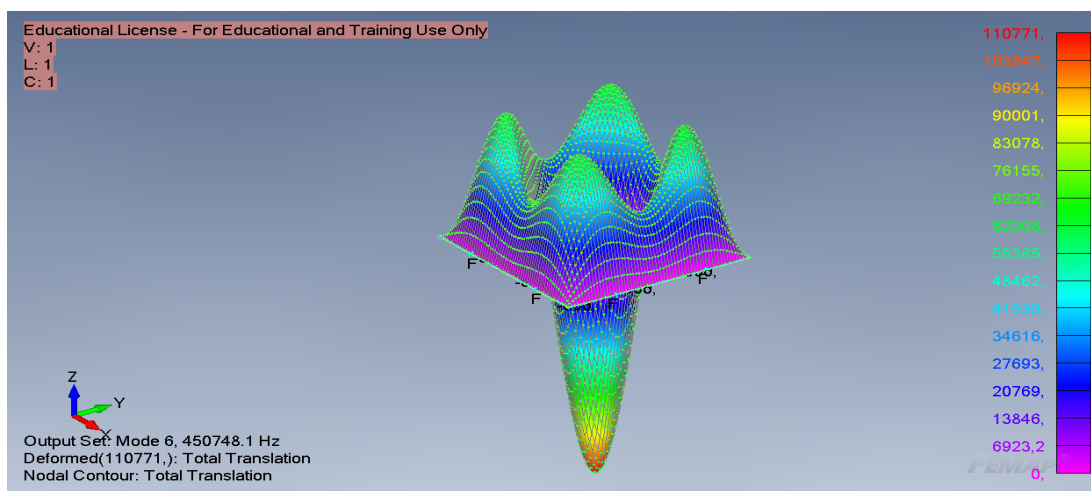
Slika 5.20: *Mod titranja ω_{12+21} prednapregnutog senzora bez platine.*



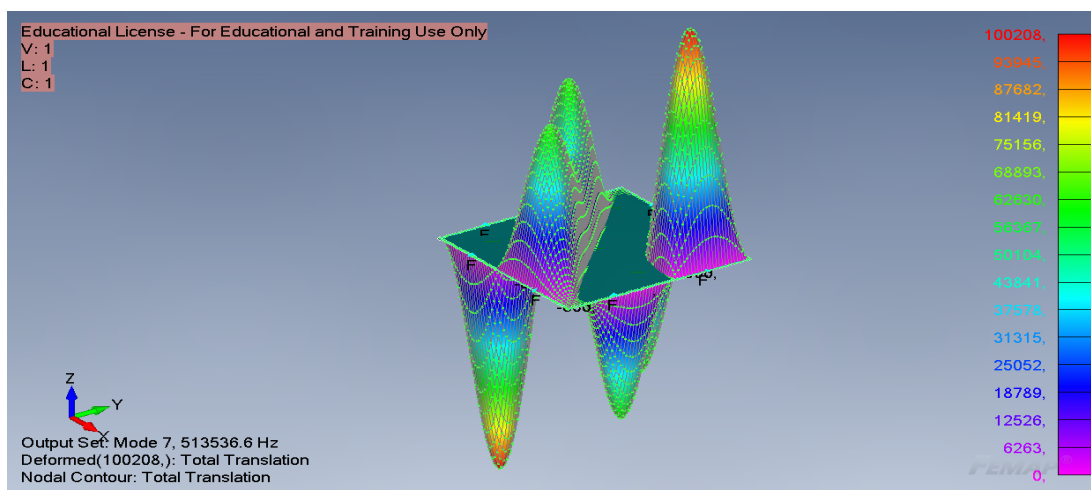
Slika 5.21: *Mod titranja ω_{12-21} prednapregnutog senzora bez platine.*



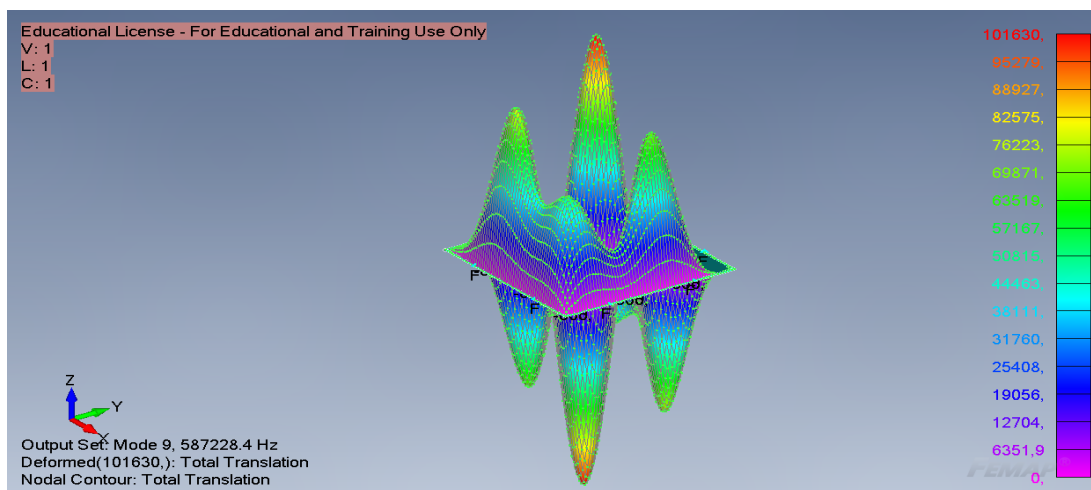
Slika 5.22: *Mod titranja ω_{22} prednapregnutog senzora bez platine.*



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



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



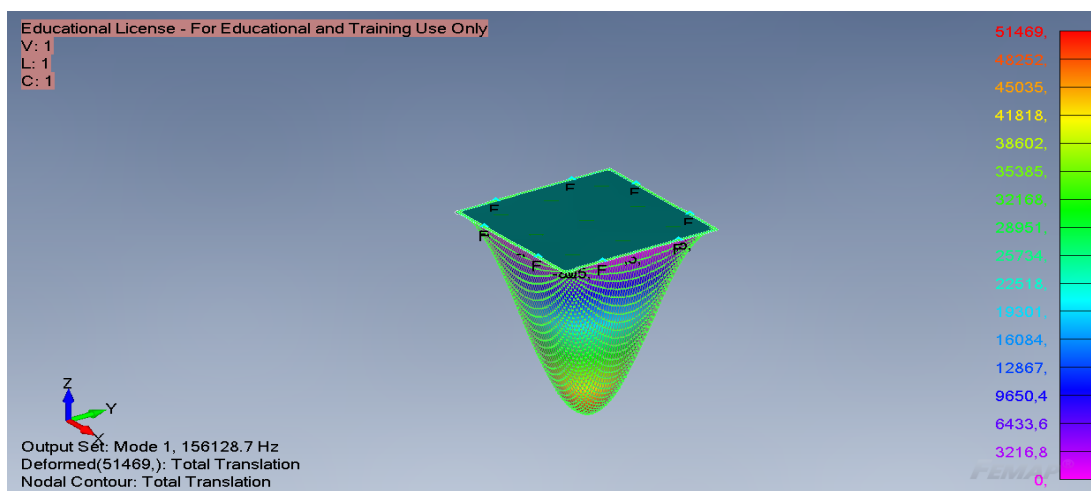
Slika 5.25: *Mod titranja ω_{14+41} prednapregnutog senzora bez platine.*

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

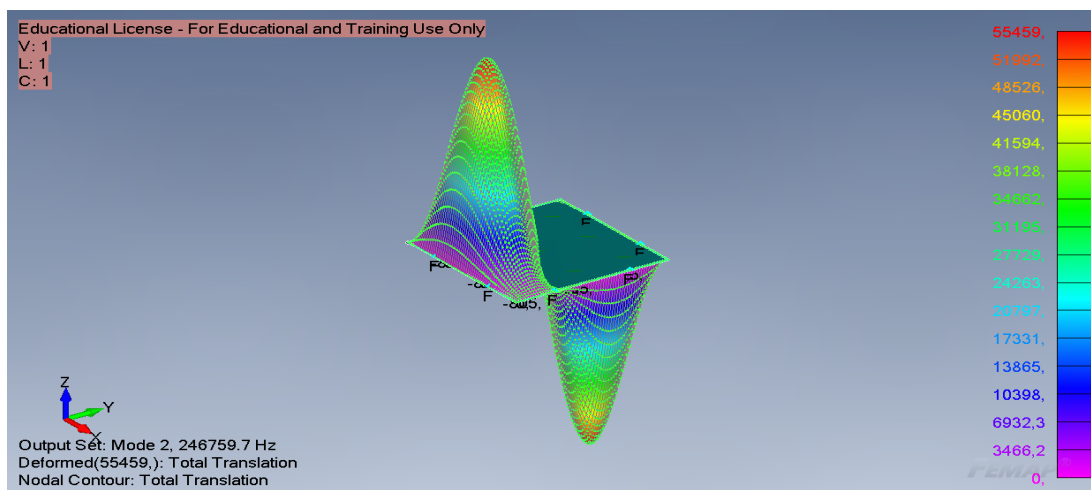
U tablici 5.4 prikazane su vrijednosti vlastitih frekvencija prednapregnutog senzora koji ima dodatni sloj platine od 10 nm. Modovi titranja prikazani su na slikama 5.26, 5.27, 5.28, 5.29, 5.30, 5.31, 5.32, 5.33 i 5.34.

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

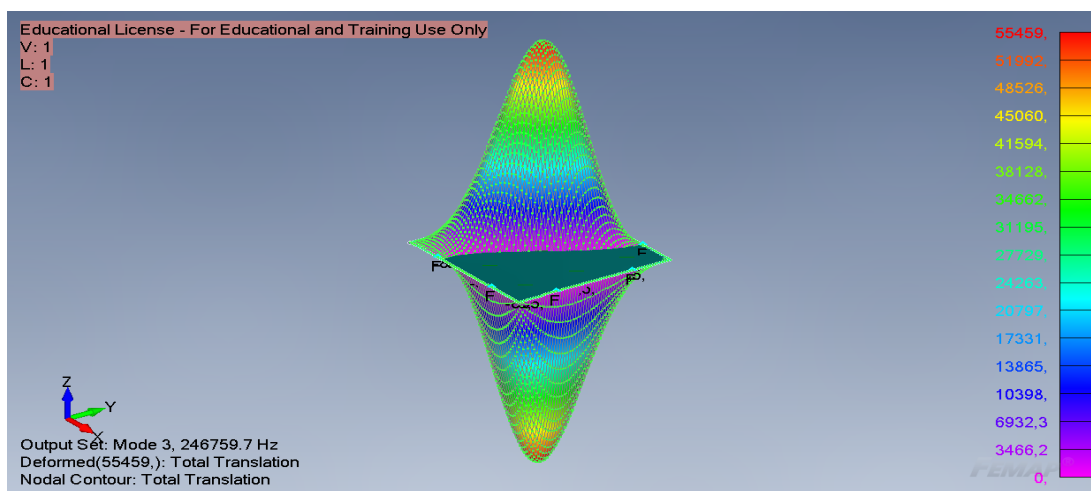
Mod titranja	Frekvencija, [Hz]
ω_{11}	156 128,7
$\omega_{12+21} = \omega_{12-21}$	246 759,7
ω_{22}	311 936,6
ω_{13+31}	348 763,8
$\omega_{23+32} = \omega_{23-32}$	397 346,0
ω_{14+41}	454 364,7



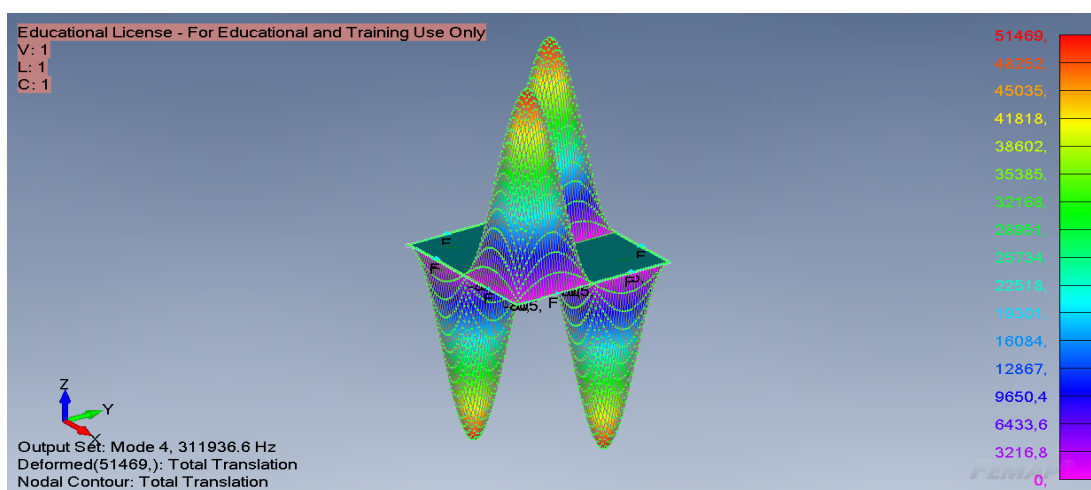
Slika 5.26: *Mod titranja ω_{11} prednapregnutog senzora sa slojem platine 10 nm.*



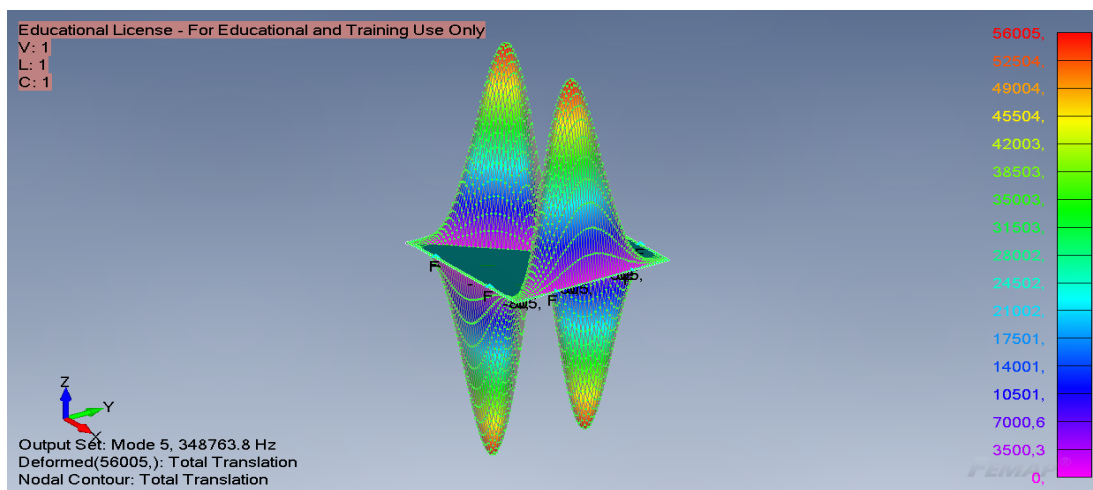
Slika 5.27: Mod titranja ω_{12+21} prednapregnutog senzora sa slojem platine 10 nm.



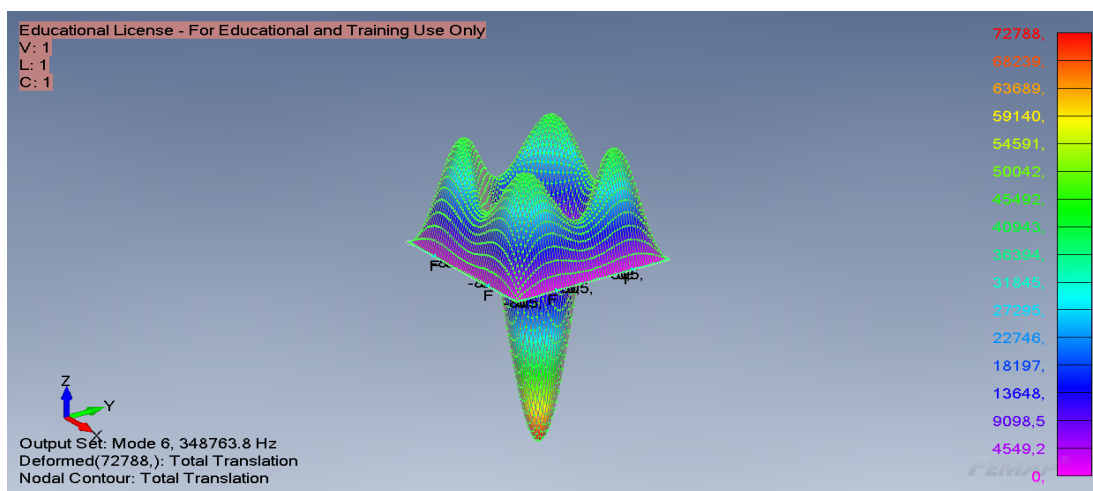
Slika 5.28: Mod titranja ω_{12-21} prednapregnutog senzora sa slojem platine 10 nm.



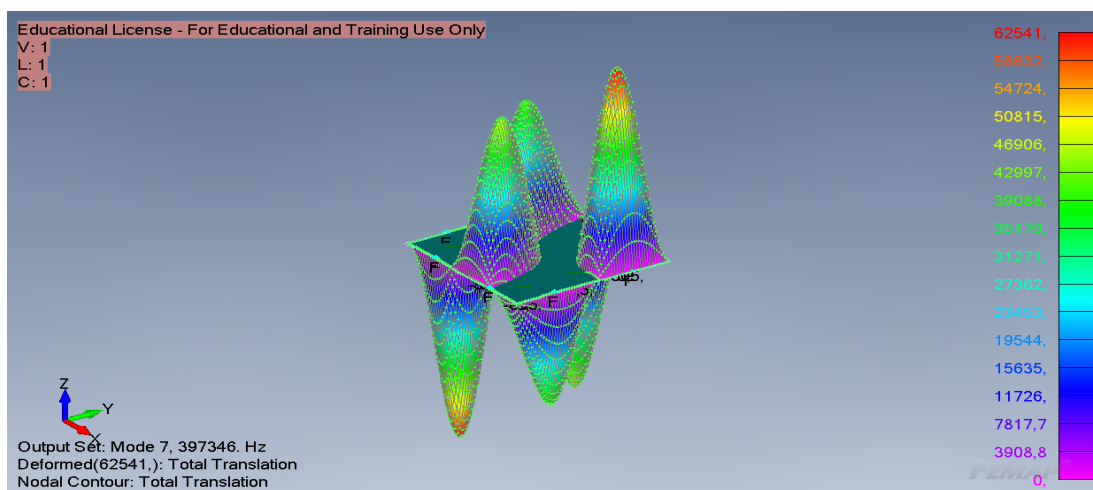
Slika 5.29: Mod titranja ω_{22} prednapregnutog senzora sa slojem platine 10 nm.



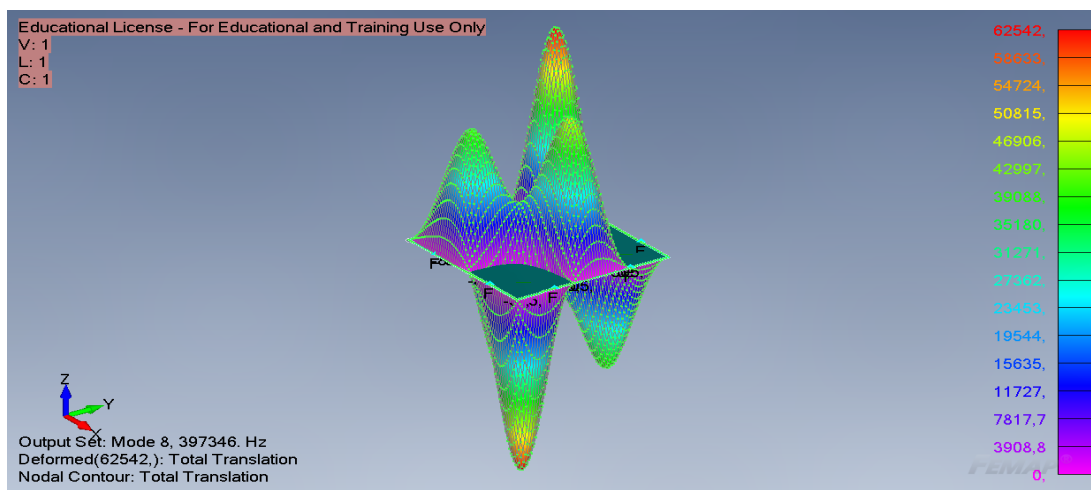
Slika 5.30: Mod titranja ω_{13+31} prednapregnutog senzora sa slojem platine 10 nm.



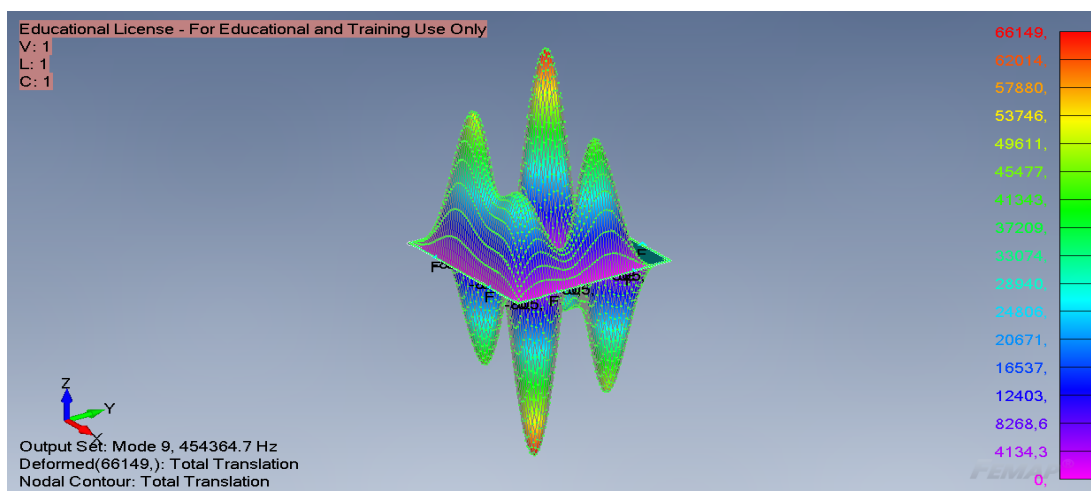
Slika 5.31: Mod titranja ω_{13+31} prednapregnutog senzora sa slojem platine 10 nm.



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.*

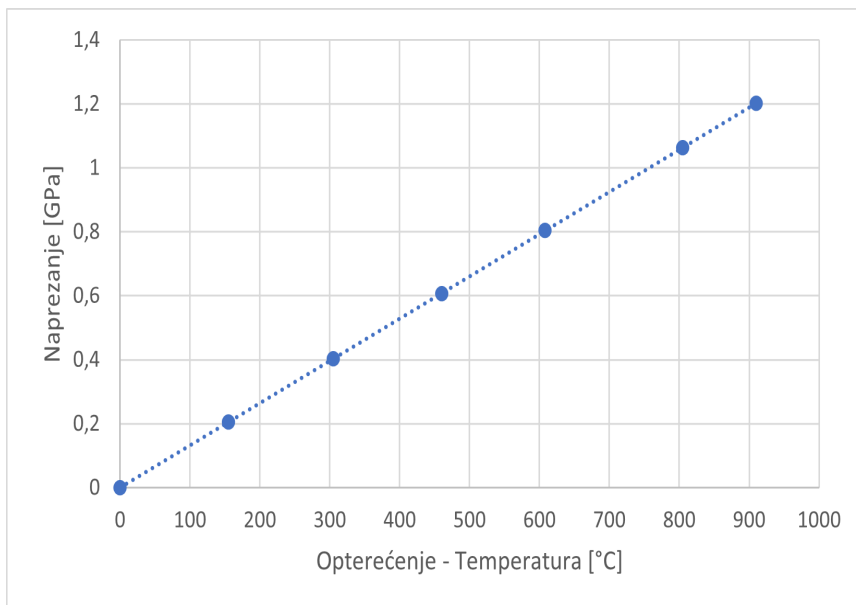
Iz dobivenih rezultata možemo uočiti da omjer vlastitih frekvencija svih modova titranja prednapregnutog senzora s platinom (ω_{pt}) i bez platine (ω) iznosi 0,77, tj. da vrijedi:

$$\frac{\omega_{pt}}{\omega} = \frac{156128,7}{201783,3} = \frac{246759,7}{318916,3} = \frac{311936,3}{403152,1} = \frac{348763,8}{450748,1} = \frac{397346,0}{513536,6} = \frac{454364,7}{587228,4} = 0,77$$

Možemo zaključiti da su vlastite frekvencije membrane koja ima dodatni sloj platine 23% niže od vlastitih frekvencija 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.

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

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 5.6: *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.

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

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 5.9: *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
$\omega_{12+21} = \omega_{12-21}$	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.

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

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

Mod titranja	Frekvencija, [Hz]
ω_{11}	105 370,7
$\omega_{12+21} = \omega_{12-21}$	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.

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

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

Mod titranja	Frekvencija, [Hz]
ω_{11}	129 403,6
$\omega_{12+21} = \omega_{12-21}$	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
$\omega_{12+21} = \omega_{12-21}$	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.

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

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 5.18: *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.

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

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

Mod titranja	Frekvencija, [Hz]
ω_{11}	171 184,0
$\omega_{12+21} = \omega_{12-21}$	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
$\omega_{12+21} = \omega_{12-21}$	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

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.

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

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

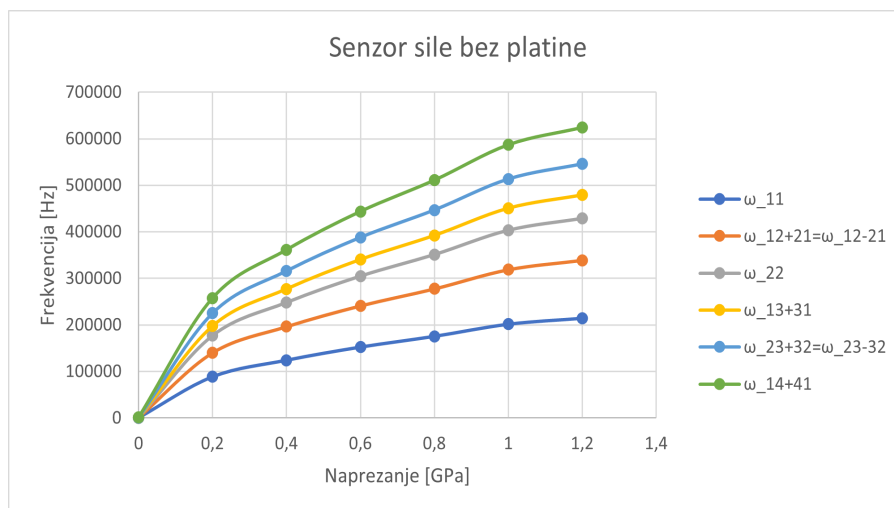
Tablica 5.24: *Vlastite frekvencije senzora sa slojem platine od 5 nm prilikom naprezanja od 1,2 GPa.*

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

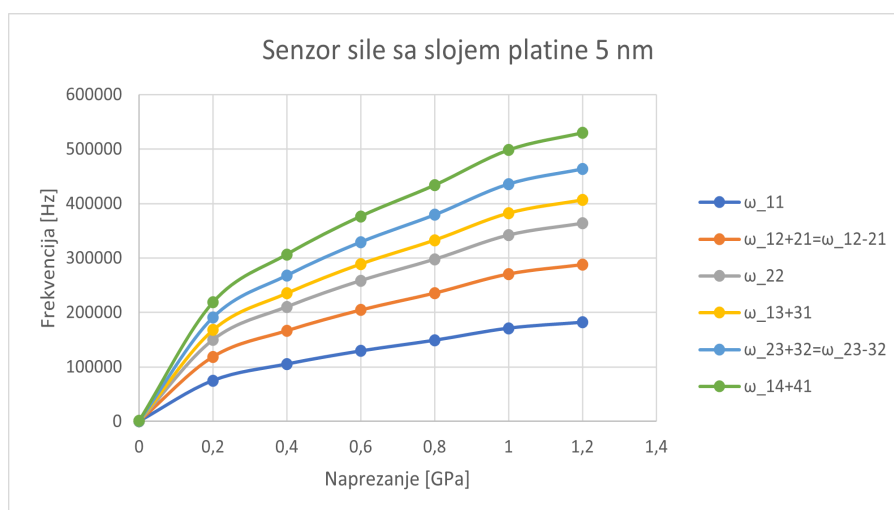
Tablica 5.25: *Vlastite frekvencije senzora sa slojem platine od 10 nm prilikom naprezanja od 1,2 GPa.*

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

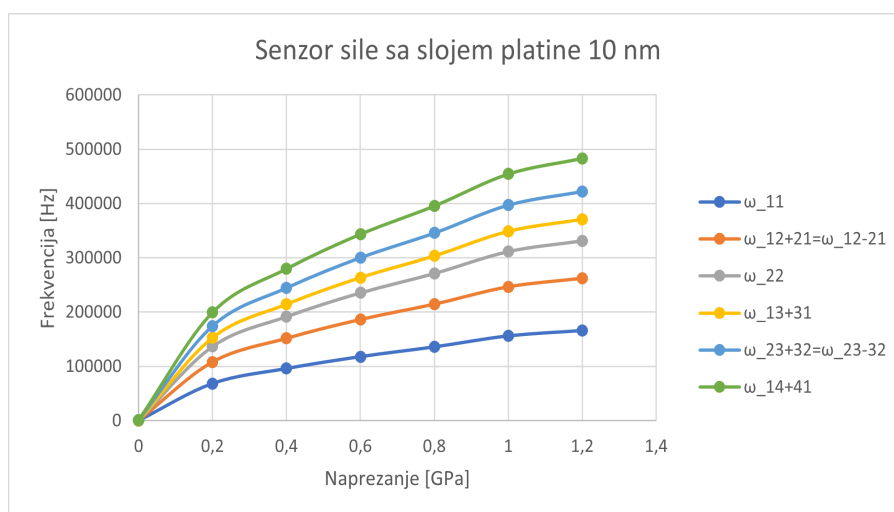
Nadalje, na grafovima na slikama 5.36, 5.37 i 5.38 možemo vidjeti promjenu vlastitih frekvencija titranja modova u ovisnosti o različitim vrijednostima naprezanja. Možemo zaključiti da se s povećanjem naprezanja povećavaju i vlastite frekvencije titranja senzora sile, i s platinom i bez platine. Međutim,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

Tablica 5.26: Senzor sile sa slojem platine 5 nm.

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

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.

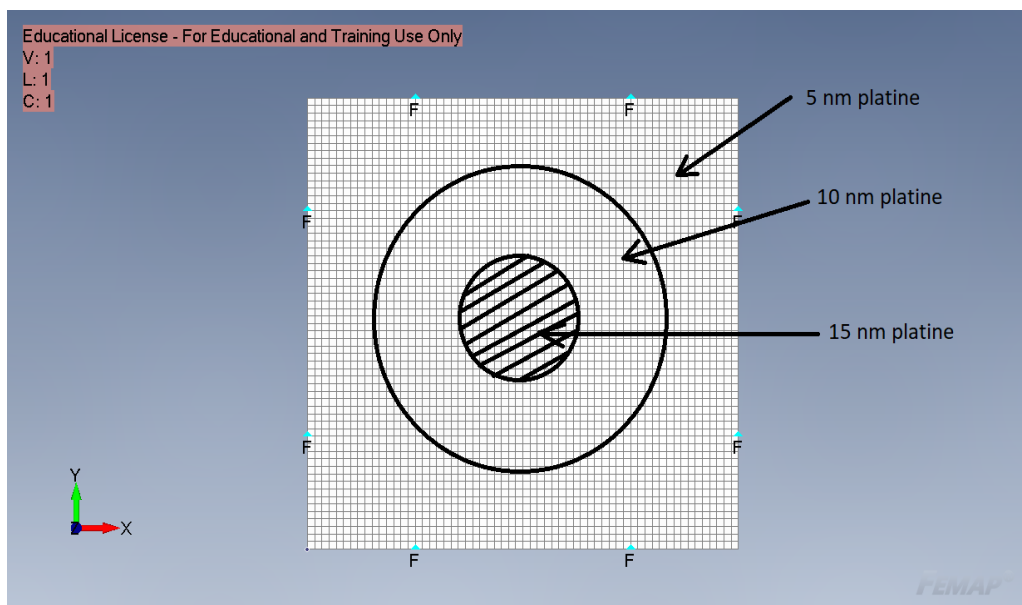
Tablica 5.27: Senzor sile sa slojem platine 10 nm.

(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 nanoseni 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 - Laminata.



Slika 5.39: Nesimetrična raspodjela platine na senzoru sile.

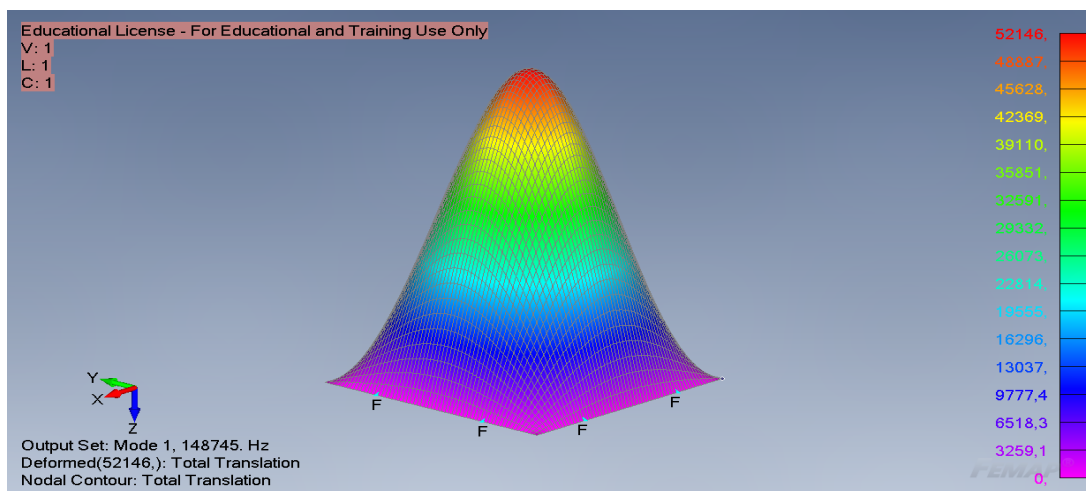
Modalnom analizom određene su vlastite frekvencije prednapregnutog senzora sile s nesimetričnom raspodjelom platine koje su prikazane u tablici 5.28.

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

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

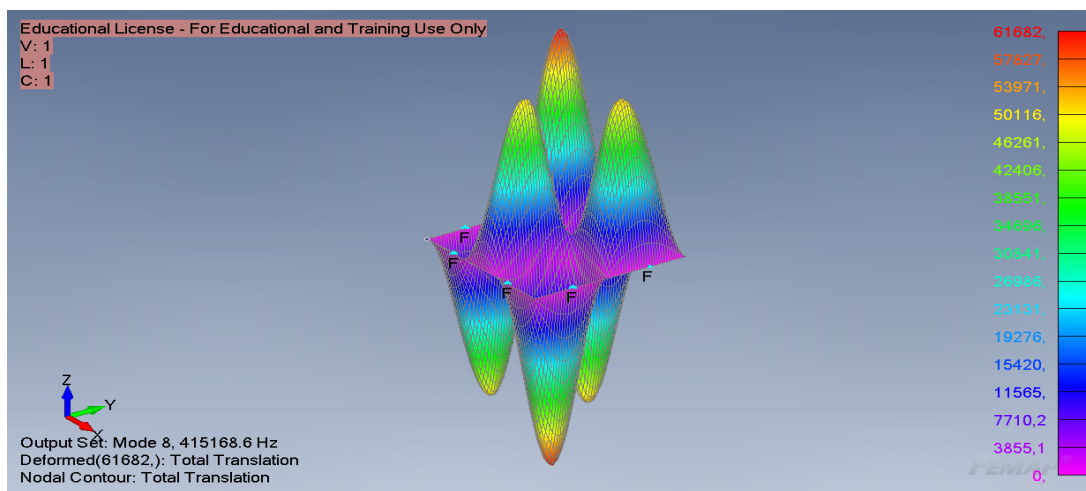
Usporedbom vlastitih frekvencija iz tablice 5.28 i vlastitih frekvencija iz tablica 5.21 i 5.22 možemo primijetiti da kod prednapregnutog senzora sile s nesimetričnom raspodjelom platine pojedini modovi titranja imaju višu, a pojedini nižu frekvenciju u odnosu na prednapregnuti senzor s jednolikim slojem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

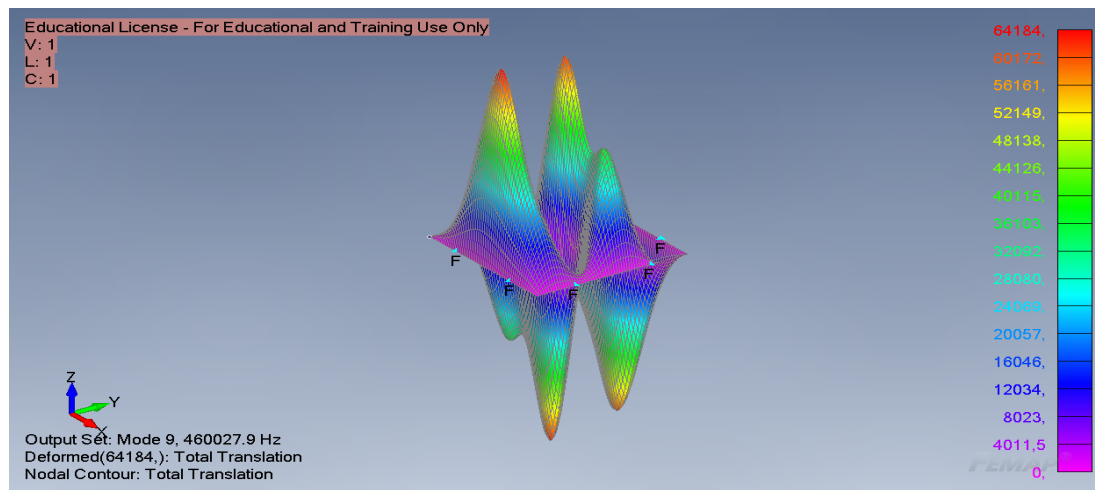


Slika 5.40: *Mod titranja ω_{11} prednapregnutog senzora s nesimetričnom raspodjelom platine.*

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 $2 \times 2 \text{ mm}^2$ 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 približno su jednake prilikom prednaprezanja od 1 GPa što je i deklarirano od strane proizvođača. Kod membrane sa slojem platine od 5 nm, 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 dobivene metodom konačnih elemenata jednake su prilikom prednaprezanja od 0,191 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-is-modal-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	<i>Membrana $2 \times 2 \text{ mm}^2$ debljine 50 nm zalijepljena na držač.</i>	2
2.2	<i>Poprečni presjek okvira membrane gdje se mogu vidjeti slojevi silicijevog nitrida i platine.</i>	2
2.3	<i>Sustav za mjerenje sile.</i>	3
2.4	<i>Michelsonov interferometar s membranom.</i>	3
3.1	<i>Pravokutna membrana.</i>	4
3.2	<i>Modovi titranja kvadratne membrane.</i>	7
4.1	<i>Naredbe za izradu geometrije senzora sile.</i>	8
4.2	<i>Geometrija senzora sile.</i>	9
4.3	<i>Definiranje materijala.</i>	10
4.4	<i>Značajke ploče.</i>	10
4.5	<i>Kreiranje sloja platine.</i>	11
4.6	<i>Membrana sa slojem platine.</i>	11
4.7	<i>Omreženi model.</i>	12
4.8	<i>Uklještenje po rubu omreženog modela.</i>	12
4.9	<i>Kreiranje opterećenja.</i>	13
4.10	<i>Statička analiza membrane.</i>	14
4.11	<i>Naredba za promjenu opterećenja (temperature).</i>	14
4.12	<i>Modalna analiza membrane.</i>	15
4.13	<i>Odabir rubnih uvjeta te opterećenja za modalnu analizu.</i>	15
5.1	<i>Mod titranja ω_{11} senzora koji nije prednapregnut i bez platine.</i>	16
5.2	<i>Mod titranja ω_{12+21} senzora koji nije prednapregnut i bez platine.</i>	17
5.3	<i>Mod titranja ω_{12-21} senzora koji nije prednapregnut i bez platine.</i>	17
5.4	<i>Mod titranja ω_{22} senzora koji nije prednapregnut i bez platine.</i>	17

5.5	<i>Mod titranja ω_{13+31} senzora koji nije prednapregnut i bez platine.</i>	18
5.6	<i>Mod titranja ω_{13+31} senzora koji nije prednapregnut i bez platine.</i>	18
5.7	<i>Mod titranja ω_{23-32} senzora koji nije prednapregnut i bez platine.</i>	18
5.8	<i>Mod titranja ω_{23+32} senzora koji nije prednapregnut i bez platine.</i>	19
5.9	<i>Mod titranja ω_{14+41} senzora koji nije prednapregnut i bez platine.</i>	19
5.10	<i>Mod titranja ω_{14+41} senzora koji nije prednapregnut i bez platine.</i>	19
5.11	<i>Mod titranja ω_{11} senzora koji nije prednapregnut sa slojem platine 10nm.</i>	20
5.12	<i>Mod titranja ω_{12+21} senzora koji nije prednapregnut sa slojem platine 10nm.</i>	20
5.13	<i>Mod titranja ω_{12-21} senzora koji nije prednapregnut sa slojem platine 10nm.</i>	21
5.14	<i>Mod titranja ω_{22} senzora koji nije prednapregnut sa slojem platine 10nm.</i>	21
5.15	<i>Mod titranja ω_{13+31} senzora koji nije prednapregnut sa slojem platine 10nm.</i>	21
5.16	<i>Mod titranja ω_{23+32} senzora koji nije prednapregnut sa slojem platine 10nm.</i>	22
5.17	<i>Mod titranja ω_{23-32} senzora koji nije prednapregnut sa slojem platine 10nm.</i>	22
5.18	<i>Mod titranja ω_{14+41} senzora koji nije prednapregnut sa slojem platine 10nm.</i>	22
5.19	<i>Mod titranja ω_{11} prednapregnutog senzora bez platine.</i>	24
5.20	<i>Mod titranja ω_{12+21} prednapregnutog senzora bez platine.</i>	24
5.21	<i>Mod titranja ω_{12-21} prednapregnutog senzora bez platine.</i>	24
5.22	<i>Mod titranja ω_{22} prednapregnutog senzora bez platine.</i>	25
5.23	<i>Mod titranja ω_{13+31} prednapregnutog senzora bez platine.</i>	25
5.24	<i>Mod titranja ω_{23+32} prednapregnutog senzora bez platine.</i>	25
5.25	<i>Mod titranja ω_{14+41} prednapregnutog senzora bez platine.</i>	26
5.26	<i>Mod titranja ω_{11} prednapregnutog senzora sa slojem platine 10 nm.</i>	26
5.27	<i>Mod titranja ω_{12+21} prednapregnutog senzora sa slojem platine 10 nm.</i>	27
5.28	<i>Mod titranja ω_{12-21} prednapregnutog senzora sa slojem platine 10 nm.</i>	27
5.29	<i>Mod titranja ω_{22} prednapregnutog senzora sa slojem platine 10 nm.</i>	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	<i>Mehanička svojstva silicijevog nitrida.[6]</i>	9
4.2	<i>Mehanička svojstva platine.[7]</i>	9
5.1	<i>Vlastite frekvencije senzora koji nije prednapregnut dobivene pomoću softvera FEMAP.</i>	16
5.2	<i>Vlastite frekvencije senzora koji nije prednapregnut, ali ima sloj platine 10 nm dobivene pomoću softvera FEMAP.</i>	20
5.3	<i>Vlastite frekvencije prednapregnutog senzora dobivene pomoću softvera FEMAP.</i>	23
5.4	<i>Vlastite frekvencije prednapregnutog senzora sa slojem platine 10 nm dobivene pomoću softvera FEMAP.</i>	26
5.5	<i>Vlastite frekvencije senzora bez dodatnog sloja platine prilikom naprezanja od 0 GPa.</i>	31
5.6	<i>Vlastite frekvencije senzora sa slojem platine od 5 nm prilikom naprezanja od 0 GPa.</i>	31
5.7	<i>Vlastite frekvencije senzora sa slojem platine od 10 nm prilikom naprezanja od 0 GPa.</i>	31
5.8	<i>Vlastite frekvencije senzora bez dodatnog sloja platine prilikom naprezanja od 0,2 GPa.</i>	32
5.9	<i>Vlastite frekvencije senzora sa slojem platine od 5 nm prilikom naprezanja od 0,2 GPa.</i>	32
5.10	<i>Vlastite frekvencije senzora sa slojem platine od 10 nm prilikom naprezanja od 0,2 GPa.</i>	32
5.11	<i>Vlastite frekvencije senzora bez dodatnog sloja platine prilikom naprezanja od 0,4 GPa.</i>	33
5.12	<i>Vlastite frekvencije senzora sa slojem platine od 5 nm prilikom naprezanja od 0,4 GPa.</i>	33
5.13	<i>Vlastite frekvencije senzora sa slojem platine od 10 nm prilikom naprezanja od 0,4 GPa.</i>	33
5.14	<i>Vlastite frekvencije senzora bez dodatnog sloja platine prilikom naprezanja od 0,6 GPa.</i>	34
5.15	<i>Vlastite frekvencije senzora sa slojem platine od 5 nm prilikom naprezanja od 0,6 GPa.</i>	34
5.16	<i>Vlastite frekvencije senzora sa slojem platine od 10 nm prilikom naprezanja od 0,6 GPa.</i>	34
5.17	<i>Vlastite frekvencije senzora bez dodatnog sloja platine prilikom naprezanja od 0,8 GPa.</i>	35
5.18	<i>Vlastite frekvencije senzora sa slojem platine od 5 nm prilikom naprezanja od 0,8 GPa.</i>	35
5.19	<i>Vlastite frekvencije senzora sa slojem platine od 10 nm prilikom naprezanja od 0,8 GPa.</i>	35
5.20	<i>Vlastite frekvencije senzora bez dodatnog sloja platine prilikom naprezanja od 1 GPa.</i>	36
5.21	<i>Vlastite frekvencije senzora sa slojem platine od 5 nm prilikom naprezanja od 1 GPa.</i>	36

5.22	<i>Vlastite frekvencije senzora sa slojem platine od 10 nm prilikom naprezanja od 1 GPa.</i>	36
5.23	<i>Vlastite frekvencije senzora bez dodatnog sloja platine prilikom naprezanja od 1,2 GPa.</i>	37
5.24	<i>Vlastite frekvencije senzora sa slojem platine od 5 nm prilikom naprezanja od 1,2 GPa.</i>	37
5.25	<i>Vlastite frekvencije senzora sa slojem platine od 10 nm prilikom naprezanja od 1,2 GPa.</i>	37
5.26	<i>Senzor sile sa slojem platine 5 nm.</i>	39
5.27	<i>Senzor sile sa slojem platine 10 nm.</i>	39
5.28	<i>Vlastite frekvencije prednapregnutog senzora sile s nesimetričnom raspodjelom platine.</i>	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 $2 \times 2 \text{ mm}^2$ 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 $2 \times 2 \text{ mm}^2$ 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