

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Радіотехнічний факультет

Кафедра радіоконструювання та виробництва радіоапаратури

«На правах рукопису»
УДК 621.317.7.087.6

До захисту допущено:

В.о. зав. кафедри

Е.М. Євгеній НЕЛІН

«18» грудня 2020р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою «Інтелектуальні технології
мікросистемної радіоелектронної техніки»

за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

на тему: «Моделювання тензорезисторів в середовищі
Comsol Multiphysics»

Виконав :

студент 2 курсу, групи РІ-91мп
Савченко Ігор Олександрович

Керівник:

К.т.н., доцент Адаменко Юлія Федорівна

Рецензент:

К.т.н., старший викл. Вишневий Сергій
Валерійович

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент (-ка)

Київ – 2020 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Радіотехнічний факультет

Кафедра радіоконструювання та виробництва радіоапаратури

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о.завідувача кафедри



Євгеній ПЕЛИШ

«02» вересня 2020 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студента
Савченка Ігоря Олександровича

1. Тема дисертації «Моделювання тензорезисторів в середовищі Comsol Multyphysics»

науковий керівник дисертації Адаменко Юлія Федорівна, к.т.н., доцент
затверджені наказом по університету від «5» листопада 2020 р. №3223-с

2. Термін подання студентом дисертації грудня 2020 року

3. Об'єкт дослідження: тензорезистивний чутливий елемент.

4. Вихідні дані: Гончарук А. В. Сенсор моніторингу артеріального тиску та пристрій на його основі : магістерської дис. : 172 / Гончарук Анастасія Вікторівна – Київ, 2018. – 83 с.

Конструкції від фірми «ВЕДА»

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: визначитися з основними конструкціями та характеристиками тензорезисторів; розібратися з особливостями моделювання тензорезисторів в середовищі Comsol Mutlyphysics; створити модель тензорезистора для її подальшого використання.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу презентація, 15 слайдів

7. Орієнтовний перелік публікацій _____

9. Дата видачі завдання 02 вересня 2020 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Підбір джерел інформації	02.09.2020-17.09.2020	виконано
2	Аналітичний огляд джерел	20.09.2020-29.09.2020	виконано
3	Дослідження конструкцій та характеристик тензорезистора	30.09.2020-12.10.2020	виконано
4	Вибір датчика для моделювання	13.10.2020-31.10.2020	виконано
5	Комп'ютерне моделювання тензорезистора	01.11.2020-04.12.2020	виконано
6	Оформлення магістерської дисертації	05.12.2020-16.12.2020	виконано

Студент


Ігор САВЧЕНКО

Науковий керівник


Юлія АДАМЕНКО

Савченко І.О.

2020

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація присвячена моделюванню тензорезисторів обсягом 68 сторінок, включає 4 розділи, 42 ілюстрації, 5 таблиць та 25 бібліографічних найменувань за переліком джерел посилань.

Ключові слова: тензорезистор, тиск, давач, сенсор, чутливий елемент.

Актуальність мети дослідження. Важливо слідкувати за станом свого здоров'я. Сучасні фітнес-браслети дозволяють контролювати кількість пройдених кроків, спалених калорій та зміну пульсу, але на даний момент немає можливості моніторити стан артеріального тиску. На кафедрі проводяться дослідження по створенню фітнес-браслету з давачем нового покоління, що дозволить вимірювати артеріальний тиск. В ході наукових досліджень виникла необхідність створення комп'ютерних 3D моделей давача та його складових частин. Як раз цій проблемі присвячена дана магістерська дисертація.

Мета та завдання. Моделювання та дослідження характеристик тензорезисторів як частини комплексного давача для вимірювання артеріального тиску в фітнес-браслеті.

Для досягнення поставленої мети, необхідно: визначитися з основними конструкціями та характеристиками тензорезисторів; розібратися з особливостями моделювання тензорезисторів в середовищі Comsol Mutlyphysics і для цього змоделювати найпростіший тензорезистор; подальше моделювання реального тензорезистора; надання рекомендацій для використання створених моделей у подальших наукових дослідженнях.

Об'єкт та предмет дослідження. Об'єктом дослідження є тензорезистивний чутливий елемент.

Предметом дослідження виступають конструкції, параметри та характеристики тензорезистора.

Методи дослідження. Комп'ютерне моделювання тензорезистивного чутливого елемента в середовищі Comsol Mutlyphysics.

Практичне значення одержаних результатів: На базі отриманих комп'ютерних моделей будуть проводитися подальші дослідження при опрацюванні конструкції та симуляції роботи як чутливих елементів, так і усього давача вимірювання артеріального тиску. Цю розробку можна буде впровадити у фітнес-браслетах для вимірювання артеріального тиску.

Савченко І.О. РІ-91МП, 2020

ABSTRACT

The master's dissertation is devoted to the modeling of strain gages with a volume of 68 pages, includes 4 sections, 42 illustrations, 5 tables and 25 bibliographic titles for a list of reference sources.

Keywords: strain gage, pressure, sensor, sensor, sensitive element.

The relevance of the purpose of the study. It is important to monitor your health. Modern fitness bracelets allow you to monitor the number of steps taken, calories burned and heart rate change, but at the moment it is not possible to monitor the state of blood pressure. The department is conducting research to create a fitness bracelet with a new generation sensor, which will measure blood pressure. In the course of scientific research, it became necessary to create computer 3D models of the sensor and its components. This master's dissertation is devoted to this problem.

Purpose and objectives. Modeling and research of strain gauge characteristics as a part of a complex sensor for measuring blood pressure in a fitness bracelet.

To achieve this goal, it is necessary to: determine the basic designs and characteristics of strain gages; to understand features of modeling of strain gages in the environment of Comsol Mutlyphysics and for this purpose to model the simplest model of a strain gage; further modeling of real strain gages providing recommendations for the use of the created models in further research.

Object and subject of research. The object of study is a strain-sensitive element. The subject of the study are the designs, parameters and characteristics of the strain gauge.

Research methods. Computer simulation of a strain-sensitive sensing element in the Comsol Mutlyphysics environment.

Practical significance of the obtained results: On the basis of the obtained computer models, further research will be carried out in the development of the design and simulation of both sensitive elements and the whole blood pressure sensor. This development can be implemented in fitness bracelets to measure blood pressure.

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до магістерської дисертації**

на тему: Моделювання тензорезисторів в середовищі
Comsol Multyphysics

ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	4
Вступ.....	5
1 Властивості та конструктивні особливості тензорезисторів.....	7
1.1 Тензорезистор.....	7
1.1.1 Тензочутливі матеріали.....	7
1.1.2 Конструктивні особливості тензорезисторів.....	11
1.2 Особливості конструкцій тензодатчиків.....	12
1.3 Основні параметри тензорезисторів.....	15
1.4 Методи перетворення тиску.....	16
1.5 Методи отримання тензорезисторів.....	25
1.6 Вибір тензорезисторів.....	27
2 Математична модель тензорезистивного сенсора.....	31
2.1 Математична модель тензорезисторів.....	31
2.2 Мостова схема ввімкнення тензорезисторів.....	33
3 Середовище моделювання тензорезисторів.....	36
3.1 Аналіз та порівняння існуючих пакетів моделювання.....	36
3.2 COMSOL як програмне середовище для моделювання.....	39
4 Моделювання тензорезисторів.....	43
4.1 Побудова моделі давача.....	43
4.1.1 Моделювання фрагменту чутливого елемента.....	47
4.1.2 Моделювання спрощеного тензорезистора.....	51
4.2 Програмне покращення характеристик комп'ютера для збільшення об'ємів розрахунків.....	56
4.2.1 Оперативна пам'ять.....	56

	3
4.2.2 Зміна розміру файлу підкачки	57
4.2.3 Зміна таймінгу в налаштуваннях BIOS	58
4.2.4 Збільшення оперативної пам'яті за допомогою флешки	58
Висновки	61
Перелік джерел посилань	62
Додаток А 3D візуалізація зміщення чутливого елемента	65
Додаток Б Механічні напруження чутливого елемента	66
Додаток В Механічні напруження мембрани	67
Додаток Г 3D візуалізація зміщення мембрани	68

Савченко І.О. РІ-91МП, 2020

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

GF — чутливість тензорезистора;

К — сплав карма;

ПТ — інтегральний перетворювач тиску;

ОП — оперативна пам'ять;

ТКО — температурний коефіцієнт опору;

ТР — тензорезистор;

ЧЕ — чутливий елемент.

Савченко І.О. РІ-91МП, 2020

ВСТУП

З недавніх пір набирає популярності носіння смарт-годинників, які у своєму функціоналі далеко відійшли від звичайного годинника, котрий лише показував час. Для людини 21 століття звичайний годинник у більшості випадків уже виконує функцію аксесуару, а час люди спостерігають на новітніх гаджетах, тому велика кількість розробників зайнялась удосконаленням звичного нам годинника до рівня сучасних смартфонів не змінюючи кардинально початковий вигляд годинника.

Більшість смарт-годинників наділені функціями, котрі не поступаються смартфонам, попри це дані гаджети почали наділяти новими функціями, не властиві ні сучасним смартфонам, а тим паче звичайним годинникам — вимірювання параметрів людської життєдіяльності, а саме серцебиття, рівень кисню в крові й тепер уже вимірювання артеріального тиску.

Вимірювання кров'яного тиску належить до найбільш широко застосовуваним додаткових методів обстеження хворого, тому що, по-перше, виявлення змін кров'яного тиску має важливе значення в діагностиці багатьох хвороб серцево-судинної системи та різних патологічних станів; по-друге, різко виражене підвищення або зниження кров'яного тиску саме по собі може бути причиною важких розладів кровообігу, що загрожує життю хворого.

Робота є продовженням магістерської роботи Гончарук А. на тему «Сенсор моніторингу артеріального тиску та пристрій на його основі» [1].

У даній роботі планується проведення теоретичних розрахунків та моделювання тензорезистора. Теоретичні дослідження включатимуть розгляд тензорезистивного ефекту в матеріалах, аналіз основних конструкцій гнучких плівкових резисторів (тензодатчиків), розгляд основних методів отримання та основних характеристик гнучких тензорезисторів. Моделювання включає саме 3D-моделювання тензорезистораа у середовищі Comsol та дослідження залежності опору від деформації.

Магістерська дисертація виконується в рамках наукової ініціативної роботи 0120U100505 «Комбінований давач моніторингу артеріального тиску. П'єзорезистивний сенсор», дата реєстрації 11.02.2020.

Зроблені висновки по проведеним дослідженням та надано рекомендації щодо застосування гнучких тензорезисторів. Результати моделювання надалі будуть використовуватися в наукових розробках тензорезистивного сенсора для портативного пристрою моніторингу артеріального тиску.

Савченко І.О. РІ-91МП, 2020

1 ВЛАСТИВОСТІ ТА КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ ТЕНЗОРЕЗИСТОРІВ

1.1 Тензорезистор

Тензорезистор (ТР) — резистор, електричний опір якого змінюється залежно від його деформації. Принцип роботи ТР датчика, ґрунтується на законі, який у 1856 році, відкрив лорд Кельвін. В основі принципу роботи ТР лежить явище п'єзорезистивного ефекту. За допомогою ТР можна вимірювати деформації механічних елементів. ТР є основною складовою частиною тензодатчиків, що застосовуються для непрямого вимірювання сили, тиску, ваги, механічних напружень тощо.

Чутливий елемент (ЧЕ) — металевий чи напівпровідниковий, електричний опір якого змінюється пропорційно до механічного напруження на поверхні об'єкта дослідження.

Цей елемент виконується у вигляді меандра зазвичай із константанового або іншого сплаву й розташовується на підкладці з поліаміду або іншого матеріалу. Ззовні меандр покривається захисною плівкою. Для кріплення до поверхні об'єкта вимірювання переважно застосовується клей, а при високих температурах — точкове зварювання підкладки[2].

1.1.1 Тензочутливі матеріали

Розглянемо особливості ТР з різних матеріалів.

Метали. Їх коефіцієнт тензочутливості (GF) досягає значень від 2 до 6. Матеріали з різним коефіцієнтом тензочутливості відрізняються лінійно градуйованою характеристикою в широкому діапазоні деформацій. Крім того, їх коефіцієнт тензочутливості в першому наближенні не залежить від особливостей попередньої обробки, і тому від наслідків можливих відхилень у технологічному процесі. Матеріали з коефіцієнтом $GF = 2,0$ мають через те, що як ця величина не залежить від стану деформації матеріалу. До таких матеріалів належать константан, манганін, ніхром і карма.

Вони перераховані тут у порядку зростання температурного коефіцієнта питомого опору. З цієї причини для високоточних вимірювань у більшості випадків використовується константан, який є в продажу у вигляді матеріалу з особливими властивостями спеціально для тензометрії [3]. Застосування ніхрома рекомендується, особливо для діапазону підвищених робочих температур, в той час, як матеріал карма застосовується переважно для чутливих елементів у вигляді натягнутого дроту, що обумовлено високою допустимою напругою цього матеріалу.

Якщо ТР виготовляються шляхом напиленням у вигляді тонких полікристалічних плівок, їх властивості змінюються: коефіцієнт тензочутливості значно зменшується, тимчасова стабільність знижується. Переваги цього методу є відсутність в'язкого шару (клейового шару), що призводить до ослаблення напруги, а також можливість виробляти велику кількість ТР на пружному елементі в одному процесі з високим ступенем ідентичності. Тому технологія тонкоплівкових ТР може мати велике значення [4].

Константан. Це сплав міді з нікелем (40%), марганцем (1,5%) і домішками деяких інших елементів. Нині в усіх ТР використовується сплав константан як найстаріший і найбільш широко використовуваний. Це пояснює той факт, що в константані найкраще поєднуються властивості необхідні для багатьох досліджень деформації. У цьому сплаві, наприклад, високий коефіцієнт чутливості до напруги. Його питомий опір досить високий, що дає змогу забезпечувати відповідне значення опору, навіть у разі дуже малих тензометричних решіток, а його температурний коефіцієнт опору (ТКО) малий. Крім того, константан характеризується хорошою довговічністю і здатний досить сильно розтягуватися. Слід відзначити, що для константану характерний постійний дрейф при температурах вище плюс 65°C, який повинен бути взятий до уваги в тих випадках, коли важливо забезпечити стабільність нуля ТР протягом декількох годин або днів.

Дуже важливо, щоб константан мав власну температурну компенсацію з широким діапазоном коефіцієнтів розширення матеріалів, з яких можуть бути виготовлені чутливі конструкції.

У разі необхідності вимірювання значних напружень — 5% і вище, у якості матеріалу решітки використовують відпалений константан (сплав *P*). Константан у такій формі дуже пластичний. У ТР довжиною 3 мм і більше рівень його напруги може перевищувати 20%. Це призводить до відповідного зсуву нуля ТР. З цієї причини, а також через тенденцію меандра до передчасного виходу з ладу при повторюваних подібних напруженнях, сплав *P* не рекомендується для застосувань з циклічним навантаженням.

Сплав карма. Широко використовується модифікований сплав карма (*K*) — є важливим членом сімейства сплавів для ТР. Цей сплав характеризується хорошою довговічністю й чудовою стабільністю. Це кращий вибір для точних статичних вимірювань протягом тривалого періоду часу при кімнатній температурі, або протягом більш коротких періодів часу при підвищеній температурі. Сплав *K* рекомендується для статичних досліджень в інтервалі температур від мінус 269 до плюс 260°C.

У разі використання в коротких проміжках часу герметизовані ТР на основі сплаву *K* можуть бути схильні до впливу температур аж до плюс 400°C. В інертній атмосфері буде покращувати стабільність і збільшувати термін служби ТР при високих температурах.

Серед інших переваг сплаву — має більш плоску форму характеристики тепловіддачі в порівнянні з багатьма іншими сплавами. Це дозволяє забезпечити точну корекцію помилок, викликаних тепловіддачею, в крайніх точках діапазону температур. Як константан, сплав *K* може бути доведений до температури з використанням матеріалів з різними коефіцієнтами теплового розширення. Сплав *K* обирають у тих випадках, коли необхідний ТР з власною термокомпенсацією, що має параметри, недосяжні ТР на основі інших сплавів, і може працювати в жорстких умовах навколишнього середовища [5, 6].

Напівпровідники. Монокристалічні напівпровідники, найбільш широко використовуються в цей час. У них ефект п'єзоопору перевищує вплив зміни форми на один-два порядки.

Нині кремній є найбільш важливим матеріалом для ТР. В залежності від питомого опору матеріалу значення коефіцієнта тензочутливості (GF) може досягати 200 Ом. Отже, датчики можуть бути виконані з великою напругою сигналу або із середньою напругою сигналу при дуже жорсткому пружному елементі. Крім того, в залежності від типу провідності (р-або n-кремній) GF має позитивний або негативний знак [7]. Отже, виходять нові ефекти, які ще не були використані для розробки більш точних датчиків.

У порівнянні з металевими ТР аналогічні напівпровідникові прилади мають один недолік — значну похибку лінійності, яка може бути скомпенсована з використанням залежності GF від деформації або подальшими перетвореннями сигналу. Крім того, потрібно вказати на велику і нелінійну залежність опору ТР і коефіцієнта тензочутливості від температури.

Таким чином, давачі сили з напівпровідниковими ТР мають більші похибки, ніж давачі з металевими ТР при однаковій вартості на виробництві. Проте в цій галузі можна очікувати поліпшення в результаті вдосконалення технології, тим більше, що є повідомлення про сильне скорочення температурних ефектів у результаті опромінення напівпровідникових ТР [7].

Напівпровідникові плівки можуть бути отримані методом напилення. Але ці полікристалічні структури мають значно нижчі значення GF , ніж монокристалічні. Значення напівпровідникових ТР, у яких використовується ефект у граничних шарах, поки що важко оцінити через те, що за своїми особливостями вони аналогічні металевим напиленим ТР, то в цій галузі проводяться подальші інтенсивні дослідження.

1.1.2 Конструктивні особливості тензорезисторів

Розглянемо конструкції ТР.

Дротові ТР. Перші конструкції дротяних тензометрів опору являли собою дротяну нитку, натягнуту на опорній рамці, яка кріпилася на досліджуваному. Ці датчики витримували багаторазове використання, проте були великими й громіздкими, мали обмежені динамічні характеристики та спричиняли труднощі при монтажі. Метрологічні характеристики визначають непрямым шляхом. З великої партії однакових датчиків, виготовлених по одній і тій же технології, здійснюють статистичну вибірку, визначають метрологічні характеристики датчиків вибірки й поширюють їх на всю партію. Дротяний ТР масового застосування має плоску петлеподібну дротяну обмотку прямокутної форми (грати), до кінців якої припаяні або приварені товсті «ніжки» з мідного дроту. Дротяна решітка за допомогою спеціального клею закріплюється на тонкій прямокутній смужці з паперу, клейової або лакової плівки, що служить для решітки підкладкою (основою). Найкращим вважається діаметр дроту d від 0,02 мм до 0,025 мм. Зазвичай застосовують дріт діаметром від 0,02 мм до 0,05 мм. При такій товщині дроту ТР працює нормально навіть при деформаціях, що перевищують межу текучості металів. [8, 9].

Основним недоліком дротяних тензорезисторів є труднощі виготовлення складних форм решіток, а також решіток із базами менше ніж 3 мм. У тензорезисторів з петлевими ґратами при малих базах значно зростає поперечна чутливість.

Фольгові ТР. Подальшим розвитком дротяних ТР є фольгові ТР. Вони виготовляються методом фотолітографії з дуже тонкої (близько 0,0036 мм) фольги. Оскільки тонка фольга легко пошкоджується, до початку фотографічного процесу та травлення на неї наносять тонку плівку, яка служить носівною основою як в процесі виробництва, так і після наклеювання ТР.

Напівпровідникові ТР. Ці датчики є результатом побічних досліджень фірми *Bell Telephone Laboratories* в галузі напівпровідникових матеріалів і

сполук, які згодом призвели до створення транзистора. Дослідження напівпровідникових властивостей кремнію й германію, і перші розробки лабораторних датчиків створили основу для промислового виготовлення напівпровідникових тензодатчиків, які набули поширення в 1960-і роки. Основна перевага цих датчиків — високе значення коефіцієнта тензочутливості (від 20 до 200) завдяки складовій $(d\rho/\rho)/(dl/l)$.

Основними перевагами напівпровідникових тензорезисторів в порівнянні з дротяними і фольговими є: високий коефіцієнт тензочутливості; високий рівень вихідного сигналу; відсутність гістерезису; хімічна інертність; більша межа втомної міцності; низька поперечна тензочутливість; здатність зберігати механічні характеристики при високих температурах до 500°C; мінімальна похибка від включень, шумів, наявності ліній зв'язку.

З огляду на високу вартість напівпровідникових тензорезисторів, їх застосування необхідно аргументувати в кожному конкретному випадку вимірювань. Використання їх доцільно насамперед в тих випадках, коли необхідно проводити вимірювання без підсилювачів, при вимірах малих деформацій і на малих базах, для установки на мініатюрні чутливі елементи перетворювачів механічних величин.

1.2 Особливості конструкцій тензодатчиків

Пристрій найбільш поширеного типу дротяного тензодатчика, що наклеюється зображено на рисунку 1.1. Решітка ТР виконана з зигзагоподібного дроту 1 діаметром 20–50 мкм розміщеної на паперовій або плівковій основі 2. Для запобігання від розриву при деформації, дріт має петлі 4. Підключення у вимірювальну схему здійснюється за допомогою мідних провідників 3 більшого діаметра, приєднаних до кінців дроту зварюванням або паянням. Для захисту від агресивного впливу довкілля константановий дріт покривається лаком або заклеюється папером.

Датчик зазвичай встановлюється так, щоб його довга сторона була орієнтована в напрямку вимірюваної сили. Такий перетворювач, будучи

приклеєним до випробуваного зразка, сприймає деформації її поверхневого шару.

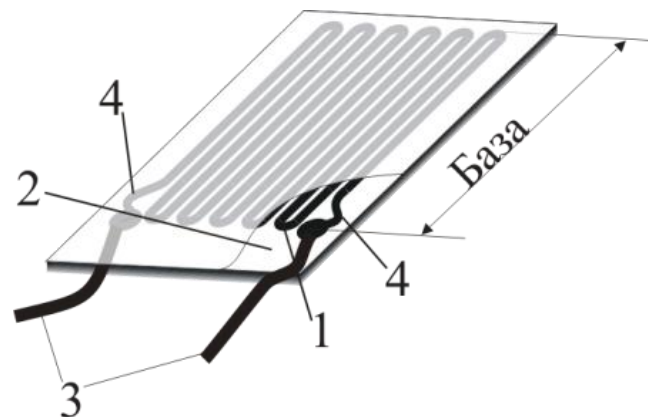


Рисунок 1.1 — Дротяний ТР

Вимірювальною базою перетворювача є довжина деталі, яку займає дріт. Більшість перетворювачів, що використовуються мають бази від 5 мм до 20 мм з опором від 30 Ом до 500 Ом.

Крім найбільш поширеного з петлевою конструкцією дротяного тензодатчика, існують і інші. При необхідності зменшуючи вимірювальну базу перетворювача (від 1 мм до 3 мм) його виготовляють особливим чином, який полягає в тому, що на оправці круглого перетину на трубку із тонкого паперу намотують спіраль з тензочутливого дроту. Потім трубка проклеюється, видаляється з оправлення, розплющується й до кінців дроту прикріплюються виводи.

Коли необхідно отримати від кола з тензоперетворювачем струм великої величини, часто використовують "потужні" дрові тензоперетворювачі. Вони складаються з великої кількості від 30 до 50 паралельно з'єднаних дротів, відрізняються великими габаритами (довжина бази від 150 мм до 200 мм) і дають змогу значно збільшити струм пропускання через перетворювач.

Дротяні датчики мають малу поверхню зв'язку з основою, яка зменшує струм витоку при високих температурах і дає більшу напругу ізоляції між чутливим елементом і основою.

Фольгові тензодатчики є найбільш популярною версією тензодатчиків, що клеяться. Фольгові перетворювачі являють собою стрічку з фольги

товщиною від 4 мкм до 12 мкм, на якій частина металу оброблена травленням отже, щоб частина, яка лишилась утворила показану на рисунку 1.2 ґратку з виводами.

При виготовленні таких ґрат можна забезпечити будь-який малюнок решітки, що є суттєвою перевагою фольгових тензоперетворювачів.

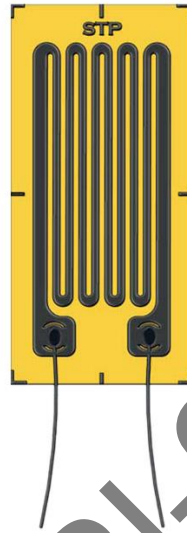


Рисунок 1.2 — Фольговий ТР

Ще однією перевагою перетворювачів із фольги є можливість збільшувати переріз виводів перетворювача; припаювання виводів можна в цьому випадку здійснити значно надійніше, ніж у перетворювачах із дроту.

Також фольгові тензодатчики в порівнянні з дротяними мають велику площу поверхні, до чутливого елемента площі поперечного перерізу й більш стабільні при мінімальних температурах і тривалих навантаженнях. Велика площа поверхні й малий поперечний переріз також забезпечує хороший температурний контакт чутливого елемента зі зразком, який зменшує саморозігрів датчика.

Для виготовлення фольгових тензоперетворювачів використовуються ті ж метали, що і для дротяних датчиків (константан, ніхром, сплав нікелю з залізом тощо), а також застосовуються ще й інші матеріали, наприклад, титаноалюмінієвий сплав 48Т-2, що забезпечує вимір деформацій до 12 %.

Плівкові тензодатчики

Існує ще один спосіб масового виробництва ТР, що кляється, він полягає у вакуумній сублимації тензочутливості матеріалу й подальшої конденсації його на підкладку, що напилюється безпосередньо на деталь. Такі тензоперетворювачі дістали назву плівкових. Мала товщина тензоперетворювача (від 15 мкм до 30 мкм) дає значну перевагу при вимірах деформацій у динамічному режимі, при високих температурах, де вимірювання деформації є спеціалізованою галуззю досліджень [7, 10].

Ряд плівкових тензоперетворювачів на основі вісмуту, титану, кремнію або германію виконується у вигляді однієї провідної смужки (рисунок 1.3). Такі перетворювачі не мають недоліків як зниження відносної чутливості перетворювача в порівнянні з чутливістю матеріалу, з якого виконаний перетворювач.



Рисунок 1.3 — ТР плівковий

Тензометричний коефіцієнт перетворювача, що виконаний на основі металевої плівки варіює від 2 до 4, а його опір змінюється в діапазоні від 100 Ом до 1000 Ом. У перетворювачів, виконаних на основі напівпровідникової плівки, коефіцієнт має значення від 50 до 200, отже вони більш чутливі до прикладеної напруги. При цьому нема потреби використовувати підсилювальні схеми, оскільки вихідна напруга напівпровідникового тензометричного моста складатиме ~ 1 В [10].

1.3 Основні параметри тензорезисторів

Розглянемо основні характеристики ТР.

Номинальний початковий опір — промислові ТР із номінальним опором у діапазоні від 30 Ом до 3000 Ом. Відхилення від номінальних значень опору в партії зазвичай не перевищує 10%. [11, 12].

Чутливість ТР — відношення зміни вихідного сигналу ТР до зміни деформації.

$$GF = \frac{(\Delta\rho/\rho)}{(\Delta l/l)}$$

де ρ — питомий опір, Ом·м; l — довжина провідника, м;

Температурна похибка — температурна похибка тензорезисторів має дві основні складові:

- визначається температурним коефіцієнтом опору;
- визначається різницею температурних коефіцієнтів лінійного розширення тензорезистора й матеріалу об'єкта дослідження.

Температурна характеристика тензодатчика — залежність вихідного сигналу ТР, встановленого на зразок із заданим коефіцієнтом лінійного розширення, від температури.

$$\varepsilon t = [(\alpha_g / K) + (\beta_s - \beta_g)] t$$

де α_g і β_g — ТКО матеріалу решітки та ТКО матеріалу ТР; K — чутливість; β_s — коефіцієнт температурного розширення матеріалу об'єкта вимірювання; t — відносна зміна температури.

Повзучість тензодатчика — зміна вихідного опору ТР у часі при сталому значенні вимірюваної деформації та незмінних умовах навколишнього середовища [13].

1.4 Методи перетворення тиску

Розглянемо особливості вимірювання тиску або пульсацій за допомогою ТР. На рисунку 1.4 представлена узагальнена схема перетворення фізичної величини тиск в електричний сигнал.

Датчик тиску складається з первинного перетворювача тиску, у складі якого ЧЕ і приймач тиску, схеми вторинної обробки сигналу, різних за

конструкцією корпусних деталей і пристрої виведення. Основною відмінністю одних приладів від інших є точність реєстрації тиску, яка залежить від принципу перетворення тиску в електричний сигнал: тензометричний, п'єзорезистивного, ємнісний, індуктивний, резонансний, іонізаційний [14].



Рисунок 1.4 — Блок-схема перетворювача тиску в електричний сигнал

Розглянемо кожний із цих принципів.

Тензометричний метод. Нині основна маса датчиків тиску випускаються на основі ЧЕ (рисунок 1.5), принципом яких є вимірювання деформації ТР, сформованих в епітаксіальній плівці кремнію на підкладці із сапфіра, припаяної твердим припоєм до титанової мембрани. Іноді замість кремнієвих ТР використовують металеві: мідні, нікелеві, залізні та ін.

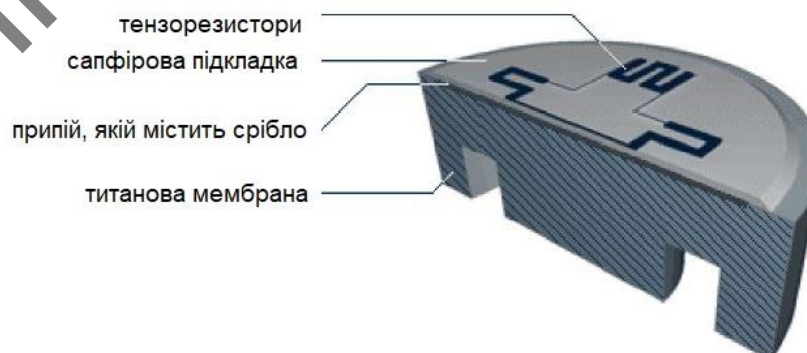


Рисунок 1.5 — Спрощений вигляд тензорезистивного чутливого елемента

Принцип дії тензоперетворювача базується на явищі тензоефекту в матеріалах. Чутливим елементом служить мембрана з ТР, з'єднаними в

мостову схему. Під дією тиску вимірюваного середовища мембрана прогинається, ТР змінюють свій опір, що призводить до розбалансу моста Уїтстона (докладніше в підрозділі 2.2). Розбаланс лінійно залежить від ступеня деформації резисторів і, отже, від прикладеного тиску.

Треба зазначити принципове обмеження перетворювача кремнію на сапфірі — фатальну тимчасову нестабільність градууювальної характеристики й суттєві гістерезисні ефекти від тиску й температури. Це обумовлено неоднорідністю конструкції й жорстким зв'язком мембрани з конструктивними елементами датчика. Тому, вибираючи перетворювач на такій основі, необхідно звернути увагу на величину основної похибки з урахуванням гістерезису і величину додаткової похибки.

До переваг можна віднести хорошу захищеність чутливого елемента від впливу будь-якого агресивного середовища, налагоджене серійне виробництво, низьку вартість.

П'єзорезистивний метод. Практично всі виробники датчиків виявляють жвавий інтерес до використання інтегральних ЧЕ на основі монокристалічного кремнію. Це зумовлено тим, що кремнієві перетворювачі мають на порядок більшу часову й температурну стабільність у порівнянні з приладами на основі структур кремній на сапфірі.

Кремнієвий інтегральний перетворювач тиску (рисунок 1.6) являє собою мембрану з монокристалічного кремнію з дифузійними п'єзорезисторами, підключеними в міст Уїтстона. ЧЕ служить кристал перетворювача тиску, встановлений на діелектричну основу з використанням легкоплавкого скла або методом анодного зрощування [14].

Основною перевагою п'єзорезистивних датчиків є висока стабільність характеристик у порівнянні з попередніми перетворювачами. Вони стійкі до впливу ударних і змінних навантажень. Якщо не відбувається механічне руйнування чутливого елемента, то після навантаження він повертається до початкового стану, що пояснюється використанням ідеально пружного матеріалу.

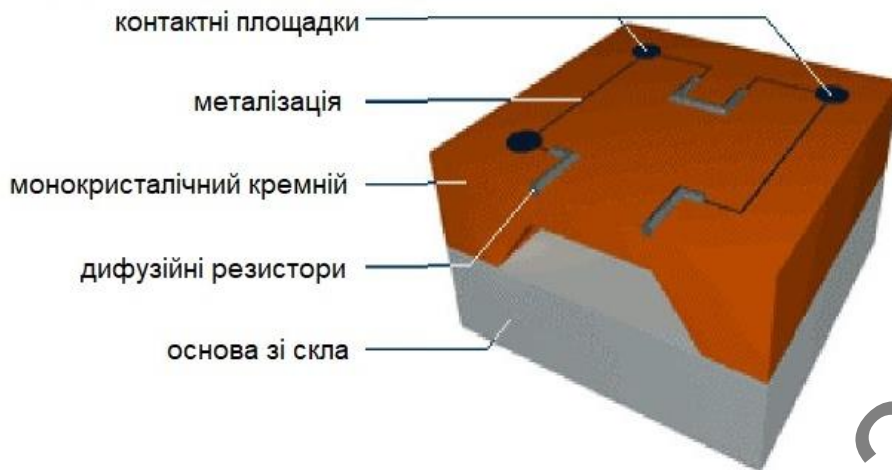


Рисунок 1.6 — Кремнієвий інтегральний перетворювач тиску

Ємнісний метод. Ємнісні перетворювачі використовують метод зміни ємності конденсатора при зміні відстані між обкладинками. Відомі керамічні або кремнієві ємнісні первинні перетворювачі тиску та перетворювачі, які виконані з використанням пружної металевої мембрани. При зміні тиску мембрана з електродом деформується і відбувається зміна ємності.

В елементі з кераміки або кремнію простір між обкладинками зазвичай заповнений маслом або іншою органічною рідиною (рисунок 1.7).

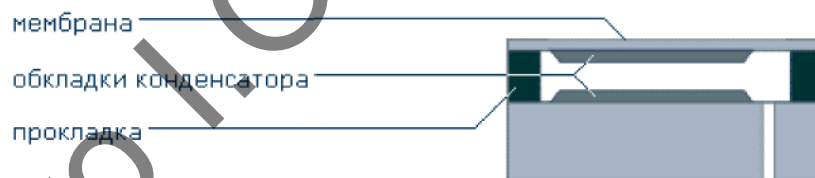


Рисунок 1.7 — Ємнісний керамічний перетворювач тиску

При використанні металевої діафрагми (рисунок 1.8) давач ділиться на дві частини, з одного боку якого розташовані електроди. Електроди з діафрагмою утворюють дві змінні ємності в плечі вимірювального моста. Коли тиск по обидва боки однаковий — міст збалансований. Зміна тиску в одній із камер призводить до деформації мембрани, що змінює ємності, розбалансовує міст. Зараз сенсори виготовляються з електродами, розташованими з одного боку від діафрагми. Газ буде контактувати тільки з камерою, виконаної з нержавіючої сталі або інконелю. Це дає змогу проводити вимірювання тиску

забруднених, агресивних, радіоактивних газів і сумішей невідомого складу. В абсолютній моделі тиск становить 10^{-7} – 10^{-8} мм рт.ст., який підтримується упродовж тривалого часу хімічним гетером.

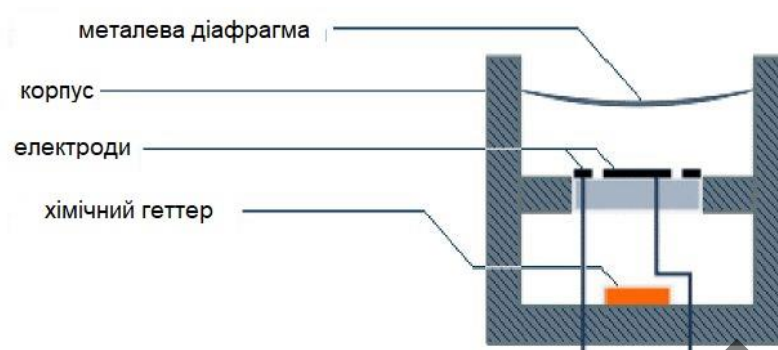


Рисунок 1.8 — Ємнісний перетворювач тиску з металевою діафрагмою

Перевагою чутливого ємнісного елемента є простота конструкції, висока точність і часова стабільність, можливість вимірювати низький тиск і слабкий вакуум.

До недоліку можна віднести нелінійну залежність ємності від прикладеного тиску.

Резонансний метод. Резонансний принцип використовується в датчиках тиску на основі вібруючого циліндра, струнних датчиках, кварцових датчиках, резонансних датчиках на кремнії. В основі методу лежать хвильові процеси: акустичні або електромагнітні. Це й пояснює високу стабільність датчиків і високі вихідні характеристики приладу [14].

Окремим прикладом може служити кварцовий резонатор (рисунок 1.9). При прогині мембрани відбувається деформація кристала кварцу, підключеного в електричну схему, і його поляризація. У результаті зміни тиску частота коливань кристала змінюється. Підібравши параметри резонансного контуру, змінюючи ємність конденсатора або індуктивність котушки, можна домогтися того, що опір кварцу падає до нуля - частоти коливань електричного сигналу й механічного коливання кристала збігаються, тобто настає резонанс.

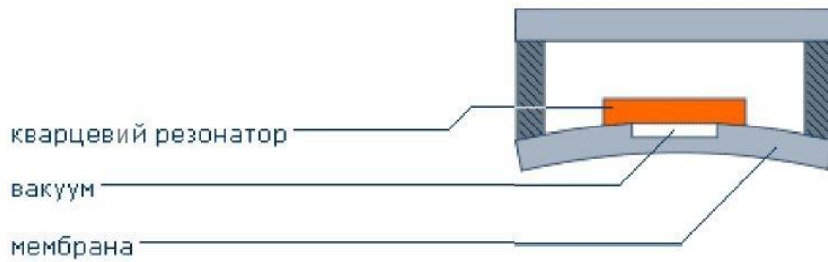


Рисунок 1.9 — Спрощений вигляд резонансного ЧЕ виконаного на кварці

Перевагою цих датчиків є точність і стабільність характеристик, яка залежить від якості використовуваного матеріалу. До недоліків можна віднести індивідуальну характеристику перетворення тиску, значний час відгуку, неможливість проводити вимірювання в агресивних середовищах без втрати точності показань приладу.

Індуктивний метод. Індукційний спосіб заснований на реєстрації вихрових струмів (струмів Фуко). Чутливий елемент складається з двох котушок, ізольованих між собою металевим екраном (рисунок 1.10).

Перетворювач вимірює зміщення мембрани за відсутності механічного контакту. У котушках генерується електричний сигнал змінного струму у такий спосіб, що заряд і розряд котушок відбувається через однакові проміжки часу. При відхиленні мембрани створюється струм у фіксованій основній котушці, що призводить до зміни індуктивності системи. Зсув характеристик основної котушки дає можливість перетворити тиск у стандартизований сигнал, за своїми параметрами прямо пропорційний прикладеному тиску.



Рисунок 1.10 — Принципова схема індукційного перетворювача тиску

Перевагою такої системи є можливість вимірювання низьких надлишкових і диференціальних тисків, досить висока точність і незначна температурна залежність. Однак датчик чутливий до магнітних впливів, що пояснюється наявністю котушок, які при проходженні змінного сигналу створюють магнітне поле.

Іонізаційний метод. В основі лежить принцип реєстрації потоку іонізованих частинок. Аналогом є лампові діоди (рисунок 1.11).

Лампа оснащена двома електродами: катодом і анодом, а також нагрівачем. У деяких лампах нагрівач відсутній, що пов'язано з використанням більш досконалих матеріалів для електродів. Корпус лампи виконаний з високоякісного скла.

Перевагою таких ламп є можливість реєструвати низький тиск аж до глибокого вакууму із високою точністю. Однак слід строго враховувати, що подібні прилади не можна експлуатувати, якщо тиск у камері близько до атмосферного. Тому подібні перетворювачі необхідно поєднувати з іншими датчиками тиску, наприклад, емнісними. Також, іонізаційні лампи повинні оснащуватися додатковими приладами, оскільки залежність сигналу від тиску є логарифмічною [14].

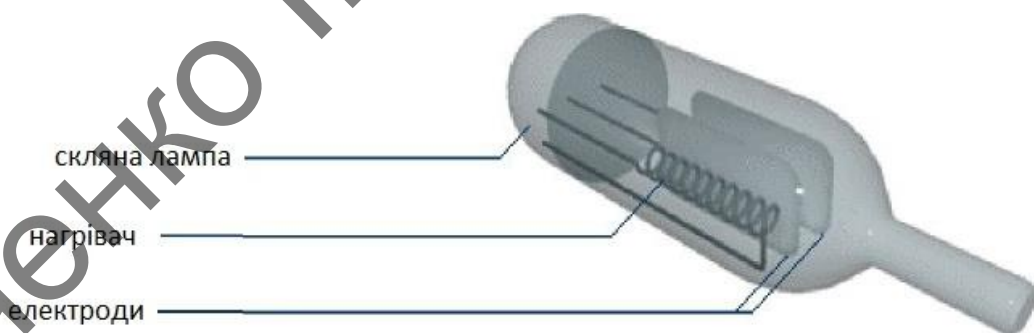


Рисунок 1.11 — Іонізаційний датчик вакууму

Подальше порівняння цих принципів вимірювання представлено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 — Порівняльна таблиця принципів вимірювання тиску

Переваги	Недоліки
Тензометричний принцип	
<p>Високий ступінь захисту від агресивного середовища.</p> <p>Висока межа робочої температури.</p> <p>Налагоджене серійне виробництво.</p> <p>Низька вартість.</p>	<p>Фатальна нестабільність градууювальної характеристики.</p> <p>Високі гістерезисні ефекти від тиску й температури.</p> <p>Низька стійкість при впливі ударних навантажень і вібрацій.</p>
П'єзорезистивний принцип	
<p>Висока стабільність характеристик.</p> <p>Стійкість до ударних навантажень і вібрацій.</p> <p>Низькі (практично відсутні) гістерезисні ефекти.</p> <p>Висока точність.</p> <p>Низька ціна.</p>	<p>Обмеження по температурі (до 150 °С)</p>
Ємнісний принцип	
<p>Висока точність.</p> <p>Висока стабільність характеристик.</p> <p>Простота конструкції.</p>	<p>Найчастіше нелінійна залежність ємності від прикладеного тиску.</p> <p>Необхідно додаткове обладнання або електрична схема для перетворення ємнісної залежності в один зі стандартних вихідних сигналів.</p>

Продовження таблиці 1.1

Переваги	Недоліки
Резонансний принцип	
<p>Висока стабільність характеристик.</p> <p>Висока точність вимірювання тиску.</p>	<p>При вимірі тиску агресивних середовищ необхідно захистити чутливий елемент, щоб зменшити до втрати точності вимірювання.</p> <p>Висока ціна.</p> <p>Тривалий час відгуку.</p> <p>Індивідуальна характеристика перетворення тиску в електричний сигнал.</p>
Індукційний принцип	
<p>Можливість вимірювати диференціальний тиск з високою точністю.</p> <p>Незначний вплив температури на точність вимірювання.</p>	<p>Сильний вплив магнітного поля.</p> <p>Чутливість до вібрацій і ударів.</p>
Іонізаційний принцип	
<p>Висока точність.</p> <p>Стабільність вихідних параметрів.</p>	<p>Не можна використовувати подібні прилади при високому тиску.</p> <p>Нелінійна залежність вихідного сигналу від прикладеного тиску.</p> <p>Крихкість.</p> <p>Необхідно поєднувати з іншими датчиками тиску.</p>

З технологічної точки зору найкраще підходить тензометричний принцип.

1.5 Методи отримання тензорезисторів

До основних методів отримання гнучких ТР належать базові технології мікроелектроніки — фотолітографія, напилення, травлення, а також складальні операції (склеювання).

Фотолітографія. У технології мікроелектронних пристроїв літографічні процеси універсальні й найбільш часто повторювані [15]. Вони використовуються для отримання контактних і прецизійних вільних масок. Літографічні процеси формують на поверхні шар стійкого, до наступних технологічних впливів матеріалу, здатного під дією опромінення певної довжини хвилі змінювати необоротно свої властивості і перш за все стійкість до проявників. Резистивний шар, локально опромінений за допомогою шаблону обробляють у проявнику, де в результаті видалення локальних ділянок отримують резистивну маску.

Фотолітографія — сукупність фотохімічних процесів, у яких можна виділити три основні етапи: формування на поверхні матеріалу шару фоторезиста; передача зображення із шаблону на цей шар; формування конфігурації елементів пристроїв за допомогою маски з фоторезисту. [16].

Нанесення фоторезисту розпиленням дозволить отримувати широкий інтервал товщини шарів, причому підкладка може мати не плоску поверхню. Фоторезист наноситься з пневматичного розпилювача. Параметри шару залежать від тиску й температури повітря, відстані від сопла до підкладки, в'язкості резисту й концентрації сухого продукту, типу розчинника. Витрата фоторезисту при розпилюванні можна зменшити приблизно в 10 разів, а дефектність шару (внаслідок відсутності напруги) від 3 до 4 разів у порівнянні з плівками, які отримуються центрифугуванням. Відсутність крайового потовщення робить метод розпилення особливо ефективним при нанесенні фотошару на прямокутні підкладки. Під час термообробки коефіцієнт дифузії розчинника у фоторезисті падає зі зменшенням концентрації залишкового розчинника. Тому поблизу підкладки плівка резисту збагачена залишковим розчинником у порівнянні з поверхнею плівки, що погіршує адгезію. Для того,

щоб мінімізувати залишкову концентрацію розчинника, рекомендується термообробка на гарячій плиті при 95°C упродовж 1 хвилини для кожного 1 мкм товщини плівки резисту. Для товстих фоторезистів, наприклад ФП-25, після термообробки не слід різко охолоджувати підкладку, щоб уникнути появи тріщин у плівці резисту [17-20].

Технологія з'єднання елементів конструкції. Технологія складання кремнієвих датчиків помітно впливає на їх характеристики, насамперед через термомеханічні напруження, що неминуче виникають при з'єднанні елементів конструкції датчиків, що мають різні температурні коефіцієнти лінійного розширення. Вибір оптимального способу з'єднання й ретельне відпрацювання технології складання мають принципове значення для створення практичних варіантів тензодатчиків.

Приклад конструкції кремнієвого тензодатчика зображено на рисунку 1.12.

Для з'єднання елементів конструкції тензодатчиків нині використовуються різні способи [17, 20]:

- 1) клейове з'єднання;
- 2) пайка за допомогою легкоплавкого скла;
- 3) пайка із застосуванням евтектичного сплаву золото-кремній;

Клейове з'єднання. Основна перевага збірки за допомогою клею полягає в низькій температурі проведення процесу (до мінус 130°C) і простоті операцій. Зазвичай для склеювання застосовують епоксидні смоли, у які додають різні наповнювачі для отримання необхідного температурного коефіцієнта лінійного розширення.

У 60-х роках у зв'язку з широким розповсюдженням ТР, що клеяться, як металевих, так і напівпровідникових були проведені великі дослідження властивостей клеїв і їх впливу на характеристики тензорезистивних мостів у датчиках тиску й сили.

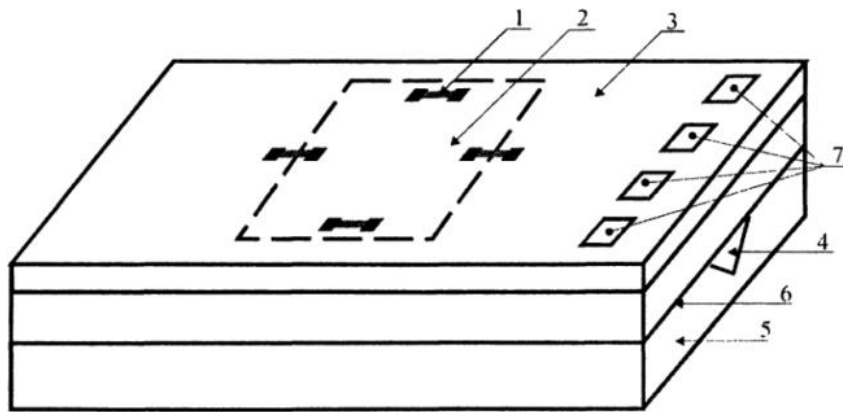


Рисунок 1.12 — Конструкція тензодатчика:

- 1 — ТР; 2 — мембрана пружного елемента; 3 — кільце жорсткості пружного елемента; 4 — канал для подачі опорного тиску; 5 — кремнієва підкладка; 6 — площину з'єднання тензоперетворювача й підкладки; 7 — контактні майданчики.

Дослідження показали, що приклеювання несприятливо впливає на характеристики датчиків, приводячи до гістерезису і зростанню температурної похибки результатів вимірювань. У результаті з'явилися кремнієві датчики, у яких з'єднання відбувається шляхом міжатомної взаємодії частин, що з'єднуються.

1.6 Вибір тензорезисторів

Процес вибору ТР полягає у визначенні конкретної комбінації параметрів, яка найбільшою мірою відповідає навколишнім і іншим умовам його експлуатації й у той же самий час найкращим чином задовольняє пропонувані монтажні і експлуатаційні обмеження.

Ці обмеження зазвичай формулюються у вигляді наступних вимог:

- точність;
- стабільність;
- діапазон температур;
- відносне подовження;
- тривалість випробувань;
- стійкість до циклічних навантажень

- легкість монтажу;
- можливість роботи в певних умовах навколишнього середовища.

Для зазначених досліджень в умовах роботи давача в контакті зі шкірою людини, найбільше всього підходять ТР зі сплаву карма у фольгованому виконанні. Однак, на цю мить можливість отримання ТР із карма, наявні тільки ТР з константану. Отже, надалі розглянемо їх.

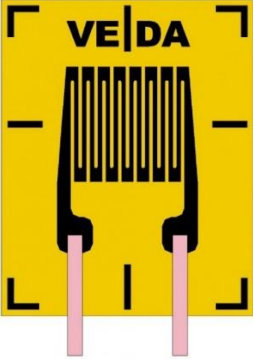
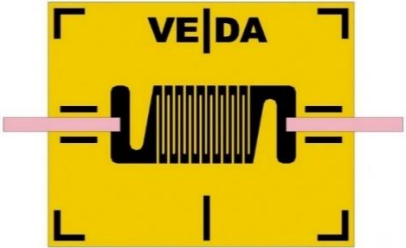
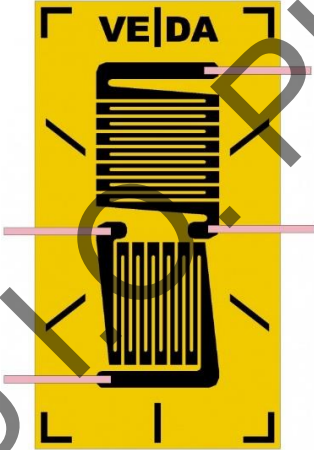
Якщо розглядати ТР із константану з гнучкою полімідною підкладкою, то для них характерні такі діапазони температури від -75°C до 175°C і працювати вони можуть до 10^6 циклів при рівні деформації $\pm 1500 \mu\epsilon$, на відміну від фольги зі сплаву К в комбінації з міцною, гнучкою полімідною підкладкою, що витримує температуру від -195°C до $+175^{\circ}\text{C}$, при деформації $\pm 1800 \mu\epsilon$ і можуть мати число циклів до 10^8 [11, 12].

Вагомим є вплив геометрії ТР на їх параметри. На опір впливають такі чинники, як розсіювання тепла, зниження чутливості через вплив дротяних виводів, відношення сигнал/шум. Термокомпенсація може змінюватися в залежності від матеріалу деталі, яка випробовується, діапазон робочих температур.

Завдячуючи компанії Veda, для початкових досліджень отримані такі конструкції ТР (таблиця 1.2).

Дані ТР призначені для вимірювання пружних деформацій розроблених нових матеріалів і конструкцій при статичних і динамічних навантаженнях, а також для вимірювання сил, прискорення, тисків, переміщення. ТР застосовуються в силовимірювальних ТР перетворювачах і датчиках в авіаційній, ракетобудівній, машинобудівній, вагобудівній і інших індустріях [21].

Таблиця 1.2 — Досліджувані зразки

Назва ТР	Рисунок	Призначення
ТР Одиничний Прямокутний П1		Прямокутні тензорезистори призначені для вимірювання величин деформацій у напрямку прикладання навантаження при одноосьовому напруженому стані.
ТР Одиничний Прямокутний П2		
ТР Розетка Р1		Розеткові тензорезистори вимірюють деформацію у двох або трьох напрямках, являють собою комбінацію з двох або трьох прямокутних ТР відповідно, змонтованих на одній підкладці.

На жаль, ці ТР мають немедичне призначення, але для початкових досліджень підходять. На них і зосередимо увагу в подальших дослідженнях.

Висновки за розділом

У цьому розділі було проаналізовано різновиди, характеристики та параметри ТР. До основних характеристик належить: номінальний опір, чутливість, температурна похибка та повзучість.

Під час аналізу методів перетворення тиску був обраний тензометричний метод, оскільки він має хорошу захищеність від впливу агресивного середовища, високу межу робочої температури та низьку вартість.

У результаті був обраний один із найбільш простих і гнучких ТР на основі фольги з константану, рівень деформації якого на рівні 1800 $\mu\epsilon$ з кількістю циклів роботи 10^8 .

Савченко І.О. РІ-91МП, 2020

2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕНЗОРЕЗИСТИВНОГО СЕНСОРА

2.1 Математична модель тензорезисторів

Принцип дії ТР ґрунтується на зміні електричного опору твердого тіла при його деформації прикладеною силою.

Опір твердого тіла довжиною L з площею поперечного перерізу S визначається формулою

$$R = \rho \frac{L}{S},$$

де ρ — питомий опір, Ом·м; l — довжина провідника, м; S — площа поперечного перерізу провідника, м².

Прикладаючи до тіла силу F , що розтягує (рисунок 2.1), відбувається деформація: збільшується довжина тіла на ΔL і зменшується площа поперечного перерізу на ΔS . У більшості тіл змінюється також питомий опір на величину $\Delta\rho$.

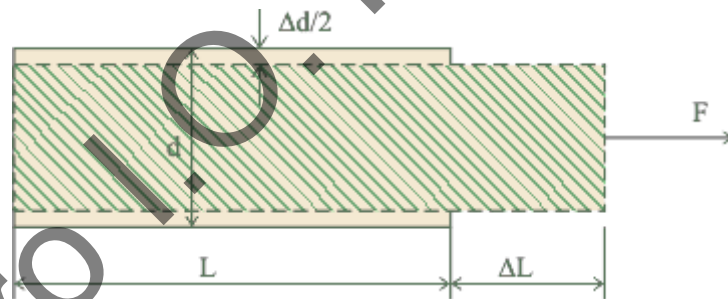


Рисунок 2.1 — Поперечний переріз ТР

У разі, коли ці збільшення малі, шляхом логарифмування й подальшого диференціювання обох частин формули для R отримаємо:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta\rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta S}{S}.$$

Оскільки площа поперечного перерізу провідника пропорційна його характерному поперечному розміру (в разі круглого перетину $S = \frac{\pi d^2}{4}$, для прямокутного перерізу площа $S = kd^2$, якщо $c = kd$), то при $\Delta d \ll d$ в обох випадках можна отримати співвідношення:

$$\frac{\Delta S}{S} = 2 \frac{\Delta d}{d}.$$

Тому

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} + 2 \frac{\Delta d}{d} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + (1 + 2\nu) \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + (1 + 2\nu) \varepsilon,$$

де $\nu = \frac{\Delta d}{d} / \frac{\Delta L}{L}$ - коефіцієнт Пуассона, для металів рівний $\nu = 0,25 \dots 0,4$;

$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$ — відносне подовження (відносна деформація) тіла.

Величина ε безрозмірна, однак, оскільки вона вимірюється тисячними і мільйонними частками, для зручності оперування числами використовують безрозмірні одиниці виміру, такі як мм/м, мкм/м, а в зарубіжній літературі найчастіше застосовується одиниця мікрострейн або мікрос, рівна 10^{-6}

У металів питомий опір змінюється слабо, тому:

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\mu) \varepsilon, \quad (2.1)$$

де $\frac{\Delta R}{R}$ — відносна зміна опору; μ — коефіцієнт Пуассона; $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$ — відносна зміна довжини.

Тобто відносна зміна опору лінійно залежить від відносної зміни довжини.

Чутливість ТР до зміни його довжини характеризується коефіцієнтом відносної тензочутливості GF (Gauge Factor):

$$GF = \frac{\Delta R}{R} / \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta R}{R} / \varepsilon \quad (2.2)$$

або, використовуючи (2.1), отримаємо

$$GF = (1 + 2\nu) \varepsilon + \frac{\Delta \rho / \rho}{\varepsilon}$$

Коефіцієнт тензочутливості для більшості металевих тензодатчиків приблизно дорівнює $GF = 2$, для платини $GF = 6,1$, для деяких спеціальних сплавів він може доходити до 10.

Для вимірювання сили за допомогою ТР використовують закон Гука, згідно з яким при пружній деформації механічне напруження пропорційно відносній деформації ε :

$$\sigma = K\varepsilon,$$

де K — модуль пружності.

Напругою σ називається фізична величина, чисельно рівна пружній силі, що припадає на одиницю площі поперечного перерізу тіла S :

$$\sigma = \frac{F}{S}.$$

Використовуючи наведені вище співвідношення, можна висловити величину сили через відносну зміну опору ТР у вигляді

$$F = S\sigma = SK\varepsilon.$$

Підставляючи замість ε його значення з (2.2), отримаємо

$$F = SK \frac{\Delta R / R}{GF}.$$

Отже, вимір сили за допомогою ТР зводиться до вимірювання його опору або напруги на виході вимірювального моста, яке залежить від опору [22].

2.2 Мостова схема ввімкнення тензорезисторів

Розглянемо особливості мостової схеми ввімкнення ТР (рисунок 2.2).

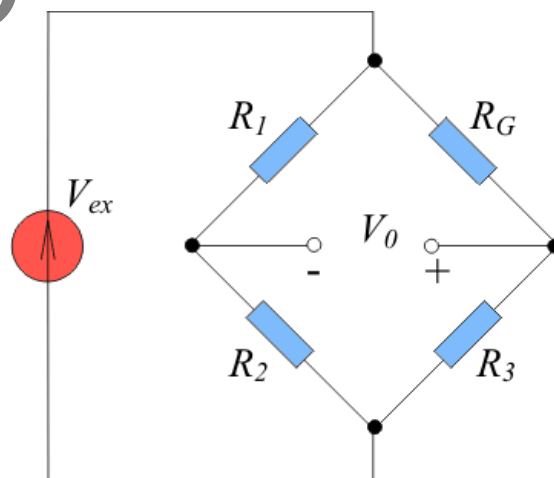


Рисунок 2.2 — Міст Уїтстона

Вимірювання за допомогою тензодатчиків вимагають реєстрації дуже малих змін опору. Наприклад, відносна зміна опору, що викликається відносним розтягуванням 0,0005 при тензорезистивному коефіцієнті рівному 2, складе 0,1 %, що для тензодатчика опором 120 Ом еквівалентно опору всього лише 0,12 Ом. Щоб вимірювати настільки малу зміну опору й компенсувати температурну похибку, тензодатчики часто використовують у мостовій схемі (рисунок 2.2), підключеної до джерела напруги або струму (джерела живлення моста).

Загальноприйнятого стандарту для живлення моста не існує. Типовими є напруги 3 В і 10 В. Струм через тензодатчик зазвичай становить від 2 мА до 30 мА для датчиків з опором від 1 кОм до 120 Ом. Напруга живлення моста має бути по можливості великою, щоб збільшити відношення сигналу до шуму, і водночас досить малою, щоб мінімізувати похибку, викликану саморозігрівом датчика.

Вихідна напруга вимірюючого моста дорівнює:

$$V_0 = \left(\frac{R_3}{R_3 + R_G} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_{BX}.$$

При умові балансу моста:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_G}{R_3}.$$

Вихідна напруга рівна $V_0 = 0$. Найменше розбалансування внаслідок зміни опору тензодатчика призводить до появи напруги на виході.

При виконанні співвідношення $R_1 / R_2 = R_2 / R_3$ напруга діагоналі моста дорівнює нулю. При деформації змінюється опір R_G (наприклад, збільшується при розтягуванні), це спричиняє зниження потенціалу точки з'єднання резисторів R_G і R_3 і зміна напруги діагоналі моста - корисний сигнал.

Зміна опору R_G може відбуватися не тільки від деформації, але і від впливу інших чинників, головний з них — зміна температури, що вносить похибку в результат вимірювання. Для зниження впливу температури застосовують сплави з низьким ТКО, термостатують об'єкт, вносять поправки

на зміну температури і/або застосовують диференціальні схеми включення ТР н міст.

Наприклад, у схемі на малюнку замість постійного резистора R_3 вмикають такий же ТР, як і R_G , але при деформації деталі цей резистор змінює свій опір із протилежним знаком. Це досягається наклейкою ТР на поверхні по-різному, що деформуються, наприклад із різних сторін згинається балки або з одного боку, але з взаємно перпендикулярною орієнтацією [22].

Висновки за розділом

У цьому розділі було розглянуто математичну модель ТР та принцип роботи ввімкнення схеми Уїтстона.

Савченко І.О. РІ-91МП, 2020

3 СЕРЕДОВИЩЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕНЗОРЕЗИСТОРІВ

3.1 Аналіз та порівняння існуючих пакетів моделювання

Для моделювання механічних та електричних параметрів та/або їх поєднання існує низка програмних середовищ. Розглянемо їх з точки зору можливості проектування ТР.

У світі дуже широко поширений програмний комплекс AutoCAD. Розроблений компанією Autodesk кілька десятиліть тому, довгий час він відповідав усім вимогам проектувальників, володіючи широкими можливостями адаптації до запитів користувача і багатим інструментарієм.

Система CATIA (Computer Aided Three-dimensional Interactive Application) — одна з найбільш поширених високорівневих систем автоматизованого проектування (рисунок 3.1). Це комплексна система проектування (CAD), технологічної підготовки виробництва (CAM) та інженерного аналізу (CAE), яка акумулює передовий інструментарій 3D-моделювання, включає підсистеми програмної імітації технологічних процесів, засоби аналізу і єдину базу даних графічної й текстової інформації. Програмний пакет може ефективно вирішувати всі завдання технічної підготовки виробництва, починаючи від зовнішнього (концептуального) проектування й до випуску специфікацій і креслень.

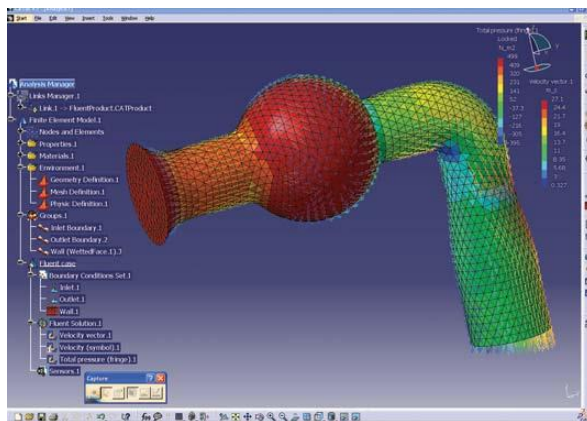


Рисунок 3.1 — Інтерфейс системи CATIA

Pro/ENGINEER — система, що охоплює всі сфери проектування, технологічної підготовки виробництва і виготовлення виробу (рисунок 3.2). Широкий спектр можливостей засобів тривимірного моделювання, висока якість результату проектування, стійкість його до подальших модифікацій і доопрацюванням зробили Pro / ENGINEER одним із лідерів CAD / CAM / CAE-систем, а існування прямого доступу в систему повної підтримки життєвого циклу виробу Windchill PDMLink виводить Pro/ENGINEER в розряд PLM-систем.

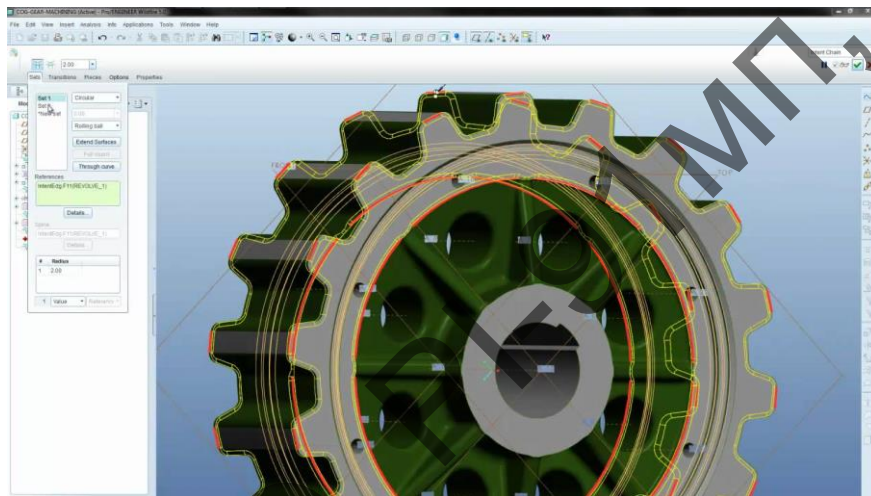


Рисунок 3.2 — Інтерфейс Pro / ENGINEER

SolidWorks — продукт компанії SolidWorks Corporation, система автоматизованого проектування, інженерного аналізу та підготовки виробництва виробів будь-якої складності й призначення (рисунок 3.3). Пакет являє собою інструментальне середовище, призначене для автоматизації проектування складних виробів у машинобудуванні та в інших галузях промисловості.

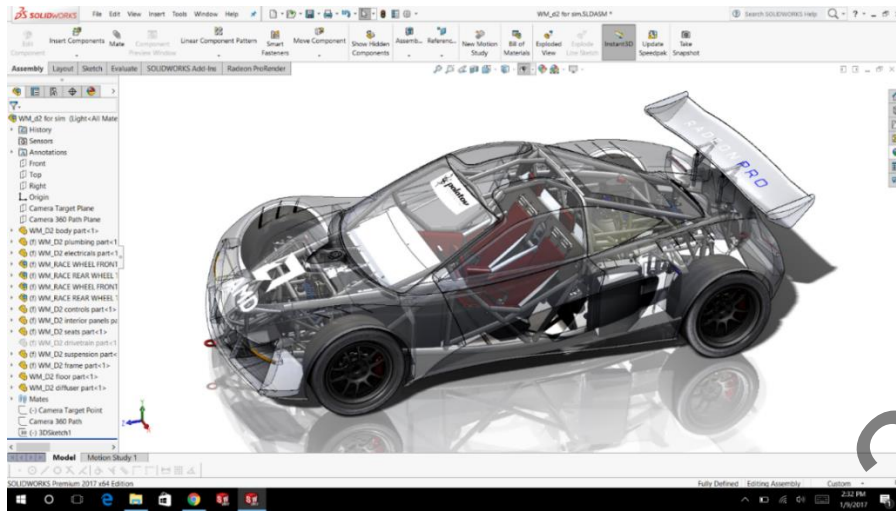


Рисунок 3.3 — Інтерфейс SolidWorks

ANSYS — універсальна програмна система кінцево-елементного аналізу, що розвивається протягом декількох десятиліть, є досить популярною у фахівців в галузі комп'ютерного інжинірингу та кінцево-елементного рішення лінійних і нелінійних, стаціонарних і нестаціонарних просторових завдань механіки деформованого твердого тіла й механіки конструкцій (рисунок 3.4) [23].

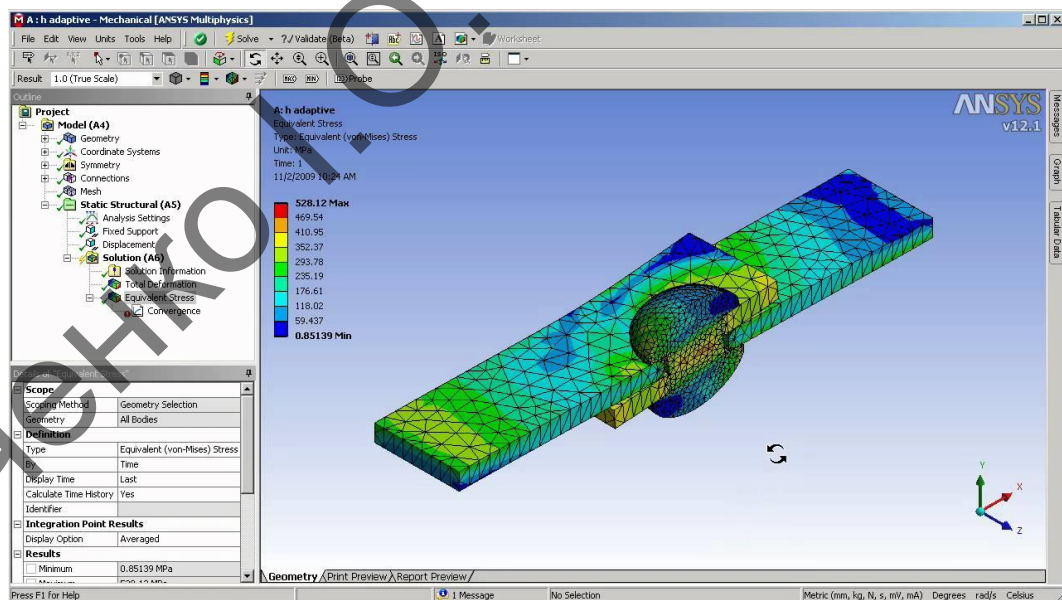


Рисунок 3.4 — Інтерфейс ANSYS

Компанія COMSOL є світовим розробником програмного забезпечення для моделювання різних фізичних процесів. Компанія була заснована в 1986

році в Стокгольмі й нині має мережу представництв у Фінляндії, Нідерландах, Норвегії, Італії, Швейцарії, Великобританії та США.

Програмні рішення COMSOL дає змогу моделювати, вивчати фізичні явища, їх взаємозв'язок у навколишньому середовищі й обробляти результати експериментів. Продукти компанії використовуються в дослідницьких інститутах і лабораторіях, а також на великих підприємствах. Додаткові модулі включають спеціальні інструменти симуляції фізичних процесів для будівельної механіки, хімічної інженерії, вивчення процесів у навколишньому середовищі, акустичних явищ, проектування систем теплопередачі, вирішення завдань в галузі мікроелектромеханіки тощо. Рішення COMSOL допомагають проектувати складні системи й пристрої, що використовуються в різних професійних галузях.

Для моделювання механічних процесів частіше за все застосовують програми CATIA, SolidWorks, ANSYS, COMSOL. На жаль CATIA є важким програмним середовищем і потребує чималих комп'ютерних ресурсів. Зміна механічних параметрів найкраще моделюється в SolidWorks та ANSYS, а от поєднання чи взаємний вплив електричних та механічних параметрів краще за все моделювати в програмному середовищі COMSOL.

3.2 COMSOL як програмне середовище для моделювання

Розглянемо обране програмне середовище більш детально.

Компанія COMSOL випускає популярну лінійку продуктів:

1. COMSOL Multiphysics універсальне середовище для моделювання складних фізичних процесів.
2. COMSOL Earth Science Module — дає змогу моделювати процеси руху рідких середовищ під землею.
3. Модуль MEMS — допомагає вирішувати завдання в області мікроелектромеханіки.
4. Бібліотека Material Library призначена для автоматизації процесу завдання властивостей матеріалів у складних моделях.

5. Chemical Engineering — інструмент для вивчення хімічних середовищ.

COMSOL Multiphysics універсальне середовище для моделювання складних фізичних процесів. Він дає змогу моделювати практично всі фізичні процеси, які описуються частковими диференціальними рівняннями. Програма містить різні вирішувачі, що допоможуть швидко впоратися навіть із найскладнішими завданнями, а проста структура додатка забезпечує простоту і гнучкість використання.

COMSOL Multiphysics є зручним, високопродуктивним і універсальним середовищем для моделювання фізичних процесів. Використовуючи шаблони, можна моделювати будь-яку комбінацію взаємопов'язаних фізичних полів.

Основні можливості COMSOL Multiphysics:

1. Високопродуктивний, інтерактивний і зручний інтерфейс користувача.
2. Потужні прямі та ітеративні вирішувачі.
3. Інструменти для проведення лінійного, нелінійного, стаціонарного й нестаціонарного аналізу, а також аналізу власного значення.
4. Повна свобода при вказівці фізичних властивостей у вигляді аналітичних виразів або функцій.
5. Необмежені можливості для моделювання взаємопов'язаних фізичних полів.
6. Загальні формулювання для швидкого моделювання довільних систем часткових диференціальних рівнянь.
7. Інструменти автоматизованого проектування для моделювання в одновимірному, двовимірному і тривимірному просторі.
8. Автоматичне створення осередків різних форм (трикутник, квадрат, тетраедр, паралелепіпед і призма).
9. Розширені бібліотеки моделей (понад 100 готових прикладів).
10. Параметричний вирішувач для роботи з нелінійними моделями.
11. Інтерактивна остаточна обробка і графічне представлення моделі.
12. Генератор звітів для автоматичного складання документації за моделями.

13. Підтримка складних обчислень на 64-бітних платформах.
14. Інтеграція з MATLAB.
15. Інтеграція із САПР-додатками
16. COMSOL Multiphysics інтегрується з різними САПР-додатками та дає змогу імпортувати файли у форматі DXF і IGES. Інтерфейс і набір інструментів COMSOL Multiphysics забезпечує широкі можливості для попередньої й кінцевої обробки моделей.

COMSOL Multiphysics має кілька режимів моделювання. Кожен режим відповідає певному фізичному процесу (наприклад, теплопередача) або набору рівнянь (наприклад, рівняння Нав'є-Стокса). Після визначення геометрії необхідно вибрати режим моделювання та задати в полях редагування властивості матеріалів і обмеження. Для моделювання декількох фізичних процесів досить вибрати додаткові режими й додати їх до вже наявного.

Спеціалізовані модулі

Нові модулі COMSOL Multiphysics надають додаткові режими моделювання та зручне робоче середовище. Модулі використовують стандартну термінологію, бібліотеки матеріалів, спеціалізовані вирішувачі і графічні інструменти - відповідно до галузі застосування. Водночас модулі повністю інтегруються з COMSOL Multiphysics і один з одним.

Кожен модуль має власне управління й бібліотеку моделей:

1. Модуль хімічних технологій.
2. Модуль геології.
3. Модуль електромагнетизму.
4. Модуль теплопередачі.
5. Модуль МЕМС для досліджень і проектування мікроелектромеханічних систем.
6. Модуль будівельної механіки [24].

Отже, програмне середовище COMSOL Multiphysics якнайкраще підходить для проектування ТР.

Висновки за розділом

У третьому розділі проведено аналіз та порівняння існуючих пакетів моделювання. Обрано середовище COMSO Multiphysics, яке ідеально підходить для моделювання мікроелектромеханічних систем через наявність в ньому модуля MEMS (Мікроелектромеханічні системи) з відповідними засобами моделювання.

Савченко І.О. РІ-91МП, 2020

4 МОДЕЛЮВАННЯ ТЕНЗОРЕЗИСТОРІВ

4.1 Побудова моделі давача

У якості моделі було обрано ТР Розетка Р1 (рисунок 4.1). Розеткові ТР вимірюють деформацію у двох або трьох напрямках, являють собою комбінацію з двох або трьох прямокутних ТР відповідно, змонтованих на одній підкладці.

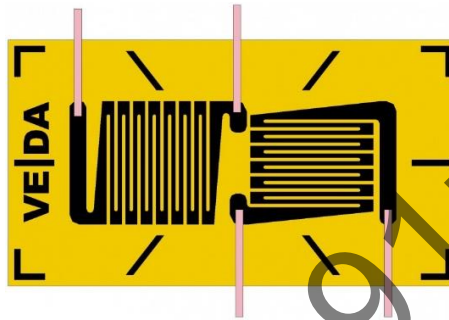


Рисунок 4.1 — ТР Розетка Р1

Така структура була обрана, оскільки саме на цій конструкції планується проводити експериментальні дослідження.

Підкладка ТЗ виконана з армованого паперу пропитаного клеєм, а сам ЧЕ з константанової фольги. Параметри моделі ТР записані в таблиці.

Таблиця 4.1 — Параметри моделі

Назва	Значення
Довжина, мм	20
Ширина, мм	8,3
Номінальна база (довжина тензорешітки), мм	5
Висота підкладки, мм	0,06
Висота ЧЕ, мм	0,03
Номінальний опір, Ом	200
Напруга живлення, В	9

У програмі Comsol Multyphysics була побудована модель такої розетки TP. Інтерфейс програмного середовища Comsol Multyphysics та побудована модель зображені на рисунках 4.2 та 4.3.

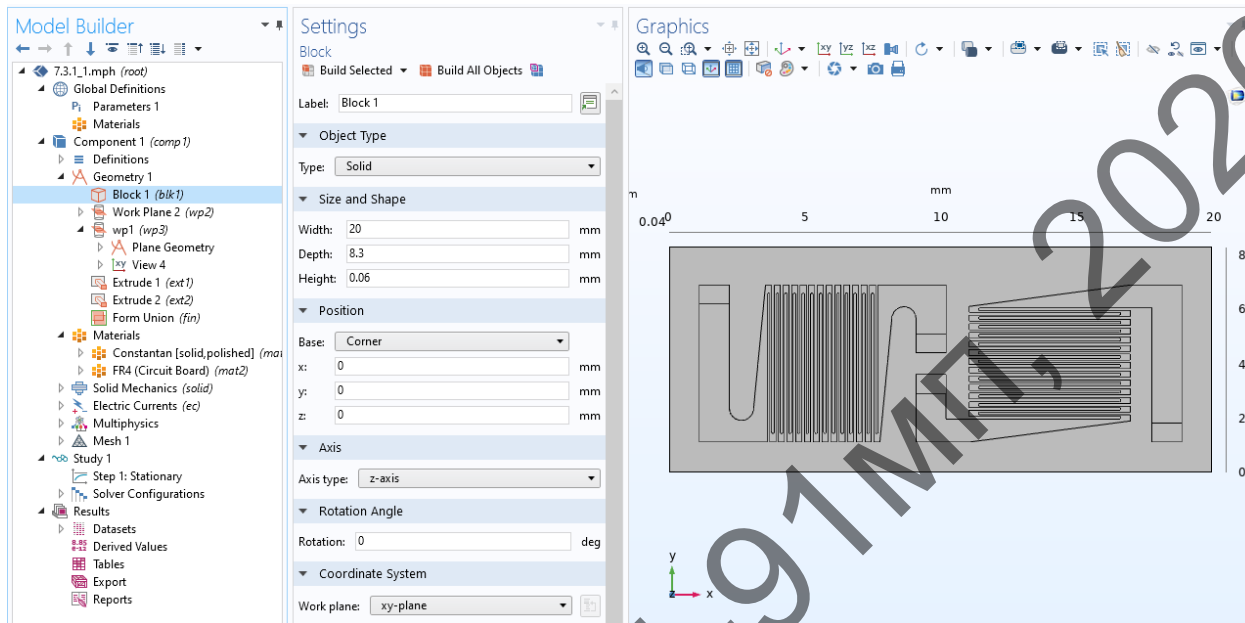


Рисунок 4.2 — Інтерфейс COMSOL та 2D модель TP

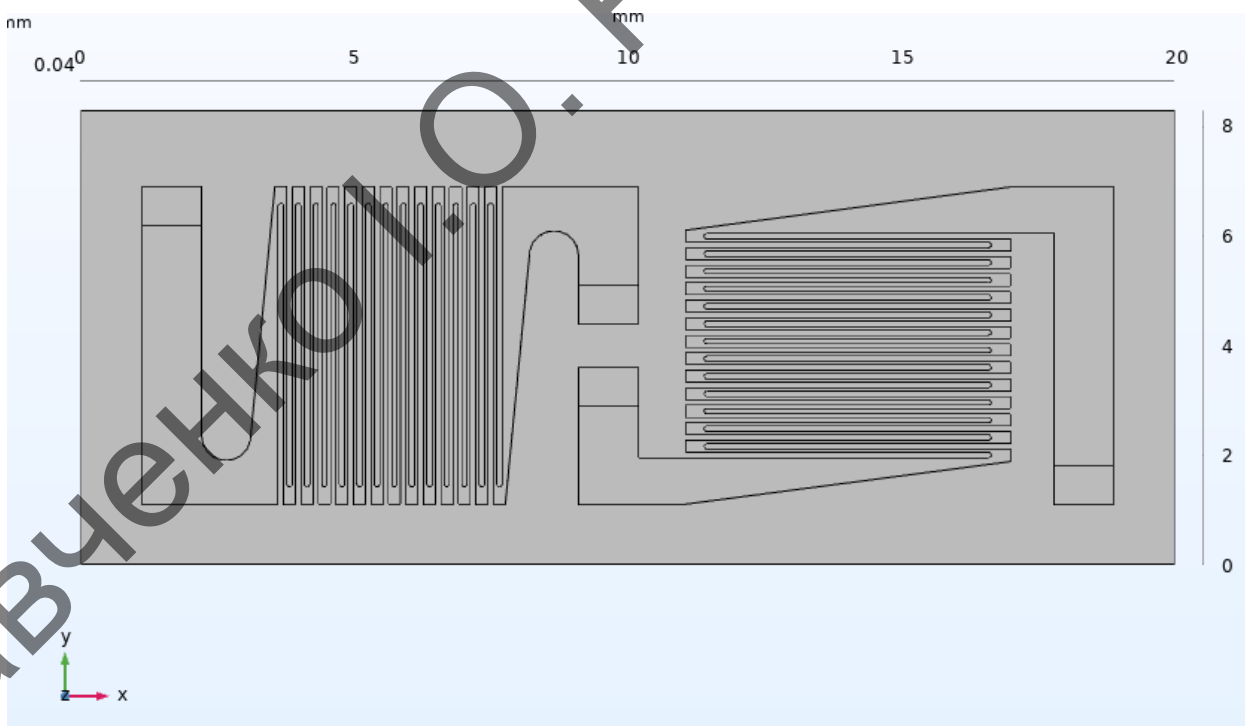


Рисунок 4.3 — Модель давача

Для подальшого моделювання необхідно було задати параметри тиску, який буде прогинати мембрану TP (рисунок 4.4). А потім задати сітку для моделювання

ТР. Обрано адаптивну сітку, найменший елемент 0,01 мм, найбільший — 2 мм (рисунок 4.5).

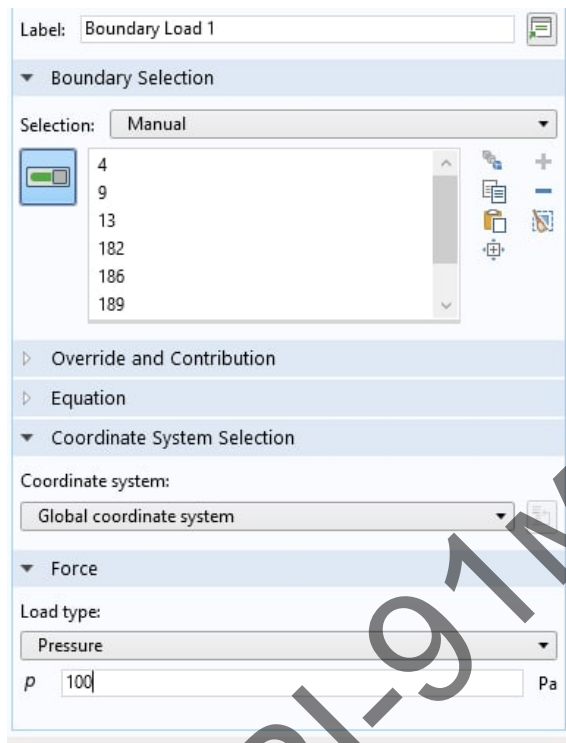


Рисунок 4.4 — Параметри тиску

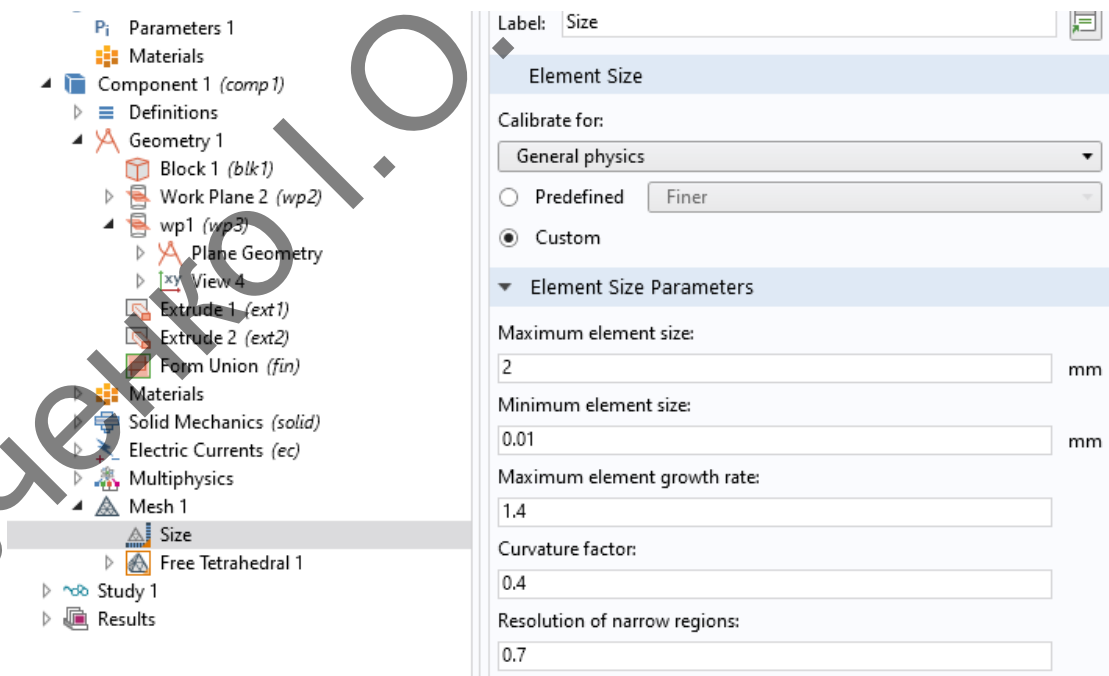
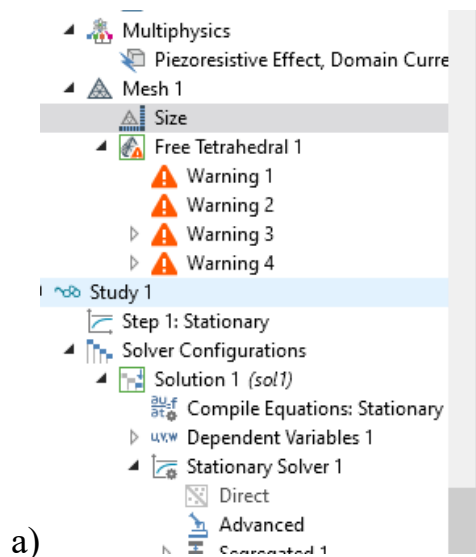
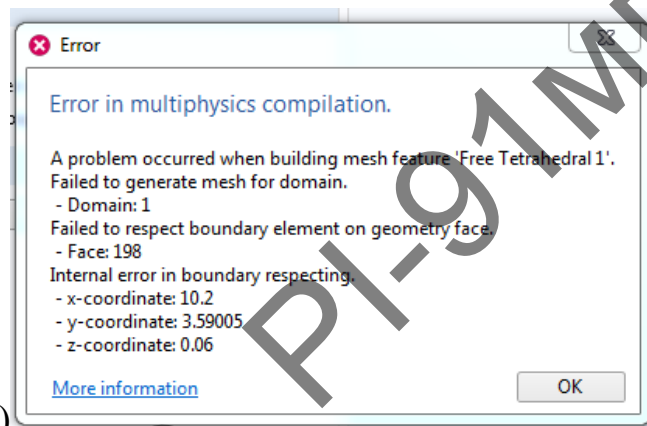


Рисунок 4.5 — Параметри сітки

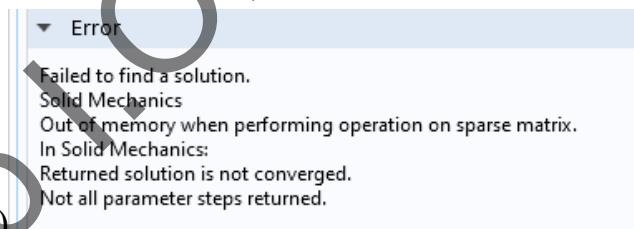
Однак при моделюванні й розбитті сітки виникли помилки такого характеру (рисунок 4.6):



a)



б)



в)

Рисунок 4.6 — Помилки при розбитті сіткою моделі

В результаті моделювання виникли внутрішні помилки при побудові сітки, які не давали змогу провести розрахунки ТР, що були спричинені недостатньою кількістю оперативної пам'яті комп'ютера.

Дослівний переклад помилки, що виникла під час моделювання (рисунок 4.6, б):

Виникла проблема при побудові елемента сітки "Вільний тетраедр 1".

Не вдалося створити сітку для домену.

- Домен: 1

Чи не вдалося врахувати граничний елемент на межі геометрії.

- Поверхня: 198

Внутрішня помилка при дотриманні границь.

- координата x: 10.2

- координата y: 3.59005

- координата z: 0,06

Дослівний переклад помилки, що виникла під час моделювання (рисунок 4.6, в):

1. Не вдалося знайти рішення.
2. Механіка твердого тіла.
3. Немає пам'яті при виконанні операції над розрідженою матрицею.
4. У механіці твердого тіла:
5. Повернене рішення не збігається.
6. Повернено не всі кроки параметрів.

Усі ці помилки, які отримані в процесі моделювання були виключно через недостатню кількість оперативної пам'яті комп'ютера.

Варіанти вирішення отриманих помилок:

1. Розглянути плоску модель.
2. Зміна параметрів розбиття сітки.
3. Використати розбиття сітки протягуванням (функція *Swept*).
4. Спрощена модель ТР до кількох чутливих елементів.
5. Програмне збільшення оперативної пам'яті комп'ютера.
6. Фізичне збільшення оперативної пам'яті комп'ютера.

4.1.1 Моделювання фрагменту чутливого елемента

Після моделювання ТР у якому виникли помилки при розрахунках, було вирішено спростити модель і застосувати так званий принцип «декомпозиції» — розбити в попередній моделі тензорезистор на елементи (рисунок 4.7) та розглянути замість ЧЕ один фрагмент довжиною 5 мм (рисунок 4.8).

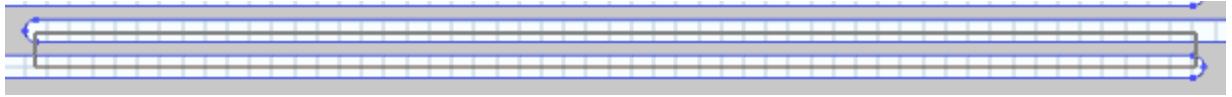


Рисунок 4.7 — Фрагмент ЧЕ

Конструктивні параметри такого одинарного ЧЕ:

- довжина $a = 5$ мм
- ширина $b = 0,06$ мм
- висота $h = 0,06$ мм
- товщина чутливого елемента $s = 0,03$ мм
- питомий опір константану $\rho = 5$ Ом м
- діапазон прикладеного тиску $P = 100$ Па – 1 кПа з кроком 100 Па

Модель фрагмента ЧЕ побудована в програмному пакеті Comsol за заданими параметрами зображена на рисунку 4.8.



Рисунок 4.8 — Модель фрагмента ЧЕ в середовищі Comsol

Після проведеного моделювання отримаємо розрахунки залежності опору від тиску, що розташовані в таблиці 4.1 та побудовано графік, який зображений на рисунку 4.9. За розрахунками опір ЧЕ без прикладеного тиску складає 6,25 Ом.

Таблиця 4.1 — Таблиця залежності зміни опору від тиску

Тиск, Па	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Опір, Ом	6,3	11,9	17,85	23,1	28,35	33,25	37,1	42,7	46,55	52,15

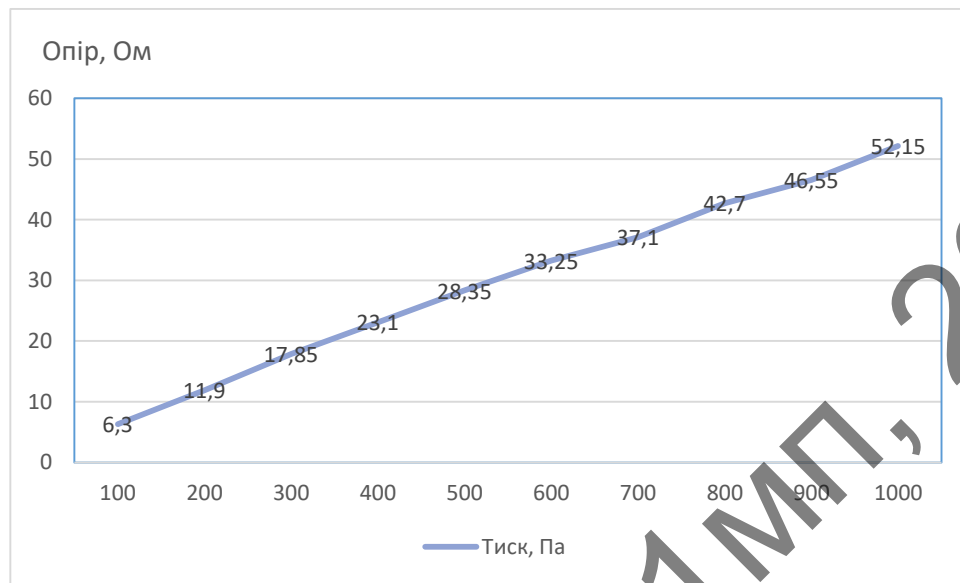


Рисунок 4.9 — Графік залежності зміни опору ЧЕ від прикладеного тиску

У результаті моделювання ми можемо спостерігати візуально як змінюється сам ЧЕ при різному навантаженні (рисунок 4.10), та де відбуваються максимальні механічні напруження (рисунок 4.11).

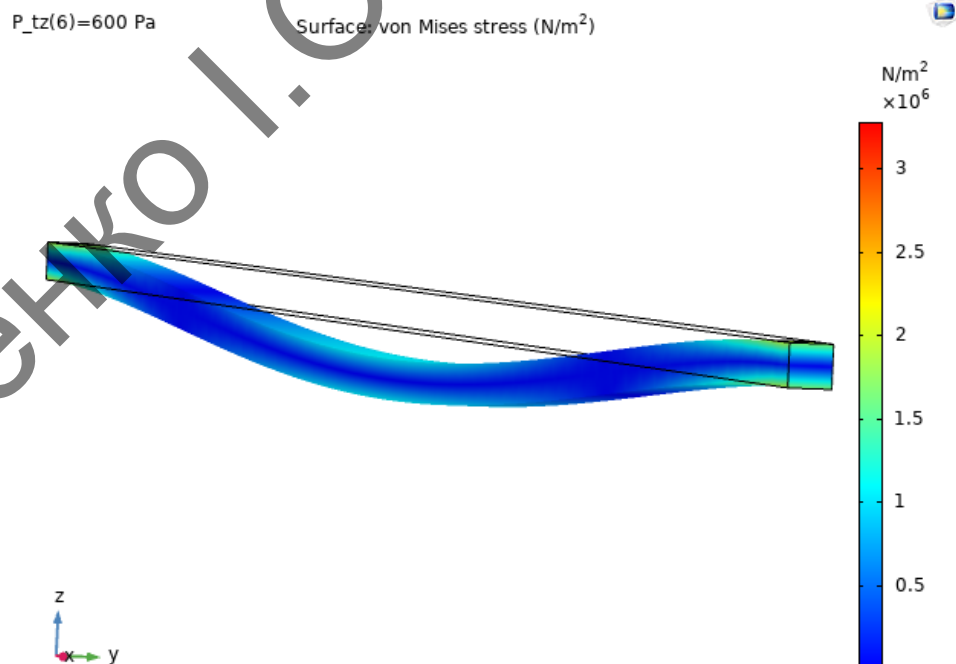


Рисунок 4.10 — Розподіл механічних напружень при 600 Па

P_tz(8)=800 Pa

Surface: Total displacement (mm)

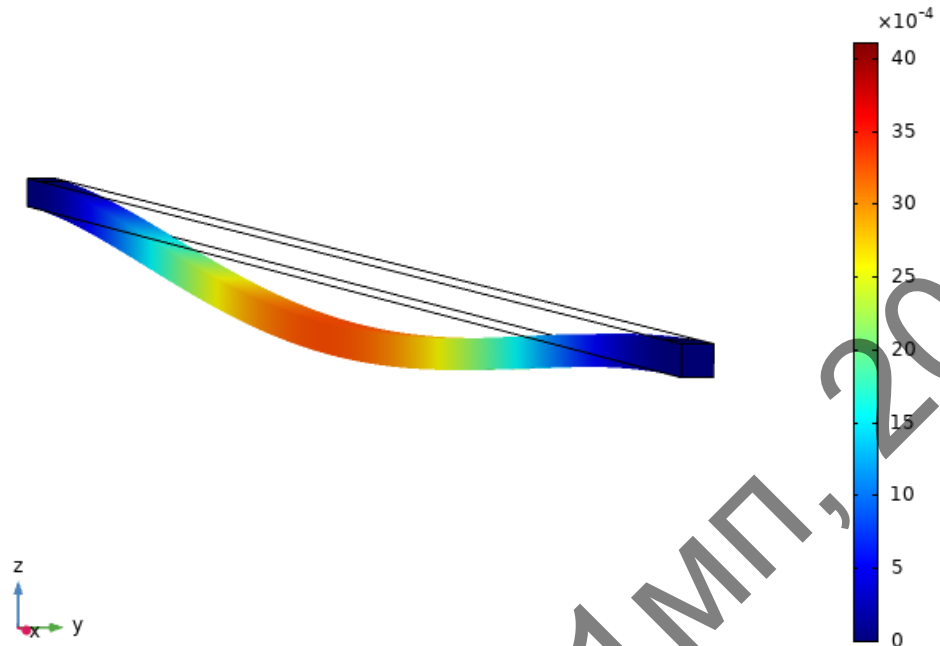


Рисунок 4.11 — Максимальне зміщення при 800 Па

Всі отримані розрахунки занесені до таблиці, що зображена на рисунку 4.12, також графічно зображено залежності зміщення ЧЕ від прикладеного тиску (рисунок 4.13).

P_tz (Pa)	Total displacement (mm), Domain Probe 1	von Mises stress (N/m ²), Domain Probe 2
100.00	2.1898E-4	65616
200.00	4.3797E-4	1.3123E5
300.00	6.5695E-4	1.9685E5
400.00	8.7593E-4	2.6246E5
500.00	0.0010949	3.2808E5
600.00	0.0013139	3.9369E5
700.00	0.0015329	4.5931E5
800.00	0.0017519	5.2493E5
900.00	0.0019708	5.9054E5
1000.0	0.0021898	6.5616E5

Рисунок 4.12 — Результати розрахунків зміщення ЧЕ та механічних напружень від прикладеного тиску

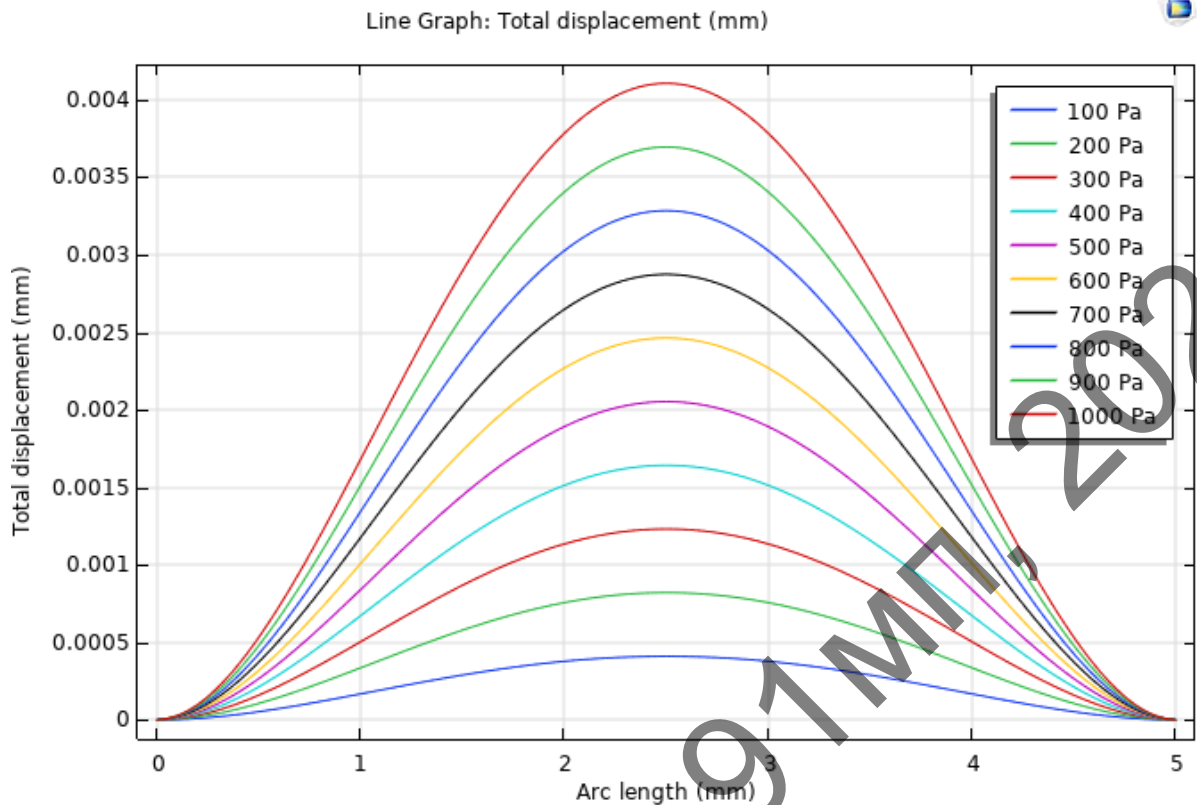


Рисунок 4.13 — Графік залежності зміщення ЧЕ від прикладеного тиску

Більш детально результати моделювання наведені в додатку А та Б.

На даному етапі оскільки вдалося провести моделювання одинарного ЧЕ, було прийнято рішення перейти до моделювання спрощеного ЧЕ.

4.1.2 Моделювання спрощеного тензорезистора

Спрощена модель ТР типу «меандр» зображено на рисунку 4.14.

Конструктивні параметри:

- довжина $a = 8$ мм
- ширина $b = 8$ мм
- висота $h = 0,06$ мм
- товщина чутливого елемента $s = 0,03$ мм
- питомий опір константану $\rho = 5$ Ом м
- прикладений тиск $P = 100$ Па – 1 кПа з кроком 100 Па.

Розбиття сітки показано на рисунку 4.15.

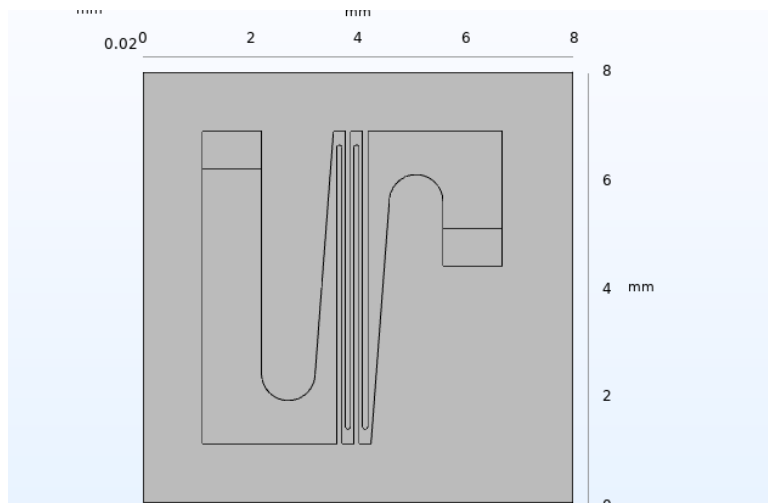


Рисунок 4.14 — Топологія спрощеної моделі

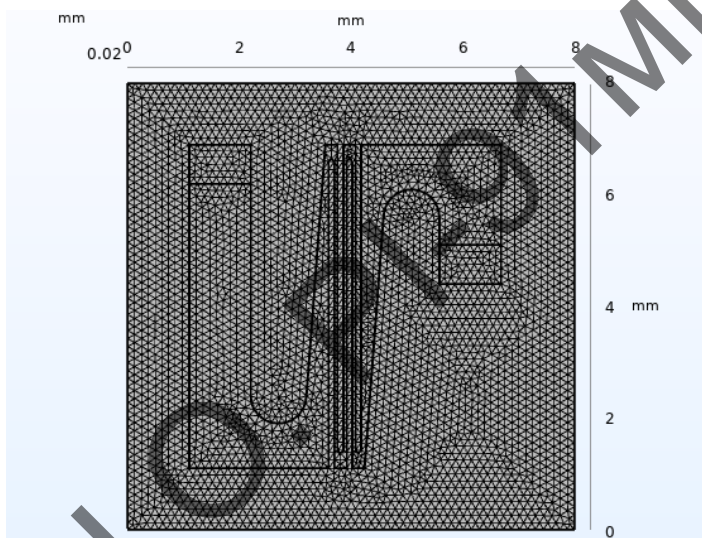


Рисунок 4.15 — Розбиття сіткою спрощеної моделі

Після закінчення моделювання отримали розрахунки зміни опору залежно від прикладеного до ТР тиску (таблиця 4.2).

Таблиця 4.2 — Таблиця залежності зміни опору від тиску

Тиск, Па	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Опір, Ом	28,5	57	85,5	114	142,5	171	199,5	228	256,5	285

Згідно з розрахунками опір ЧЕ без прикладеного тиску складає 27,8 Ом.

За результатами моделювання побудовано залежність зміни опору ТР від деформації (рисунок 4.16).

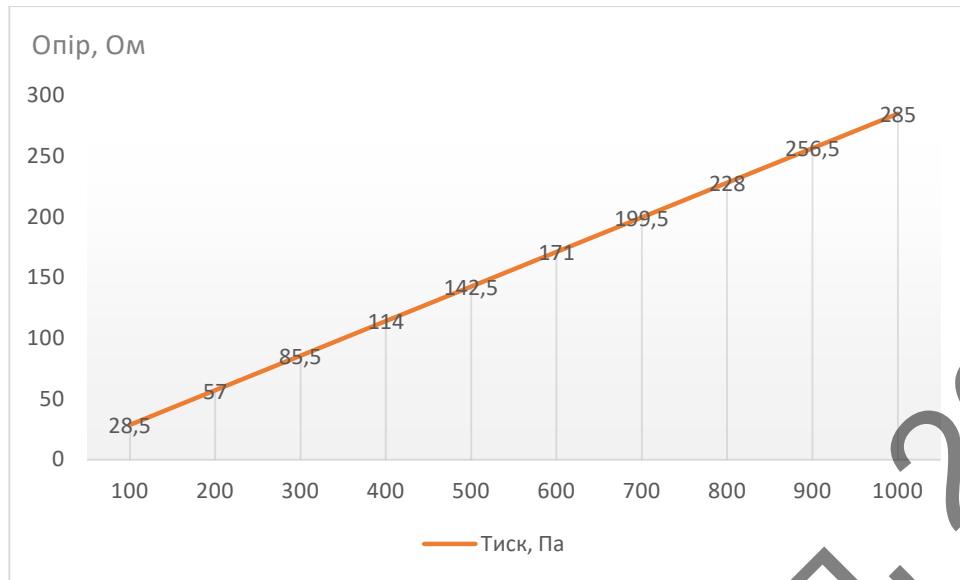


Рисунок 4.16 — Графік залежності зміни опору ТР від прикладеного тиску

На рисунках 4.17 зображено змодельований ТР із прикладеним тиском в 1000 Па в різних «ракурсах» із закріпленням по периметру.

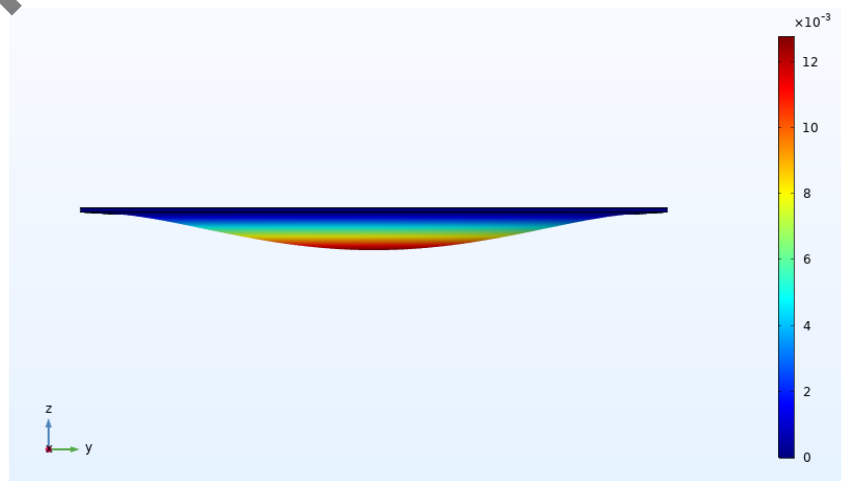
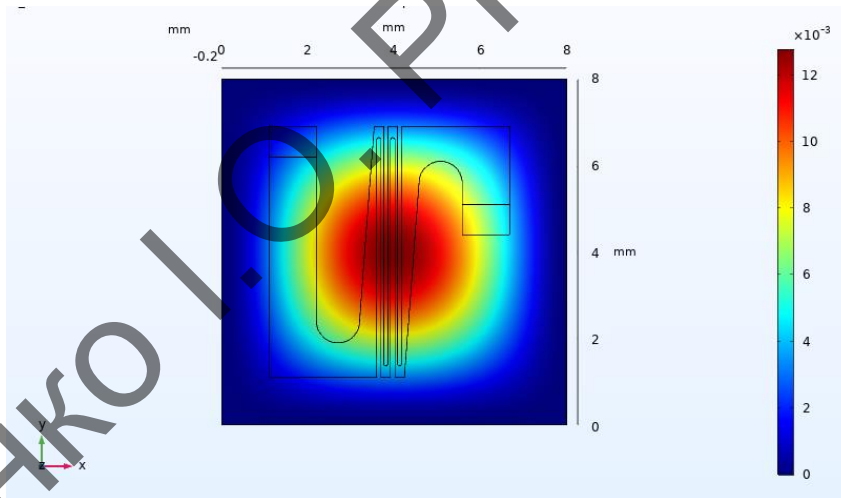


Рисунок 4.17 — Розподіл зміщення мембрани при 1000 Па

Візуальний розподіл механічних напружень при 1 кПа можна спостерігати на рисунках 4.18.

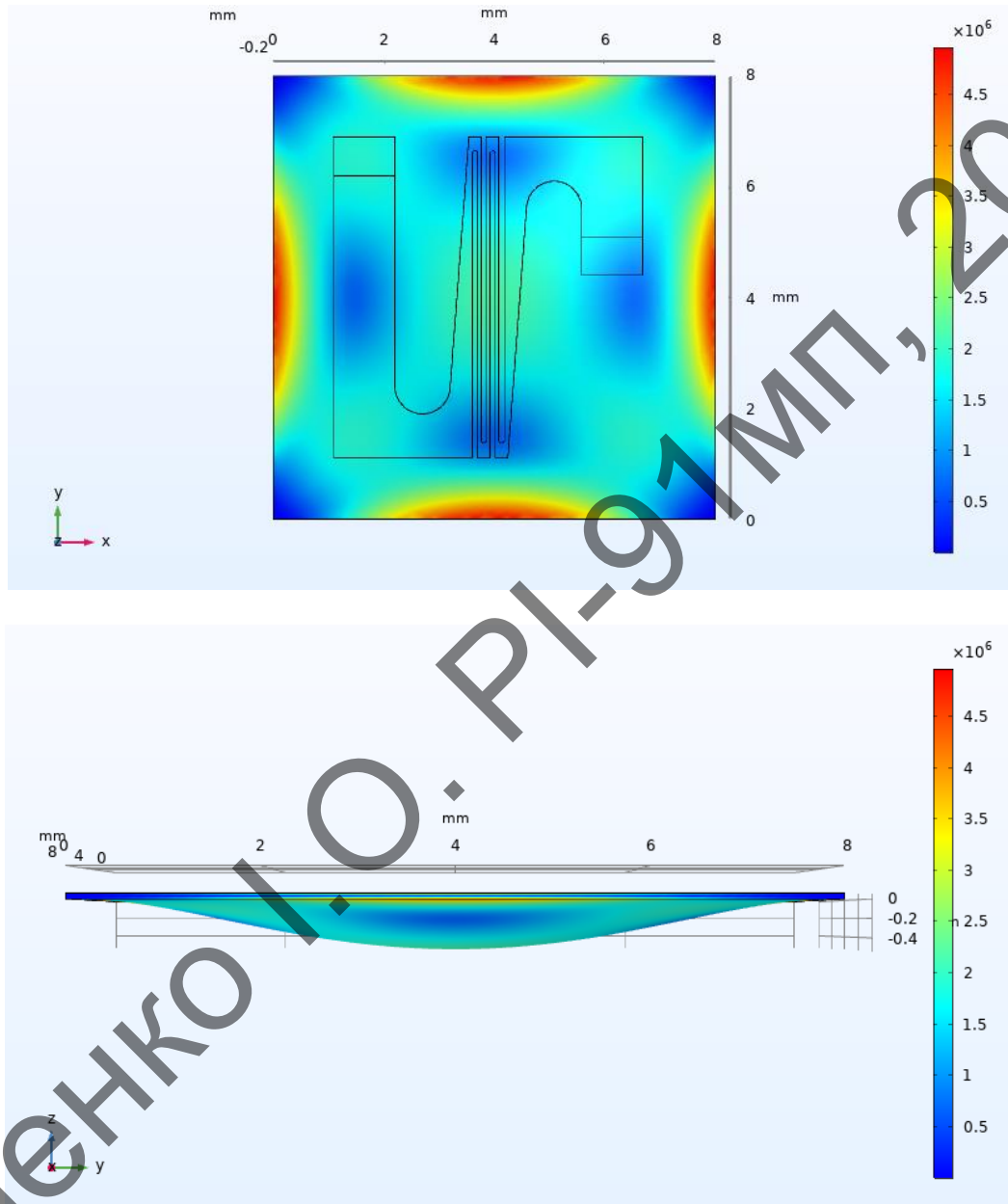


Рисунок 4.18 — Розподіл механічних напружень при 1000 Па

За результатами моделювання, на рисунку видно, що датчик фіксує зміни тиску при зростанні граничних напружень.

Отримані дані після закінчення моделювання ТР в діапазоні від 100 Па до 1 кПа зображені на рисунку 4.19 та побудовані графіки залежності зміщення (рисунок 4.20) та впливу механічних напружень (рисунок 4.21).

P_ (Pa)	Total displacement (mm), Domain Probe 1	von Mises stress (N/m ²), Domain Probe 2
100.00	3.9297E-4	86357
200.00	7.8594E-4	1.7271E5
300.00	0.0011789	2.5907E5
400.00	0.0015719	3.4543E5
500.00	0.0019648	4.3178E5
600.00	0.0023578	5.1814E5
700.00	0.0027508	6.0450E5
800.00	0.0031437	6.9086E5
900.00	0.0035367	7.7721E5
1000.0	0.0039297	8.6357E5

Рисунок 4.19 — Результати розрахунків зміщення та механічних напружень від прикладеного тиску

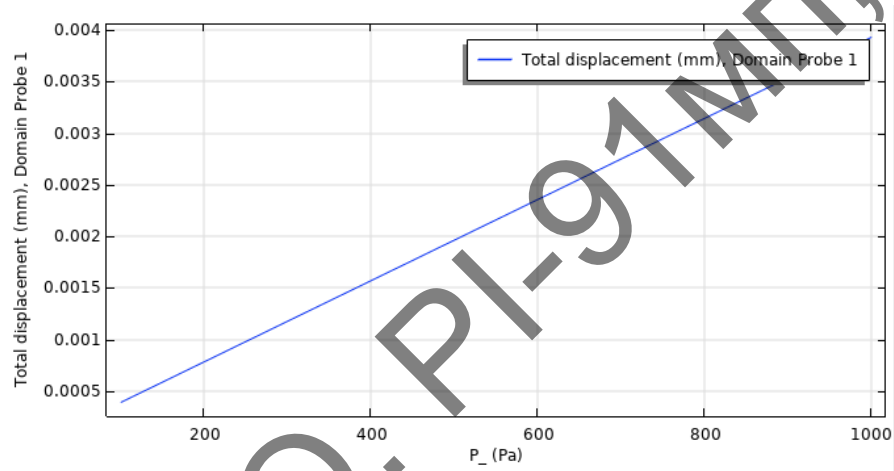


Рисунок 4.20 — Графік залежності зміщення мембрани TP від прикладеного тиску

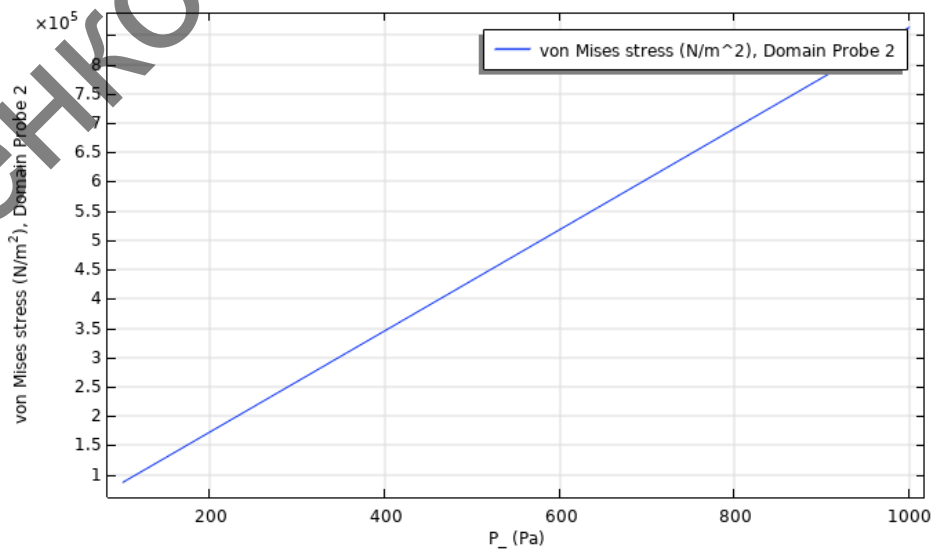


Рисунок 4.21 — Графік залежності механічних напружень від прикладеного тиску

Більш детально результати моделювання наведені в додатку В та Г.

Надалі планується експортувати дані про прогин мембрани в програмне середовище MATLAB для подальшого моделювання.

4.2 Програмне покращення характеристик комп'ютера для збільшення об'ємів розрахунків

Програмне покращення характеристик комп'ютера дасть змогу збільшити об'єми моделювання, точність та швидкість розрахунків. Оскільки, основною проблемою виникнення помилок та попереджень при розрахунках моделі була недостатня кількість оперативної пам'яті, для цього розглянемо можливі варіанти розв'язання даної проблеми.

4.2.1 Оперативна пам'ять

Малий обсяг оперативної пам'яті завдає користувачам безліч незручностей, оскільки при її малому обсязі стає неможливо працювати з деякими ресурсомісткими програмами. Ось тут і виникає проблема того, як оперативну пам'ять збільшити до такого розміру, щоб не було гальмування або зависання системи. Для цього є кілька основних методів, включно з використанням знімних накопичувачів у вигляді звичайних флешок.

Оперативна пам'ять (ОП, RAM, «оперативка») призначена для зберігання даних усіх активних у певний момент часу процесів (системних і призначених для користувача). Вона є сполучною ланкою між встановленим програмним забезпеченням і центральним процесором, але не безпосередньо, а через системну шину й кешування.

Якщо не заглиблюватися в тонкощі комп'ютерної термінології, просто можна описати пам'ять ОП у такий спосіб: у момент старту програми або процесу в ОП відбувається завантаження основних компонентів, які зберігаються там до завершення програми. Тільки після завантаження здійснюється переадресація команд на центральний процесор, який і виробляє їх обробку. Отже, пам'ять ОП — це проміжний буфер обміну даними, без якого

не зможе функціонувати жодна система. Чим більше обсяг ОП, тим більша кількість компонентів можна завантажити й передати на обробку.

4.2.2 Зміна розміру файлу підкачки

Один із варіантів розв'язання питання того, як збільшити ОП без використання додаткових коштів і без фізичної зміни обсягу, полягає в тому, щоб встановити більший розмір віртуальної пам'яті, за яку відповідає так званий файл підкачки (pagefile.sys), що являє собою зарезервованій на жорсткому диску простір, куди записуються кешовані дані при перевищенні ліміту оперативної пам'яті. Звичайно, швидкість звернення до жорсткого диска буде набагато менша, ніж безпосередньо до ОП, але як варіант підійде.

Для цього у властивостях комп'ютера використовується розділ додаткових налаштувань, де обирається вкладка додаткових параметрів, і через кнопку в розділі швидкодії здійснюється перехід до поточних налаштувань. На вкладці «Додатково» (рисунок 4.22) і можна змінити розмір віртуальної пам'яті, встановивши власне значення, що перевищує рекомендовану настройку за умовчанням.

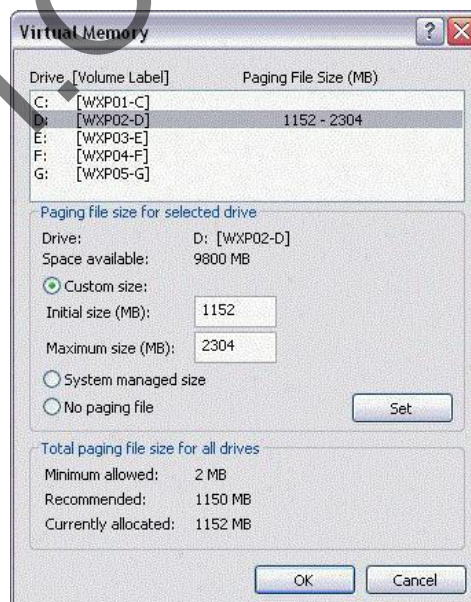


Рисунок 4.22 — Вікно налаштування файлу підкачки

Однак захоплюватися не варто. При підвищеному розмірі система почне в першу чергу звертатися саме до файлу pagefile.sys, а не до оперативної пам'яті, що призведе лише до зворотного ефекту.

4.2.3 Зміна таймінгу в налаштуваннях BIOS

Якщо подивитися на проблему того, як збільшити ОП на ноутбуці, де немає можливості встановити додаткові планки пам'яті, можна скористатися налаштуваннями BIOS (правда, це більшою мірою стосується збільшення обсягу відеопам'яті) (рисунок 4.23).

Parameters	Setting	Current Value	Item Help
Memory Timing Setting	[Expert]		Menu Level >>>
tCL (CAS Latency)	[4]	4	Select [Expert] to enter timings manually
tRCD	[4]	4	
tRP	[4]	4	
tRAS	[12]	12	
Command Per Clock (CMD)	[1T]	1T	
** Advanced Memory Settings **			
tRRD	[Auto(3)]	3	
tRC	[Auto(22)]	22	
tWR	[Auto(5)]	5	
tWTR	[Auto(9)]	8	
tREF	[Auto]	7.8uS	

Рисунок 4.23 — Вікно налаштування BIOS

У розділі додаткових налаштувань потрібно знайти рядок Shared Memory для зміни налаштувань DRAM Read Timing (чим менше значення встановлено, тим вище швидкодія системи).

4.2.4 Збільшення оперативної пам'яті за допомогою флешки

Нарешті, подивимося, як збільшити ОП на комп'ютері за допомогою флешки. Робиться це досить просто, проте потрібно дотриматися кількох початкових умов.

Для цих процедур буде потрібно знімний накопичувач (флешка або карта пам'яті) обсягом не менше 1 Гб і не більше ніж 32 Гб зі швидкістю запису 1,75 Мб / сек (з блоками по 512 Кб) і читання 2,5 Мб / сек (з тим же розміром

блоку). Вільного місця повинно бути не менше 256 Мб, хоча цим параметром можна знехтувати, оскільки в будь-якому випадку на підготовчому етапі буде здійснюватися форматування носія (рекомендується). Загальний розмір пам'яті одночасно підключених пристроїв не може перевищувати 256 Гб. І бажано використовувати пристрої, що підтримують стандарт USB 3.0, оскільки в цьому випадку швидкість передачі даних буде набагато вище, ніж через порти з інтерфейсом USB 2.0.

Для збільшення оперативної пам'яті буде використовуватися технологія ReadyBoost, яка полягає в тому, що фізична флеш-пам'ять може бути використана в якості віртуальної. Іншими словами, на знімному пристрої просто додатково створюється ще один файл підкачки.

Для операційних систем на базі архітектури x64 частинка фізичного простору не може перевищувати 32 Гб, для систем x86 (32 біти) — 4 Гб. Крім того, відповідно до рекомендацій фахівців корпорації Microsoft, співвідношення пам'яті накопичувача і стаціонарної оперативної пам'яті може коливатися в діапазонах від 1:1 до 2,5:1. При цьому максимальний приріст продуктивності спостерігається при читанні менших блоків із розміром на рівні 4 КБ (у порівнянні зі зверненням до жорстких дисків збільшення продуктивності приблизно в 10 разів), але при читанні великих блоків ефект практично непомітний.

Отже, якщо робити висновки з усього вищесказаного, варто зазначити, що найбільш дієвим методом збільшення оперативної пам'яті є все-таки заміна або додавання планок. Однак якщо така можливість просто фізично відсутня (наприклад, на ноутбуках), варіант із використанням знімних накопичувачів є найкращим. Водночас можна навіть не задіяти системну віртуальну пам'ять, файл якої зберігається на HDD, оскільки звернення до вінчестера має нижчий показник швидкості. Але, як вже зрозуміло, потрібно враховувати й деякі вимоги щодо флешок і знімним картам пам'яті. Без цього на ефект збільшення RAM можна навіть не розраховувати [25].

Висновки за розділом

У розділі було проведено моделювання ТР. Через виникнення помилок при моделюванні було запропоновано спростити модель і застосувати так званий принцип «декомпозиції» — розбити тензорезистор на елементи та розглянути замість ЧЕ один фрагмент.

Після вдалих розрахунків ЧЕ було вирішено спробувати змоделювати спрощену модель ТР типу «меандр». У ході моделювання отримані результати залежності опору від прикладеного тиску були занесені до таблиць та зображені на графіках.

Аналіз результатів моделювання показав збільшення опору, який виникає при зміні тиску, що свідчить про те, що змодельований датчик є доволі чутливим для виявлення перепаду тиску в 1 кПа.

Створена на цей момент Гончарук Анастасією математична модель дозволяє в першому наближенні визначити опір ТР. Надалі планується експортувати дані про прогин мембрани в програмне середовище MATLAB для більш точного моделювання.

ВИСНОВКИ

1. Базуючись на розглянутих конструкціях та матеріалах ТР, найкраще для подальших розробок ЧЕ для портативного давача артеріального тиску є напівпровідникові ТР через їх високий коефіцієнт тензочутливості; високий рівень вихідного сигналу; відсутність гістерезису; хімічна інертність; мінімальна похибка від шумів.

2. Завдячуючи компанії VEDA, для початкових досліджень безкоштовно отримані ТР трьох конструкцій. Ці ТР виготовлені з константану на паперовій мембрані та мають немедичне призначення. Було вирішено провести моделювання цих ТР із можливістю надалі змінювати модель для напівпровідникового ТР.

3. У програмному середовищі Comsol Multyphysics було проведено моделювання ТР типу Розетка Р1, під час якого сталася внутрішня помилка, а саме недостатня кількість ОП для проведення даного об'єму розрахунків. У результаті було прийнято рішення спростити модель і застосувати так званий принцип «декомпозиції» — розбити в попередній моделі тензорезистор на елементи та розглянути замість ЧЕ один фрагмент довжиною 5 мм. Отримані результати моделювання узгоджуються з розрахунковими.

4. Після «вдалих» розрахунків фрагменту ЧЕ було вирішено спробувати також змодельовати спрощену модель ТР типу «меандр». Аналіз результатів моделювання показав збільшення опору, який виникає при зміні тиску, що свідчить про те, що змодельований датчик є доволі чутливим для виявлення перепаду тиску в 1 кПа.

5. Створена на цю мить Гончарук Анастасією математична модель дозволяє в першому наближенні визначити опір ТР. Надалі планується експортувати дані про прогин мембрани в програмне середовище MATLAB для більш точного моделювання.

6. Для подальшої роботи зі складнішими конструкціями ТР надано рекомендації щодо збільшення ОП як програмно, так і апаратно.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Гончарук А. В. Сенсор моніторингу артеріального тиску та пристрій на його основі: науково–дослідна робота на здобуття ступеня магістр: напр. 6.050902 "Радіоелектронні апарати" / Гончарук Анастасія Вікторівна; Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т ім. Ігоря Сікорського". — К., 2018. — 84 с.
2. Тензорезистори [Електронний ресурс] // Вікіпедія. — 2020. — Режим доступу до ресурсу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/тензорезистор> — Назва з екрану 10.12.2020.
3. ГОСТ 492–73. Никель, сплавы никелевые и медно-никелевые, обрабатываемые давлением. — Введ. 1973-01-01. — Москва: Изд.-во стандартов, 1973. — 18 с.
4. Бауман Э. Измерение сил электрическими методами / Э. Бауман. — Москва: Мир, 1978. — 430 с.
5. Левшина Е. С. Электрические измерения физических величин / Е. С. Левшина, П. В. Новицкий. — Ленинград: Энергоатомиздат, 1983. — 315 с.
6. Гордин Е. М. Основы автоматики и вычислительной техники / Е.М. Гордин, Ю. Ш. Митник, В. А. Тарлинский. — Москва: Машиностроение, 1978. — 303 с.
7. Ильинская Л.С. Полупроводниковые тензодатчики / Л.С. Ильинская, А. Н. Подмарьков — Москва: Энергия, 1966. — 120 с.
8. Глаговский, Б.А. Электротензометры сопротивления / Б.А. Глаговский, И. Д. Пивен. — Ленинград: Энергия, 1972. — 88 с.
9. Исакович, Р.Я. Технологические измерения и приборы / Р.Я. Исакович. — Москва: Мир, 1979. — 344 с.
10. Аш, Ж. Датчики измерительных систем / Ж. Аш. — Москва: Мир, 1992. — 480 с.
11. ГОСТ 20420–75. Тензорезисторы. Термины и определения. Введ. 1976-01-01. — Москва: Изд.-во стандартов, 1975. — 15 с.

12. ГОСТ 21615–76. Тензорезисторы. Методы определения характеристик. Введ. 1978-01-01. – Москва: Изд.-во стандартов, 1976. – 27 с.

13. Тесленко В. А. Что следует знать о Тензорезисторах / В. А. Тесленко // ПИКАД. – 2006. – №1. – С. 42–53.

14. Конюхов В. Н. Исследование емкостного датчика давления / В. Н. Конюхов, К. Е. Воронов. – Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет, 2006. – 23 с.

15. Королев М.А, Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем: в 2 ч. / М.А. Королев, Т.Ю. Крупкина, М.А. Ревелева; под общей ред. Ю.А. Чаплыгина. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний.

16. Галперин В.А. Процессы плазменного травления в микро- и нанотехнологиях: Учебное пособие / В.А. Галперин, Е.В. Данилкин, А.И. Мочалов; под ред. С.П. Тимошенко. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. — 283 с. : ил.

17. Болванович Э.И. Полупроводниковые пленки и миниатюрные измерительные преобразователи / Э.И. Болванович. — Минск: Наука и техника, 1981. – 214 с.

18. Киреев, В.Ю. Технологии микроэлектроники. Химическое осаждение из газовой фазы / В.Ю. Киреев, А.А. Столяров. — Москва: Техносфера, 2006. — 192 с.

19. Моро У. Микролитография / У. Моро. — Москва: Мир, 1990. — 605 с.

20. Роцин В.М. Технология материалов микро-, опто- и наноэлектроники: учебное пособие. Ч.2 / В.М. Роцин, М.В. Силибин. — М.: БИНИМ. Лаборатория знаний, 2010. — 180с.: ил.

21. Тензорезисторы [Электронный ресурс] // ВЕДА. — Режим доступа до ресурсу: <http://veda.com.ua/> — Назва з екрану — 10.12.2020.

22. Тензорезисторы [Электронный ресурс] // Энциклопедия АСУ ТГ. — Режим доступа до ресурсу: https://www.bookasutp.ru/chapter6_3_5.aspx — Назва з екрану — 10.12.2020.

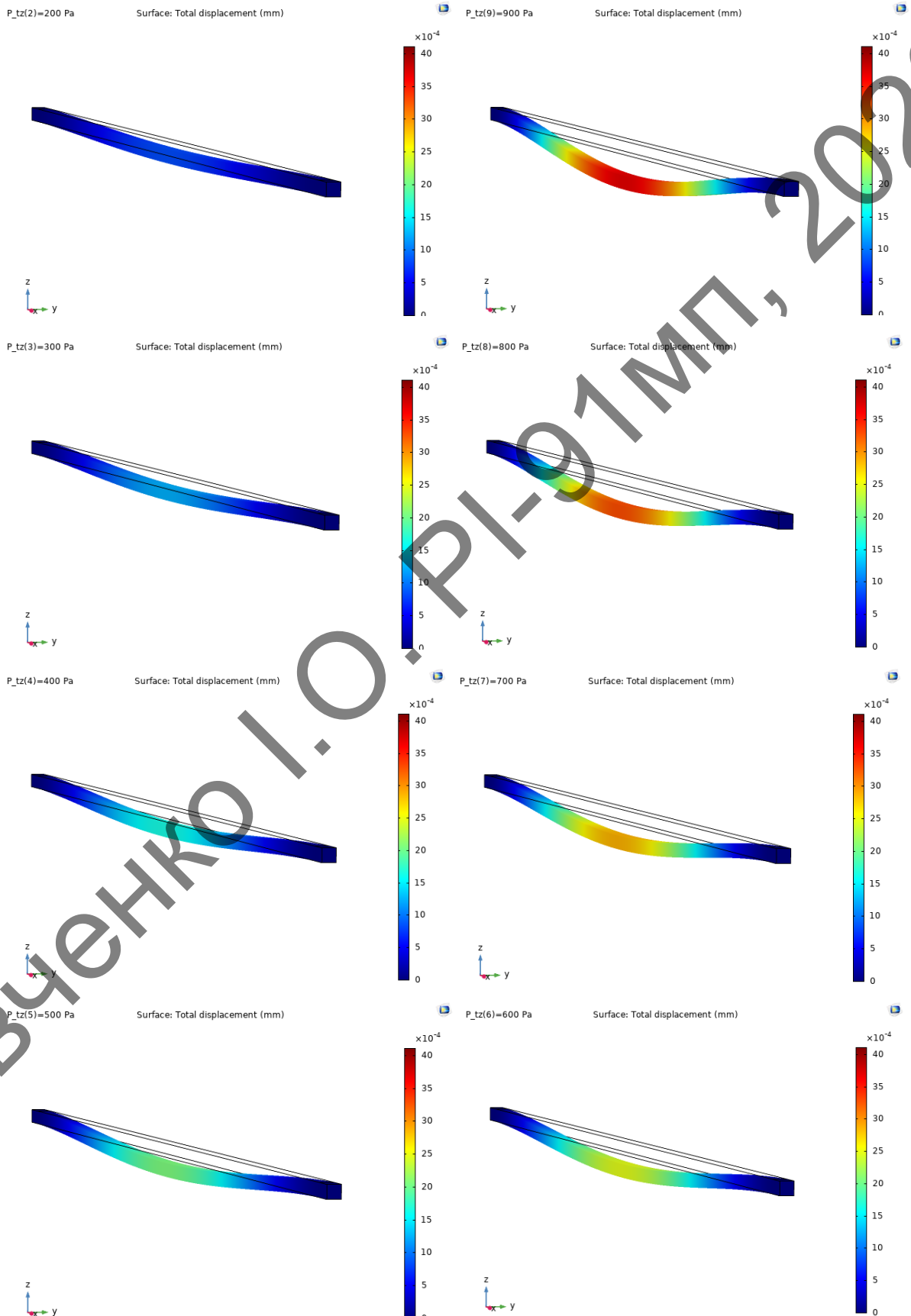
23. Информационные технологии в моделировании и проектировании технических объектов [Электронный ресурс] // ТГТУ. — Режим доступа до ресурсу: <https://www.tstu.ru/book/elib3/mm/2017/maistrenko/t4.html> — Назва з екрану — 10.12.2020.

24. Анализируйте, прогнозируйте поведение и оптимизируйте инженерные расчётные проекты с помощью пакета COMSOL Multiphysics [Электронный ресурс] // Comsol. — Режим доступа до ресурсу: <https://www.comsol.ru/> — Назва з екрану — 10.12.2020.

25. Оперативна пам'ять комп'ютера — як збільшити обсяг правильно [Электронный ресурс] // totrdlo. — Режим доступа до ресурсу: <https://totrdlo.ru/uk/operativnaya-pamyat-kompyutera-kak-uvelichit-obem-pravilno-ddr2-i-ddr3.html> — Назва з екрану — 10.12.2020.

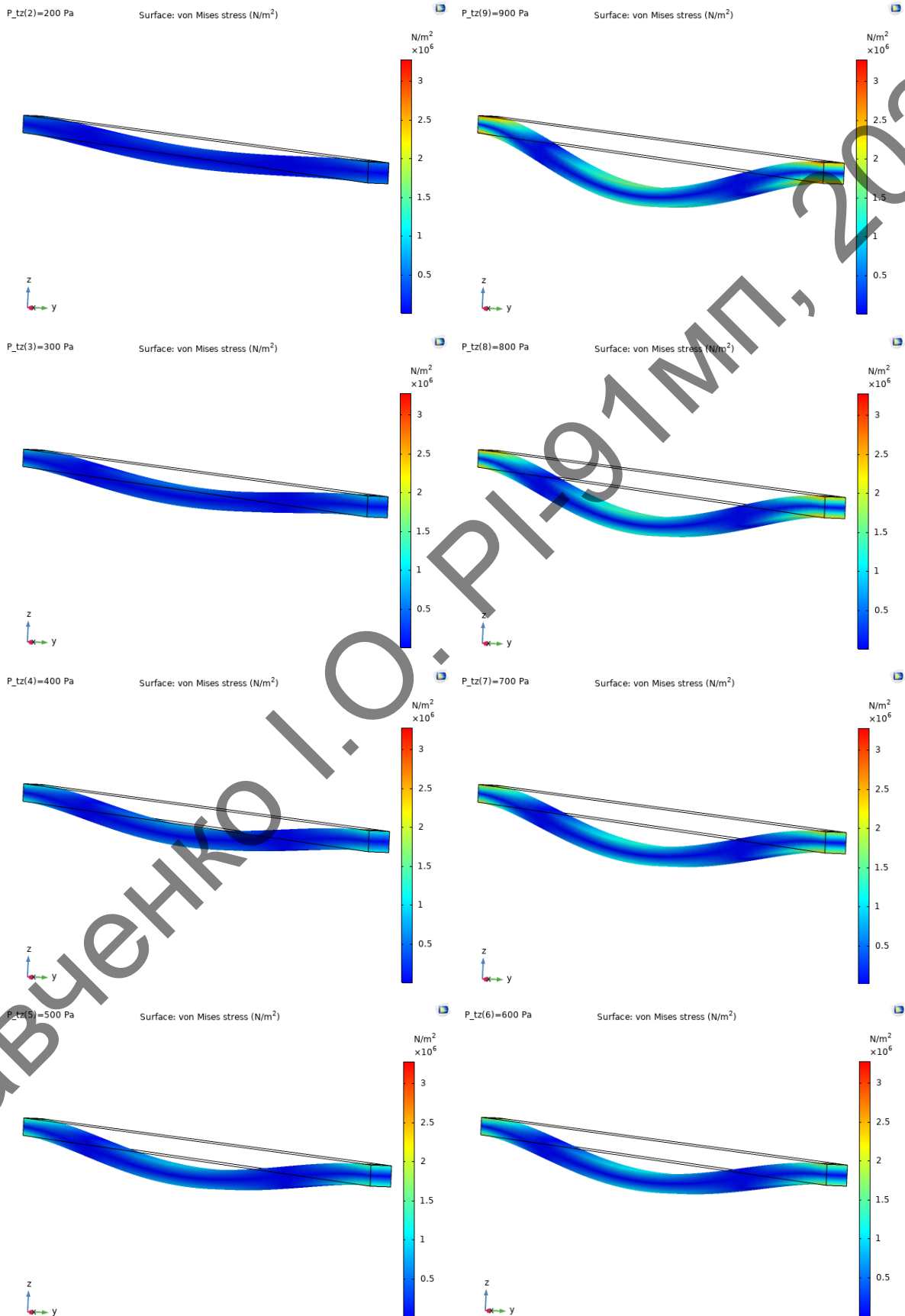
ДОДАТОК А

3D ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ЗМІЩЕННЯ ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТУ



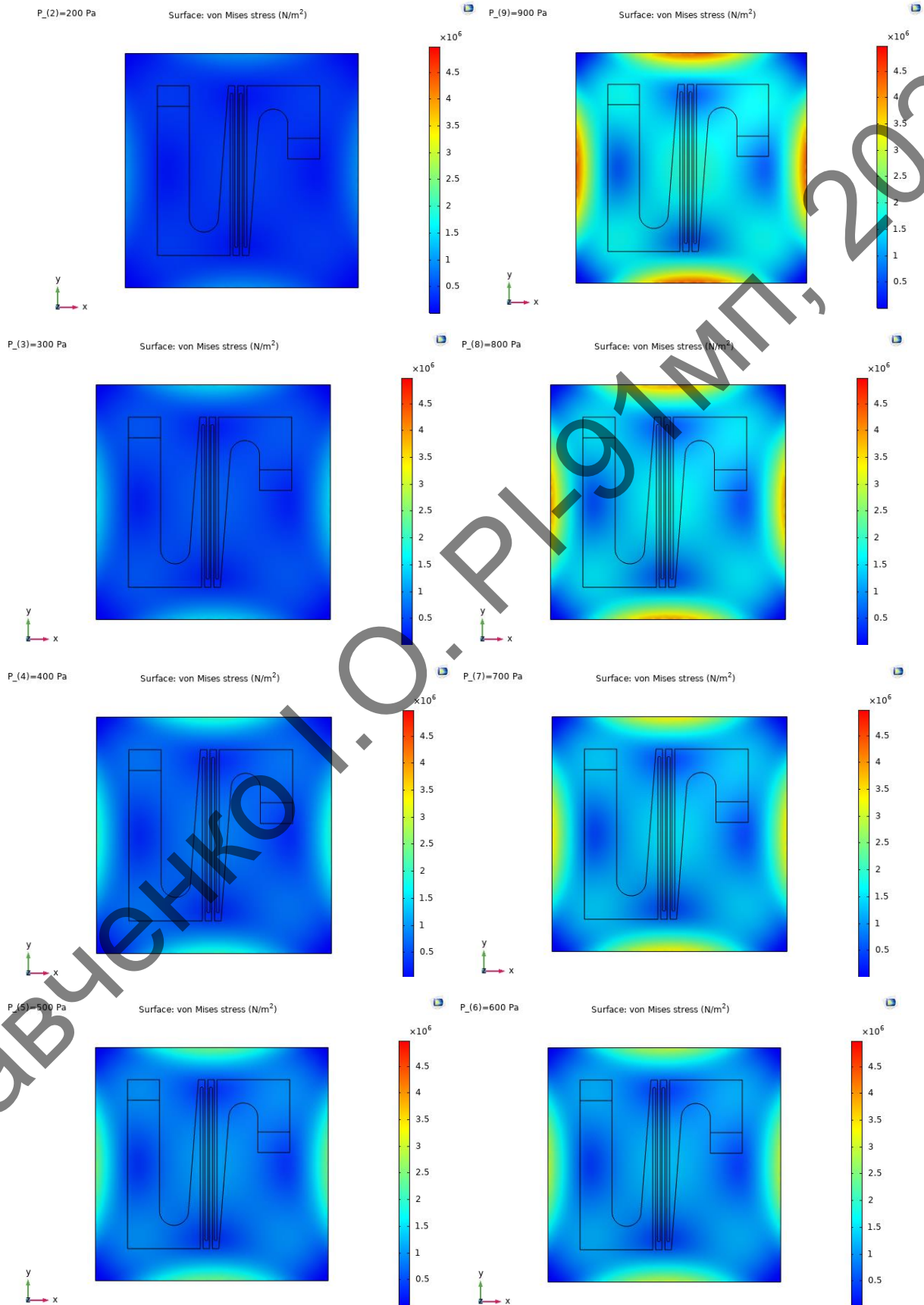
ДОДАТОК Б

МЕХАНІЧНІ НАПРУЖЕННЯ ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТУ



ДОДАТОК В

МЕХАНІЧНІ НАПРУЖЕННЯ МЕМБРАНИ

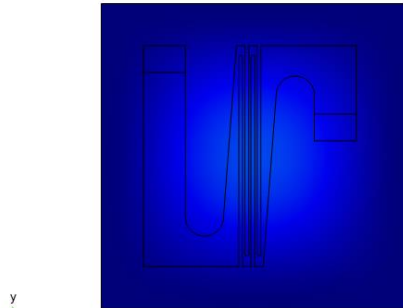


ДОДАТОК Г

3D ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ЗМІЩЕННЯ МЕМБРАНИ

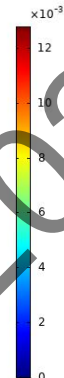
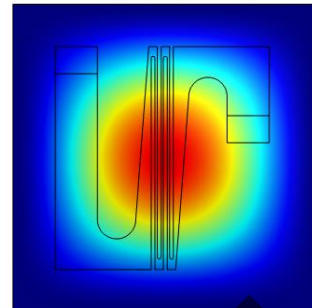
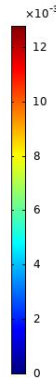
P_(2)=200 Pa

Surface: Total displacement (mm)



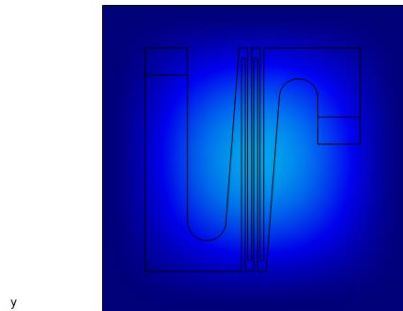
P_(9)=900 Pa

Surface: Total displacement (mm)



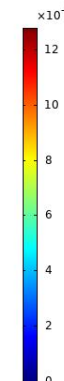
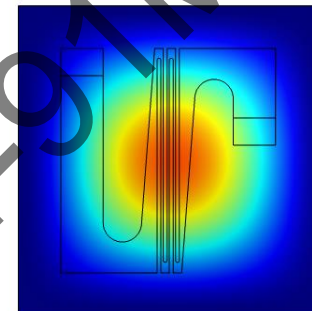
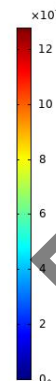
P_(3)=300 Pa

Surface: Total displacement (mm)



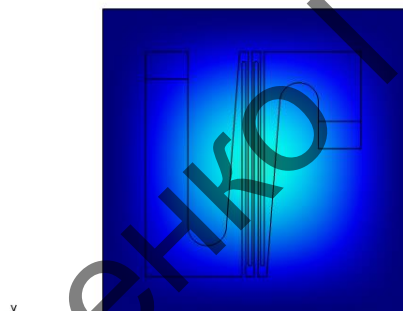
P_(8)=800 Pa

Surface: Total displacement (mm)



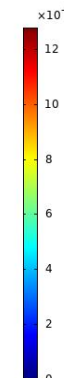
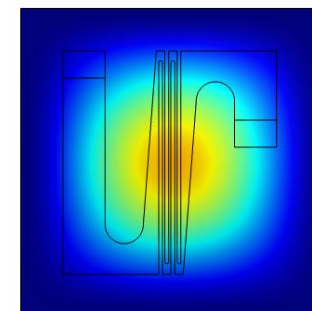
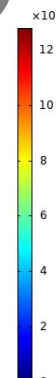
P_(4)=400 Pa

Surface: Total displacement (mm)



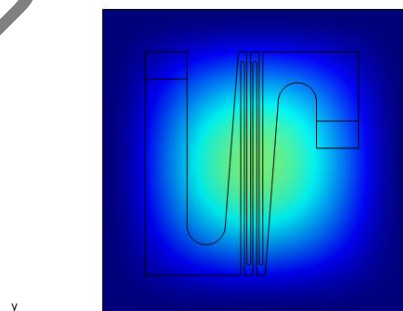
P_(7)=700 Pa

Surface: Total displacement (mm)



P_(5)=500 Pa

Surface: Total displacement (mm)



P_(6)=600 Pa

Surface: Total displacement (mm)

