

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

ІІРЕ ФРЕТІ

(повне найменування інституту, факультету)

Інформації гасиології енекиронних засобів

(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему Методи моделювання електричних
мікросистемної техніки

Виконав: студент(ка) 2 курсу, групи РІ-58ш
Назаренко Т.А.

Спеціальності 172 Інженерія та радіотехніка
 (код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Інженерія гасиології мікросистемної
радіоселекційної техніки
 (прізвище та ініціали)

Керівник Фурманова Т.І.
 (прізвище та ініціали)

Рецензент Воскобойник В.О.
 (прізвище та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
 Національний університет «Запорізька політехніка»
 (повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут, факультет МРЕ, ДРЕТН
 Кафедра МВЕЗ
 Ступінь вищої освіти магістр
 Спеціальність Інтегрована механіка мікросистемної радіомеханіки РММ
 (код і найменування)
 Освітня програма (спеціалізація) на спеціалізації по радіомеханіка
 (назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Г. М. Шенко
 « 16 » чэрне 20 19 року

ЗАВДАННЯ
 НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

Назаренко Фемлі Анатоліївни
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Методи моделювання електричних мікросистемної техніки

керівник проекту (роботи) Гурманова Н. І., к. т. н., доцент
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від « 08 » листопада 20 19 року № 368

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 16 червня 2019 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Об'єкт - елементи мікросистемної техніки, середовища моделювання ANSYS, EMWorks

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Діагностика помилок та термінів. 2. Елементи мікросистемної техніки як об'єкт моделювання. 3. Універсальні САЕ системи для моделювання. 4. Формат виконання математичного аналізу електричного приводу в ANSYS 6.1. 5. Елементи об'єкту моделювання. 6. Особливі умови та безпека у надзвичайних ситуаціях.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Презентація

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1	Гурманова Н.І., к.т.н., доц. каф. ІМЕЗ		
2	Гурманова Н.І., к.т.н., доц. каф. ІМЕЗ		
3	Гурманова Н.І., к.т.н., доц. каф. ІМЕЗ		
4	Гурманова Н.І., к.т.н., доц. каф. ІМЕЗ		
5	Лівошенко Т.В., к.е.н., доц. каф. ТАНІС ВД		
6	Дімішов Ю.В., к.т.н., доц. каф. ОП:НС		
7	Госюнова І.Є., ст. викл. каф. ІМЕЗ ІІРОП		

7. Дата видачі завдання « 03 » вересня 20 19 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Огляд літературних джерел за тематичною тематикою	24. 09. 19	
2	Аналіз методів моделювання елементів мікродвистійної техніки	15. 10. 19	
3	Аналіз елементів автоматизованого проектування для елементів МСТ	22. 10. 19	
4	Проведення аналізу стириманню результатів	05. 11. 19	
5	Проведення моделювання в об'єкті САПР	19. 11. 19	
6	Оформлення патентованої документи та графічних матеріалів	3. 12. 19	

Студент(ка)

(підпис)

Назаренко Т.А.
(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)

(підпис)

Гурманова Н.І.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

ПЗ: 95 с., 34 рисунки, 5 джерел.

Об'єкт дослідження — методи моделювання елементів мікросистемної техніки.

В магістерській роботі розглядаються питання застосування програмних засобів, які використовуються при проектуванні пристроїв мікросистемної техніки. Наводяться відомості про спеціалізовані системи проектування, про універсальні САЕ- і інших пакетах програм, які забезпечують вирішення завдань моделювання і розробки елементів мікросистемної техніки.

MEMC, CAE, MCT, ANSYS, COMSOL Multiphysics, ALGOR, EMSWORKS

ЗМІСТ

ВСТУП	4
ЗМІСТ	5
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	7
ВСТУП	8
1 ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТА ТЕРМІНИ	9
2 ЕЛЕМЕНТИ МІКРОСИСТЕМНОЇ ТЕХНІКИ ЯК ОБ’ЄКТИ МОДЕЛЮВАННЯ	16
2.1 Методи моделювання елементів.....	16
2.2 Чисельне моделювання.....	18
2.3 Моделювання за допомогою схем заміщення.....	20
2.4 Поведінкові моделі елементів мікросистемної техніки	22
2.5 Постановка задачі.....	23
3 УНІВЕРСАЛЬНІ САЕ СИСТЕМИ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ	25
3.1 ANSYS	25
3.2 COMSOL Multiphysics	32
3.3 ALGOR	38
4 ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ МАГНІТНОГО АНАЛІЗУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПРИВОДУ В ANSYS 6.1	42
4.1 Побудова геометрії.....	43
4.2 Виконання логічної операції перекриття.....	46
4.3 Завдання матеріалів та визначення їх властивостей	46
4.4 Генерування стінки кінцевих елементів	49
4.5 Додаток навантажень	53
4.6 Отримання рішень.....	56
4.7 Перегляд результатів	57
4.8 EMS від EMSWORKS.....	60
5 ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ МОДЕЛЮВАННЯ	687
5.1 Планування моделювання моделі рупорної антени	67

5.2	Визначення витрат на моделювання моделі.....	70
5.2.1	Розрахунок основної заробітної плати.....	70
5.2.2	Розрахунок додаткової заробітної плати	71
5.2.3	Відрахування на єдиний соціальний внесок	71
5.2.4	Визначення затрат на матеріали	71
5.2.5	Витрати на спеціальне обладнання	72
5.2.6	Інші прямі витрати	76
5.2.7	Розрахунок накладних витрат	787
5.3	Розрахунок техніко-економічної ефективності моделі	798
6	ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	80
6.1	Аналіз потенційних небезпек.....	80
6.2	Заходи з забезпечення безпеки	81
6.3	Заходи з виробничої санітарії та гігієни праці	82
6.4	Заходи з пожежної безпеки	88
6.5	Заходи забезпечення безпеки у надзвичайних ситуаціях	90
	ВИСНОВКИ.....	92
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	94

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

МСТ – мікросистемна техніка

МЕМС – мікроелектромеханічна система

ROM – Reduced Order Model

МСЕ – метод кінцевих елементів

APDL – мова параметричного моделювання

CAE – Computer Aided Engineering

CAD – Computer Aided Design

CAM – Computer Aided Manufacturing

САПР – система автоматизованого виробництва

ВСТУП

З середини 80-х років минулого століття одним з найбільш динамічна розвинутих науково-технічних напрямків є мікросистемна техніка (МСТ), що виникла на стику електроніки, механіки та оптики, що включається в себе надмініатюрні механізми, прилади, машини з раніше недосяжними масогабаритами, енергетичними показниками і функціональними параметрами, створювані інтегрально-груповими економічно ефективними процесами мікро- і нанотехнологій.

Мікроелектромеханічні системами (МЕМС) називають пристрої з інтегрованими в обсязі або на поверхні твердого тіла електронними та мікромеханічними структурами. Статична або динамічна сукупність цих структур забезпечує реалізацію процесів генерації, перетворення, передачі енергії і механічного руху в інтеграції з процесами сприйняття, обробки, передачі та зберігання інформації.

1 ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТА ТЕРМІНИ

1.1 Поняття про мікросистемну техніку

Мікросистеми в функціонально завершеному вигляді представляють собою інформаційно-керуючі системи різного призначення, структурно об'єднують підсистеми збору і обробки інформації, що виробляють впливу на виконавчі пристрої і далі - на об'єкт управління.

Функціональними мікропристроями інформаційно-керуючої частини мікросистем є: перетворювачі фізичних величин, підсилювачі, аналогові ключі та комутатори, подільники частоти, перетворювачі цифро-аналогові і аналого-цифрові, мікроконтролери, мікропроцесори і цифрові процесори сигналів, цифрові і логічні схеми, запам'ятовуючі пристрої.

Функціональними виконавчими мікропристроями мікросистем є мікродвигуни, мікроелементи гідравліки, мікросопла, мікропоршні, мікроредуктори, мікродзеркала, мікропривід, конструктивно виконані в обсязі і на поверхні напівпровідникового кристала з застосуванням базових і модифікованих процесів мікроелектроніки, оптоелектроніки, пьезоелектроніка і ін.

Мікросистема техніка - сукупність науково-технічних і технологічних способів, що забезпечують створення в обсязі і (або) на поверхні твердого тіла впорядкованої композиції мікронних і субмікронних областей матеріалів із заданими складом, структурою і геометрією, і спрямована на реалізацію функцій сприйняття, перетворення, зберігання, обробки, трансляції інформації, енергії, руху і вироблення керуючих впливів в необхідних режимах і умовах експлуатації.

Виріб мікросистемої техніки (мікросистема) – сукупність мікроелектронних керуючих і функціональних виконавчих елементів і компонентів в єдиному конструктивному виконанні, принцип дії яких

заснований на електрофізичних, електромеханічних, електрохімічних, електронно-оптичних, фотохімічних процесах і явищах з урахуванням ефектів масштабування при переході від макро- до мікро- і нанорозмірних рівнів, і призначених для реалізації функцій прийому, перетворення, зберігання, передачі інформації, енергії і руху для виконання функції кінцевого призначення в заданих режимах експлуатації.

Елемент мікросистеми: частина мікросистеми або функціонального мікропристрою, що реалізує певну функцію в складі функціонального пристрою або мікросистеми, яка не може бути виділена як самостійний виріб з точки зору вимог до випробувань, приймання, постачання та експлуатації.

Компонент мікросистеми: частина мікросистеми або функціонального пристрою, що реалізує певну функцію в складі функціонального пристрою або мікросистеми, яка може бути виділена як самостійний виріб з точки зору вимог до випробувань, приймання, постачання та експлуатації.

Існують наступні види мікросистем:

- інтегральна мікросистема: мікросистема, мікропристрій і елементи якої неподільно виконані і з'єднані в обсязі і (або) на поверхні кристала;

- гібридна мікросистема: мікросистема, яка містить компоненти, виконані з використанням різних матеріалів і технологій і з'єднані між собою на єдиній конструктивній основі;

- модульна мікросистема: мікросистема, конструктивно об'єднує два або більше мікропристроїв з метою спільного застосування для виконання заданих функцій;

- повна мікросистема: мікросистема, яка містить мікропристрій або елементи, що виконують функції прийому, перетворення, зберігання, передачі інформації, енергії і руху і вироблення керуючого впливу в необхідних режимах і умовах експлуатації і впливу на навколишнє середовище;

- неповна мікросистема: мікросистема, що не виконує одну з функцій прийому, перетворення, зберігання, передачі інформації, енергії і руху і

вироблення керуючого впливу в необхідних режимах і умовах експлуатації і впливу на навколишнє середовище;

- інформаційно-керуюча мікросистема: неповна мікросистема, що забезпечує сприйняття, перетворення виду і форми інформації, її зберігання, обробку і подальшу передачу у вигляді керуючого сигналу для мікросистеми виконання;

Існують наступні види функціональних мікропристроїв в складі мікросистем:

- функціональний мікропристрій: мікропристрій в складі мікросистеми, нерозривно пов'язаний з нею конструктивно, електрично, механічно і забезпечує виконання заданої функції;

- електромеханічний мікропристрій: мікропристрій, що забезпечує виконання функцій за рахунок перетворення електричної енергії в механічну;

- оптоелектромеханічний мікропристрій: мікропристрій, забезпечує виконання функцій за рахунок керування оптичним сигналом або перетворення оптичного впливу за допомогою електромеханічного мікропристрою;

- флюїдні мікропристрої: мікропристрій, що забезпечує виконання функцій за рахунок локалізації, перебігу, поділу, зберігання мікро- і нанокількостей рідини або газу, а також їх фізико-хімічних перетворень під дією зовнішніх електричних, магнітних, оптичних, механічних, теплових і хімічних впливів;

- корпус мікросистеми: частина конструкції мікросистеми, призначена для захисту від зовнішніх дестабілізуючих впливів, використовується при виконанні заданих функцій і забезпечує з'єднання з зовнішніми електричними ланцюгами, механічними і іншими конструкціями;

- мікродвигун: мікропристрій, який виконує кероване перетворення будь-якого виду енергії в роботу. Мікродвіжатель: мікропристрій, який виконує функції автономного або керованого руху;

- мікроактюатор: мікропристрій, яке виконує роботу за рахунок споживання і перетворення енергії.

Існують наступні види елементів мікросистем:

- мікропідвіс: елемент мікросистеми, що з'єднує дві рухомі частини мікросистеми;

- мікробалка: елемент мікросистеми з одним закріпленим кінцем;

- мікроопора: елемент мікросистеми, що з'єднує рухливу частину конструкції з нерухомою основою - підкладкою,

- мікрогребінь: елемент мікросистеми в формі зустрічно-штирбовий консолі, який здійснює заданий рух під впливом керуючого сигналу;

- мікроторсіон: елемент мікросистеми, що працює на вигин і крутіння під впливом керуючого сигналу;

- мікроякор: елемент мікросистеми, нерухомий і службовець для закріплення інших його частин або виконує допоміжні конструктивно-технологічні функції;

- мікроричаг: елемент мікросистеми, що має точку опори і при впливі керуючого сигналу виконує функцію урівноваження більшої сили меншою;

- мікрозажим: елемент мікросистеми, який здійснює керовану фіксацію інших його функціональних частин;

- мікропружина: елемент мікросистеми, що виконує функцію тимчасового накопичення енергії за рахунок пружної деформації при впливі керованої навантаження;

- мікромаховик: елемент мікросистеми, що виконує функцію акумулятора механічної енергії для вирівнювання обертають моментів і навантаження мікрочастин;

- мікроклапан (мікрозаслонка): елемент мікросистеми, що виконує функцію управління витратою рідини, пари або газу шляхом керованої зміни площі прохідного перетину;

- змінний мікроіндуктор: елемент мікросистеми, що виконує функцію перетворення електричної енергії в енергію змінного магнітного поля,

індуктивність якого змінюється шляхом керованого переміщення елементів мікроструктури;

- змінний мікроконденсатор: елемент мікросистеми, що виконує функцію керованого конденсатора, ємність якого змінюється шляхом переміщення елементів мікроструктури;

- Мікросопла: елемент мікросистеми, що представляє собою канал спеціального профілю, призначений для керованого розгону мікрооб'ємів рідин або газів до заданої швидкості і додання їх потоку заданого напрямку;

- мікродроссель: елемент мікросистеми, що забезпечує зниження тиску мікрооб'ємів рідин або газів при їхньому проходженні через звуження в каналі або пористу перегородку;

Існують наступні види компонентів мікросистем:

- мікропривід: компонент мікросистеми, який використовується для приведення мікрооб'єктів в стан гармонійних коливань або обертань під впливом керуючого сигналу;

- мікротрансмісія: компонент мікросистеми, який використовується для передачі обертання від мікродвигуна до споживачів енергії;

- мікроредуктор: компонент мікросистеми, що використовує зубчасту або черв'ячну передачу для керованої зміни кутовий швидкості і моменту обертання мікрооб'єктів;

- мікропоршень: компонент мікросистеми, який щільно перекриває поперечний переріз мікрооб'єкту і переміщається в напрямку його осі при подачі керуючого сигналу або активує енергії;

- мікромембрана: компонент мікросистеми в вигляді тонкої плівки або пластини, закріплений по контуру і працює на прогин або вібрацію під впливом керуючого сигналу;

- зубчаста мікропередача: компонент мікросистеми, призначений для передачі обертального руху, зміни частоти, напрямку і характеру обертання під впливом керуючого сигналу;

- зубчасте мікроколесо: компонент мікросистеми, що має форму зубчастого колеса і призначений для передачі лінійного руху, зміни швидкості, напрямку і характеру руху під впливом керуючого сигналу;
- мікроперемикач: частина конструкції мікросистеми, що виконує функцію керованого фізичного замикання або розмикання контактів;
- керований мікрофільтр: компонент мікросистеми, що забезпечує кероване поширення механічних впливів або електромагнітних хвиль оптичного діапазону;
- мікронасос: компонент мікросистеми, що виконує функцію керованого напірного переміщення мікрооб'ємів рідини, пара або газу в результаті повідомлення їм енергії;
- мікрореактор: компонент мікросистеми, в обсязі якого проходять керовані хімічні реакції.

1.2 Опис моделей елементів мікросистемної техніки

Моделювання мікромеханічних пристроїв може викликати значні труднощі. Це пояснюється тим, що для створення і аналізу моделей цих пристроїв, як правило, необхідне рішення комплексу пов'язаних завдань, що описують різні за своєю природою фізичні ефекти. Відомий ряд способів опису поведінки елементів МСТ: від аналітичного опису за допомогою формул до тривимірного чисельного моделювання. Останнім часом приділяється велика увага проблемі комп'ютерного моделювання МЕМС. Значний практичний інтерес представляє чисельне моделювання, так як воно дозволяє найбільш повно враховувати взаємодію процесів різної фізичної природи для елементів довільної форми. Використання пакетів чисельного моделювання, що реалізують метод кінцевих елементів, робить можливим детальне вивчення процесів, покладених в основу чутливих і виконавчих пристроїв МСТ.

2 ЕЛЕМЕНТИ МІКРОСИСТЕМНОЇ ТЕХНІКИ ЯК ОБ'ЄКТИ МОДЕЛЮВАННЯ

2.1 Методи моделювання елементів

Мікросистемна техніка є в даний час одним з найбільш динамічно розвивинених напрямків мікроелектроніки і передбачає виготовлення в єдиному технологічному циклі не тільки інтегральних схем обробки даних, а й інтегральних пристроїв збору інформації (мікросенсорів) і виконавчих механізмів (мікроактюаторов). Пристрої МСТ включають також мікромініатюрні джерела живлення, мікродвигуни, мікродозатори, мікронагрівачі і мікрохолодильники, мікромеханічні резонатори, випромінювальні пристрої (лазери і світлодіоди), струменеві і лазерні друкують устрою, кантілевери, носії інформації і т. п. Застосування МЕМС в поєднанні з традиційними елементами напівпровідникових інтегральних схем дозволяє істотно підвищити рівень інтеграції, а також значно зменшити розміри електронних пристроїв.

Внаслідок цього технології мікросистемної техніки в даний час відносяться до найбільш перспективних напрямків мікроелектроніки, дозволяючи реалізувати багатофункціональні мікросистеми на одному кристалі. Приклад складної мікросистеми, виконаної на одній підкладці і включає як сенсорні, так і виконавчі компоненти, представлений на рис. 2.1. Приклади конструкцій різних виконавчих мікросистемних елементів наведені на рис. 2.2.

Розробка і дослідження компонентів сучасних мікроелектромеханічних систем (МЕМС) пов'язані з вирішенням завдань математичної фізики, до яких відносять задачі теплопровідності, дифузії, електростатики та електродинаміки, завдання про перебіг рідини, про розподіл щільності електричного струму в провідному середовищі, про деформації твердих тіл і багато інших. Крім того, моделювання мікропристроїв вимагає врахування

таких факторів, як опір повітря і сили тяжіння в електростатичних пристроях, облік поверхневого натягу рідини в рідинних пристроях і т. д. Приклад такого завдання (аналіз електростатичного перемикача), рішення якої вимагає проведення пов'язаного електростатичного-структурного розрахунку з урахуванням опору повітря, представлений на рис. 2.3.

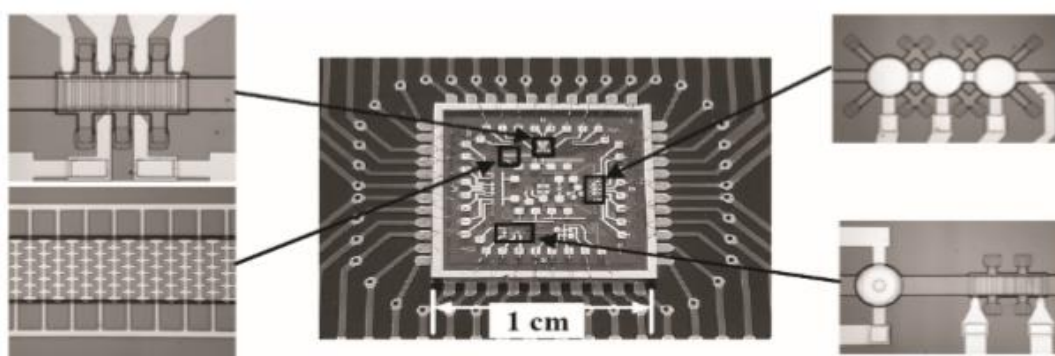


Рисунок 2.1 - Аналітичний мікрофлюїдний чіп, виготовлений за технологією поверхневої мікрообробки. Мікрофлюїдні пристрої, показані на малюнку: (зліва направо, за годинниковою стрілкою) перистальтичний мікронасос, емнісний датчик витрати, теплової датчик витрати.

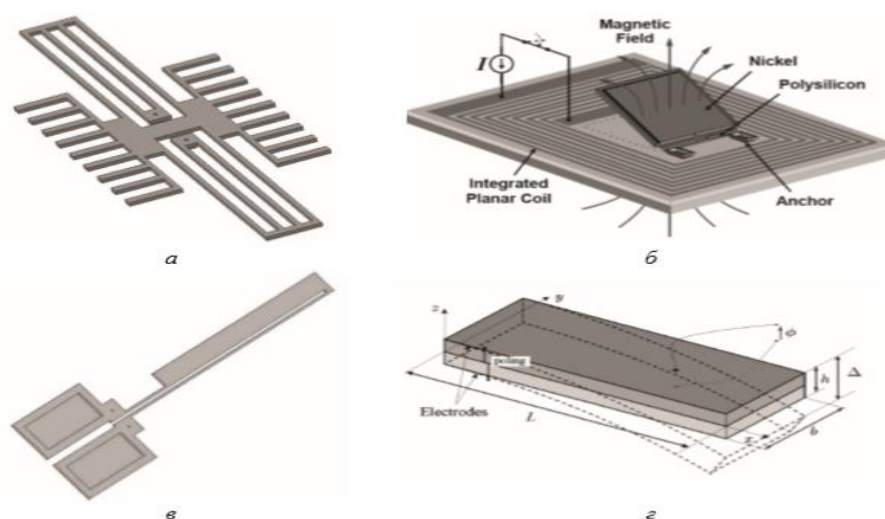


Рисунок 2.2 - Приклади мікроактюаторів різних типів: *a* - елемент електростатичного двигуна; *б* - магнітний актюатор; *в* - П-подібний теплової актюатор; *г* - п'єзоелектричний біморфний актюатор.

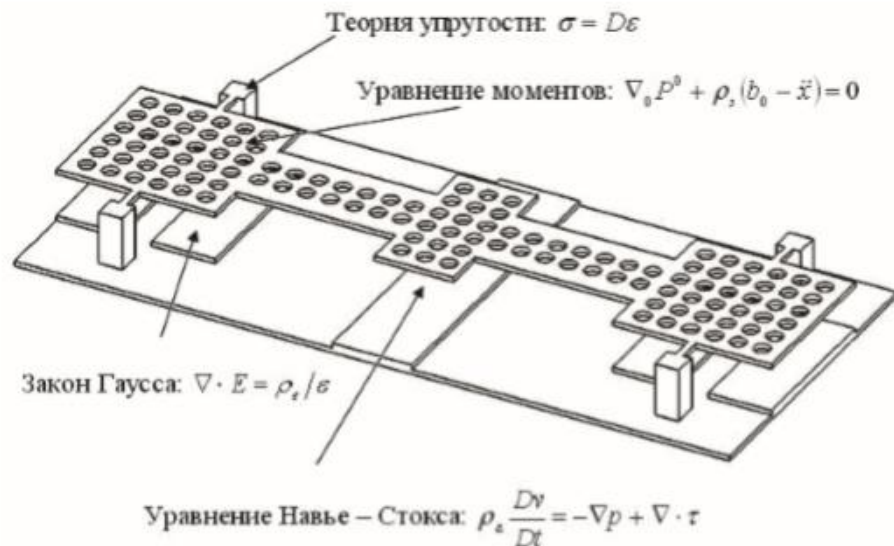


Рисунок 2.3 - Пов'язаний аналіз на прикладі електростатичного перемикача.

Огляд джерел, присвячених моделюванню мікромеханічних пристроїв, показує, що при описі моделей МСТ-пристроїв використовуються аналітичні методи, чисельні методи (методи скінченних елементів, кінцевих різниць, кінцевих обсягів), поєднання декількох способів опису.

Останнім часом особливо широко став використовуватися метод скінченних елементів. З поширенням цього методу створені моделі як простих електростатичних (електростатичні дзеркала, перемикачі) та п'єзоелектричних пристроїв (п'єзоелементи, п'єзотрансформатор), так набагато більш складних конструкцій (мікрореактори, мікронасоси, п'єзоелектричні двигуни), при цьому одночасно враховується взаємодія різних фізичних процесів в пристроях. Крім того, розвивається напрямок створення поведінкових моделей пристроїв на основі кінцево-елементних моделей, що дозволяє значно скоротити тимчасові витрати при моделюванні великих систем, що включають виконавчі елементи.

2.2 Чисельне моделювання

Чисельне моделювання включає метод кінцевих елементів, метод скінченних об'ємів, метод граничних елементів. Чисельне моделювання дозволяє детально досліджувати поведінку аналізованої структури. Найбільшого поширення набув метод кінцевих елементів. На ньому засновано більшість програм моделювання МЕМС. В основі методу лежить дискретизація об'єкта з метою вирішення рівнянь механіки суцільного середовища в припущенні, що ці співвідношення виконуються в межах кожної з елементарних областей. Ці області називаються кінцевими елементами. Вони можуть відповідати реальній частині простору, як, наприклад, просторові елементи, або ж бути математичною абстракцією, як елементи стрижнів, балок, пластин або оболонок. В межах кінцевого елемента призначаються властивості обмежує їм ділянки об'єкта (це можуть бути, наприклад, характеристики жорсткості та міцності матеріалу, щільність і т.д.) І описуються поля цікавлять величин (переміщення, деформації, напруження і т.д.). Параметри з другої групи призначаються в вузлах елемента, а потім вводяться і інтерполюють функції, за допомогою яких відповідні значення можна обчислити в будь-якій точці всередині елемента або на його кордоні. Завдання математичного опису елемента зводиться до того, щоб зв'язати діючі в вузлах чинники. Наприклад, переміщення і зусилля. Метод кінцевих елементів дозволяє вирішувати завдання знаходження власних частот елементів МЕМС; визначення напружень і деформацій в умовах статичного навантаження конструкцій; визначення відгуку конструкції на впливу, що змінюються в часі.

Перший етап в процедурі чисельного аналізу (рис. 2.4) - це створення моделі аналізованої структури. Цей етап може бути виконаний різними способами і залежить від можливостей використовуваних пакетів. Модель може створюватися автоматично на основі вже існуючих фотошаблонів в форматах CIF або GDSII, або використовуються спеціальні програми

твердотільного моделювання (або вбудовані в обчислювальні пакети кошти створення геометричних моделей). Як тільки модель створена, задаються властивості матеріалів, вибирається тип аналізу, і модель розбивається на кінцеві елементи.

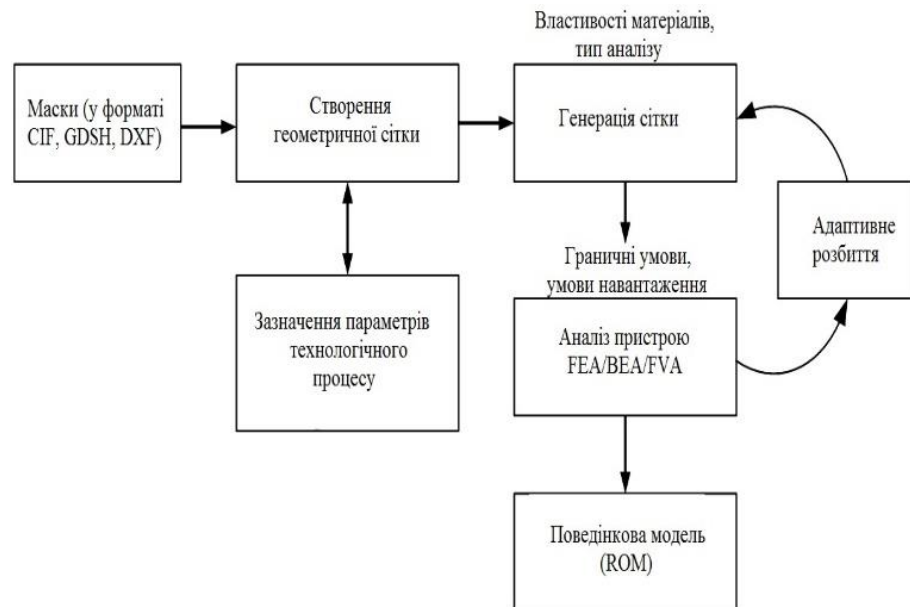


Рисунок 2.4 - Етапи моделювання за допомогою методу кінцевих елементів

Метод граничних елементів вимагає нанесення сітки тільки на зовнішніх поверхнях моделі, в той час як інші два методи вимагають розбиття на елементи всього обсягу моделі. Після того, як сітка була створена, вказуються навантаження на модель і граничні умови. Після закінчення аналізу результати досліджують, щоб визначити, чи добре задовольняє сітка прикладеному навантаженню і граничним умовам. Після цього може знадобитися доопрацювання сітки і повторний аналіз. Деякі пакети можуть виконувати цю процедуру автоматично, використовуючи технологію адаптивного розбиття, яка дозволяє автоматично налаштовувати щільність сітки так, щоб критичні ділянки мали кращу якість сітки, ніж некритичні ділянки. Отримані в результаті результати можуть використовуватися для оптимізації конструкції, доробки технології (мінімізації залишкових напруг при виробництві) і для

створення поведінкової моделі структури, необхідної для аналізу роботи пристрою в складі підсистеми або системи.

2.3 Моделювання за допомогою схем заміщення

Крім чисельного моделювання пристроїв МСТ широко застосовуються методи аналітичного моделювання і моделювання за допомогою еквівалентних електричних схем. Ці способи дозволяють моделювати роботу пристроїв МСТ спільно зі схемою обробки сигналу на системному рівні. Крім того, використання таких підходів дозволяє значно скоротити час розрахунків, а також знизити вимоги до обчислювальних ресурсів комп'ютерів.

Однак аналітичне рішення може бути отримано тільки для обмеженого кола порівняно простих завдань. У більшості випадків для складної геометрії завдання і при необхідності врахування різних нелінійностей потрібне застосування чисельних методів. Найбільш точний метод - опис за допомогою систем рівнянь в приватних похідних. Цей підхід використовують програми кінцево-елементного аналізу. При цьому завдання моделювання реальної системи стає дуже великою, і для її вирішення потрібні значні обчислювальні ресурси. Виходом з цієї ситуації може бути використання моделей з зосередженими параметрами для опису мікросистеми. Подібною моделлю є, наприклад, модель насоса на рис. 2.5.

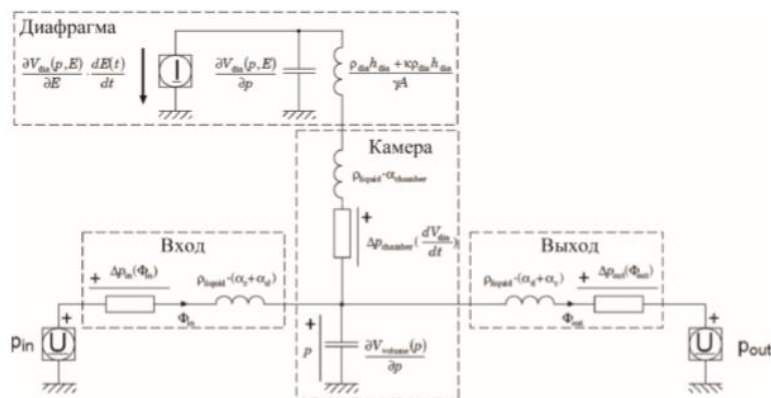


Рисунок 2.5 - Еквівалентна схема мікронасоса

В рамках даного підходу використовується виділення зі структури елементів із зосередженими параметрами, кожен з яких може бути описаний за допомогою простих аналітичних моделей, і для яких можуть бути сформульовані співвідношення між окремими елементами.

2.4 Поведінкові моделі елементів мікросистемної техніки

При великих розмірностях моделей застосування методу скінченних елементів ускладнюється необхідністю використовувати значні обчислювальні ресурси і великими часовими витратами. Тому стає неможливим застосування кінцево-елементних моделей для аналізу виконавчих пристроїв спільно з керуючою схемою. Для вирішення цієї проблеми на основі кінцево-елементних моделей створюються поведінкові моделі.

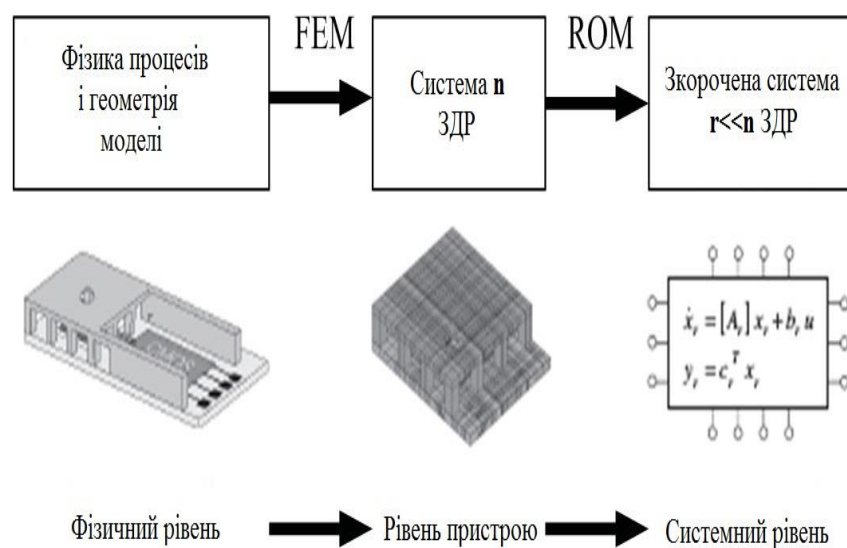


Рисунок 2.6 – Процедура створення ROM моделі

Створення поведінкових моделей засновано на процедурі зменшення порядку (Reduced Order Model - ROM), яка може бути повністю автоматизована. Вона заснована на формальному перетворенні систем диференціальних рівнянь в приватних похідних до систем звичайних

диференціальних рівнянь нижчого порядку (рис. 2.6). ROM-модель порядку вимагає меншої кількості компонентів або меншої кількості рівнянь, ніж деталізована модель системи. Такий підхід забезпечує підвищення ефективності засобів моделювання складних систем.

Один із способів створення поведінкових моделей - метод суперпозиції форм, що передбачає, що основні невідомі, наприклад переміщення $\{u(t)\}$, можуть бути отримані комбінацією (суперпозицією) власних векторів (мод) $\{\varphi_i\}$, помножених на відповідні масштабні коефіцієнти $y_i(t)$:

$$\{u(t)\} = y_1\{\varphi_1\} + y_2\{\varphi_2\} \dots y_p\{\varphi_p\}$$

При цьому використовується обмежене число власних форм коливань, достатню для створення поведінкової моделі з прийнятною точністю. Рисунок 2.7 ілюструє застосування методу суперпозиції форм для створення поведінкової моделі. Для автоматичного створення ROM-моделей можливо використовувати спеціальні програмні засоби (приклад - програма mor4ansys) або вбудовані в пакети чисельного моделювання алгоритми. Моделі скороченого порядку конвертовані в формат VHDL і можуть безпосередньо використовуватися для системного моделювання.

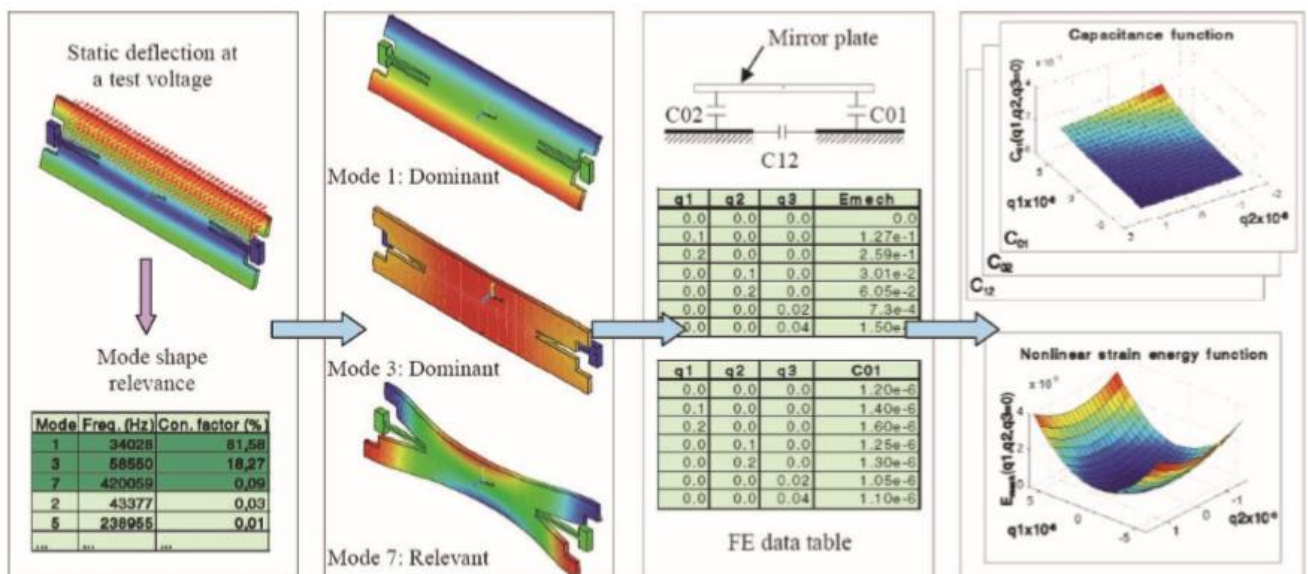


Рисунок 2.7 - Застосування методу суперпозиції форм для створення поведінкової моделі

2.5 Постановва задачі

Завдання освоєння існуючого досвіду з моделювання МСТ представляє інтерес як для дослідницьких, так і для проектних завдань. Аналіз існуючих методик дозволяє визначити конкретні підходи до використання пакетів, що виконують моделювання складних фізичних процесів, для аналізу поведінки пристроїв МСТ. Вибір на користь аналітичного опису або чисельного моделювання визначається специфікою конкретного завдання. У багатьох випадках найкращий ефект досягається шляхом комбінування різних підходів. На ранніх стадіях проектування, як правило, використовуються аналітичні моделі. Детальне вивчення пристроїв зазвичай проводиться чисельними методами. Для аналізу МЕМС на системному рівні використовують поведінкові моделі, отримані шляхом зниження порядку складності вихідної моделі.

3 УНІВЕРСАЛЬНІ САЕ – СИСТЕМИ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ

До даної групи належать програмні засоби чисельного аналізу, що охоплюють широке коло завдань, пов'язаних з вивченням різних фізичних процесів в прикладних і наукових завданнях. Найбільш поширені системи, що використовують рішення систем диференційних рівнянь в приватних похідних методом кінцевих елементів (МСЕ), хоча використовуються і системи, засновані на методах скінченних різниць та скінченних об'ємів. Існуючі САЕ-системи можна поділити на інженерні та наукові. Перші, як правило, орієнтовані на рішення певного класу задач (наприклад, механіки - CosmosWorks, електрику і магнетизм - CosmosEMS і ін.). Наукові дослідні пакети, наприклад, ANSYS, COMSOL Multiphysics, FlexPDE, мають більшу гнучкість і дозволяють вирішувати завдання в самих різних областях. Діапазон застосування таких пакетів дуже широкий. Поряд з вирішенням наукових фізичних завдань вони знаходять застосування в машинобудуванні, електроніці, авіа- і ракетобудуванні, хімії, біології та інших прикладних науково-технічних напрямках. Окремим видом систем, використовуваних для дослідження МЕМС, є універсальні програми, які використовують імітаційне моделювання за допомогою спрощених моделей. До таких засобів відноситься, наприклад, пакет MATLAB \ Simulink.

3.2 ANSYS

Програмний комплекс ANSYS являє собою багатоцільовий пакет кінцево-елементного аналізу для вирішення складних наукових і технічних завдань. Розробником пакета ANSYS є компанія ANSYS, Inc., США. В даний час цей пакет лідирує серед універсальних дослідних САЕ-систем з повним охопленням явищ різної фізичної природи. ANSYS дозволяє: враховувати різноманітні конструктивні нелінійності; вирішувати завдання при наявності

великих деформацій; виконувати оптимізацію; використовувати адаптивне перебудування сітки; створювати макрокоманди за допомогою мови параметричного програмування (APDL) і т. д. Різноманітність розв'язуваних у ANSYS завдань забезпечується наявністю в ньому сімейства спеціалізованих програм, спрямованих на вирішення окремих класів задач. Програма забезпечує інтеграцію і двосторонній обмін даними практично з усіма CAD / CAE / CAM-системами. Поряд з APDL доступні засоби програмування C ++, C #, Javascripts, XML. Програмні продукти ANSYS сертифіковані згідно з такими міжнародними стандартами: The ISO-9000 series, Lloyd's Register's software certification, NAFEMS QA certification, British standard BS 5750, The TickIT initiative і ін.

Склад пакету ANSYS

Пакет ANSYS має модульну структуру, що включає в себе набір спеціалізованих програм. На основі цих модулів або їх сукупності формуються інструменти аналізу комплексу ANSYS, зокрема: Multiphysics, Mechanical, EMAG, FLOTRAN, LS-DYNA. ANSYS Multiphysics дозволяє проводити наступні види аналізу: структурний аналіз (механіка деформованого твердого тіла); теплової аналіз (рівноважний стан, теплопровідність, конвекція, випромінювання); динамічний аналіз рідини (ламінальний потік, турбулентний потік, вільна, примусова або змішана конвекція); електромагнітний аналіз (Електростатичний, магнитостатичний, аналіз гармонік, модальний аналіз і інші).

ANSYS Mechanical - програма для виконання проектних розробок, аналізу та оптимізації: рішення задач по визначенню міцності конструкцій, теплопередачі і акустики. Ця програма дозволяє визначати переміщення, напруження, зусилля, температури, тиску і інші параметри, важливі для оцінки поведінки матеріалів і міцності конструкцій. Дана програма є підмножиною ANSYS / Multiphysics.

ANSYS Structural - здійснює складний прочностной аналіз конструкцій з урахуванням різноманітних нелінійностей, серед яких геометрична і фізична нелінійність, нелінійне поведінку кінцевих елементів і втрата стійкості. Використовується для точного моделювання поведінки великих і складних розрахункових моделей. Дана програма є підмножиною ANSYS / Mechanical.

ANSYS Thermal - окрема програма, виділена з ANSYS / Mechanical для вирішення теплових стаціонарних і нестаціонарних задач. ANSYS / Emag - програма для чисельного моделювання електромагнітних полів та вирішення завдань, пов'язаних з явищами електрики і магнетизму.

ANSYS / LS-DYNA - програма, призначена для вирішення міцності завдань динаміки при великих нелінійних. Ця програма може використовуватися для чисельного моделювання процесів формоутворення матеріалів, аналізу аварійних зіткнень і ударів при кінцевих деформаціях, включаючи пробивання, нелінійне поведінку матеріалу і контактна взаємодія елементів конструкції.

ICEMCFD - комплексна система генерації будь-яких типів розрахункових сіток, що має прямий інтерфейс з CAD-системами (Pro / Engineer, Catia, Unigraphics, I-DEAS, SDRC, ICEM Surf).

CFX - програмний комплекс, що поєднує можливості аналізу гідрогазодинамічних процесів, багатофазних потоків, хімічної кінетики, горіння, радіаційного теплообміну і багатьох інших. CFX забезпечує прямий інтерфейс до більшості CAD-систем і можливість проводити аналіз спільно з ANSYS Multiphysics.

ANSYS Workbench - нове покоління програмних продуктів, в основу яких покладено об'єктно-орієнтований підхід до інженерного аналізу з використанням при цьому можливостей решателів ANSYS. Це середовище інженерного аналізу надає широкі можливості по інтеграції з CAD-системами (в тому числі двосторонню асоціативний зв'язок). Можна поєднувати процес

проектування в CAD-пакеті з отриманням достовірних даних розрахунків і проведенням оптимізації конструкції.

Модуль паралельних обчислень Parallel Performance for ANSYS дозволяє вирішувати великі завдання як на кластерах обчислювальних станцій, так і на багатопроцесорних станціях.

Застосування ANSYS для проектування елементів MEMC

На рис. 3.1 показаний процес проектування пристрою MEMC з використанням ANSYS. Пакет ANSYS дозволяє не тільки створити геометричну модель пристрою, провести аналіз за допомогою методу скінченних елементів, а й побудувати поведінкову ROM-модель за результатами кінцево-елементного аналізу.

За допомогою пакета ANSYS можна моделювати MEMC, використовуючи елементи з зосередженими параметрами - lumped elements (рис. 2.10).

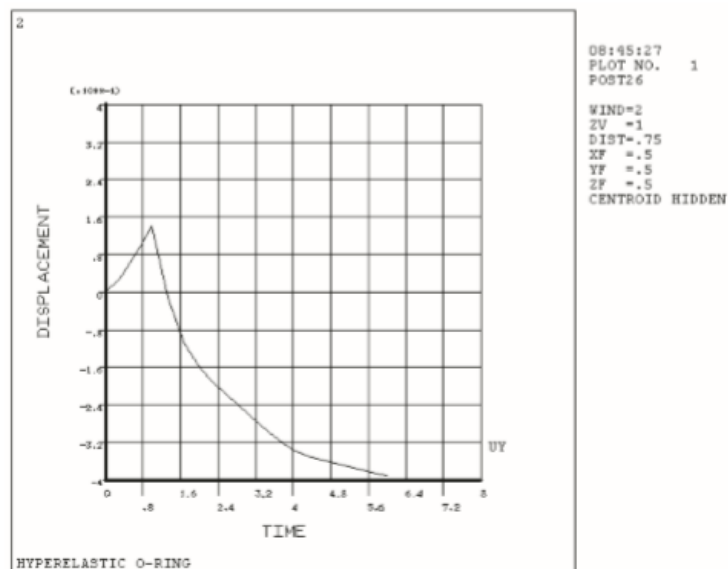


Рисунок 3.1 - Графік, побудований в постпроцесорі POST26

Наведені на рис. 3.12 варіанти представляють різні способи комбінування моделей, в яких лише частина структури замінена елементами з зосередженими параметрами. Зокрема, на рис. 3.2, в показана схема пристрою,

побудована з використанням методу підструктур (substructuring). Застосування спрощених моделей дозволяє істотно знизити загальну кількість невідомих при дослідженні характеристик MEMС.

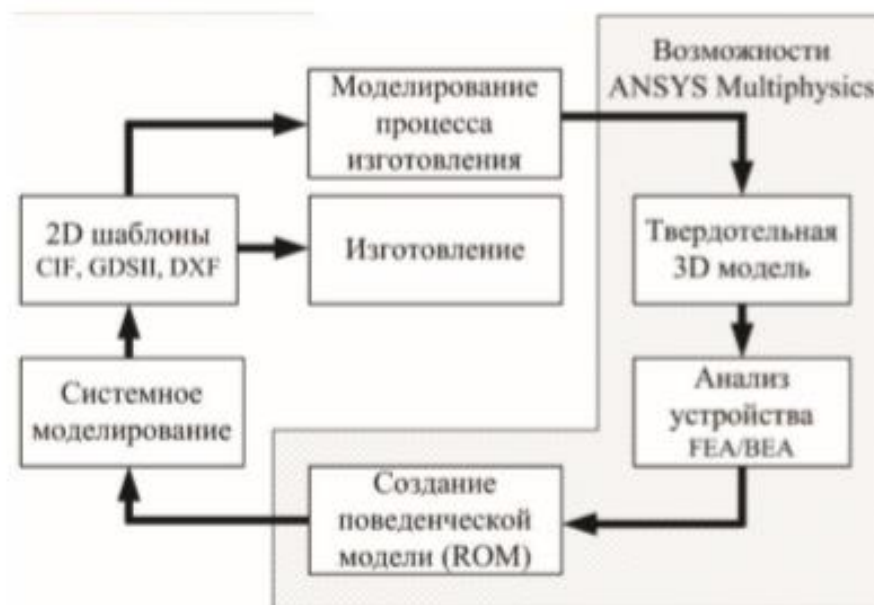


Рисунок 3.2 - Використання ANSYS в проектуванні MEMС

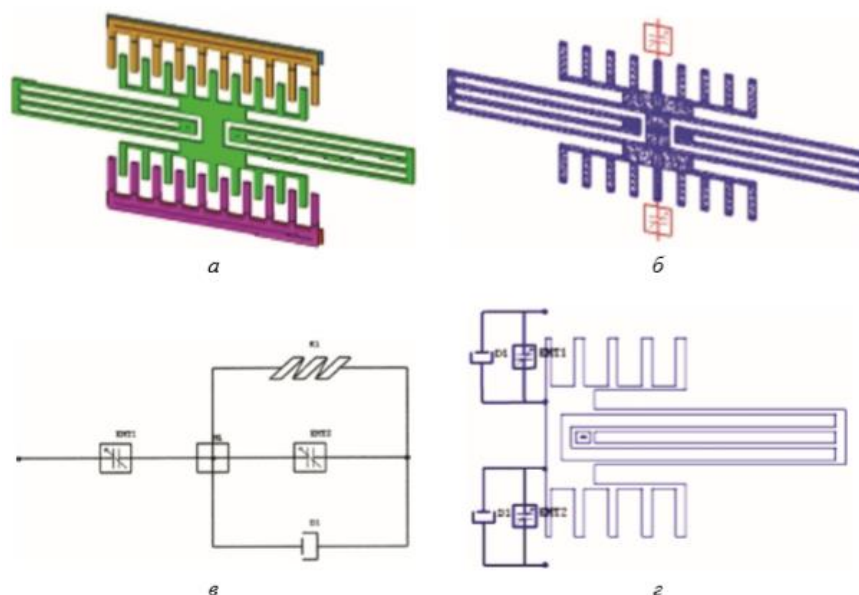


Рисунок 3.3 - Комбіновані моделі MEMС в ANSYS: *а* - геометрична модель електростатичного перетворювача; *б* - звичайно-елементна модель, що включає ROM-моделі смісних елементів; *в* - ROM-модель, яка використовує елементи з зосередженими параметрами; *г* - ROM-модель, яка використовує метод підструктур

Основні класи мікросистемних компонентів, робота яких може бути досліджена в ANSYS, наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 Мікросистемні компоненти і відповідний їм в ANSYS тип аналізу

Мікросистемні компоненти	Відповідний тип аналізу в ANSYS
Теплові друкують головки, термоелектричні приводи	Електротермічний аналіз, термічний - структурний аналіз
П'єзоелектричні друкують головки	Структурний - електричний аналіз
Електростатичні борін двигуни	Електростатичний - структурний аналіз
Рідинні мікросистеми	Аналіз потоку стисливої і нестисливої рідини
П'єзоелектричні актюатори	Модальний, статичний, перехідний
Електро механічні фільтри	Електростатичний - структурний аналіз
Мікродзеркала	Електростатичний - структурний аналіз
Датчик тиску	Ємнісні: електростатичний - структурний аналіз, п'єзорезистивного: структурний - електричний аналіз
Мікроредуктори	Механічний з урахуванням контакту, тертя
термоелектричні актюатори	Електротеплової - структурний аналіз
магнітострикційні актюатори	низькочастотний електромагнітний

На рисунках 3.4-3.6 наведені приклади моделей різних елементів MEMS, створених в ANSYS.



Рисунок 3.4 - Моделі мініатюрного безклапанних п'єзоелектричного насоса з планарним (а) і поперечним (б) розташуванням вводів

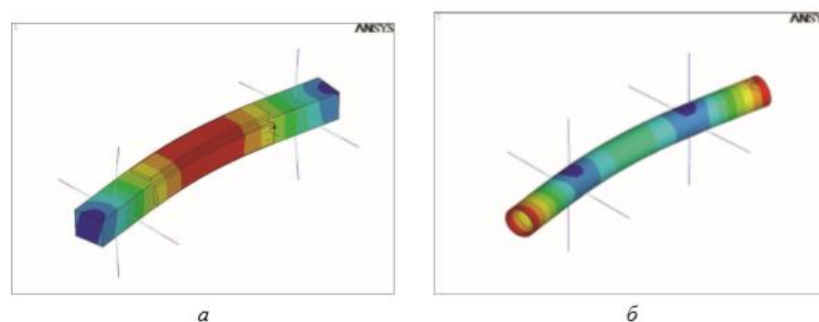


Рисунок 3.5 - Моделі п'єзоелектричних вібраційних гіроскопів: а - с металевим резонатором; б - з трубчастим керамічним резонатором

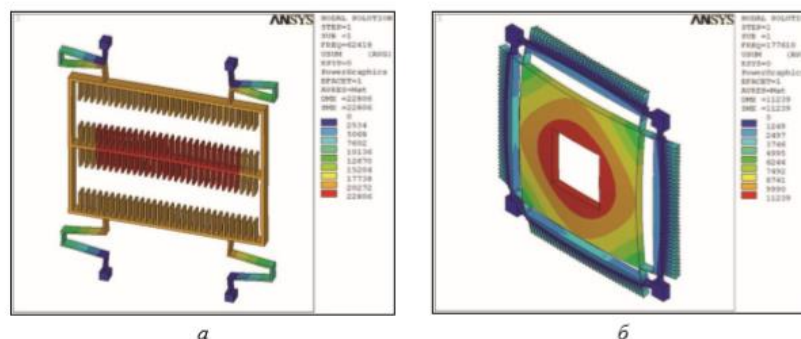


Рисунок 3.6 - Моделювання тунельних мікрогіроскопів в ANSYS

3.3 COMSOL Multiphysics

Пакет COMSOL Multiphysics, як і ANSYS, відноситься до універсальних пакетів кінцево-елементного моделювання наукових та інженерних задач. Пакет дозволяє розширювати стандартні моделі, що використовують одне диференціальне рівняння, в «мультифізичні» моделі для розрахунку пов'язаних між собою фізичних явищ. Взаємодія з програмою можливо

стандартним способом - через графічний інтерфейс користувача (GUI) або програмуванням на мові COMSOL Script або на мові MATLAB. Історію цього пакета можна відраховувати від появи додатки PDEtoolbox системи MATLAB, яке забезпечувало вирішення завдань, що описуються диференціальними рівняннями в приватних похідних, в двомірній постановці. Згодом було розроблено тривимірне додаток, що отримало назву FEMLAB. Починаючи з версій 3.x програма випускалася вже як незалежна від MATLAB додаток. Пакет отримав нову назву - COMSOL, а ще пізніше - COMSOL Multiphysics.

COMSOL Multiphysics забезпечує можливість вирішення завдання як у формальній математичній постановці, так і в фізичному, включаючи розгляд, проведення пов'язаного аналізу. У другому випадку різниця полягає лише в можливості використовувати фізичні системи одиниць і відповідну термінологію як при визначенні параметрів, що входять в рівняння, так і додаткових умов завдання. При цьому користувач працює з рівняннями, що описують певні в завданню фізичні явища.

Серед представлених в пакеті фізичних розділів - механіка (пружні деформації) конструкцій, теплоперенос, інженерна хімія (в тому числі з урахуванням хімічної кінетики), електротехніка, акустика, геофізика, пов'язані явища на мікрорівні, оптичні і високочастотні ефекти. Для аналізу в рамках кожної з перерахованих дисциплін призначений спеціалізований модуль, а для розрахунку пов'язаних завдань між усіма модулями забезпечується ефективна взаємодія. Налаштування режиму роботи при запуску пакета здійснюється за допомогою навігатора моделей - Model Navigator (рис. 3.7).

У вікні навігатора представлені наступні прикладні режими (Application Modes):

COMSOL Multiphysics - багатодисциплінарний пов'язаний аналіз; AC / DC Module - моделювання електромагнітних ефектів (постійний і змінний струм), включаючи електростатики, магнітостатики, квазістатична наближення; Acoustics Module - акустика;

Chemical Engineering Module - аналіз хімічних процесів;

Design Optimization Module - рішення задач оптимізації в комбінації з іншими розрахунковими модулями COMSOL Multiphysics;

Earth Science Module - геофізика - дослідження течій нафти і газу, моделювання підземних стоків і поширення забруднень в ґрунті;

Heat Transfer Module - теплоперенос за допомогою теплопровідності, конвекції і випромінювання;

MEMS Module - розрахунок фізичних процесів в елементах МЕМС;

RF Module - розрахунок електромагнітних полів радіохвиль;

Structural Mechanics Module - структурна механіка (деформація твердого тіла). У вікні навігатора моделей представлений ряд закладок:

Model Library - бібліотека готових моделей для перерахованих вище фізичних розділів;

User Models - моделі, створені користувачем, Open - вкладка для відкриття моделей із зазначеного місця (файли моделей COMSOL Multiphysics - * .mph і * .fl); Settings - налаштування, які включають вибір мови, наприклад, англійської або російської (В разі наявності спеціального файлу русифікації), настройка кольору фону робочої області, вибір системи одиниць вимірювань, наприклад, СІ.

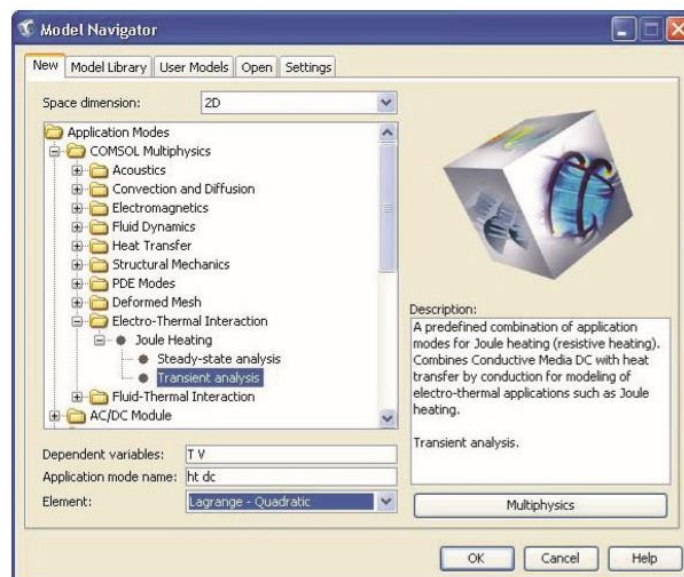


Рисунок 3.7 - Вікно навігатора моделей COMSOL Multiphysics, створення нової моделі

Графічний користувальницький інтерфейс програми COMSOL Multiphysics представляє кожен параметр відповідно до заданої системою вимірювань. Користувач може вибрати одну з дев'яти відомих систем одиниць, так що узгоджені позначення одиниць з'являються у всіх діалогових вікнах поруч з полями введення даних і на відповідних графіках.

У табл. 3.2 представлені моделі MEMС, включені в бібліотеку Model Library пакета COMSOL Multiphysics. Приклади моделей MEMС з бібліотеки Model Library показані на рис. 3.8.

Таблиця 3.2 - Моделі MEMС, включені в бібліотеку Model Library пакета COMSOL Multiphysics

1 Розділ бібліотеки	Моделі
1	2
Actuator Models (актюаторні моделі)	ale cantilever beam 2d - двомірна модель кантільовери
	ale cantilever beam 3d - тривимірна модель кантільовери comb
	drive 2d - 2D-модель гребенчатого електростатичного приводу
	comb drive 3d - 3D-модель гребенчатого електростатичного приводу
	gecko foot - мікро / наноструктура кантільовери
	micromirror - модель електростатично керованого мікродзеркала
	microresistor beam - балковий мікрорезистор
	resonator folded 2d - 2D-модель резонатора з вигнутими елементами
resonator folded 3d - тривимірна модель тонкопленочного резонатора з вигнутими елементами	

Продовження табл. 3.2

1	2
Microfluidics Models (моделі мікрорідинних структур)	Resonator straight 2d - двовірна модель резонатора з лінійними елементами
	resonator straight 3d - тривимірна модель тонкопленочного резонатора з лінійними елементами
	thermoelastic damping 2d - 2D-модель теплових ефектів в резонаторі
	thermoelastic damping 3d - 3D-модель теплових ефектів в резонаторі
	thermomechanical valve 2d - 2D-модель термомеханічного клапана
	thermomechanical valve 3d - 3D-модель термомеханічного клапана
	ac electrokinetic 2d - електрокінетическіє процеси в змінному полі
	capillary filling - капілярне заповнення
	electrokinetic valve 3d - модель електрокінетичного клапана
	electroosmotic biochip - електроосмотіческій биочип
	electroosmotic micropump 2d - електроосмотіческій мікронасос
	electroosmotic mixer - електроосмотіческій змішувач
	fluid structure interaction - взаємодія рідини і структури
	inkjet - моделювання вприскування
	lamella mixer – модель смесителя
	microchannel h cell - мікроканальна комірка
star chip - з'єднання каналів «зіркою»	
tortuous reactor - модель звивистого реактора	

Продовження табл. 3.2

1	2
Piezo Models (моделі п'єзоелектричних структур)	composite transducer - аналіз характеристик ультразвукового п'єзоелектричного перетворювача
	piezoceramic tube - модель п'єзокерамічної трубки
	shear bender - модель п'єзоелектричного балочного актюатора
Sensor Models (моделі сенсорних структур)	accelerometer 2d - двовимірна модель акселерометра
	accelerometer 3d - тривимірна модель акселерометра
	elevator button - модель п'єзорезистивного елемента
	mems gyroscope - модель МЕМС гіроскопа
	pressure sensor 2d - двовимірна модель датчика тиску
	SAW gas sensor - газовий сенсор на поверхневих акустичних хвилях
	thermal expansion - моделювання теплового розширення

Для розширення можливостей пакету COMSOL Multiphysics також використовуються бібліотека матеріалів і модуль імпорту, що дозволяє передавати в програму геометричні моделі, створені в зовнішніх CAD-системах.

Модуль Cad Import Module виконує імпорт геометричних моделей, записаних у форматах STEP, IGES, ACIS (SAT) і Parasolid, а також експорт моделей, створених в COMSOL Multiphysics.

У результаті забезпечується імпорт файлів всіх основних форматів CAD-програм (SolidWorks, Solid Edge, Unigraphics NX, CATIA, Autodesk Inventor, NASTRAN, Parasolid, SAT, VDA-FS, STEP і IGES).

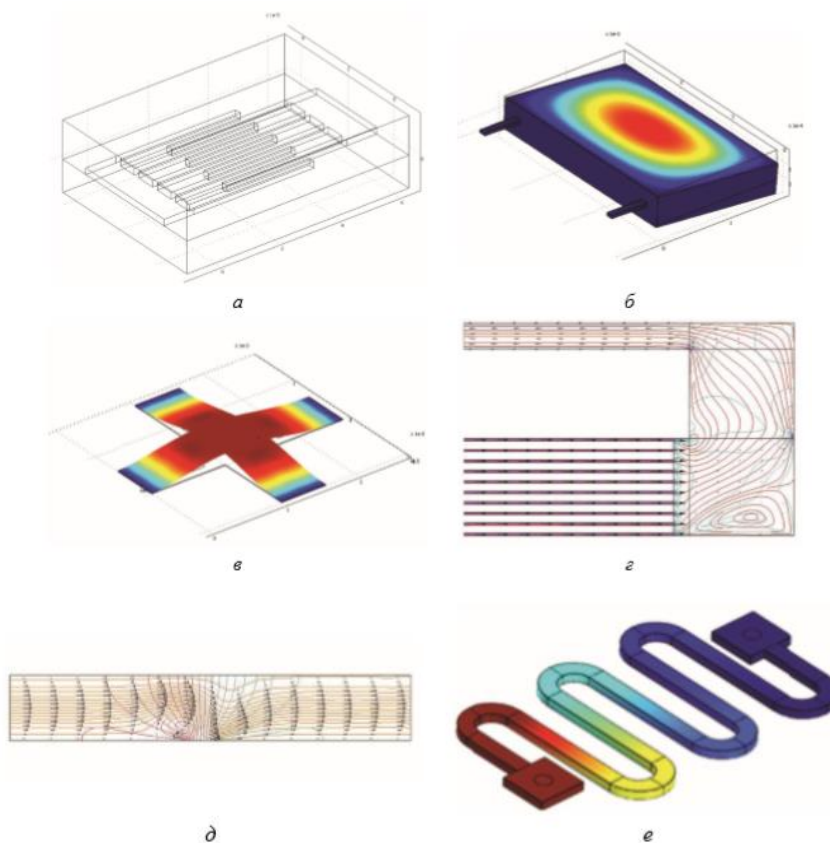


Рисунок 3.8 - Моделі елементів MEMC з набору Model Library: *a* - модель гребенчатого електростатичного приводу; *б* - модель акселерометра; *в* - термомеханічний клапан; *г* - електроосмотічеській мікронасос; *д* - потік рідини в Мікроканали; *е* – мікрореактор

Імпорт моделей з інших CAD-систем дозволяє уникнути трудомісткого процесу створення геометрії моделі, істотно прискорюючи процес моделювання. Слід зазначити додаткові функції, що забезпечуються системою. Пакет підтримує COMSOL Script - мова технічного моделювання. Ця мова-інтерпретатор включає більше 500 команд для чисельних розрахунків і візуалізації в режимі командного рядка, а також дозволяє створювати сценарії («скрипти» - процедури, записані в текстовому форматі). Програма COMSOL Script інтегрується з COMSOL Multiphysics, однак може працювати і як самостійний пакет. Використання сценаріїв дозволяє виконувати інтерактивні параметричні дослідження та оптимізації, здійснювати імітаційне моделювання. Функція Moving Mesh дає можливість імітувати геометрії з

рухомими частинами: електромеханічні, п'єзоелектричні і біологічні системи, а також рухомі поверхневі потоки. Широкий спектр графічних інструментів включає імітацію динаміки поширення електромагнітних хвиль. Програма COMSOL Multiphysics виконує імітацію поширення електромагнітних хвиль в нелінійній середовищі на основі кінцево-елементного аналізу. Прикладом такого завдання є поширення потужного світлового імпульсу в середовищі, що змінює властивості під впливом цього імпульсу.

3.4 ALGOR

Система кінцево-елементного моделювання ALGOR виконує дослідження моделей деталей і вузлів, використовуючи технологію InCAD. На цій технології базуються основні функціональні можливості пакета, включно із застосуванням Mechanical Event Simulation (MES) для комбінованого прочностного і кінематичного аналізу в лінійній і нелінійній постановці, аналіз статичних задач в лінійній і нелінійній постановці, аналіз динамічних процесів в лінійній постановці, аналіз теплопередачі і теплопереносу, стійкого і нестійкого течії рідини з урахуванням турбулентності, аналіз електростатичних процесів, моделювання пристроїв MEMS, прочностной аналіз трубопровідних систем і інженерних комунікацій. Розробник пакета - компанія ALGOR, Inc. (США).

Технологія InCAD, що підтримує інтеграцію пакета ALGOR з іншими програмними засобами, забезпечує повний обмін даними з Autodesk Inventor та Mechanical Desktop, отримання повної геометрії деталі і складання без трансляції файлів для виконання кінцево-елементного аналізу. Пакет має єдиний інтерфейс, що забезпечує побудову чисельних моделей, виконання розрахунків і виведення результатів в графічній формі (FEMPRO) (див. Рис. 3.9).

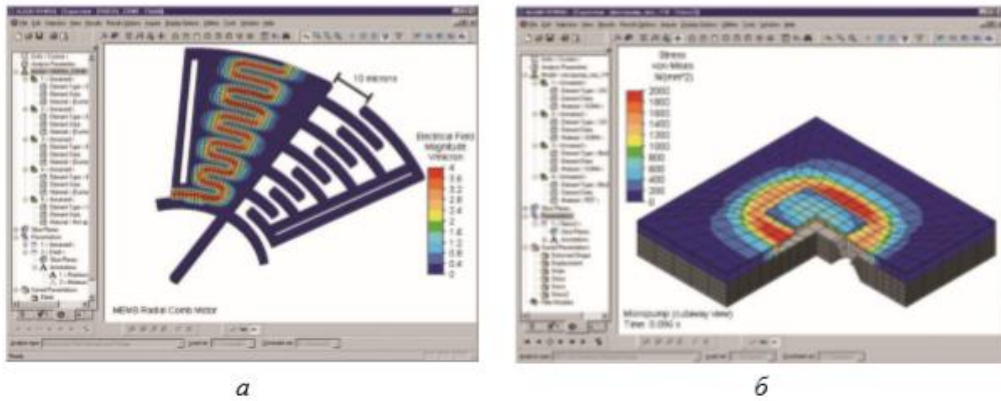


Рисунок 3.9 - Моделювання MEMC в програмі ALGOR: *а* - електростатичний двигун; *б* – мікронасос

Моделювання

Середовище моделювання використовує технологію InCAD для прямого обміну даними з наступними CAD / CAE системами:

- 1) Alibre Design, розробник - Alibre Inc., США;
- 2) Autodesk Inventor, розробник - Autodesk, Inc., США;
- 3) Inovate, розробник - IronCAD Inc., США;
- 4) IronCAD, розробник - IronCAD Inc., США;
- 5) KeyCreator, розробник - Kubotek Inc., США;
- 6) Mechanical Desktop, розробник - Autodesk, Inc., США;
- 7) Pro / ENGINEER, розробник - Parametric Technology Corporation, США;
- 8) Rhinoceros, розробка - Robert McNeel & Associates;
- 9) Solid Edge, розробник - Siemens PLM Software; SolidWorks, розробник - SolidWorks Corporation, США.

Також система забезпечує традиційні для CAD / CAE-систем середнього рівня можливості:

- 1) повна асоціативний зв'язок моделей;
- 2) підтримка різних файлів зберігання моделей - твердотільних ACIS, IGES, STEP і STL, а також дво- і тривимірної каркасної геометрії в форматах CDL, DXF і IGES;

- 3) керований користувачем інструмент придушення особливостей з можливістю вибору користувачем або автоматично;
- 4) автоматичні засоби генерації сітки;
- 5) автоматична система обробки сітки для підвищення якості елементів сітки і, відповідно, збільшення точності результатів розрахунку.

Аналіз

Пакет ALGOR дозволяє виконувати пов'язаний електростатичний - структурний аналіз механізмів MEMS. Крім того, в ALGOR може бути проведений аналіз і оптимізація компонентів, що відповідають за корпусування, захист і підключення пристроїв MEMS.

Можливості моделювання MEMS в пакеті ALGOR включають:

- 1) електростатичний аналіз, що забезпечує розрахунок сил, викликаних поверхневими зарядами;
- 2) механічне моделювання і статичний аналіз напружень з лінійними і нелінійними моделями матеріалів для визначення електромеханічних ефектів, викликаних електростатичними силами;
- 3) моделі п'єзоелектричних матеріалів для механічного моделювання та статичного аналізу механічної напруги;
- 4) розрахунок динамічних процесів в лінійному наближенні.

Обробка результатів і графічне відображення

На цьому етапі система також забезпечує традиційні для CAD / CAE-систем середнього рівня можливості, зокрема - різні варіанти настройки зображення, анімація рішення, експорт у вигляді графічних файлів. Додаткова обробка результатів чисельного моделювання дозволяє отримати різні види епюр і залежностей.

4 ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ МАГНІТНОГО АНАЛІЗУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПРИВОДУ В ANSYS 6.1

Електромагнітний привід аналізується як осесиметрична двовірна (2-D) модель. Для заданого струму в обмотці обчислюється сила, що виникає на якорі.

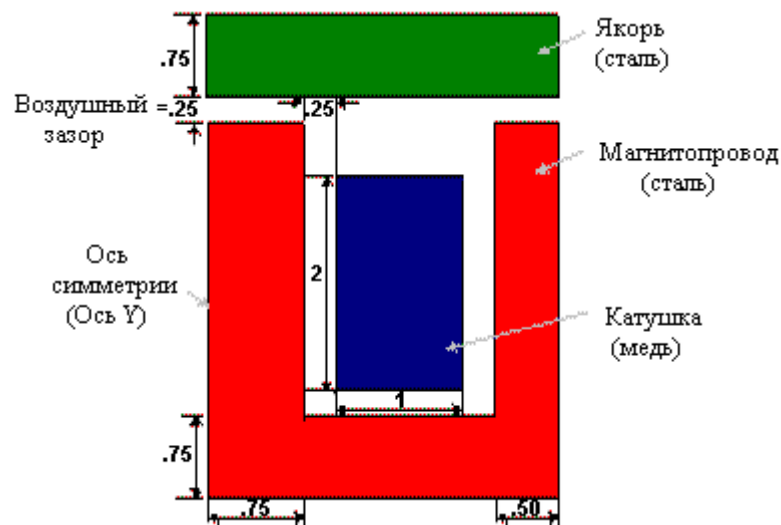


Рисунок 4.1 – Двовимірна осесиметрична модель електромагнітного приводу

Міра довжини - сантиметри. Якір - рухливий компонент приводу. Магнітопровід - нерухомий компонент приводу, що становить магнітну ланцюг навколо обмотки. Переплетена обмотка складається з 650 витків, при струмі 1А (1 А / виток); живиться від зовнішнього джерела постійного струму. Повітряний зазор - це тонка прямокутна область повітря між якорем і полюсними наконечниками муздраттеатру.

Прийняті допущення.

Магнітний потік, створюваний струмом в обмотці, мається на увазі настільки малим, що насичення магнітопровода не відбувається. Виток магнітного потік з заліза муздраттеатру за периметр моделі, маютьсь на увазі незначними. Дані припущення спрощують аналіз і зменшують розмір моделі.

Для більш точного аналізу в моделі може бути створена з додатковою областю повітря навколо заліза. Величина її повинна бути більше максимальної площі моделі.

Повітряний зазор моделюється окремо, таким чином, щоб була можливість використовувати квадратні елементи сітки в ньому. Це викликано значно меншими розмірами повітряного зазору порівняно з усіма іншими розмірами всіх частин моделі. Розмір елементів сітки (висота дорівнює ширині) нами будуть обрані більше величини висоти повітряного зазору і тому сітка елементів моделі буде створюватися програмою автоматично, то в разі не вказівки користувачем особливих розмірів сітки в повітряному проміжку елементи сітки в ньому не будуть мати квадратну форму. У віртуальному повітряному зазорі моделі в процесі рішення буде створюватися віртуальна сила, що притягає якір. А для коректного її розрахунку бажано використання в повітряному зазорі елементів сітки квадратного виду.

Далі елементи сітки будуть називатися просто "елементи".

Для даного типу аналізу потрібно, щоб струм в обмотці був заданий у вигляді щільності струму (струм на площу, що припадає на обмотку).

Той факт, що ми приймаємо магнітний потік не виходять за області моделі, має на увазі, що потік буде паралельний зовнішніх кордонів моделі. Це допущення моделюється "потокотпараллельного" ("flux parallel") граничною умовою. Це гранична умова може використовуватися в моделях, що містять замкнутий магнітопровід.

Сила розраховується на кожен елемент якоря і потім підсумовується. Вона розраховується двома методами, і обидва результату можна потім порівняти (значення близькі).

4.2 Побудова геометрії

Геометрія моделі створюється за допомогою логічної операції перекриття для шести прямокутників. Створіть кожен прямокутник завданням

координат його протилежних кутів (замість вказівки мишею точок на робочій площині). На рис. 4.1 – 4.8 наведено послідовність створення прямокутників.

1) **Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Rectangle > By Dimensions**

2) Введіть наступне:

$$X1 = 0$$

$$X2 = 2.75$$

$$Y1 = 0$$

$$Y2 = 0.75$$

3) ОК.

4) Увімкніть нумерацію областей: **Utility Menu > PlotCtrls > Numbering**

5) Поставте прапорець у Area numbers.

6) Натисніть ОК.

Далі створіть прямокутники 2,3,4,5 і 6.

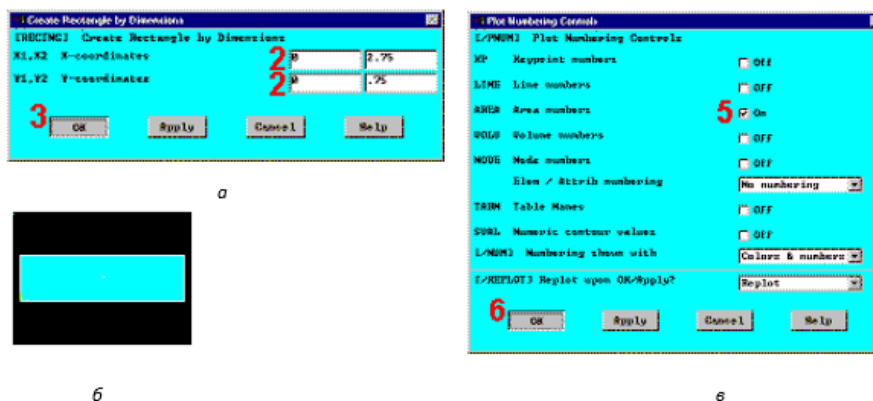


Рисунок 4.1 – побудова геометрії а – вибір параметрів; в – завдання геометрії; б – підтвердження створення

1) **Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Rectangle > By Dimensions**

2) Введіть наступне:

$X1 = 0$

$X2 = 2.75$

$Y1 = .75$

$Y2 = 3.5$



Рисунок 4.2 – створення прямокутника 2

3) Натисніть Apply

4) Введіть наступне:

$X1 = .75$

$X2 = 2.25$

$Y1 = 0$

$Y2 = 4.5$



Рисунок 4.3 – Створення прямокутника 3

5) Натисніть Apply

6) Введіть наступне:

$X1 = 1$

$X2 = 2$

$Y1 = 1$

$Y2 = 3$



Рисунок 4.4 – Створення прямокутника 4

7) Натисніть Apply

8) Введіть наступне:

$X1 = 0$

$X2 = 2.75$

$Y1 = 0$

$Y2 = 3.75$



Рисунок 4.5 – Створення прямокутника 5

- 9) Натисніть Apply
- 10) Введіть наступне:
 $X1 = 0$
 $X2 = 2.75$
 $Y1 = 0$
 $Y2 = 4.5$

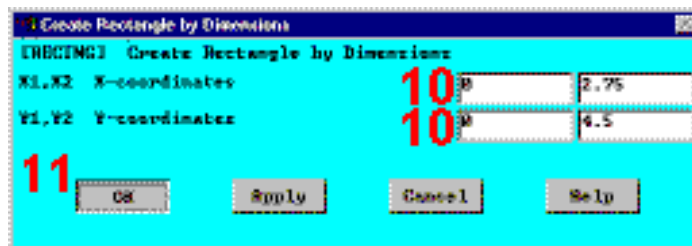


Рисунок 4.6 – Створення прямокутника 6

- 11) Натисніть ОК.

4.3 Виконання логічної операції перекриття.

Створені нами прямокутні області, накладаються один на одного. Ця логічна операція створить нові області в моделі у всіх місцях перетину цих шести прямокутних областей. На рис.4.7 наведено об'єднання прямокутників.

- 1) **Main Menu > Preprocessor> Modeling> Operate> Booleans> Overlap > Areas**
- 2) Виберете **Pick All**



Рисунок 4.7 – Створення єдиної області для прямокутників

- 3) Натисніть на панелі кнопку **SAVE_DB**.

4.4 Завдання матеріалів та визначення їх властивостей

Програма Ansys має безліч інструментів для різних видів аналізу моделей (механічні, термічні, електромагнітні і т.д.). Завдання переваг програми - це фільтрація цих інструментів відповідно до обраним видом аналізу. Після виконання цієї процедури (рис. 4.8) для роботи залишаються тільки необхідні інструменти.

- 1) **Main Menu > Preferences**
- 2) Відзначте: **Electromagnetic:**

Magnetic-Nodal

- 3) **OK.**

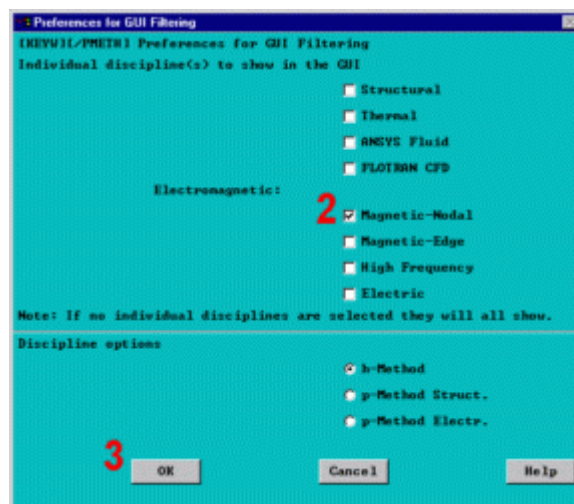


Рисунок 4.8 – Завдання Magnetic - Nodal

Далі задаємо матеріали та їх магнітні властивості: повітря, заліза муздраттеатру, обмотки і якоря. Для спрощення завдання властивості всіх матеріалів прийняті лінійними. Зазвичай, параметр магнітної проникності заліза задається у вигляді нелінійної кривої В-Н. Матеріал 1 буде використовуватися для завдання елементів повітря, матеріал 2 буде використовуватися для елементів заліза магнітопровода, матеріал 3 - для елементів обмотки, матеріал 4 - для елементів якоря (рис.4.9 - 4.13).

- 1) **Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models**
- 2) Задаємо відносну магнітну проникність повітря: подвійне клацання на

Electromagnetics, Relative Permeability, Constant.

- 3) Ввести 1 для MURX
- 4) 9 ОК.

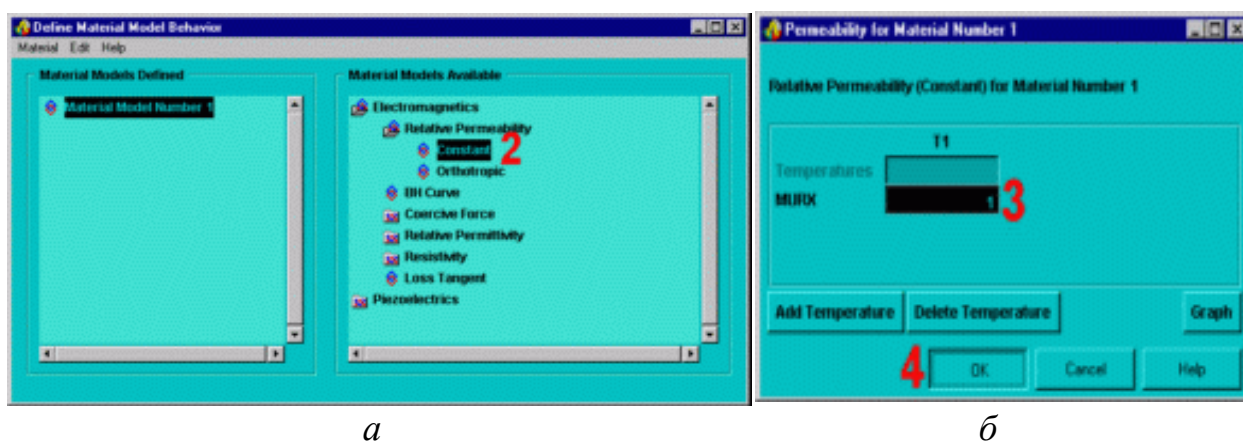


Рисунок 4.9 – Завдання матеріалів *a* – вибір матеріалу; *б* – задаємо 1 для MURX

- 5) **Edit > Copy**
- 6) ОК для копіювання **Material Model Number 1** в **Material Model Number**

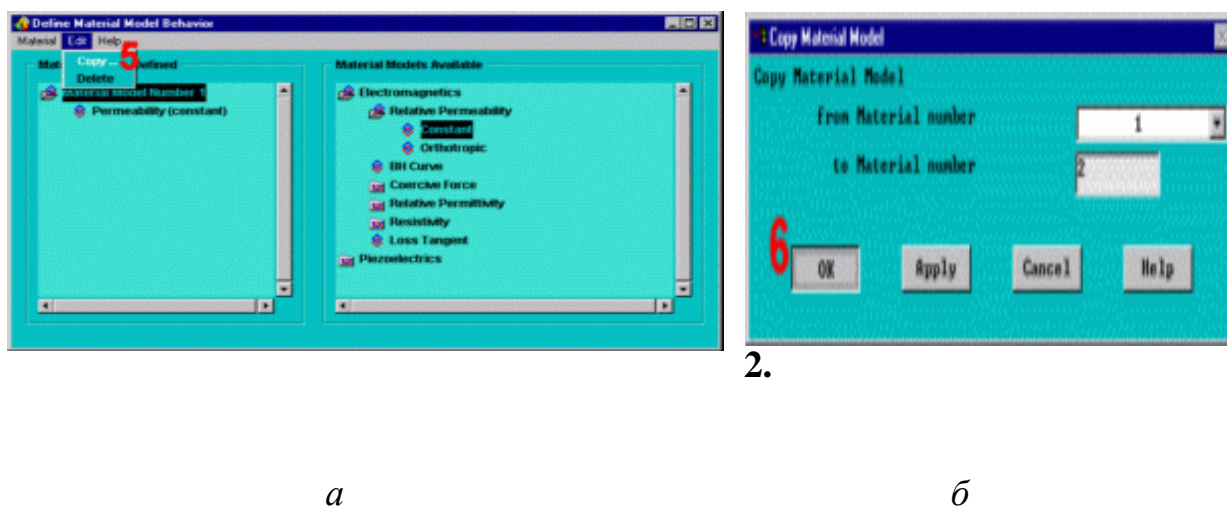
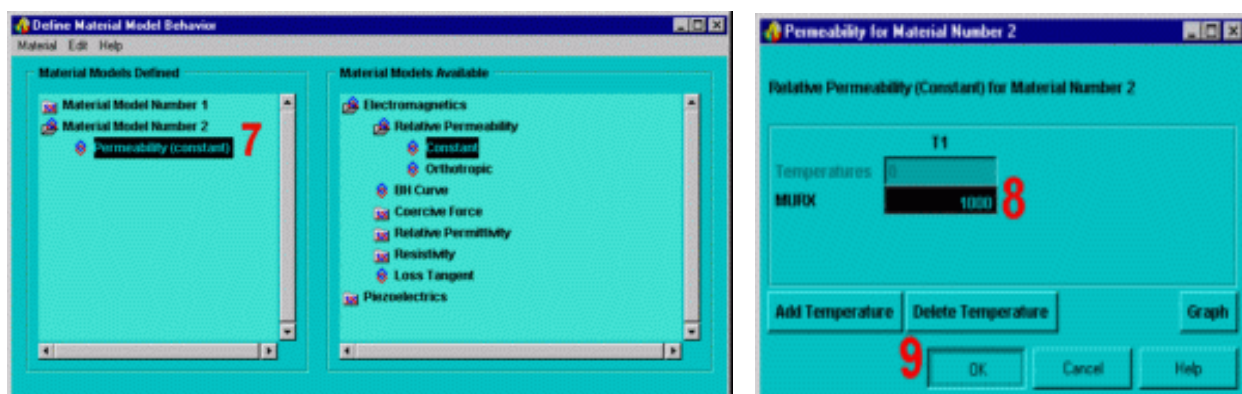


Рисунок 4.10 – Завдання матеріалу для моделі 1 та 2 *a* – вибір матеріалу; *б* – ввід значення

- 7) Подвійне клацання по Material Model Number 2, потім по Permeability (Constant).
- 8) Змінити значення MURX з 1 на 1000.

9) ОК.



a

б

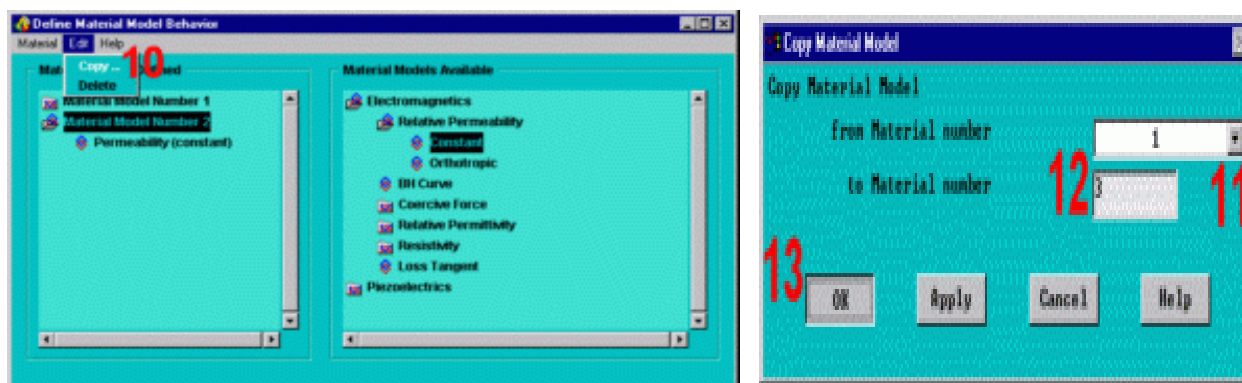
Рисунок 4.11 – Завдання матеріалу для моделі 2 а – вибір матеріалу; б – зміна значення

10) **Edit > Copy**

11) Вибрати 1 для from Material Number

12) Ввести 3 для to Material Number.

13) ОК.



a

б

Рисунок 4.12 – Завдання матеріалу а – вибір матеріалу; б – зміна значення

14) **Edit > Copy**

15) Вибрати 2 для from Material Number.

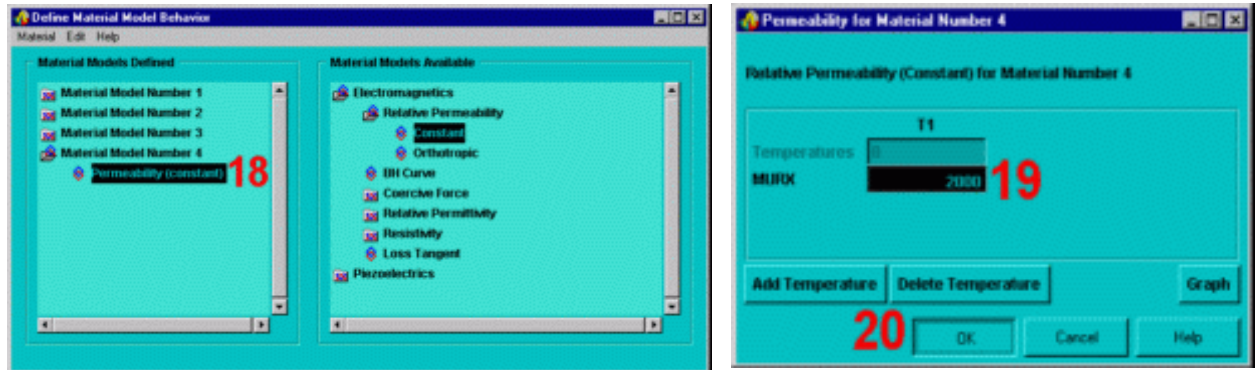
16) Ввести 4 для to Material Number.

17) ОК

18) Подвійний клік по Material Model Number 4, потім по Permeability (Constant).

19) Змінити значення MURX від 1000 на 2000.

20) ОК



a

б

Рисунок 4.13 – Завдання матеріалу *a* – вибір матеріалу; *б* – зміна значення

21) Material > Exit

4.5 Генерування сітки кінцевих елементів.

На цій стадії необхідно вказати типи елементів, які будуть використовуватися в моделі, і задаєте які відповідають цим типам параметри(рис 4.14).

Зазвичай використовуються елементи більш високого порядку типу PLANE53 але ми будемо використовувати елементи нижчого порядку PLANE13 для зменшення об'єму пам'яті, що займається моделлю.

1) **Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete**

2) Add

3) Вибрати Magnetic Vector.

4) Вибрати Vect Quad 4nod13 (PLANE13).

5) ОК.

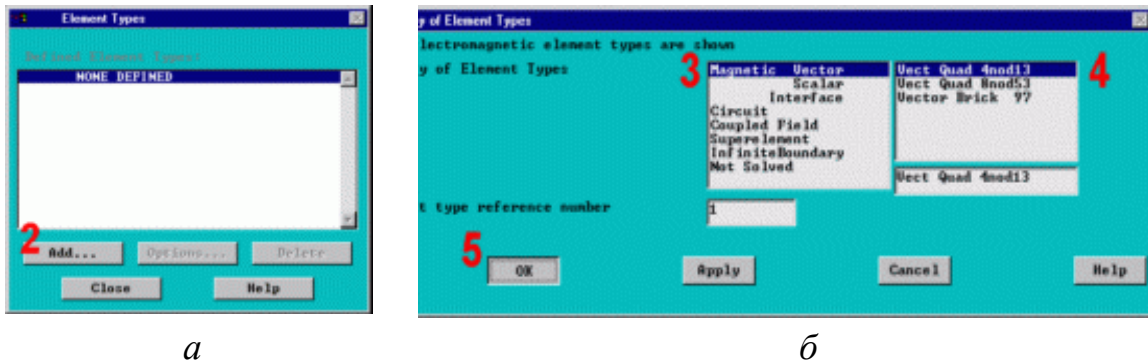


Рисунок 4.14 – Типи елементів *a* – виклик вікна; *б* – вибір елементів

- 6) Options.
- 7) Змінити Element behavior з plain strain на Axisymmetric. (Змінити поведінку елементів з плосконапряженого на осесиметричне).
- 8) OK.
- 9) Close.

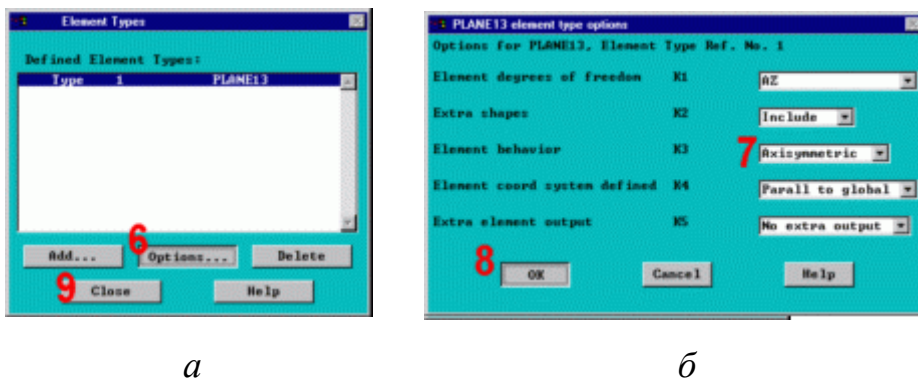
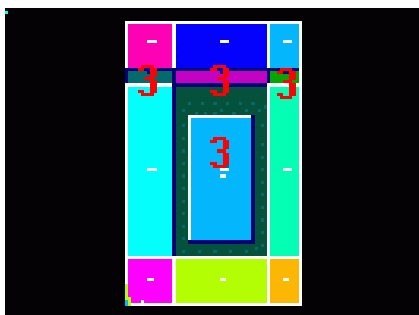


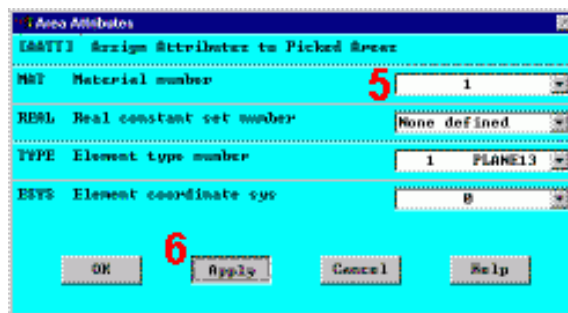
Рисунок 4.15 – Типи елементів *a* – виклик вікна; *б* – вибір елементів

Тепер припишіть свій тип матеріалу елементів повітря, заліза, обмотки і якоря. (рис. 4.16 - 4.20)

- 1) **Main Menu > Preprocessor > Meshing > MeshTool**
- 2) Вибрати Areas для Element Attributes, нажать Set.
- 3) Виділити мишею чотири області повітряного зазору, A13, A14, A17 і A18 (клацайте на номер області).
- 4) OK (в меню виділення).
- 5) Вибрати 1 для Material number
- 6) Apply.



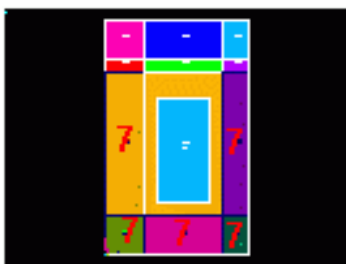
а



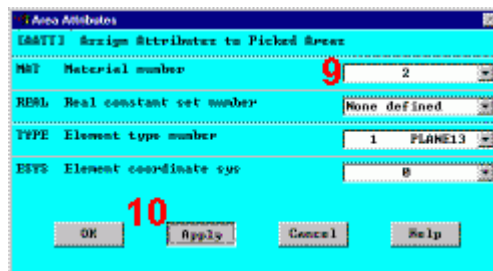
б

Рисунок 4.16 – Области повітряного зазору *a* – Розміщення зазору; *б* – завдання параметрів

7) Виділити мишею п'ять областей заліза магнітопровода, A7, A8, A9, A11, A12.



а



б

Рисунок 4.17 – Залізо магнітопровода *a*- виділена область; *б* – завдання параметрів

- 8) ОК (в меню виділення).
- 9) Вибрати 2 для Material number.
- 10) Apply.
- 11) Виділити мишею область обмотки A4.
- 12) ОК (в меню виділення).
- 13) Вибрати 3 для Material number.
- 14) Apply.

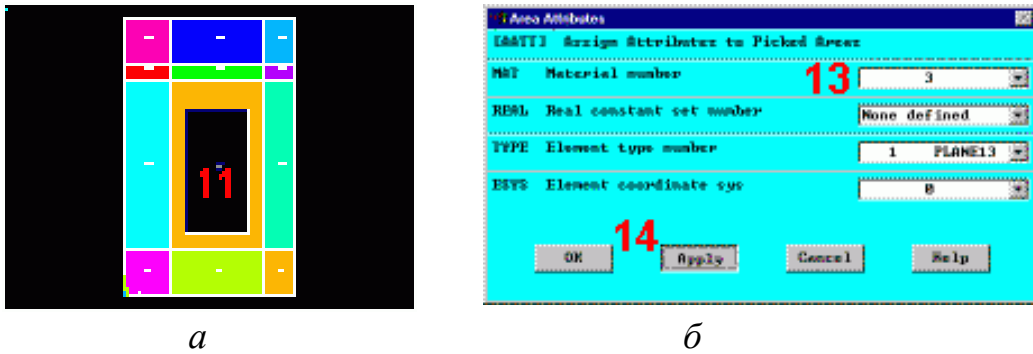


Рисунок 4.18 – Области обмотки *a* – виділення обмотки; *б* – завдання параметрів

- 15) Виділити мишею області якоря A10, A15, A16.
- 16) ОК (в меню виділення).
- 17) Вибрати 4 для Material number.
- 18) ОК.

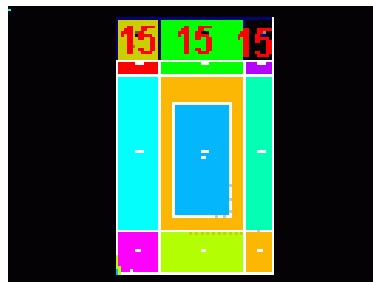


Рисунок 4.19 – Области якоря

- 19) Натиснути SAVE_DB на панелі інструментів.

Завдання розмірів елементів сітки в повітряному зазорі.

Викличте MeshTool

- 1) Вибрати Lines, Set для Size Controls.

2) Виділити мишею чотири вертикальні лінії в повітряному зазорі.

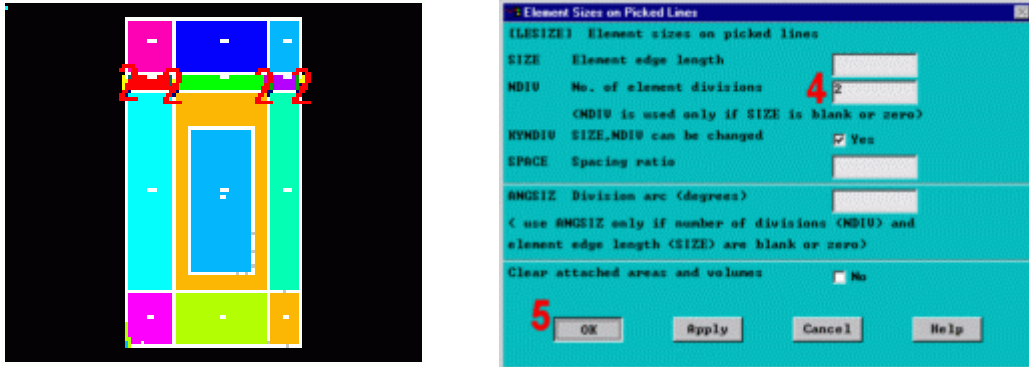


Рисунок 4.20 – Завдання розміру елементів сітки в повітряному зазорі
 а – виділення області; б – завдання параметрів сітки

3) ОК.

4) Введіть 2 для No. of element divisions.

5) ОК.

Генерування сітки з використанням інструменту MeshTool.

- 1) Натиснути кнопку Set поруч з Global в Size Control інструменту MeshTool.
- 2) Ввести 0.25 для Element edge length (Довжина ребра елемента).
- 3) ОК.
- 4) Вибрати Areas в Mesh інструменту MeshTool
- 5) Клацнути по кнопці Mesh.
- 6) Pick All (в меню виділення).
- 7) Close в MeshTool.
- 8) **Utility Menu > PlotCtrls > Numbering**
- 9) Вибрати Material numbers.
 (Пронумерувати по атрибуту і як атрибут вибрати - номер матеріалу).

10) ОК.



Рисунок 4.21 – Генерування сітки *a*- виділення всієї області; *б* – завдання параметрів

Масштабування моделі в метри.

У цьому прикладі використовується система одиниць СІ. Всі значення розмірів заносяться нами в процесі побудови моделі були в сантиметрах. Тому нам необхідно масштабувати модель у метри.(рис.4.22)

- 1) **Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Scale > Areas**
- 2) Pick All.
- 3) Ввести 0.01 для RX и RY. (Масштаб по осям.)
- 4) Вибрати для Existing areas значення Moved. (Існуючі області заміняться новими, масштабувати.) (Зверніть увагу, щоб параметр вище мав значення "Areas and mesh" - тобто масштабування піддадуться і наявні області і побудована для них сітка кінцевих елементів).
- 5) ОК.

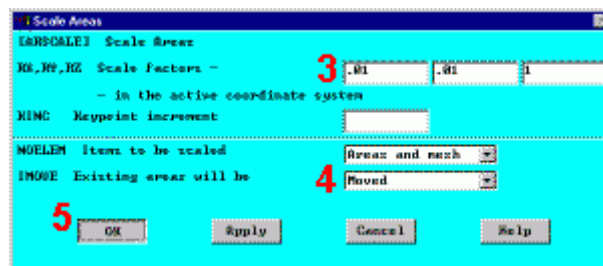


Рисунок 4.22 – Масштабування моделі в метри

4.6 Додаток навантажень.

Визначення якоря як компоненту.

Якір можна легко визначити як компонент, вибравши його елементи. Це потрібно для того, щоб далі докласти до нього навантаження.

1) **Utility Menu > Select > Entities** (Вибрати об'єкти.)

2) Вибрати Elements.

3) Вибрати By Attributes.

4) Ввести 4 для Min, Max, Inc

(Вибрати елементи по атрибуту - номеру матеріалу - № 4 (Виділено пункт Material num.))

5) ОК.

6) **Utility Menu > Plot > Elements**

На екрані з'являться тільки елементи якоря:

7) **Utility Menu > Select > Comp/Assembly > Create Component** (Создать компонент.)

8) Ввести ARM для Component name.

9) Вибрати Elements.

10) ОК.

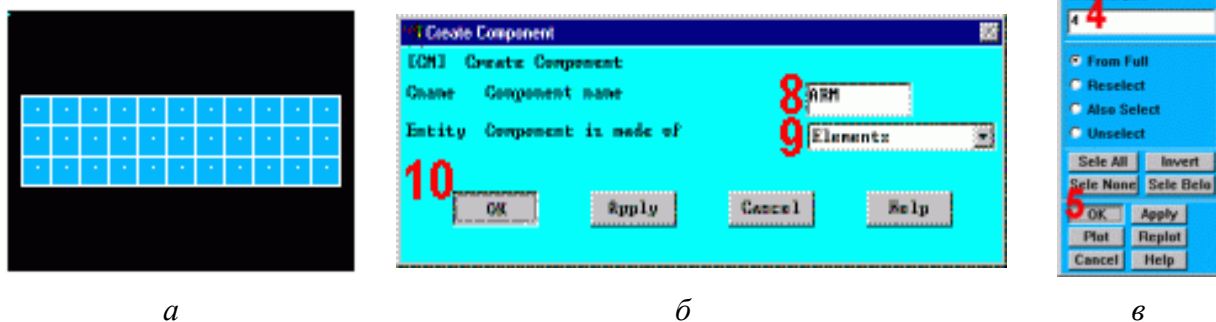


Рисунок 4.23 – Додаток навантажень на якорі *a*- область якоря; *б* – завдання параметрів; *в* – створення компоненту

На рис.4.24 наведено додаток силових граничних умов до якоря.

- 1) **Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Magnetic > Flag > Comp. Force/Torq**
- 2) Вибрати ARM.

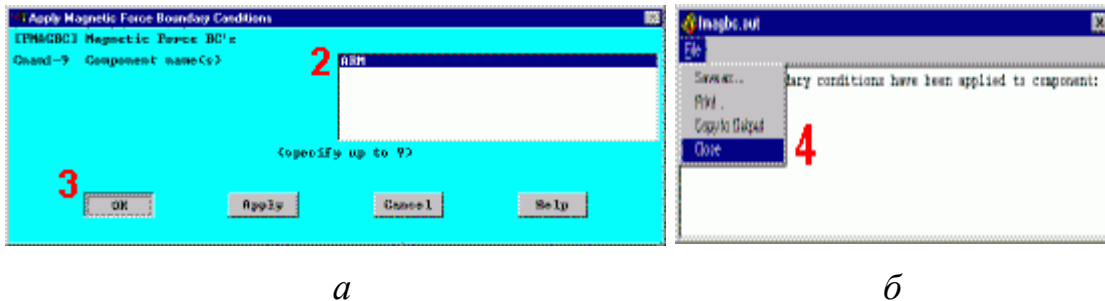


Рисунок 4.24 – Силові та граничні умови якоря *a* – завдання параметрів;
б – перегляд результату та вихід

- 3) **OK.**
- 4) Перегляньте інформацію потім закрийте її:
- 5) **File > Close** (вікно),
- 6) **Utility Menu > Select > Everything**
- 7) **Utility Menu > Plot > Elements**

Завдання щільності струму.(рис.4.25)

Щільність струму визначається як число витків обмотки (650),

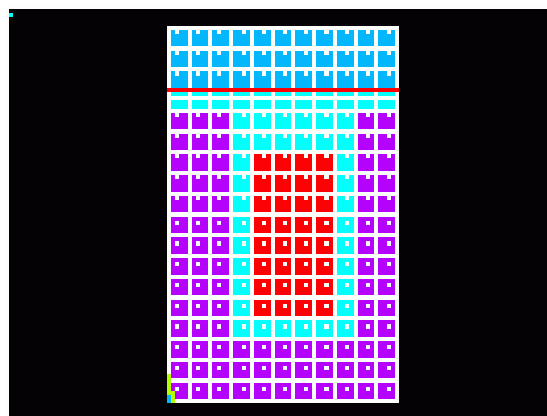


Рисунок 4.25 – Щільність струму

помножене на ток (1 A) і розділена на площу, що припадає на обмотку (2 см²), тобто $(650) (1) / 2$, або 325. Для переведення в систему СІ це значення має бути розділено на $0.01 ** 2$ (0,0001)(рис.4.26).

1) **Utility Menu > Plot > Areas**

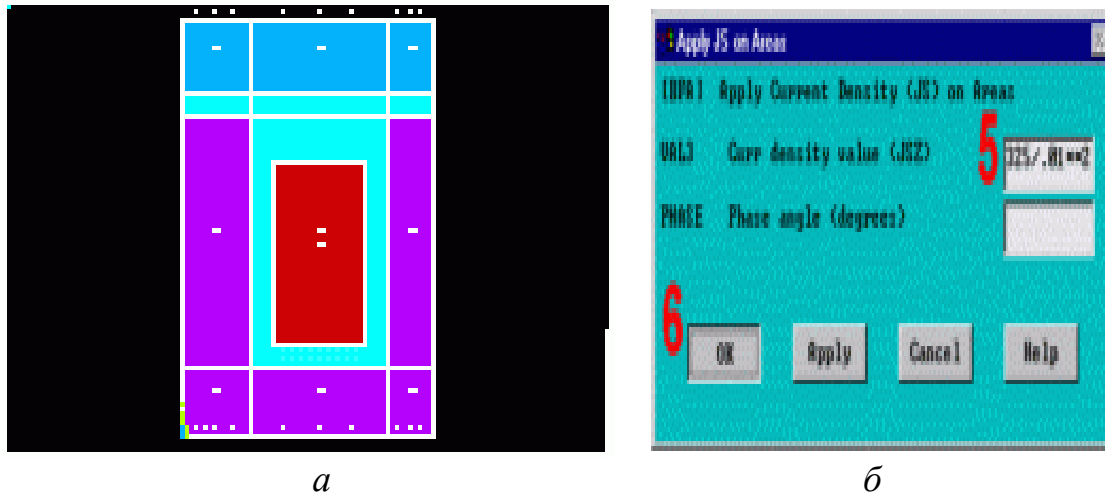


Рисунок 4.26 – Переведення щільності струму в систему СІ *a* – області струму; *б* – завдання параметрів

2) **Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Magnetic > Excitation > Curr Density > On Areas**

- 3) Виділити мишею область обмотки (клацайте на номер області).
- 4) ОК (в меню виділення).
- 5) Ввести $325/.01**2$ для Current density value.
- 6) ОК.

Закрийте всі інформаційні вікна, якщо вони з'являться.

Завдання потокопараллельної граничної умови.

Задавши цю умову ми повідомимо програмі, що магнітний потік не виходить за периметр моделі(рис. 4.27). Щоб змодельовати середу, в якій знаходиться модельований електромагнітний об'єкт, досить створити навколо нього області цього середовища і задати для них відповідний матеріал з властивою цьому середовищі магнітною проникністю.

1) **Utility Menu > Plot > Lines**

2) **Main Menu> Preprocessor> Loads > Define Loads> Apply > Magnetic-> Boundary > Vector Poten> Flux Par'l> On Lines**

3) Виділіть всі лінії по периметру моделі (14 ліній).

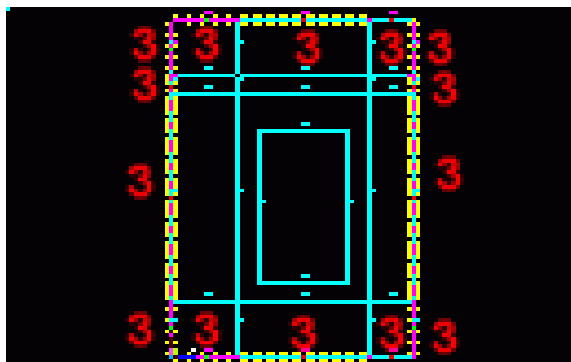


Рисунок 4.27 – Завдання потокопаралельної граничної умови

4) ОК (в меню виділення).

5) Натиснути SAVE_DB на панелі інструментів (Зберегти базу даних).

4.6 Отримання рішення.

Розв'язання задачі

1) **Main Menu> Solution> Solve> Electromagnet> Static Analysis> Opt & Solve**

2) Натисніть ОК для початку вирішення. (рис.4.28)

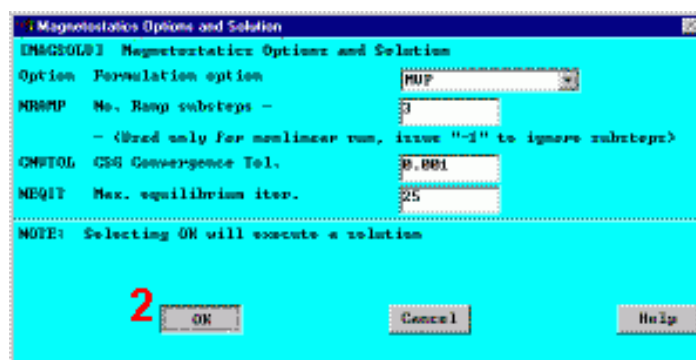


Рисунок 4.28 – Діалогове вікно отримання рішення

3) Закрийте інформаційне вікно після того, як виконається рішення

4.7 Перегляд результатів

Відображення ліній магнітного потоку наведено на рис.4.29

- 1) **Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > 2D Flux Lines**
- 2) OK.

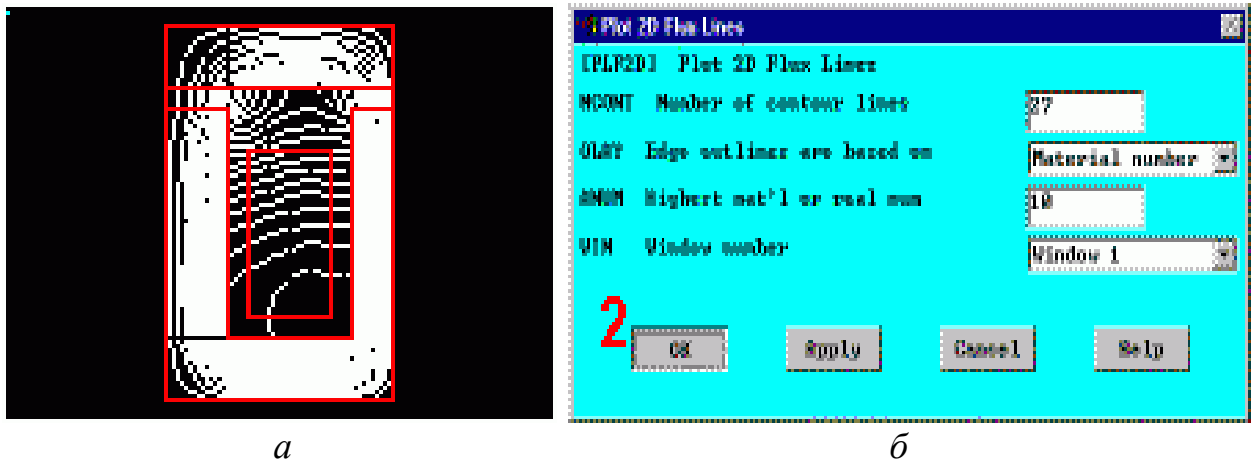


Рисунок 4.29 - Перегляд розрахованих сил. *a* – магнітний потік; *б* – введення параметрів

- 1) **Main Menu > General Postproc > Elec & Mag Calc > Component Based > Force**
- 2) Вибрати ARM.
- 3) OK.
- 4) Перегляньте інформацію, потім виберіть: **File > Close** щоб закрити вікно або збережіть її в файл **File > Save as** для подальшого перегляду в Блокноті (рис.4.30).

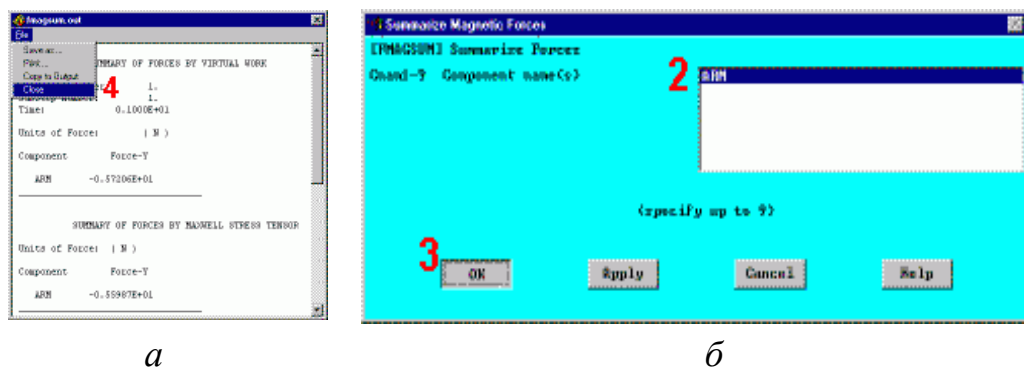
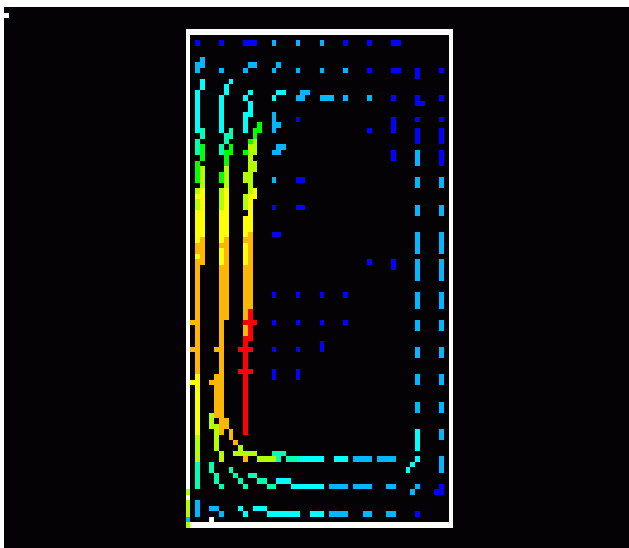


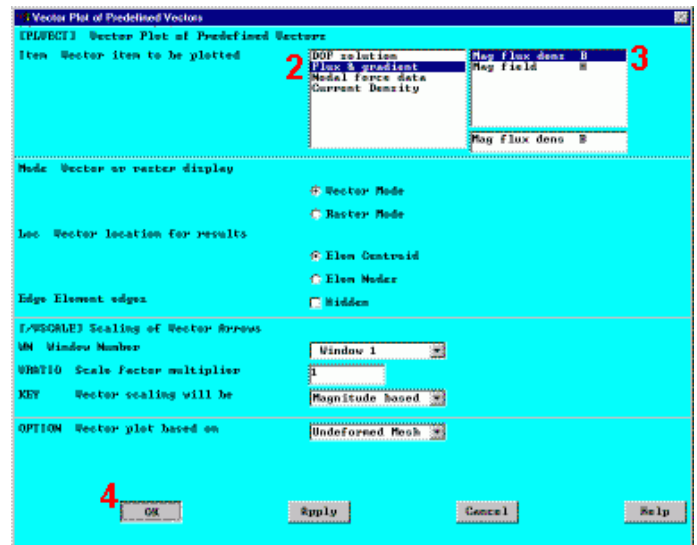
Рисунок 4.30 – Перегляд результатів *a* – перегляд в блокноті; *б* – вивод інформації

Відображення щільності магнітного потоку в векторному вигляді наведено на рис.4.31.

- 1) **Main Menu > General Postproc > Plot Results > Vector Plot> Predefined**
- 2) Вибрати Flux & gradient
- 3) Вибрати Mag flux dens B.
- 4) ОК.



a



b

Рисунок 4.31 – Відображення щільності магнітного потоку *a* – векторний вигляд магнітного потоку; *b* – завдання параметрів

Відображення областей насичення магнітопроводу наведено на рис. 4.32.

- 1) **Main Menu > General Postprocessor > Plot Results > Contour Plot> Nodal Solution**
- 2) Вибрати Flux & gradient
- 3) Вибрати BSUM.
- 4) ОК.



Рисунок 4.32 – Области насичення магнітопровода *a* – області насичення;
б – завдання параметрів

Ansyes дозволяє створити 3-D вид з осесиметричної плоскої моделі(рис.4.33). Ця процедура не вносить зміни в базу даних моделі.

- 5) **Utility Menu > PlotCtrls > Style > Symmetry Expansion > 2D Axi-Symmetric**
- 6) Вибрати 3/4 expansion
- 7) OK
- 8) **Utility Menu > PlotCtrls > Pan,Zoom,Rotate**
- 9) Iso.
- 10) Close.

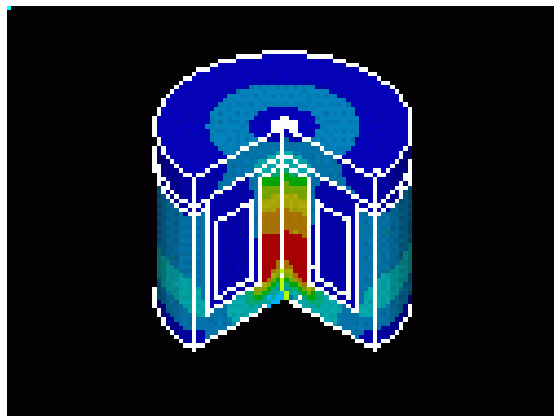


Рисунок 4.33 – 3D модель магнітопровода

Вихід з програми.

На панелі інструментів: QUIT

Вибрати Quit - No Save!

4.8 EMS від EMWorks

Електростатичний привід, що зазвичай використовується в MEMS, заснований на електростатичних полях і силах, які вони створюють на конструкції. Деформація електродів, викликана електростатичними силами, є основною проблемою в електромеханічних приводах, таких як радіочастотні мікроперемикачі, гребінкові приводи та датчики тиску.

Фактично, електричне поле створюється між двома електродами, застосовуючи різницю потенціалів, яка генерує електростатичні сили, які будуть основною причиною відхилення. Ця технологія застосовується в багатьох галузях промисловості, таких як автомобільна та біомедична, через її малу вагу, компактні розміри, низьке енергоспоживання та довговічність.

Програмне забезпечення для моделювання EMS від EMWorks було використано для дослідження результативного відхилення мембрани під напругою постійного струму. Для досягнення цієї мети був використаний тип електростатичного аналізу з приєднанням до структурних. У проведеному аналізі враховували електричну силу, а прискорення сили тяжіння ігнорували.

Модельна геометрія

На рис. 4.10 і на рис. 4.11 представлена геометрія аналізованої моделі. Вона складається з двох квадратних мембран площею 40 мкм, одна закріплена внизу і рухома вгору, керована двома змійовиковими пружинами.

Товщина пристрою дорівнює 1 мкм по осі z.

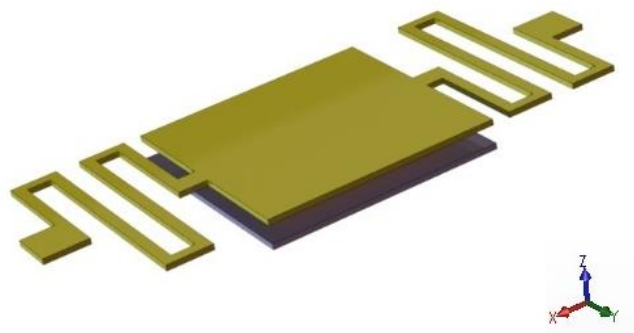


Рисунок 4.10 - Геометрія аналізованої моделі

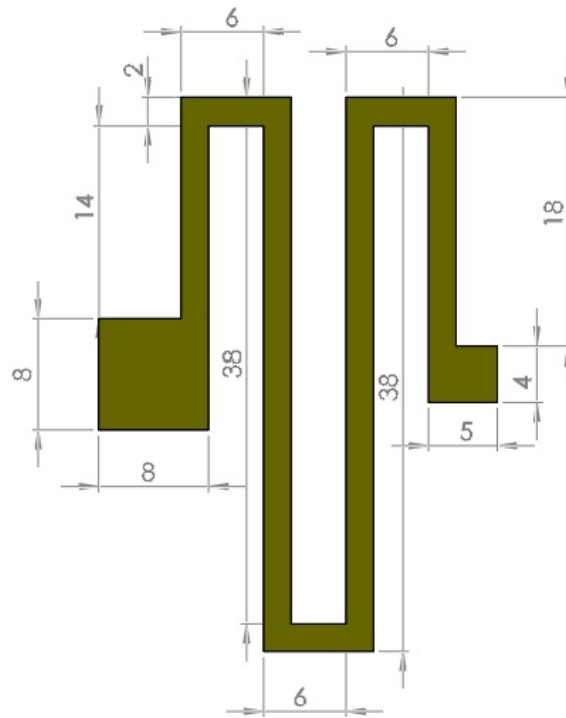


Рисунок 4.11 - Геометрія змінної пружини

Усі одиниці наведені в мікрометрах

Налаштування моделювання

Для обчислення та візуалізації електричних результатів та механічної деформації рухомої мембрани був використаний електростатичний модуль EMS в поєднанні зі структурним аналізом.

Для проведення аналізу за допомогою EMS було виконано наступні важливі кроки:

- 1) Виберіть відповідний матеріал для всіх твердих тіл.
- 2) Визначте необхідні електромагнітні входи.
- 3) Застосуйте структурні граничні умови.
- 4) З'єднайте всю модель і запустіть вирішувач.

У табл. 4.3, наведеній нижче, узагальнено необхідні властивості матеріалу для моделювання

Таблиця 4.3 - Властивості матеріалів, віднесених до моделі

Назва матеріалу	Відносна діелектрична проникність	Щільність ($\text{кг}/\text{м}^3$)	Еластичний модуль пружності (Па)	Пуассона коеф. сек
Платина	1	2145	$170\text{e}+0.9$	0,26
Повітря	1,0026	0	Не обов'язково	Не обов'язково

Прикордонні умови

Електричний граничний стан

1) Фіксована напруга 1 (В)

Верхня мембрана заземлена, як показано на рис. 4.12. На стрілках зображені символи граничної умови, заданої їй.

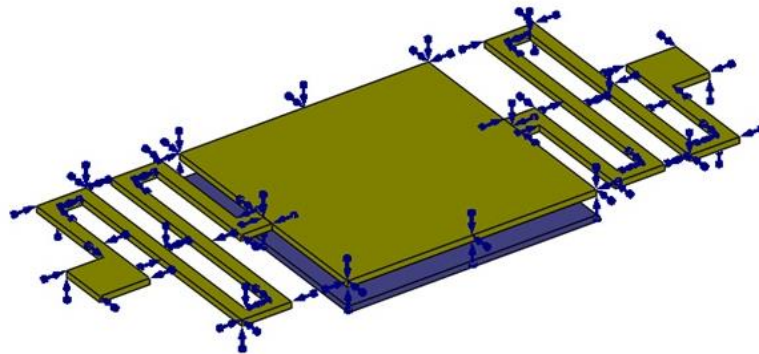


Рисунок 4.12 - Фіксована напруга, прикладена до верхньої мембрани

2) Фіксована напруга 2 (позитивна напруга)

На нерухомий електрод присвоюється позитивна напруга.

На рис. 4.13 показано, де подається напруга.

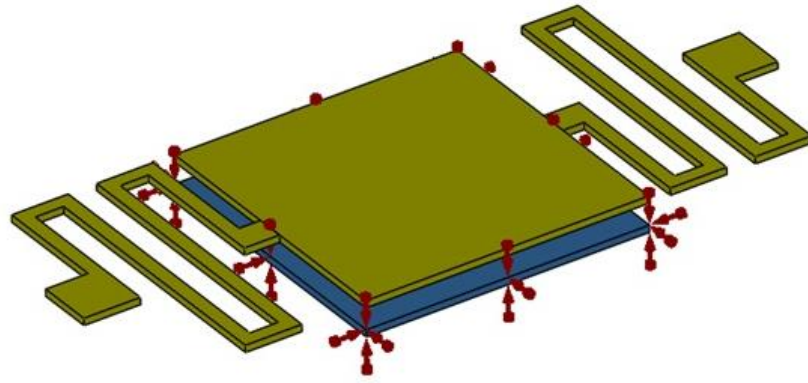


Рисунок 4.13 - Фіксована напруга, прикладена до нижньої мембрани

Структурно гранична умова

Фіксовані граничні умови застосовуються до нижньої мембрани та до якорів двох пружин змії, як показано на рис. 4.14:

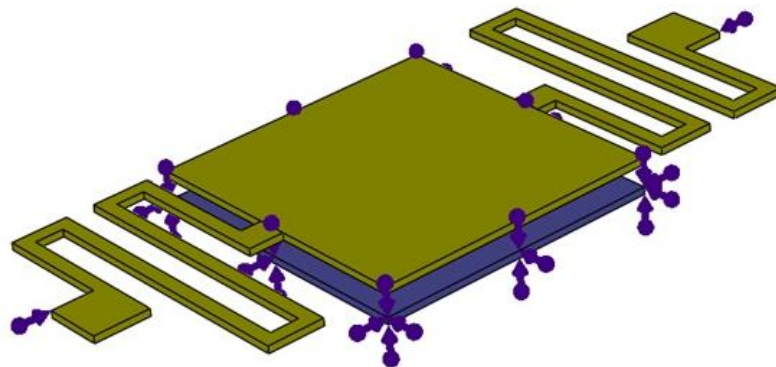


Рисунок 4.14 - Фіксоване обмеження, застосоване на нижній мембрана
Мережі

Геометрія моделі не містить дуже складних фігур. Мережеве управління застосовано до всіх твердих тіл режиму; цього буде достатньо для отримання точних електричних та структурних результатів. На рис. 4.15 показана створена сітка.

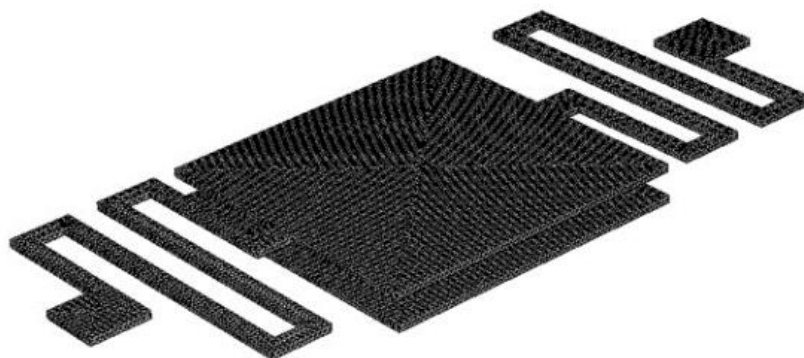


Рисунок 4.15 - Сітчаста модель

Результати моделювання

На нижню мембрану подано різні напруги. Сформована електростатична сила є джерелом відхилення верхньої мембрани. На рис. 4.16 показано результуюче переміщення як функція прикладеної напруги, обчисленої EMS порівняно з еталонними результатами.

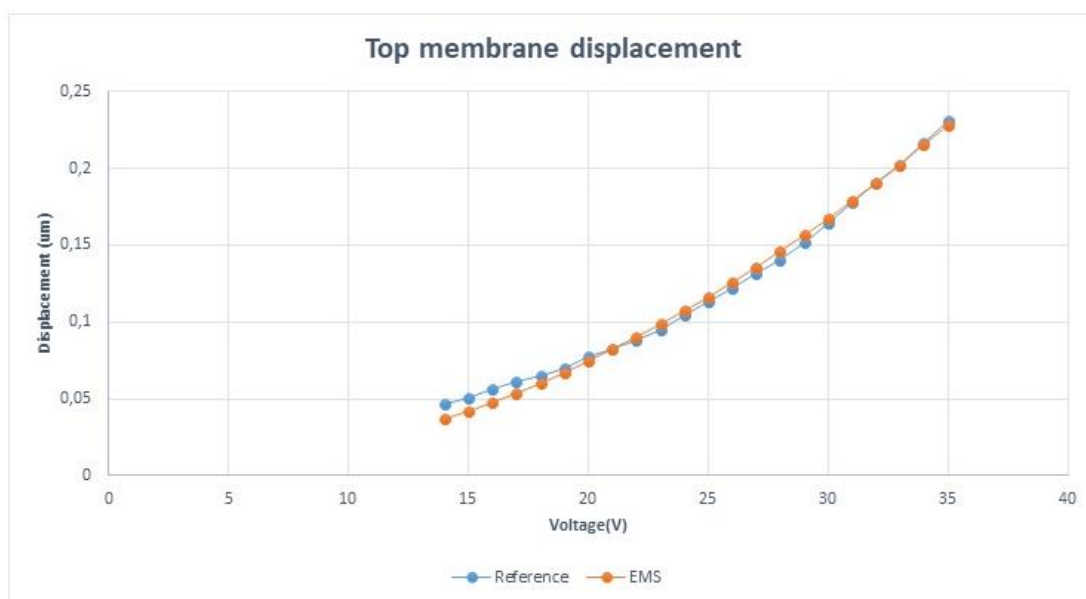


Рисунок 4.16 - Переміщення як функція напруги для EMS та еталон

Візуалізація результатів для напруги, що застосовується 33В:

EMS пропонує можливість дізнатися результуючу електричну жорстку силу тіла, що діє на деталі конструкції. У нашому випадку нас цікавить пошук електричної сили, що діє на верхню мембрану. У табл. 4.4 показані

компоненти вектору електричної сили, що діє на мембрану. Сила задана в ньютонках.

Таблиця 4.4 - Компоненти вектору електричної сили(таблиця результатів)

	Fx	Fy	Fz
Virtual Work - 1	-1.3525e-011	-7.7219e-010	-9.0504e-007

Аналітична формула

$$F_{el} = \frac{1}{2} \cdot \frac{dC}{dz} \cdot V^2$$

C: ємність

V: напруга, прикладена до нижньої мембрани

Кореляція між EMS та еталонним результатом:

Таблиця 4.5 - Порівняння EMS та еталонних результатів

	Результат EMS	Довідковий результат
Результатне переміщення під 33 В (в μm)	0.202591	0.201708

Результатний сюжет переміщення:

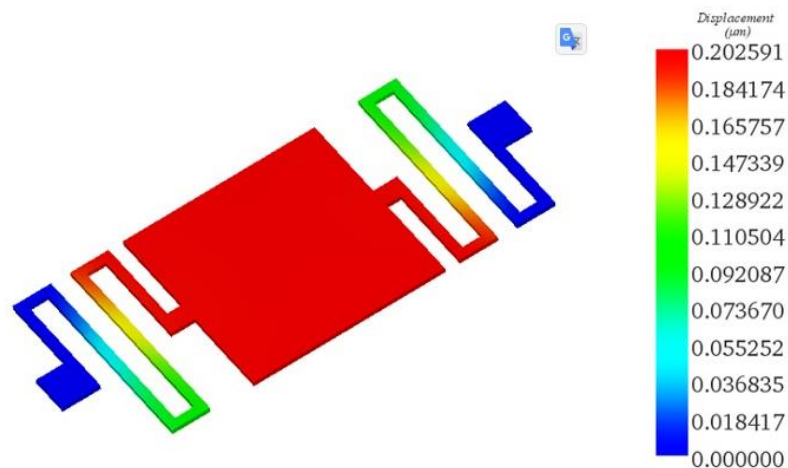


Рисунок 4.18 – Результатний розподіл зміщення на верхній мембрані

На рис.4.18 видно, що максимальне зміщення відбувається на квадратній мембрані

Отже, досліджено структурну поведінку мікросутливої мембрани з двома змійовиковими пружинами за допомогою програмного забезпечення для моделювання EMS. Розрахункове переміщення виявилось в хорошій відповідності з референтними результатами. Цей чисельний аналіз допоміг отримати уявлення про те, як пристрій MEMS реагує на різні входи постійної напруги; у досліджуваному випадку зміщення нижньої мембрани постійно збільшувалось із збільшенням прикладеної напруги.

5 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

Розроблена магістерська робота «Методи моделювання елементів мікросистемної техніки» призначена для дослідження програмного продукту в якому можна використовувати один з методів моделювання елементів мікросистемної техніки. Найпоширеніший метод є метод кінцевих елементів.

5.1 Визначення трудомісткості та тривалості

Весь комплекс моделювання можна розділити на етапи. Для кожного етапу вказуються трудомісткість, кількість виконавців і тривалість робіт. У дослідженні методів приймають участь дослідник протягом 1,3 місяці і консультант протягом 0,2 місяця. Дослідження починається сімнадцятого вересня і повинна бути виконана до шостого листопада 2019 року. Тривалість робіт визначають за формулою 5.1:

$$T_{ц} = \frac{Q}{R} = \frac{45}{2} = 22,5 \quad (5.1)$$

де $T_{ц}$ - тривалість циклу, днів;

Q - трудомісткість, людино-днів;

R - кількість виконавців, чол.

Отримана інформація зведена в табл. 5.1

Таблиця 5.1 - Завдання та обов'язки по моделюванню моделі

Найменування роботи	Трудомісткість		Виконавці	Тривалість, днів
	люд.- дні	%к підсумку		
1. Аналіз предметної області (ПО)	10	12,5	Дослідник	2.5
			Консультант	2.5
2. Визначення вимог до програмному продукту	10	12,5	Дослідник	10
3. Проектування структури моделі	10	25	Дослідник	10
4. Моделювання моделі у вибраній системі	10	25	Дослідник	10
5. Завдання граничних умов та параметрів моделі	5	12,5	Дослідник	5
6. Аналіз отриманих результатів	10	12,5	Дослідник	2.5
			Консультант	2.5
Разом	55	100		45

За даними табл. 5.1 складається зведений стрічковий графік планування моделювання моделі, який представляє собою таблицю, в першому стовпці якої розміщені в порядку збільшення термінів початку виконання всі види роботи, а навпаки - календарний період їх виконання. Даний графік наведено в табл. 5.2.

Таблиця 5.2 - Зведений стрічковий графік планування моделювання

Найменування робіт	Календарний період, дні								
	17.09-22.09.19	22.09-27.09.19	27.09-03.10.19	03.10-08.10.19	13.10-18.10.19	18.10-23.10.19	23.10-28.10.19	28.10-01.11.19	01.11-06.11.19
Аналіз ПО									
2. Визначення вимог до програмному продукту									
3. Проектування структури моделі									
4. Моделювання моделі у вибраній системі									
5. Завдання граничних умов та параметрів моделі									
6. Аналіз отриманих результатів									

- консультант

- дослідник

5.2 Визначення витрат на моделювання елементів

Для визначення витрат на моделювання елементів складається калькуляція вартісної вартості робіт, яка включає наступні статті:

- основна заробітна плата;
- додаткова заробітна плата;
- єдиний соціальний внесок (ЄСВ);
- витрати на спеціальне обладнання;
- матеріали і комплектуючі вироби;
- накладні витрати;
- податки.

5.2.1 Розрахунок основної заробітної плати

Витрати за цією статтею складаються з планового фонду зарплати всіх категорій працівників, зайнятих в моделюванні моделі. Розрахунок зарплати ведеться на підставі даних про трудомісткості, представлених в табл. 5.3.

Таблиця 5.3 - Розрахунок основної заробітної плати

Посада виконавця	Чисельність, чол.	Місячний оклад, грн.	Кількість місяців роботи	Сума ЗП, грн.
Дослідник	1	6000	1.1	6600
Консультант	1	5000	0,2	1000
Разом	2			7600

5.2.2 Розрахунок додаткової заробітної плати

Додаткову заробітну плату приймають рівною 10% від основної заробітної плати працівників і розраховують за формулою 5.2:

$$ЗП_{доп} = ЗП_{осн} \cdot 0,1 \quad (5.2)$$

Підставивши величину основної заробітної плати в формулу 5.2, отримуємо:

$$ЗП_{доп} = 7600 \cdot 0,1 = 760 \text{ грн}$$

5.2.3 Відрахування на єдиний соціальний внесок

Вони становлять 22% і беруться від основної та додаткової заробітної плати.

$$ОТ = (ЗП_{осн} + ЗП_{доп}) \cdot 0,22 \quad (5.3)$$

$$ОТ = (7600 + 760) \cdot 0,22 = 1839,2 \text{ грн.}$$

5.2.4 Визначення затрат на матеріали

У цю статтю включають вартість основних і допоміжних матеріалів, напівфабрикатів, що купуються, і комплектуючих виробів. Транспортно-заготовчі витрати приймають рівними 3-10% від вартості матеріалів. Використовується 3 найменування матеріалів: диск CD-R – 25 грн.; картридж - 250 грн.; папір - 105 грн. (1 пачка).

Витрати на комплектуючі розраховують за формулою 5.4:

$$M = \sum_{i=1}^n (Ц_i \cdot N_i \cdot (1 + K_{м.з.}) - Ц_{io} \cdot N_{io}), \quad (5.4)$$

де M - витрати на покупні напівфабрикати і комплектуючі вироби, грн.;

$K_{м.з.}$ - коефіцієнт, що враховує транспортно-заготівельні витрати;

$Ц_i$ - ціна i -го найменування напівфабрикату і комплектуючого, грн.;

N_i - потреба в i -му напівфабрикаті і комплектуючому;

C_{io} - вартість зворотних відходів і-го найменування комплектуючого, грн.;

N_{io} - кількість зворотних відходів і-го найменування;

n - кількість найменувань напівфабрикатів і комплектуючих.

$$C_{io} = 0; N_{io} = 0; K_{m.з.} = 0,05;$$

$$M = (1 + 0,05) \cdot (25 + 250 + 105) = 399 \text{ грн.}$$

Разом, витрати на матеріали становлять 399 грн.

5.2.5 Витрати на спеціальне обладнання

У цю статтю входять витрати на придбання, транспортування, монтаж і налагодження нестандартного обладнання.

У табл. 5.4 наведене обладнання яке використовується при роботі.

Таблиця 5.4 – Спеціальне обладнання

Матеріали	Одиниця Виміру	Кількість	Ціна за одиницю, грн.	Загальна вартість, грн.
Lenovo IdeaCentre AIO 330-20	шт.	1	6000	6000
Artline Business B27	шт.	1	7800	7800
Стіл комп'ютерний	шт.	1	950	950
Крісло комп'ютерне	шт.	1	1100	1100
Транспортно-підготовчі роботи 5%				792,5
Разом				16642,5

Амортизаційні відрахування визначають за формулою 5.5:

$$A = \Phi_{\sigma} \cdot \frac{H_a}{100}, \quad (5.5)$$

де Φ_{σ} - балансова вартість обчислювальної техніки, грн. ;

H_a - норма амортизаційних відрахувань на повне відновлення обчислювальної техніки, для ПК 25%.

Балансова вартість обчислювальної техніки становить 16642,5 грн.

Отримуємо:

$$A = 16642,5 \cdot 0,25 = 4160,6 \text{ грн.}$$

Статтю «Експлуатація обладнання» розраховують підсумовуванням витрат на електроенергію і допоміжні комплектуючі.

$$C_e = N_n \cdot \Phi_{ef} \cdot K_{зв} \cdot K_{зм} \cdot C_e, \quad (5.6)$$

де N_n - номінальна потужність ЕОМ, кВт;

Φ_{ef} - річний ефективний фонд часу роботи ЕОМ, машино-год;

$K_{зв}$ - середній коефіцієнт завантаження за часом;

$K_{зм}$ - коефіцієнт завантаження по потужності;

C_e - ціна одного кВт-год електроенергії, грн./(кВт-ч).

Номінальна потужність ЕОМ - 0,5 кВт. Річний ефективний фонд часу роботи ЕОМ становить 1800 годин. Середні коефіцієнти завантаження за часом і за потужністю рівні відповідно 0,9 і 0,6. Ціна однієї кіловат-години електроенергії становить 2,68 грн.

Отримуємо:

$$C_e = 0,5 \cdot 1800 \cdot 0,9 \cdot 0,6 \cdot 2,68 = 1302,5 \text{ грн.}$$

Зарплата обслуговуючого персоналу розраховується за формулою 5.7:

$$ЗП_{обсл} = ФЗП_{г} \cdot (1 + K_{отч}) \cdot \frac{t_{обсл}}{\Phi_{эф.обсл}} \quad (5.7)$$

де $ФЗП_{г}$ - річний фонд заробітної плати (основної і додаткової) обслуговуючих робітників, грн.;

$K_{отч}$ - коефіцієнт, що враховує відрахування на соціальне страхування і в інші фонди;

$t_{обсл}$ - час протягом року, необхідне на технічне обслуговування ЕОМ, ч/рік;

$\Phi_{эф.обсл}$ - річний ефективний фонд часу обслуговуючого персоналу, ч/рік.

Місячна заробітна плата обслуговуючого персоналу становить 7600 грн., а річний фонд заробітної плати відповідно дорівнює 91200 грн. Річний ефективний фонд робочого часу обслуговуючого ПК працівника дорівнює 1750 год / рік.

$$ЗП_{обсл} = 91200 \cdot (1 + 0,22) \cdot 12 / 1750 = 762,9 \text{ грн.}$$

Стаття «Поточний ремонт обладнання» приймається рівною 3% від балансової вартості обладнання і складає 500 грн.

Стаття «Інші витрати» приймається рівною п'яти відсоткам від суми всіх попередніх статей витрат на утримання і експлуатацію обладнання. Сума всіх попередніх статей дорівнює 6793,25 грн., 5% від суми складають 339,6 грн. Розраховані статті витрат на утримання і експлуатацію устаткування внесені в табл. 5.4.

Таблиця 5.4 - Кошторис витрат на утримання і експлуатацію устаткування

Найменування статей витрат	Сума, грн.
Амортизація обладнання	4160,6
Експлуатація обладнання (крім витрат на поточний ремонт)	1302,5
Заробітна плата основна і додаткова обслуговуючих робітників з ЄСВ	726,9
Поточний ремонт обладнання	500
Інші витрати	339,6
Разом	7029,6

Витрати на оплату машинного часу ЕОМ для моделювання моделі і налагодження програмних засобів визначаються за формулою 5.8:

$$C_{мо} = P_{екс} \cdot t_{мо}, \quad (5.8)$$

де $C_{мо}$ - витрати на оплату машинного часу, грн.;

$P_{екс}$ - експлуатаційні витрати на одну годину машинного часу цієї цифрової ЕОМ, грн. / машино-год.;

$t_{мо}$ - машинний час цифрової ЕОМ для написання і налагодження даного програмного продукту, машино-год.

«Витрати на утримання та експлуатацію обладнання (ЕОМ)» (табл. 5.4) на річний ефективний фонд часу роботи ЕОМ. Річний ефективний фонд часу роботи ЕОМ дорівнює 1800 годин. В результаті експлуатаційні витрати на одну годину машинного часу рівні:

$$P_{екс} = 7029,6/1800 = 3,90 \text{ грн./машино-год}$$

ЕОМ експлуатується 45 днів в одну зміну, що становить в сумі 360 годин. Таким чином, витрати на оплату машинного часу складуть:

$$C_{\text{мо}} = 3,90 \cdot 360 = 1404 \text{ грн.}$$

5.2.6 Інші прямі витрати

В інші прямі витрати включаються витрати на яке використовується при розробці системи комерційне програмне забезпечення:

- дольове ПЗ, що використовується постійно при роботі ПК (Windows 10) - 5000 грн. без НДС;
- цільове ПЗ, що купується для даного конкретного завдання (ANSYS) - 5000 грн. без НДС.

$$S_{\text{доль.ПЗ}} = \frac{C_{\text{ПЗWindows}} \cdot T_{\text{КТС}}}{\Phi_{\text{еф.КТС}} \cdot T_{\text{с.ПЗ}}} \quad (5.9)$$

$$S_{\text{ціль.ПЗ}} = C_{\text{ПЗ А}}$$

де $S_{\text{доль.ПЗ}}$ - витрати на дольове ПЗ при моделюванні розробляється в розрахунку ПЗ, грн .;

$S_{\text{ціль.ПЗ}}$ - витрати на цільове ПЗ, що купується виключно для моделювання в розрахунку ПЗ, грн .;

$C_{\text{ПЗWindows}}$ - ціна ПЗ Windows (без ПДВ), грн;

$C_{\text{ПЗ А}}$ - ціна ПЗ ANSYS (без ПДВ), грн;

$T_{\text{КТС}}$ - машинний час КТС, необхідне користувачеві для моделювання моделі, машино-год / рік;

$\Phi_{\text{еф.кмс}}$ - річний ефективний фонд часу роботи КТС, машино-год / рік;

$T_{\text{с.ПЗ}}$ - термін служби дольової ПЗ, років.

$$S_{\text{доп.ПЗ}} = \frac{5000 \cdot 360}{1800 \cdot 5} = 200 \text{ грн.}$$

$$S_{\text{цвл.ПЗ}} = 5000 \text{ грн.}$$

$$S_{\Sigma} = 200 + 5000 = 5200 \text{ грн.}$$

5.2.7 Розрахунок загальновиробничих витрат

До загальновиробничих витрат відносяться витрати на загальне управління і загальногосподарські потреби (заробітна плата апарату управління, канцелярські витрати і т.д.), утримання та експлуатацію будівель. Накладні витрати включаються до вартості моделювання непрямым шляхом - у відсотках до основної заробітної плати розробників. В даному випадку накладні витрати становлять 40% до основної заробітної плати розробників, що складає 7600 грн.

Результати визначення витрат на моделювання моделі у вигляді калькуляції кошторисної вартості робіт наведені в табл. 5.5.

Таблиця 5.5 - Калькуляція кошторисної вартості робіт з моделювання моделі

№	Найменування статей витрат	Сума, грн.	Питома вага до підсумку, %
1	Основна заробітна плата	7600	34,59
2	Додаткова заробітна плата	760	3,45
3	ЄСВ	1839,2	8,37
4	Матеріали	399	2,19
5	Витрати на спец. обладнання	16642,5	16,87
6	Інші прямі витрати	5200	20,7
7	Загальновиробничі витрати	3040	13,83
8	Разом (S_{np})	35480,7	100

5.3 Розрахунок техніко-економічної ефективності моделі

Для теоретичних досліджень у більшості випадків важко чи навіть неможливо розрахувати економічний ефект, тому доцільно визначити їхню техніко-економічну ефективність з урахуванням наступних показників:

- важливості дослідження для народного господарства;
- складності розробки;
- результативності й можливості використання.

Важливість теоретичного дослідження оцінюємо як пошук принципово нових конструктивних і технологічних рішень і ін.

Результативність НДР визначається по повноті рішень поставленого завдання: отриманий результат відповідає планованому, задовільний (часткове рішення) чи негативний.

Аналіз залежності між цими показниками й витратами на їхнє досягнення дає можливість кількісної оцінки техніко-економічної ефективності теоретичних НДР і визначається за формулою (5.10):

$$K_{\text{НДР}} = \frac{J^n \cdot R \cdot T}{B_{\text{НДР}} \cdot t_{\text{НДР}}}, \quad (5.10)$$

де $K_{\text{НДР}}$ - рівень ефективності дослідження (коефіцієнт техніко-економічної ефективності НДР):

J^n - важливість роботи;

R - результативність роботи;

T - технічна складність виконання НДР;

$B_{\text{НДР}}$ - витрати на проведення НДР, років;

n - показник використання результатів НДР:

$n = 0$ - результати НДР не використовуються;

$n = 1$ - результати НДР використовуються частково;

$n = 2$ - результати НДР використовуються в дослідно-конструкторських роботах (ДКР);

$n = 3$ - результати НДР можуть бути використані без проведення ДКР.

Для НДР, у яких $V_{\text{НДР}} > 30$ тис. грн. і $t_{\text{НДР}} \leq 2$ років, можна застосовувати такі значення оцінних факторів наведених в табл. 5.6

Таблиця 5.6 – Значення оцінних факторів

Оцінні фактори	J	R	T	C	t_{ϕ}	n
Припустимі значення	2...5	1...4	1...3	-	-	1...8
Прийняті значення	3	1	2	-	-	2

Згідно значень з таблиці оцінних факторів, отримуємо такий вираз:

$$K_{\text{НДР}} = \frac{3^2 \cdot 1 \cdot 2}{35480,7 \cdot 0,37} = 1,37$$

Таким чином, так як коефіцієнт техніко-економічної ефективності НДР $K_{\text{НДР}} \geq 1$, в нашому випадку рівний $K_{\text{НДР}} = 1,37$, то дослідницька робота вважається ефективною.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

6.1 Аналіз потенційних небезпек

Тема магістерської роботи «Методи моделювання елементів мікросистемної техніки».

Дослідження проводяться у приміщенні конструкторського бюро з довжиною 8 метрів та шириною 6 метрів, загальна площа становить 48 м².

Аналіз потенційних небезпек складається з визначення потенційно небезпечних або шкідливих виробничих чинників, пошуку причин їх появи та з'ясування можливих наслідків впливу на людину. До потенційних небезпек відносять:

- потенційні небезпеки, фізичного характеру механічне травмування, що може бути пов'язано з порушеннями правил охорони праці, зокрема, невикористання спеціальних приладів та запобіжних заходів;

- потенційні небезпеки психофізіологічного характеру, незадовільна організація робочого місця, що може бути пов'язана з недостатнім врахуванням вимог ергономіки, зокрема з нераціональним розташуванням технологічного обладнання та захаращеністю робочої зони або підвищеним психофізіологічним навантаженням при роботі з персональним комп'ютером через нераціональну організацію робочого часу;

- потенційні небезпеки санітарно-гігієнічного характеру, незадовільний стан повітряного середовища, незадовільний рівень освітленості, підвищений рівень шуму, вібрації, електромагнітних полів або іонізуючих випромінювань не виконання вимог до обладнання і організації робочих місць користувачів ПК та вимог до режиму праці й відпочинку;

- потенційні небезпеки, пов'язані з порушеннями правил пожежної безпеки, коротке замикання, що може призвести до виникнення пожежі, відсутність або неправильний вибір типу та необхідної кількості первинних засобів гасіння пожеж (вогнегасників), несправність електрообладнання;

- потенційні небезпеки, пов'язані з проявом наслідків надзвичайних ситуацій, такі як невідповідність персоналу до дій в умовах надзвичайних ситуацій та інші ситуації.

6.2 Заходи з забезпечення безпеки

Для захисту людей в приміщенні конструкторського бюро встановлено трьохполюсні розетки з нульовим заземленням. Захист від дотику до струмопровідних частин: контроль і профілактика пошкодження ізоляції; використання малих напруг; електричне і механічне блокування, сигналізація та маркування.

Для виключення ураження персоналу електричним струмом в проекті передбачено:

організаційні заходи: провести інструктаж згідно вимог НПАОП 0.00-4.12-05 «Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці», з метою попередження можливих травмувань, з усіма працівниками, прийнятими на роботу, а також у період роботи проводити навчання з питань: охорони праці; надання першої допомоги потерпілим від нещасних випадків; правилам поведінки при виникненні аварій або навчання з правил електробезпеки, перевірка знань та атестація персоналу на отримання та підвищення групи з електробезпеки.

технічні заходи: електроживлення обладнання ПК здійснюється від мережі змінного струму напругою 220 В і частотою 50 Гц. Відповідно до вимог «ПУЕ», електрообладнання в приміщенні з ПК, характеризується як електроустановки до 1000 В, тому згідно вимог глави 1.7 «ПУЕ» та ГОСТ 12.1.030-81 (2001) «ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление», величина опору контуру захисного заземлення електрообладнання приміщення з ПК не перевищує 4 Ом.

Для приміщення, обладнаного персональними комп'ютерами з візуальними дисплейними терміналами (далі ПК з ВДТ), визначаються

ергономічні характеристики моніторів, наприклад, відповідно до вимог розділу «Мінімальні вимоги з охорони праці», директиви ЄС 90/270 ЕЕС виконані основні вимоги до моніторів, які жорстко регламентують безпечні умови роботи і захист здоров'я осіб, що працюють з комп'ютерами:

- символи на екрані чіткі і добре розрізняються;
- зображення позбавлене блимання;
- яскравість та / або контрастність легко регулюються;
- екрани вільні від відблисків і відбиття;
- випромінювання знижені до надзвичайно малих рівнів.

Схемно-конструктивні заходи.

Призначені для забезпечення захисту від ураження електричним струмом при дотику до металевих оболонок, які можуть опинитися під напругою в результаті аварій.

Згідно з ГОСТ 12.1.030-81 (2001) «ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление» у приміщеннях галузі управління персоналом влаштовується занулення. .

Експлуатація електроустановок і електроустаткування проводиться відповідно до НПАОП 40.1-1.01-97 «Правила безпечної експлуатації електроустановок» (далі «ПБЕЕ») та НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів».

6.3 Заходи з виробничої санітарії та гігієни праці

Загальні ергономічні вимоги встановлено ДСТУ ISO 9241-1:2003 «Ергономічні вимоги до роботи з відеотерміналами в офісі. Частина 1. Загальні положення». Організація робочого місця передбачає: правильне розміщення робочого місця у виробничому приміщенні; вибір ергономічно обґрунтованого робочого положення, виробничих меблів з урахуванням антропометричних характеристик людини; раціональне компонування

обладнання на робочих місцях; врахування характеру та особливостей трудової діяльності.

Щоб тунельний синдром вас не турбував, потрібно дотримуватися кількох правил організації робочого місця:

- оптимальна висота клавіатури від підлоги – 65-75 см;
- наявність ергономічних і зручних особисто для вас миші і клавіатури;
- можливість регулювання висоти і нахилу клавіатури (відстань від поверхні стола до середини клавіатури – не більше 30 мм, кут підйому клавіатури – від 2° до 15°);
- наявність у клавіатури підставки для рук;
- наявність килимка для миші з захистом від тунельного синдрому (спеціальний виступ забезпечує правильне положення кисті);
- наявність стільця або крісла з підлокітниками;

Заходи щодо забезпечення виробничої санітарії і гігієни праці розробляються відповідно до вимог Державних санітарних норм та правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу», МЮУ 06.05.2014 р. за № 472/25249 (далі – «Гігієнічна класифікація праці»).

Проекти підприємств та їх побудова повинні відповідати вимогам «Санітарних норм і правил промислових підприємств» (СН245-7Г) і відповідним «Будівельним норми та правила» (БНіП), ці норми та правила становлять санітарні вимоги до промислових підприємств з урахуванням небезпечних речовин, що виділяються при технологічних процесах та метеорологічних умов. Удосконалення технічних процесів та обладнання з метою зменшення тепла у виробничих приміщеннях; раціональне розміщення технічного обладнання автоматизації дистанційного керування технічними процесами: вентиляція, опалення, кондиціонування повітря, захисні екрани, засоби індивідуального захисту; оздоровлення повітряного середовища, як один з основних напрямків у комплексі заходів.

Оцінка умов праці на робочих місцях, аналіз впливу на працюючих санітарно-гігієнічних чинників і параметрів трудового процесу, передбачених гігієнічною класифікацією проводиться в процесі трудової діяльності. При цьому, оцінюється технічний і організаційний рівень робочого місця та ступінь можливого ушкодження здоров'я.

- Заходи щодо забезпечення виробничої санітарії та гігієни праці для конструкторського бюро обладнаного ПК з ВДТ розроблені відповідно до вимог Державних санітарних норм та правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу», МЮУ 06.05.2014 р. за № 472/25249, ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні стандартні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» і НПАОП 0.00-1.28-10 «Правила охорони праці під час експлуатації електронно-обчислювальних машин».

Для забезпечення оптимального рівня параметрів повітряного виробничого середовища використовуємо ДСН 3.3.6-042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» та ГОСТ 12.1.005-88 (1991) «ССБТ.

- Заходи щодо освітленості робочої зони та її забезпечення для конструкторського бюро обладнаного ПК з ВДТ розроблені відповідно до вимог ДБН В.2.5-28-2006 «Інженерне обладнання будинків і споруд. Природне і штучне освітлення»);

- Заходи щодо виробничих вібрацій (згідно ДСН 3.3.6.039-99 «Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації» та ДСТУ ГОСТ 12.1.012:2008 «ССБП. Вібраційна безпека. Загальні вимоги»);

- Заходи щодо іонізуючих випромінювань і неіонізуючих електромагнітних полів та випромінювання моніторів (згідно МРР II, ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин», НПАОП 0.00-1.28-10 «Правила охорони праці під час експлуатації електронно-обчислювальних машин»);

- Заходи щодо важкості та напруженості праці (у відповідності до «Гігієнічної класифікації праці»);

- Заходи щодо режиму праці та відпочинку при роботі з ПК, згідно ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин»;

Освітлення робочого місця нормується згідно з Державними будівельними нормами України: ДБН В.2.5-28-2006 Інженерне обладнання будинків і споруд. Природне і штучне освітлення.

Мінімальна освітленість встановлюється в залежності від розряду виконуваних зорових робіт. Для IV розряду зорових робіт вона складає 300...500 лк. Для штучного освітлення у приміщенні використовуються люмінесцентні лампи. Розрахунок штучного освітлення проведемо для кімнати площею 48 м², довжина якої складає 8м, ширина – 6м, висота – 3м.

Скористаємося методом використання світлового потоку. Для визначення потрібної кількості світильників, які повинні забезпечити нормований рівень освітленості, визначимо світловий потік, що падає на робочу поверхню за формулою:

$$\Phi = \frac{E \cdot k_3 \cdot S \cdot Z}{\eta}, \quad (5.1)$$

де: Φ – світловий потік, що розраховується, лм;

E – нормована мінімальна освітленість, лк; $E = 300$ лк;

S – площа освітлюваного приміщення $S = 48\text{м}^2$;

Z – відношення середньої освітленості до мінімальної (зазвичай приймається рівним 1,1... 1,2, в нашому випадку $Z = 1,1$);

k_3 – коефіцієнт запасу, що враховує зменшення світлового потоку лампи в результаті забруднення світильників в процесі експлуатації (його значення залежить від типу приміщення і характеру робіт, що проводяться в ньому, в нашому випадку $k_3 = 1,5$);

η – коефіцієнт використання світлового потоку, (виражається відношенням світлового потоку, що падає на розрахункову поверхню, до сумарного потоку всіх ламп, і обчислюється в долях одиниці; залежить від характеристик світильника, розмірів приміщення, забарвлення стін і стелі, що характеризуються коефіцієнтами відбиття від стін ($\rho_{\text{ст.}}$) і стелі ($\rho_{\text{стелі}}$)), значення коефіцієнтів дорівнюють $\rho_{\text{ст.}} = 30\%$ і $\rho_{\text{стелі}} = 70\%$.

Обчислимо індекс приміщення за формулою:

$$I = \frac{S}{h(A+B)}, \quad (5.2)$$

де: S – площа приміщення, $S = 48\text{м}^2$;

h – розрахункова висота підвісу, $h = 2,2$ м;

A – довжина приміщення, $A = 8$ м; B – ширина приміщення, $B = 6$ м.

Підставивши значення отримаємо:

$$I = \frac{48}{2,9 \cdot (8+6)} = 1,18$$

Знаючи індекс приміщення I , за таблицею 4 [ДБН В.2.5-28-2006] знаходимо $\eta = 0,46$.

Підставимо всі значення у формулу для визначення загального світлового потоку Φ :

$$\Phi = \frac{300 \cdot 1,5 \cdot 48 \cdot 1,1}{0,46} = 51652 \text{ лм}$$

Для освітлення використані люмінесцентні лампи типу ЛПО, світловий потік яких $\Phi = 3200$ лм. Розрахуємо необхідну кількість ламп у світильниках за формулою:

$$N = \frac{\Phi}{\Phi_l}, \quad (5.3)$$

де: N – кількість ламп, що визначається;

Φ - світловий потік, $\Phi = 51652$ лм;

$\Phi_{\text{л}}$ - світловий потік лампи, $\Phi_{\text{л}} = 3200$ лм

$$N = \frac{51652}{3200} = 16$$

В приміщенні використовуються світильники типу ЛПО. Кожен світильник комплектується двома лампами ЛБ-40. Тобто необхідно використовувати 8 світильників по 4 у кожному ряді.

6.4 Заходи з пожежної безпеки

Комплекс протипожежних заходів для виробничого приміщення (дослідницької лабораторії, конструкторського бюро тощо) обладнаного ПК з ВДТ розроблений згідно вимог НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні».

- Згідно ГОСТ 27331-87 (СТ СЭВ 5637-86) «Пожарная техника. Классификация пожаров» у приміщенні (дослідницької лабораторії, конструкторського бюро, тощо) обладнаному ПК з ВДТ можлива пожежа класів – П-П_а.

- Обчислювальний центр, згідно ДСТУ Б В.1.1-36:2016 «Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою» відноситься до категорії «П-П_а», а клас можливої пожежі, згідно ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва», визначається як А та Е.

- У разі виникнення пожежі у конструкторського бюро, обладнаному ПК з ВДТ для евакуації персоналу відповідно до вимог ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги» передбачені виходи, по обидві сторони приміщення, з одного боку вікно (на пожежні сходи), а з іншого – вхідні двері.

- Обладнання, силові та освітленні мережі приміщення (дослідницької лабораторії, конструкторського бюро, тощо) обладнаного ПК з ВДТ відповідають вимогам пожежної безпеки, оскільки виконані відповідно до вимог НПАОП 40.1-1.32-01 «Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок», та мають ступінь захисту ізоляції обладнання IP44 яка відповідає класу пожежанебезпечної зони до якої належить приміщення.

- З технічних та організаційних заходів запобігання пожеж в приміщенні (дослідницької лабораторії, конструкторського бюро, тощо) обладнаному ПК з ВДТ передбачені наступні протипожежні заходи. На силовому обладнанні, силових та освітлювальних колах, згідно вимог пункту 3.1 «ПУЕ», встановлені захисні пристрої, що вимикають джерело живлення від ділянки електричного кола, у якій виникло коротке замикання.

- Оскільки приміщення конструкторського бюро, що обладнане ПК з ВДТ має площу 48м², тому відповідно до вимог п. 3.8 розділу «Типові норми належності вогнегасників» ДСТУ 4297:2004 «Пожежна техніка. Технічне обслуговування вогнегасників. Загальні технічні вимоги» для гасіння електроустановок, що знаходяться під напругою, передбачені вуглекислотні вогнегасники типу ВВК-3,5 у кількості 2 штук (з розрахунку один вогнегасник с величиною заряду вогнегасної речовини 3 кг. і більше, на 20 м² площі приміщення). Відстань між вогнегасниками та місцями можливих загорянь не перевищує 10 м.

6.5 Заходи забезпечення безпеки у надзвичайних ситуаціях

Заходами забезпечення безпеки в загородній зоні, робочих та службовців, населення в надзвичайних ситуація є евакуація.

Евакуація проводиться на державному, регіональному, місцевому або об'єктовій рівні. Залежно від особливостей надзвичайними ситуації встановлюються різні види евакуації, а отже:

- обов'язкова;
- загальна або часткова;
- тимчасова або безповоротна.

Рішення про проведення евакуації приймають:

- на державному рівні - Кабінет Міністрів України;
- на регіональному рівні - обласні державні адміністрації;
- на місцевому рівні - районні державні адміністрації і органи місцевого самоврядування;
- на об'єктовому рівні - керівники об'єктів.

У разі виникнення радіаційних аварій рішення про евакуації населення приймається місцевими державними адміністрації на підставі висновку санітарно-епідеміологічної служби про прогнозовану дозу опромінення населення або на основі інформації, отриманої від керівників радіаційно небезпечних об'єктів. У невідкладних випадках, рішення про проведення екстреної евакуації населення може прийняти керівник робіт по ліквідації наслідків надзвичайної ситуації, а в разі його відсутності - керівник будь якої аварійно-рятувальної служби, який першим прибув в зону надзвичайної ситуації.

Обов'язкову евакуацію населення проводиться в випадках виникнення наступних загроз:

- аварій з викидом радіоактивних або небезпечних хімічних речовин;
- катастрофічного затоплення місцевості;
- масових лісових і торф'яних пожеж, землетрусів, зсувів, а також інших геологічних і гідрогеологічних явищ і процесів;
- збройних конфліктів (з районів можливих бойових дій в безпечні райони, визначені Міністерством оборони України на особливий період).

Загальна евакуація проводиться для всіх категорій населення з зон:

- можливого радіоактивного та хімічного забруднення;

- катастрофічного затоплення місцевості, для якої час приходу хвилі прориву становить 4 години до руйнування гідротехнічної споруди.

Часткова евакуація проводиться для вивезення тих категорій населення, які за віком або за станом здоров'я, що не здатні самотійно евакуюватися, а також осіб, офіційно доглядаючих за ними.

Проведення евакуації забезпечується шляхом:

- створення регіональних, місцевих та об'єктових евакуаційних органів;
- планування евакуації;
- визначення безпечних районів, придатних для розміщення евакуйованого населення і майна;
- організацію оповіщення керівників об'єктів і населення про початок евакуації;
- організації управління евакуацією;
- життєзабезпечення евакуйованого населення в місцях їх безпечного розміщення;
- навчання населення діям при евакуації.

Для вивезення основної частини населення із зони надзвичайної ситуації або районів можливих бойових дій залучаються транспортні засоби об'єктів, а в разі безпосередньої загрози життю або здоров'ю населення - усі наявні транспортні засоби об'єктів і громадян.

Об'єктам і громадянам, транспортні засоби яких залучались для евакуації, компенсуються вартість надання послуг і фактичні витрати на рахунок коштів, що виділяються на ліквідації наслідків надзвичайної ситуації або усунення загрози її виникнення.

Працівники об'єктів, власники, користувачі, водії транспортних засобів, які відмовилися від надання послуг з перевезення населення в зв'язку з надзвичайною ситуацією, несуть відповідальність згідно закону.

ВИСНОВКИ

В магістерській роботі були розглянуті методи моделювання елементів мікросистемної техніки та питання застосування програмних засобів, які використовуються при проектуванні пристроїв мікросистемної техніки. Було проаналізовано відомості про спеціалізовані системи проектування, про універсальні CAE- та інші пакети програм, які забезпечують вирішення завдань моделювання і розробку елементів мікросистемної техніки.

Завдання освоєння існуючого досвіду з моделювання МСТ представляє інтерес як для дослідницьких, так і для проектних завдань. Аналіз існуючих методик дозволяє визначити конкретні підходи до використання пакетів, що виконують моделювання складних фізичних процесів, для аналізу поведінки пристроїв МСТ. Вибір на користь аналітичного опису або чисельного моделювання визначається специфікою конкретного завдання. У багатьох випадках найкращий ефект досягається шляхом комбінування різних підходів. На ранніх стадіях проектування, як правило, використовуються аналітичні моделі. Детальне вивчення пристроїв зазвичай проводиться чисельними методами. Для аналізу МЕМС на системному рівні використовують поведінкові моделі, отримані шляхом зниження порядку складності вихідної моделі.

Також, було визначено, що найкращим методом є чисельне моделювання, що визначається специфікою конкретного завдання. У багатьох випадках найкращий ефект досягається шляхом комбінування різних підходів.

Виконано приклад магнітного аналізу електромагнітного приводу, як осесиметрична двовимірна (2-D) модель в універсальній системі проектування ANSYS 6.1, та електростатичний привід, що зазвичай використовується в МЕМС, заснований на електростатичних полях і силах, які вони створюють на конструкції за допомогою універсальної системи моделювання EMS від EMWorks. В ній було досліджено структурну поведінку мікрочутливої мембрани з двома змійовиковими пружинами. Розрахункове переміщення

виявилось в хорошій відповідності з референтними результатами. Цей чисельний аналіз допоміг отримати уявлення про те, як пристрій МЕМС реагує на різні значення вхідної постійної напруги; у досліджуваному випадку зміщення нижньої мембрани постійно збільшувалось зі збільшенням прикладеної напруги.

Наведено економічне обґрунтування магістерської роботи.

Запропоновано заходи з охорони праці при проведенні проектних робіт під час виконання моделювання елементів мікросистемної техніки.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Проектирование микросистем. Программные средства обеспечения САПР : учеб. пособие / А. А. Левицкий, П. С. Маринушкин. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2010. – 156 с.
2. Введення в мікросистемну техніку та нанотехн логії [Текст] : підручн. / В. В. Семенець, І. Ш. Невлюдов, В. А. Палагін. — Х. : ТОВ «Компанія СМІТ», 2011. — 416 с.
3. Коноплев Б.Г., Лысенко И.Е. Компоненты микросистемной техники. Часть 1.– Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009.– 117 с
4. . ANSYS в примерах и задачах / Под общ. ред. Д. Г. Красковского. – М.; КомпьютерПресс, 2002. – 224с.: ил.
5. Учебно-методическое пособие "Моделирование элементов микросистемной техники в программе ANSYS".– Таганрог: Изд-во Технологического института ЮФУ, 2007.– 42
6. Нано- и микросистемная техника
ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.microsystems.ru/>
7. НПАОП 0.00-4.12-05 «Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці»
8. ГОСТ 12.1.030-81 (2001) «ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление»
9. ДСТУ ISO 9241-1:2003 «Ергономічні вимоги до роботи з відеотерміналами в офісі. Частина 1. Загальні положення»
10. ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні стандартні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин»
11. НПАОП 0.00-1.28-10 «Правила охорони праці під час експлуатації електронно-обчислювальних машин».
12. ДСН 3.3.6-042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень»

13. ДБН В.2.5-28-2006 «Інженерне обладнання будинків і споруд. Природне і штучне освітлення»
14. НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні»
15. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 «Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою»
16. Методичні вказівки до виконання економічного розділу дипломних та магістерських проектів для студентів спеціальності 7.05090301, 8.05090301 «Інформаційні мережі зв'язку» всіх форм навчання. /Укладачі: Бобровникова Р.Г., Круглікова В.В. - Запоріжжя: ЗНТУ, 2012. – 18 с.
17. Методичні вказівки по економічному обґрунтуванню дипломних проектів для студентів спеціальностей 7.080403 «Програмне забезпечення автоматизованих систем», 7.080402 «Інформаційні технології проектування» та 7.091501 «Комп'ютерні і інтелектуальні системи і мережі» для усіх форм навчання. /Укл.: Остапенко В. В., Сердюк Є.М. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2009. – 23 с.
18. Моделювання елементів мікросистемної техніки в програмі ANSYS [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://www.novsu.ru/file/1057459>
19. Комп'ютерне моделювання компонентів МЕМС [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://www.mes-conference.ru/data/year2008/74.pdf> 21.
20. Вікіпедія. П'єзоелектричний ефект [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://ru.wikipedia.org/wiki/Пьезоэлектрический_эффект
21. Інженерний аналіз методом кінцевих елементів [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://www.edushk.ru/matematika/5572/index.html> 23.
22. Система автоматизованого побудови просторових сіток для рішень завдань методом граничних елементів на основі технології СОМ [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://www.cs.vsu.ru/sbem-contact/papers6.php>.
23. Проектування МЕМС [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://www.micromachine.narod.ru/>.
24. Словник нано-термінів [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://thesaurus.rusnano.com>.