

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Електронної та біомедичної інженерії _____
(повна назва)

Кафедра _____ Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв _____
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти _____ перший (бакалаврський) _____

_____ РОЗРОБКА МІКРОРЕЗОНАТОРУ МЕМС _____
(тема)

Виконав:
студент 4 курсу, групи МНТМН-21-1
Золкін Г.П. _____
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 153 Мікро- та наносистемна те-
хніка _____
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна _____

Освітня програма Мікро- та наноелектроніка _____
(повна назва освітньої програми)

Керівник Карнаушенко В.П. _____
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____
(підпис)

Бондаренко І. М. _____
(прізвище, ініціали)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Електронної та біомедичної інженерії _____
 Кафедра _____ Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв _____
 Рівень вищої освіти _____ перший (бакалаврський) _____
 Спеціальність _____ 153 Мікро- та наносистемна техніка _____
 (код і повна назва)
 Тип програми _____ освітньо-професійна _____
 Освітня програма _____ «Мікро- та наноелектроніка» _____
 (повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
 (підпис)
 « _____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові _____ Золкіну Глібу Павловичу _____
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ «Розробка мікро резонатору МЕМС»
 затверджена наказом університету від 20 05 2025 р. № 454Ст _____
2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 5 06 2025 р.
3. Вихідні дані до роботи: напруга живлення - 5 В, робоча частота – 15-20 кГц, технологія мікро механіки, розміри – до 1 мм² _____
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі
 - 1) Аналітичний огляд
 - 2) Розробка мікро приводу із застосуванням САПР
 - 3) Конструкторська частина
5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) _____
Схема електрична принципова, схема монтажна, друкована плата
Слайди _____

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання	20.04.2024	
2	Огляд інформаційних джерел	1.05-10.05	
3	Створення проекту за допомогою САПР	10.05-15.05	
4	Розробка конструкції пристрою	15.05-25.05	
5	Пояснювальна записка	25.05-30.05	
6	Підготовка презентації	1.06-2.06	
7	Рецензування, нормконтроль	2.06-5.06	
8	Здача роботи на кафедрі	8.06.2024	

Дата видачі завдання 20 квітня 2025р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи ВПК _____ Карнаушенко В.П.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи складає: 39 сторінок, 24 рисунків, 8 джерел, 3 додатки.

MEMS, САПР, МІКРОСИСТЕМА, ПРОЄКТУВАННЯ

Об'єкт дослідження – засоби проєктування мікро електромеханічних систем

Метод дослідження – аналітичний.

Мета роботи – метою даної кваліфікаційної роботи є дослідження систем автоматизованого проєктування MEMS, розробка мікро приводу із застосуванням САПР.

Актуальність теми – розвиток систем автоматизованого проєктування мікросистем надає можливість спростити інтеграцію MEMS в сучасну мікроелектроніку.

ABSTRACT

The explanatory note to the qualification paper consists of: 39 pages, 24 figure, 8 sources 3 appendices.

MEMS, CAD, MICROSYSTEM, DESIGN

Object of research – means of designing micro electromechanical systems

Research method – analytical.

Purpose of work – the purpose of this qualification work is to study automated design systems for MEMS, develop a micro drive using CAD.

Relevance of the topic – the development of automated design systems for microsystems provides an opportunity to simplify the integration of MEMS into modern microelectronics.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД	9
.1 Перспективні напрями розвитку МЕМС	17
2 РОЗРОБКА МІКРОПРИВОДУ МЕМС	20
2.1 Системи проєктування МЕМС	25
2.2 Розробка топології приводу МЕМС	29
ВИСНОВКИ	38
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	39
ДОДАТКИ	40

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

MEMS, MEMS – мікро електромеханічні системи;

MST – мікросистемна техніка;

AI – штучний інтелект;

DLP – Digital Light Processing;

DMD – Digital Micromirror Device;

IOT – інтернет речей;

LIGA – технологія виробництва;

LVS – компоновка за схемою, layout vs. schematic;

MUMPS – багато користувальницький MEMS-процес;

SUMMiT – технологія виробництва MEMS;

SPICE – симулятор.

ВСТУП

Мікро електромеханічні системи (МЕМС, MEMS) окремо і мікросистемна техніка (МСТ) взагалі відіграють величезну роль в сучасному житті людини, починаючи від побутових приладів і закінчуючи надскладними виробництвами, транспортними системами, аерокосмічною і військовою галуззю, обчислювальними і керуючими комплексами, зв'язком і таке інше. Зростання рівня мікроелектронних технологій призвело до появи нового напрямку в напівпровідниковій галузі – одно і багато кристальних продуктів системного рівня. Поєднання функцій механічних, оптичних, теплових і мікро флюїдних систем з традиційною мікроелектронікою дало надзвичайний поштовх в розвитку нового напрямку напівпровідникової галузі.

Треба відзначити, що шлях від перших лабораторних зразків МЕМС до рівня сучасного виробництва був доволі складним, оскільки традиційні технології напівпровідникової мікроелектроніки і матеріали, що використовувались для виробництва інтегральних схем не могли повністю задовольнити потреби розробників мікросистем. Однак невпинний прогрес технологій, обладнання, матеріалів і засобів розробки забезпечили сталий розвиток галузі, що стала однією з провідних в інтегральній мікроелектроніці.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

Тенденція до менших розмірів, вищої продуктивності та більшої функціональності електронних пристроїв стала можливою завдяки успіху технології твердотільної мікроелектроніки. Наприкінці 1980-х років було розроблено і налагоджено виробництво надвеликих інтегрованих схем для використання в галузі мікро електромеханічних систем [1]. Ця галузь має різні назви в різних частинах світу: мікро електромеханічні системи, мікросистемна технологія, мікро механіка та мікросистеми повного циклу тощо. Ці системи об'єднують обробку електричних сигналів із вимірюванням параметрів зовнішнього середовища та керуванням вбудованими пристроями. MEMS поєднують в собі різні електронні функціональні блоки з рухомими частинами механічних елементів, утворюючи мініатюрні системи, такі як акселерометри, датчики тиску та потоку рідини, гіроскопи та мікро оптичні пристрої.

Практично в кожній галузі пов'язаній з вимірюванням різних видів фізичних величин і контролем навколишнього середовища, можна зустріти системи, що містять елементи, виконані за технологією MEMS. Всі ці типи датчиків можна умовно поділити на 4 категорії: інерційні датчики та датчики, що відносяться до всіх видів руху, датчики, що контролюють стан навколишнього середовища, датчики, що містять оптичні елементи, системи BioMEMS пов'язані з переробкою органічних речовин. У кожній із цих груп можна розмістити десяток інших різних типів датчиків.

Інтегральна технологія виготовлення ІС використовується для виготовлення механічних мікроструктур, таких як балки, пружини, діафрагми, отвори, канавки, шестерні, з'єднання та складні механічні підвісні структури. Технології MEMS пристроїв можна розділити на два класи виготовлення: поверхнева мікро обробка та об'ємна мікро обробка.

Мікро обробка поверхні – це технологія адитивного виготовлення, яка передбачає формування об’ємних структур на поверхні підкладки. Специфічні елементи структури пристрою формуються по чергово з шарами жертвовного матеріалу під час процесу виготовлення. Структурні частини вивільнюються шляхом розчинення жертвовних шарів хімічним травником. Мікро обробка поверхні може бути використана для виготовлення не лише відносно традиційних механічних структур, таких як балки або діафрагми, але й більш складних, таких як шестерні, з’єднання та елементи мікро двигунів. Для створення прототипів конструкцій MEMS існують різноманітні процеси мікро обробки поверхні полікристалічного кремнію, такі як MUMPS (багато користувальницький MEMS-процес) та SUMMiT (Sandia Ultra-planar Multi-level MEMS). Для формування механічних структур використовуються багаторівневі шари легованого або не легованого полі кремнію, а шари діоксиду кремнію – як жертвний матеріал. Технологічний процес формування мікроструктур за технологією SUMMiT показано на рис. 1.1 [2]. Електростатичний мікро мотор, виготовлений за допомогою поверхневої мікро обробки, показано на рис. 1.2.

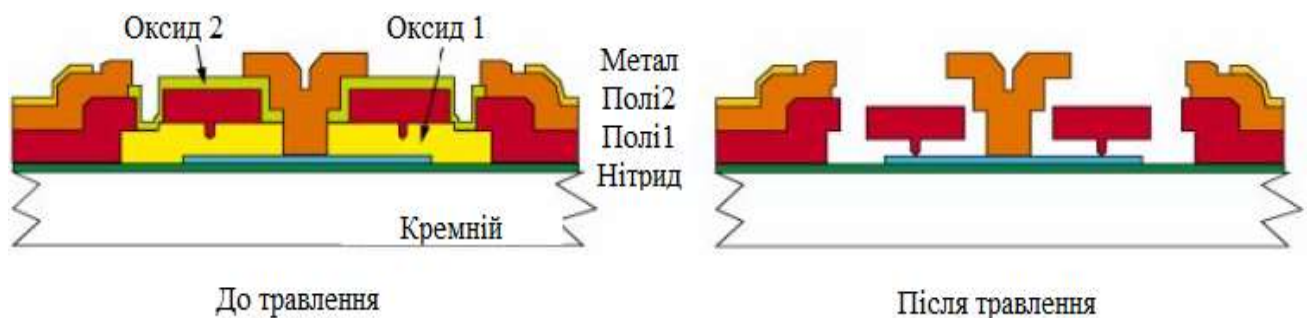


Рисунок 1.1 – Процес формування MEMS структур за технологією жертвовного шару

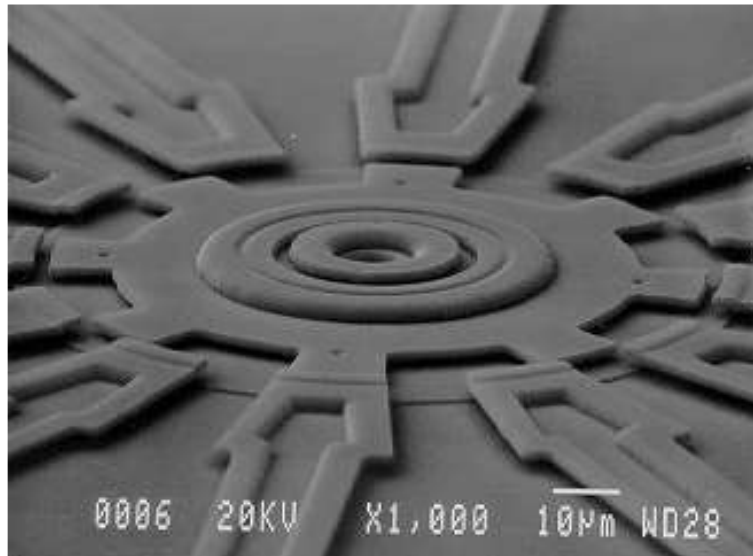


Рисунок 1.2 – Електростатичний мікро мотор сформований за поверхневою технологією (діаметр 80 мкм)

Конструкція MEMS-пристрою обмежена площинною геометрією традиційного процесу виготовлення ІС. Тривимірну структуру або структуру з високим аспектним співвідношенням (відношення висоти до ширини) важко виготовити за допомогою сталих технологій. Для створення структури з високим аспектним співвідношенням (декілька десятків) була застосована техніка рентгеновської фотолітографії (LIGA). Суть процесу полягає у використанні рентгеновського випромінювання від синхротрона для отримання глибоких, з перпендикулярними стінками топологічних структур у полімерному матеріалі. Глибина проникнення випромінювання досягає одиниць міліметрів. Ця технологія не отримала широкого розповсюдження внаслідок високої вартості обладнання. Мікроредуктор та двигун, виготовлені за допомогою LIGA, надані на рис. 1.3.

Треба зазначити, що процес проєктування мікросистем стикається зі значними труднощами, що значною мірою обумовлено над малими розмірами як самих механічних структур, наприклад проблема сухого тертя, чи колізії через сили поверхневого натягу, так і близькістю традиційних транзисторних функціональних блоків, що викликає проблеми з узгодженням взаємного впливу окремих блоків [3].

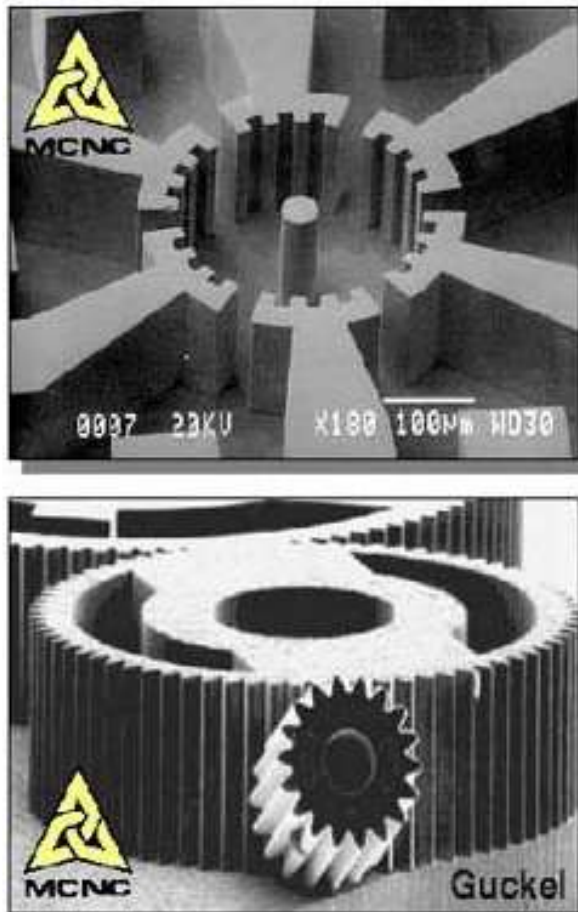


Рисунок 1.3 – Компоненти мікро мотору за технологією LIGA (MCNC)

Застосовувати звичайні для макромеханіки функції масштабування неможливо, оскільки при лінійному зменшенні розмірів «масові» сили зменшуються в кубі, а «поверхневі» тільки в квадраті. В мікро системах зростає вплив в'язкості, в пристроях різних приводів (демпферах, резонаторах тощо) найбільш впливовими виявляються електростатичні, а не звичні електромагнітні сили взаємодії.

Електростатичні актюатори використовують електростатичну силу, що забезпечує керування структурами конденсаторів з паралельними пластинами або гребінчасту структуру. Сили тяжіння та відштовхування, що генеруються розподілом електричного заряду, використовуються для перетворення електричної енергії в механічну. Пристрої з електростатичним актюатором (наприклад, мікро дзеркальна матриця, мікроперемикач, сканер, мікро затвор, мікро мотор)

широко використовуються в різних галузях. Одним з найяскравіших представників пристроїв із електростатичними актюаторами є DLP-проектори (Digital Light Processing) (рис. 1.4). В основі цих приладів лежить відносно велика, за загальним розміром корпусу мікро електромеханічна система під назвою DMD (Digital Micromirror Device, цифровий мікро дзеркальний пристрій).

DMD – це оптична мікро електромеханічна система, яка містить масив алюмінієвих мікро дзеркал з високою відбивною здатністю. Окремий елемент (піксель) DMD є електромеханічним елементом що має два стабільні стани мікро дзеркала ($\pm 12^\circ$ для більшості сучасних DMD), які визначаються геометрією та станом пікселя під час роботи.

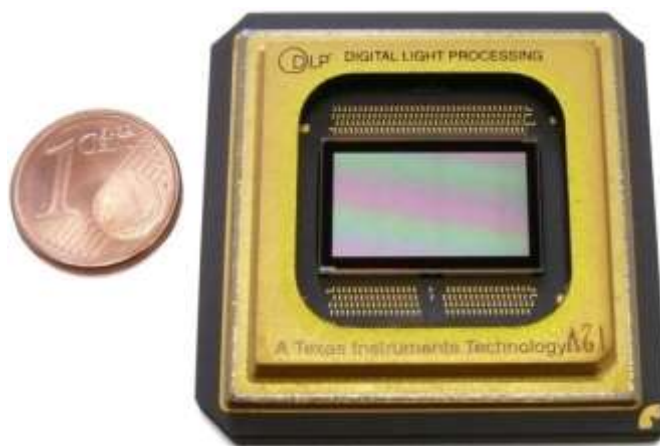


Рисунок 1.4 – Мікро дзеркальний процесор (Texas Instruments)

Положення кожного оптичного елемента залежить від електростатичного заряду актюатора, що визначає напрямок відхилення світла. Зокрема, DMD є просторовим модулятором світла. За умовчанням, позитивний стан називається станом «увімкнено», а негативний – «вимкнено». На рисунку 1.5 показано два окремих пікселі, один увімкнений, а один вимкнений. Це єдині робочі стани мікро дзеркала.

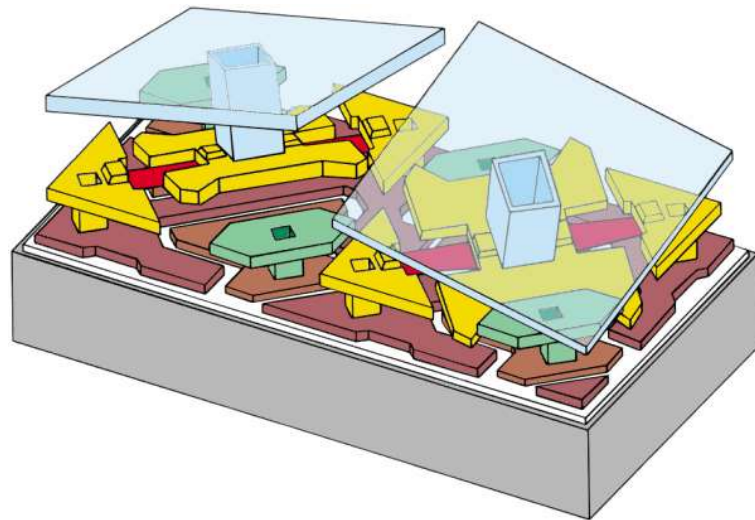


Рисунок 1.5 – Комірка DMD з двох мікродзеркал

Механічно піксель складається з мікро дзеркала, закріпленого за допомогою перехідного отвору до прихованого торсійного шарніру. Нижня сторона мікродзеркал контактує з пружинними балками, як показано на рисунку 1.6.

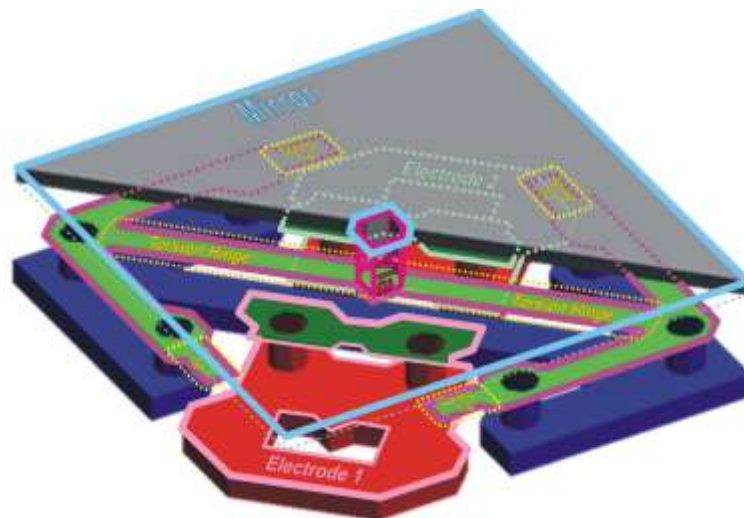


Рисунок 1.6 – Комірка мікродзеркала у вимкненому стані

Під кожним мікродзеркалом розташована комірка пам'яті, сформована з двох елементів пам'яті CMOS (рис. 1.7). Стан двох елементів пам'яті не є незалежним, а завжди доповнює один одного. Якщо один елемент має логічний

стан 1, то інший елемент має логічний стан 0, і навпаки. Стан комірки піксельної пам'яті відіграє певну роль у механічному положенні мікро дзеркала, проте він не є єдиним фактором і завантаження комірки пам'яті не змінює автоматично механічний стан мікро дзеркала.

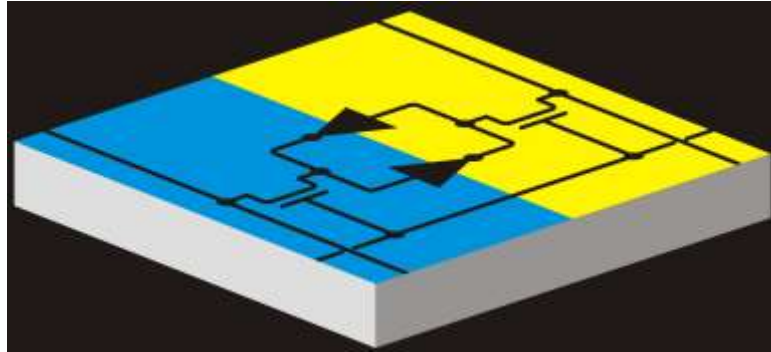


Рисунок 1.7 – Комірка пам'яті, з двох елементів пам'яті CMOS

Після того, як мікро дзеркало встановлено, зміна стану комірок пам'яті не призведе до перемикання мікро дзеркала в інший стан. Тому стан пам'яті та стан мікро дзеркала безпосередньо не пов'язані між собою.

Для того, щоб стан CMOS-пам'яті перейшов у механічне положення мікро дзеркала, піксель повинен отримати "імпульс синхронізації дзеркала" (скидання). Цей імпульс синхронізації дзеркала на мить звільняє мікро дзеркало, а потім знову встановлює його на основі стану CMOS-пам'яті, встановленого раніше. Тому важливо, щоб комірка пам'яті не перезаписувалася під час дії імпульсу синхронізації дзеркала.

У паспортних технічних характеристиках DMD вказано час до та після виникнення імпульсу синхронізації дзеркала, коли дані не можуть бути завантажені в піксельну CMOS-пам'ять. Це дозволяє попередньо завантажувати пам'ять груп пікселів та змінювати їхнє механічне положення одночасно з тактовим імпульсом для дзеркала.

Електростатичний привод домінує в розробці приводів у мікросвіті завдяки своїй простоті та більшій сумісності з виготовленням інтегральних схем. Ін-

ша форма мікромеханіки базується на п'єзоелектричному ефекті [4]. П'єзоелектричні плівки можуть бути використані для забезпечення руху в різних застосуваннях, таких як клапани, насоси та пристрої позиціонування. Типовими п'єзоелектричними тонкими плівками, що зараз використовуються в технології мікроактюаторів, є оксид цинку (ZnO), цирконат титанат свинцю, (PZT) та полівініліденфторид. З цих матеріалів PZT має найбільший п'єзоелектричний коефіцієнт. Термічний актюатор використовує біморфну структуру, в якій існує невідповідність теплового коефіцієнта розширення між двома шарами матеріалів для створення зусилля або руху. Біморфна структура може забезпечувати деформації в латеральній або перпендикулярній площини до підкладки. Загалом, теплові мікроактюатори мають повільний час відгуку (порядку десятків мілісекунд) та високе енергоспоживання (порядку десятків міліват). Електростатичні мікроактюатори можуть бути набагато швидшими (з часом відгуку, що вимірюється в мікросекундах), і споживають набагато менше енергії, але і генерують значно меншу потужність [5].

Інша складова частина мікросистем це мікросенсори – компоненти, які перетворюють неелектричну форму енергії в електричну у відповідь на певну вхідну дію. Фактичним початком напряму мікро системної техніки вважається розробка і початок виробництва в середині семі десятих років перших інтегральних МЕМС сенсорів тиску. Хоча, як такі, мікро механічні датчики з'явилися раніше, але насправді вони були лишень первинними перетворювачами і не мали інтегрованих електронних засобів обробки, або збудження. Наступним не аби яким кроком в розвитку галузі мікро електромеханіки стала розробка і широке впровадження в транспортну електроніку датчиків прискорення – акселерометрів. Перші масові акселерометри ADXL склалися за дво кристальною однокорпусною технологією: механічна (первинний перетворювач) і електронна (схема обробки) частини були сформовані на різних кристалах (рис. 1.8).

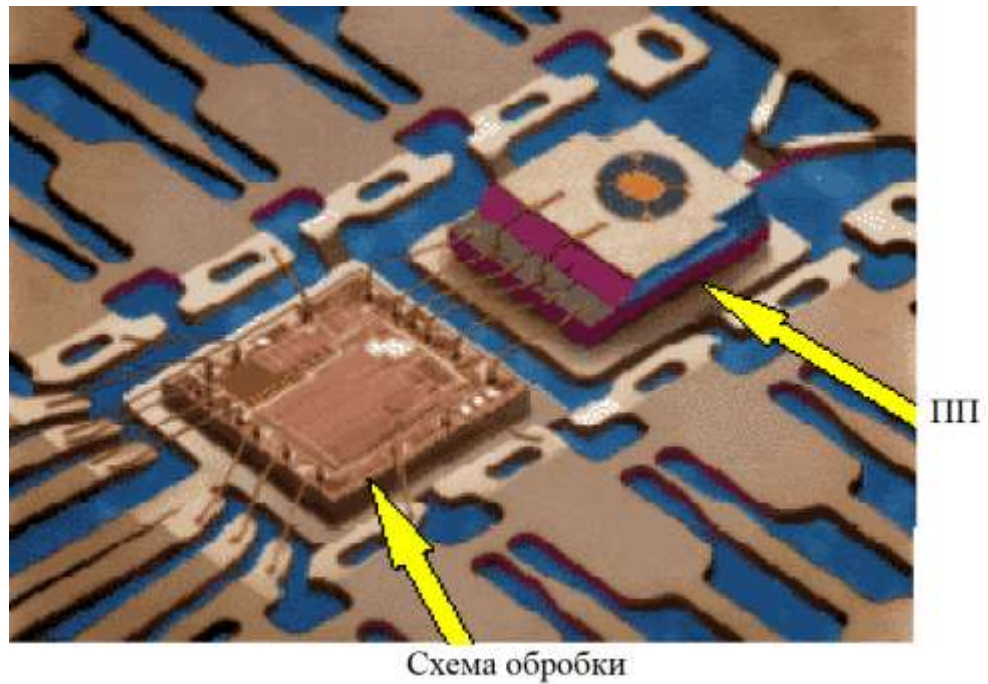


Рисунок 1.8 – Зображення акселерометру ADXL (Analog Devices)

Отже, в основу функціонування MEMС покладено використання класичних принципів механіки, оптики, електротехніки та фізики твердого тіла. Основними фізичними ефектами, що реєструється первинними фізичних величин є ємність, магнетизм, індукція, електричний опір, п'єзоелектричний ефект (прямий та зворотний), піроелектричний ефект, ефект Холла та магніто резистивний ефект, ефекти Зеєбека та Пельтьє, звукові хвилі, теплові властивості матеріалів, світлове випромінювання, радіометрія та фотометрія [5].

1.1 Перспективні напрями розвитку MEMС

Технології MEMС відкрили нові можливості на світовому ринку мікроелектроніки і серйозно вплинули на всю напівпровідникову промисловість. Розвиток багатьох напрямів цього ринку багато в чому зумовлений системами MEMS.

Поєднання механічних структур та електронних схем дозволяє вимірювати безліч різних неелектричних величин за допомогою невеликих за розміром та відносно недорогих пристроїв. Поширення такого типу рішень стало одним із джерел успіху мобільних пристроїв та продуктів IoT (інтернет речей). Поява недорогої та малогабаритної альтернативи традиційним датчикам дозволило привнести до багатьох продуктів абсолютно нові можливості, сприяючи популяризації рішень в області, наприклад, доповненої реальності. Сьогодні складно уявити смартфон без функціоналу акселерометра чи компаса, чи смарт-браслет чи смарт-годинник без можливості підрахунку кроків чи виявлення руху. Адже всі ці рішення були б неможливими без датчиків, виготовлених за технологією MEMS.

Пристрої BioMEMS є одними з найскладніших систем, виконаних за технологією MEMS. Це системи MEMS для біомедицини. Вони охоплюють широкий спектр різних типів продуктів – основні типи систем включають рішення Lab-On-A-Chip (LOC), біосенсори, мініатюрні діагностичні пристрої та системи дозування ліків. Технологія LOC дозволяє створювати мініатюрні системи, які здатні проводити лабораторні дослідження з біологічними матеріалами. Навіть кілька різних лабораторних функцій можуть бути інтегровані в єдину систему площею кілька квадратних міліметрів. Ці системи вимагають використання невеликих обсягів проб у порівнянні з традиційними аналітичними методами, що дозволяє прискорити перебіг реакції, скоротити час обстеження та зменшити кількість медичних відходів. Технологія LOC все ще знаходиться на стадії інтенсивних досліджень, але вже досягнуті результати вказують на її високий потенціал. Поточні реалізації зосереджені на діагностичних додатках у медичному обладнанні та аналізі структур ДНК та РНК. Навіть є система здатна виконувати аналізи крові на ВІЛ. Мікросистеми дозування лікарських засобів можуть використовувати різні типи насосних механізмів для закачування речовин в організм пацієнта – механічні чи немеханічні.

Особливо широкий спектр МЕМС-приводів можна знайти в радіочастотному зв'язку — він включає різні типи мікроперемикачів, фільтрів і резонаторів. У зв'язку із поступальним поширенням технології 5G найближчим часом очікується значне зростання продажу цього типу елементів.

Отже, системи MEMS тепер можна знайти в будь-якій галузі: від медицини до систем домашньої та промислової автоматизації, авіації, автомобілів, зв'язку, мобільних пристроїв та побутової електроніки. На рисунку 1.9 нижче показано насичення типового системами та датчиками МЕМС. Хоча кількість МЕМС пристроїв варіюється від кількох тисяч у літаку до кількох або десятків у смартфоні, їхня вартість у всіх випадках становить не менше кількох відсотків від вартості всієї системи [6].

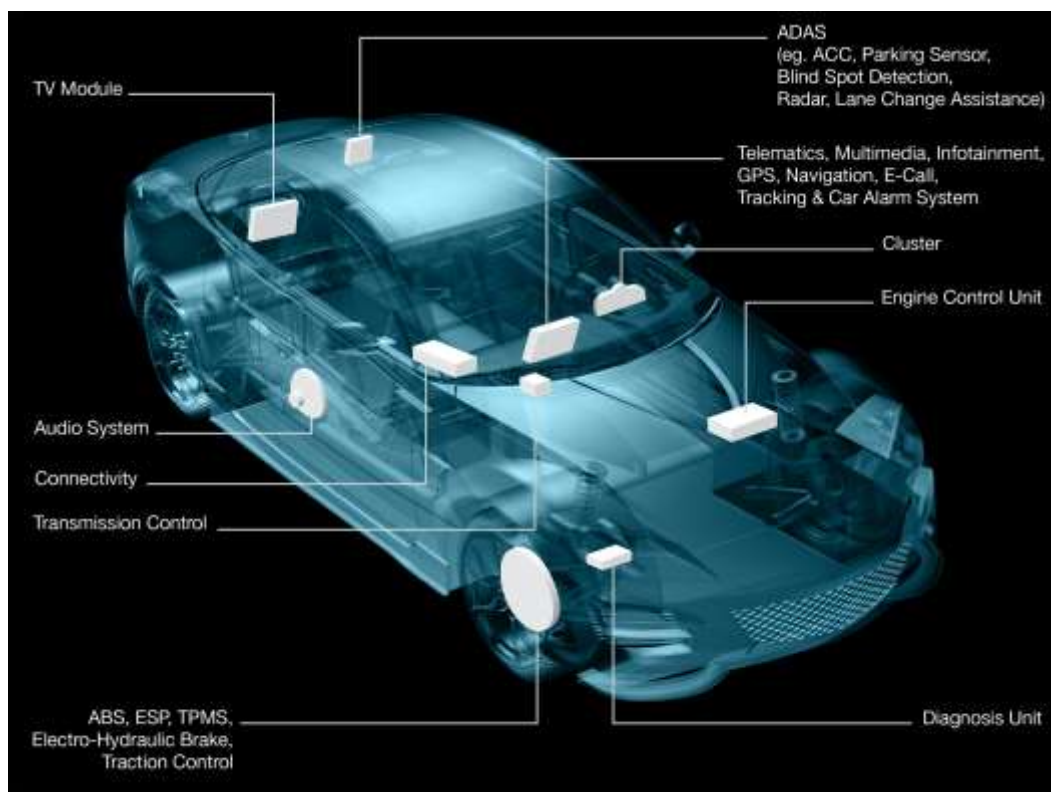


Рисунок 1.9 – Мікро електромеханічні системи в складі сучасного автомобіля

2 РОЗРОБКА МІКРОПРИВОДУ MEMS

На сучасному етапі розвитку розробка різноманітних мікроелектронних систем, в тому числі і MEMS відбувається за допомогою автоматизованих систем проектування. Одним з основних факторів розвитку MEMS-технологій є поєднання процесів розробки механіки та електроніки в єдину технологічну послідовність. Для цього необхідно, щоб дані, отримані в результаті моделювання механічних структур MEMS, автоматично експортувались до інструменту проектування інтегральних схем. На відміну від «приданого», отриманого MEMS від інтегральної мікро схемотехніки у вигляді деяких технологій, які були застосовані у виробництві мікросистем, проблема автоматизації розробки проєктів із застосуванням мікро механіки вирішувалась майже з нуля. Звісно, існувало програмне забезпечення, за допомогою якого значно спрощувались етапи моделювання різноманітних мікро механічних структур, але не існувало продуктів, які б дозволяли в одному пакеті здійснювати створення топології мікроелементів, моделювання і генерації технологічних файлів для виробництва. Перед тим, як почати новий проєкт потрібно визначитись з типами програмного забезпечення, яке призначено для цього напрямку, оскільки САПР MEMS є відносно новим напрямом в галузі автоматизованого проєктування [1].

Є кілька ключових особливостей, на які розробник повинен звернути увагу при виборі інструменту проектування. По-перше, він має містити основні моделі елементів мікросистем. Поведінкові моделі мають бути параметризовані включно з можливістю генерації макетів для подальшого застосування. Набір інструментів повинен підтримувати об'ємні мікро машинні конструкції, такі як інфрачервоні датчики, п'єзорезистивні механічні пристрої та акселерометри, а також інтегральні поверхневі – мікромашинні елементи, такі як ємнісні датчики та електростатичні приводи. Необхідна підтримка як самої конструкції MEMS, так і можливість гібридного дизайну мікросхеми зі змішаним сигналом. Крім

того, опис системи повинен доповнюватися засобами конвертації до інструментів аналогового моделювання поведінки та генерації макетів для структур, починаючи від мостів і консолей, до інфрачервоних сенсорів і акселерометрів, моделювання травлення та осадження, перегляду в поперечному перерізі та розширених правил проектування компоновки MEMS [2].

Особливості проектування мікросистем:

а) для виготовлення мікросистем головним чином використовується групова технологія. При використанні такої технології одночасно обробляється велика кількість елементів, виключається ручне втручання. Наприклад, осадження плівок, оптична літографія, гальваніка або травлення. Багато з цих технологій були розвинені в напівпровідниковій технології;

б) використовуються матеріали, які отримали розповсюдження у напівпровідниковому виробництві. Часто використовувані матеріали: кремній, метали (нікель, золото, мідь, алюміній), кераміка (Al_2O_3 , AlN) і полімери (поліімід, поліметилметакрилат). Властивості цих матеріалів добре вивчені у напівпровідниковій промисловості. До того ж кремній, наприклад, має видатні механічні характеристики в діапазоні мікророзмірів;

в) мікросистеми мають мізерні розміри і малі витрати матеріалів, а це означає, що виробничі витрати низькі, незважаючи на те, що накладаються особливі вимоги на необхідну чистоту матеріалів;

г) мікросистеми економічно вигідно виробляти тільки у великих обсягах. Низька вартість однієї одиниці пристрою досягається за рахунок масовості групового виробництва;

д) мікросистемні технології внаслідок своєї особливості мало придатні для виробництва дослідних зразків. Якщо тестування дослідного зразка виявляє невідповідність проектному завданню, це тягне за собою величезні додаткові витрати. Тому виготовлення дослідного зразка слід уникати настільки, наскільки це можливо.

є) крім високої вартості виробництва дослідного зразка для виконання виробничого циклу потрібно доволі багато часу. Залежно від складності, цикл займає кілька днів, тижнів або більше. За той же самий час величезна кількість варіантів конструкції може бути перевірена за допомогою моделювання;

ж) згідно з CALS – технологіями (Continuous Acquisition and Life cycle Support — безперервна інформаційна підтримка постачань і життєвого циклу), процес проектування включає в себе високу цінову відповідальність за кожен наступний крок в життєвому циклі виробу (рис.2.1). У типовому циклі зазвичай виділяють наступні етапи:

- планування проекту;
- проектування;
- виробництво;
- збут;
- сервісне обслуговування;
- утилізація.

Проектування екстенсивно впливає на вартість наступних кроків, хоча прямі витрати на проектування відносно малі. Зазвичай витрати на проектування це 10% від загальної вартості, хоча воно несе відповідальність за 70-80% загальної вартості.

з) висока вартість дослідного зразка для мікросистем вимагає використання інструментальних засобів моделювання для того, щоб надійно прогнозувати функціонування системи на більш ранніх етапах.

к) на відміну від традиційних (макро) систем, можливість ремонту мікросистем практично нульова. Таким чином, головна мета розробки – отримання повністю функціонуючої системи в першій же реалізації в кремнії. Хоча типова інтенсивність відмов відносно висока (близько 10%), контрольованість параметрів системи також є важливим завданням при проектуванні.

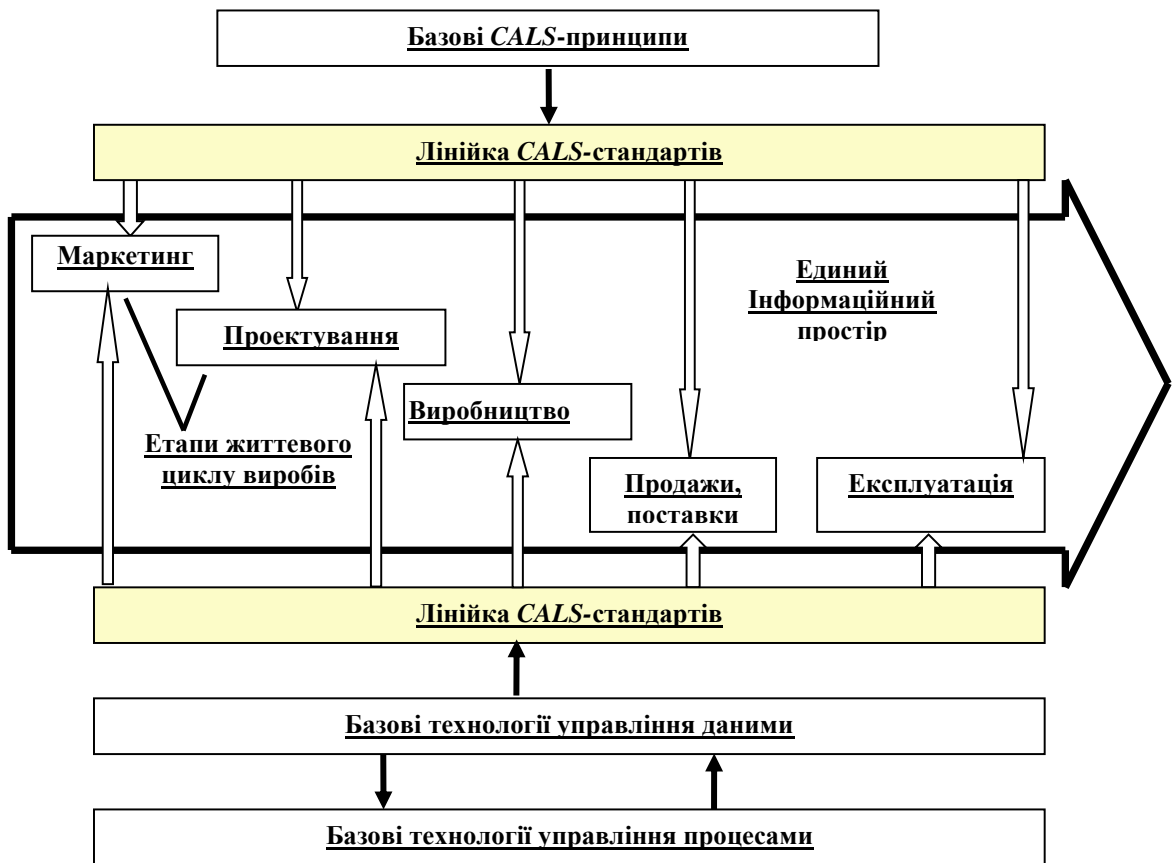


Рисунок 2.1 – Концептуальна модель CALS технології

Існує декілька підходів до класифікації типів задач, що виникають в процесі проектування. Типи проектування MEMS поділяються на рівень замовлення, тобто проектування нових MEMS у новому процесі, або рівень модернізації існуючих MEMS (пів замовлення) у новому процесі для покращення експлуатаційних і вартісних характеристик. Інший рівень передбачає повторне застосування існуючих конструкцій і технологічних процесів MEMS для можливості використання готових блоків для створення нових вбудованих систем.

Моделювання процесу передбачає документування та перевірку етапів процесу або потоків процесу, створення моделі безпосередньо з процесу виготовлення, пов'язування процесу та проектування для зменшення кількості проектів прототипів [2].

База даних включає етапи процесу MEMS, стандартні шаблони ливарного виробництва, можливості розширюваного налаштування етапів або шаблонів

процесу. Для технологічного процесу передбачається моделювання анізотропного травлення, створення бази даних швидкості травлення, технологічні процеси одно- і двостороннього травлення, зупинки під час травлення, візуалізація травлення в режимі реального часу, візуалізація 3D-геометрії, вимірювання глибини травлення та розмірів елементів,

Дослідження залежності процесу від наявних матеріалів, тобто характеристики матеріалів, оцінка властивостей матеріалу для аналізу пристроїв, дані про поведінку матеріалів, що підвищує якість пристроїв і збільшує вихід продукції.

Моделювання пристрою дозволяє обчислювати зв'язану реакцію MEMS-пристрою за допомогою числових методів, а також перевіряти наявні ефекти зв'язку, на яких базуються MEMS, наприклад, електромеханічна, термомеханічна, оптоелектрична та оптомеханічна взаємодія, а також отримувати моделі поведінки для симуляції на системному рівні, 3D-моделювання пристроїв (рис.2.2).



Рисунок 2.2 – Етапи проєктування мікро механіки

Моделювання взаємодії упаковки та пристрою шляхом розділення методу скінчених елементів (МСЕ) корпусу і схеми з наступним об'єднання результатів за допомогою параметричних поведінкових моделей упаковки.

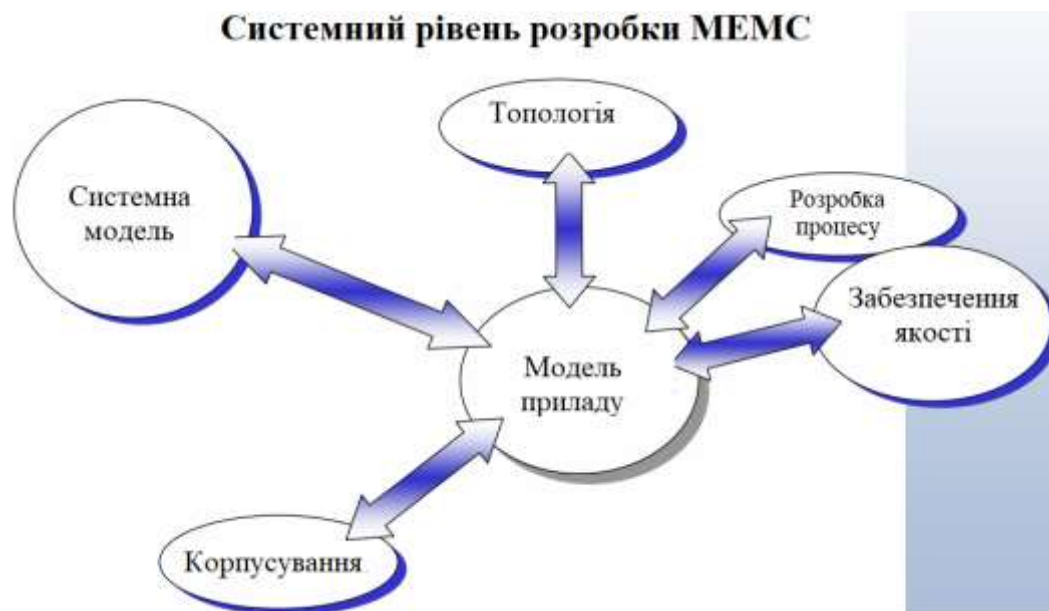


Рисунок 2.3 – Алгоритм системного рівня проектування MEMC

2.1 Системи проектування MEMC

САПР Coventor MP підтримує комплексну методологію проектування та інтегрує у своєму складі додатки MEMS+ та CoventorWare. Ці програмні засоби поєднують інструменти проектування мікросистем, які використовують різноманітні фізичні ефекти (механічні, електростатичні, п'єзоелектричні, п'єзорезистивні або термічні) для контролю та керування в промислових і побутових додатках. Програма Coventor MP – це уніфікована платформа для проектування MEMS. Вона дозволяє переносити моделі пристроїв MEMS між програмними продуктами MEMS+ та CoventorWare (рис. 2.1). Додатки MEMS+ та CoventorWare забезпечують платформу для конструювання, яка дозволяє розробникам MEMS моделювати, проводити детальний аналіз пристроїв за набором рішень отриманих за допомогою метода скінчених елементів (розбиття об-

ласті дослідження на невеликі, прості частини – скінченні елементи), або метода граничних елементів (необхідно визначити шукані величини тільки на межі досліджуваної області), і визначати заздалегідь основні якісні характеристики кінцевого продукту, такі як чутливість, лінійність, частотна характеристика, співвідношення сигнал–шум, температурна стабільність, швидкодія або затримка сигналу. Обидва продукти корисні на всіх етапах типової процедури розробки MEMS структур.

Особливості програмного забезпечення [1]:

- проєкт достатньо ввести один раз у MEMS+ і далі використовувати як для спрощеного моделювання у додатку MEMS+, так і для детального моделювання в CoventorWare;
- Coventor MP підтримує передачу моделей пристроїв з додатку MEMS+ у додаток CoventorWare для розв’язання впливу електромагнітних полів;
- отримані в Coventor MP дані проєктування є єдиною базою для всіх типів моделювання, що виключає необхідність ручної конвертації даних між різними програмними середовищами проєкту (рис. 2.4).

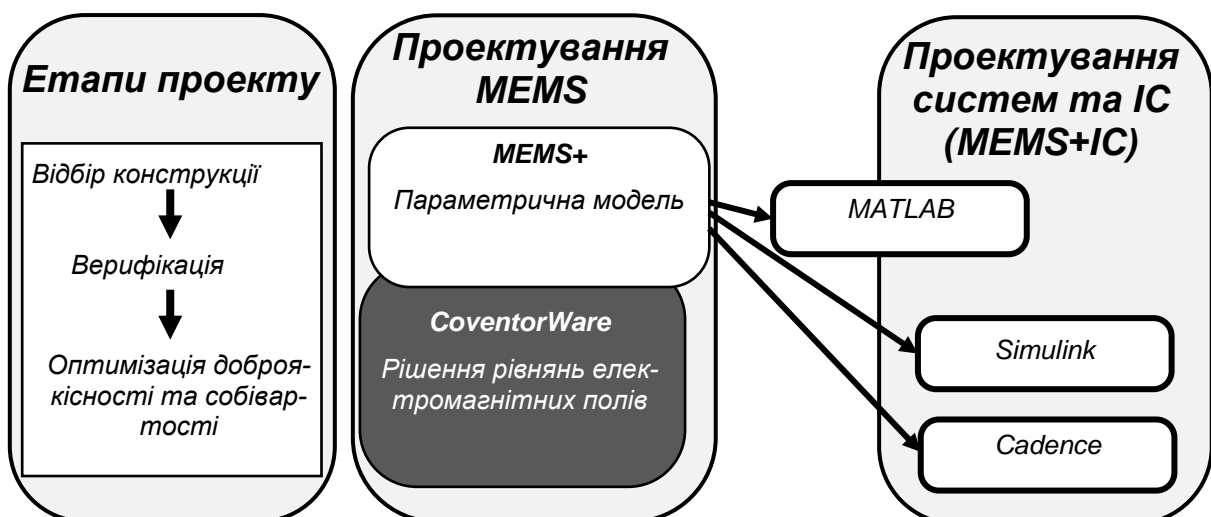


Рисунок 2.4 – Зв'язок додатків платформи Coventor MP з іншими засобами розробки пристроїв MEMS

Для прискорення та полегшення розробки пристроїв MEMS існує бібліотека компонентів. Бібліотека компонентів MEMS+ складається з базових структурних компонентів і блоків (рис.2.5). Кожен компонент має тривимірний вигляд і базову модель, яка фіксує механічну, електричну та фізичну поведінку.



Рисунок 2.5 – Структура бібліотеки механічних компонентів додатка MEMS+

Подібно до того, як розробник ІС створює електронну схему, вибираючи та збираючи моделі з бібліотеки моделей SPICE, розробник пристрою MEMS вибирає компоненти з бібліотеки MEMS+ і збирає їх у потрібну конструкцію пристрою. На рис. 2.6 зображено, як з компонентів бібліотеки побудовано складну конструкцію акселерометра.

Усі вигнуті форми пластин моделюються єдиним готовим елементом оболонки зі змінним порядком кривої обвідної, відомим як MITC (змішана інтерполяція тональних компонентів). Конструювання підвіски вимагає мінімізації ефектів, пов'язаних з технологічним процесом, такі як викривлення аспектного співвідношення, попереднє напруження матеріалу, багат шарова структура, а також нелінійні форми поведінки гнучких елементів.

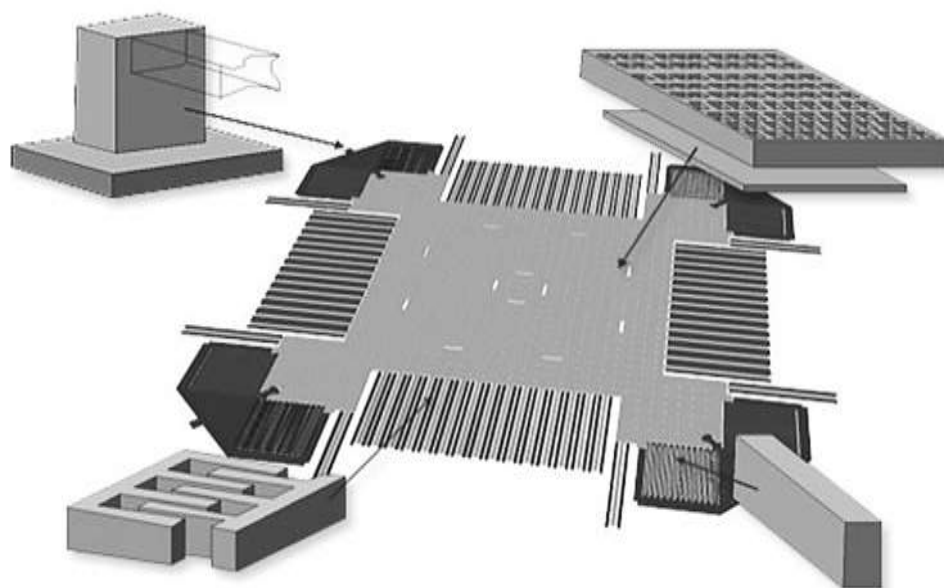


Рисунок 2.6 – Конструкція акселерометра, складена з компонентів бібліотеки MEMS+

Інструменти SoftMEMS – це продукти відкритої платформи, які підтримують провідні програмні засоби для автоматизованого дизайну, що використовуються для розробки інтегральних схем. Додатки SoftMEMS дозволяють обмінюватися даними між конструкторами систем, розробниками ІС, інженерами процесів та експертами MEMS, дозволяючи проводити більш ранню та ефективну перевірку проекту між послідовними етапами розробки. Склад компонентів дозволяє розробляти нові конструкції MEMS, інтегрувати нові та існуючі конструкції в системи та поєднувати їх з електронікою (рис. 2.7).

Програма SoftMEMS пропонує два основних інструменти проектування MEMS для задоволення потреб дизайнера:

- MEMS Explorer (для платформ UNIX та HP);
- MEMS Pro (для платформи ПК).

Обидва пакети – це повно функціональні системи проектування, які охоплюють весь процес розробки MEMS.

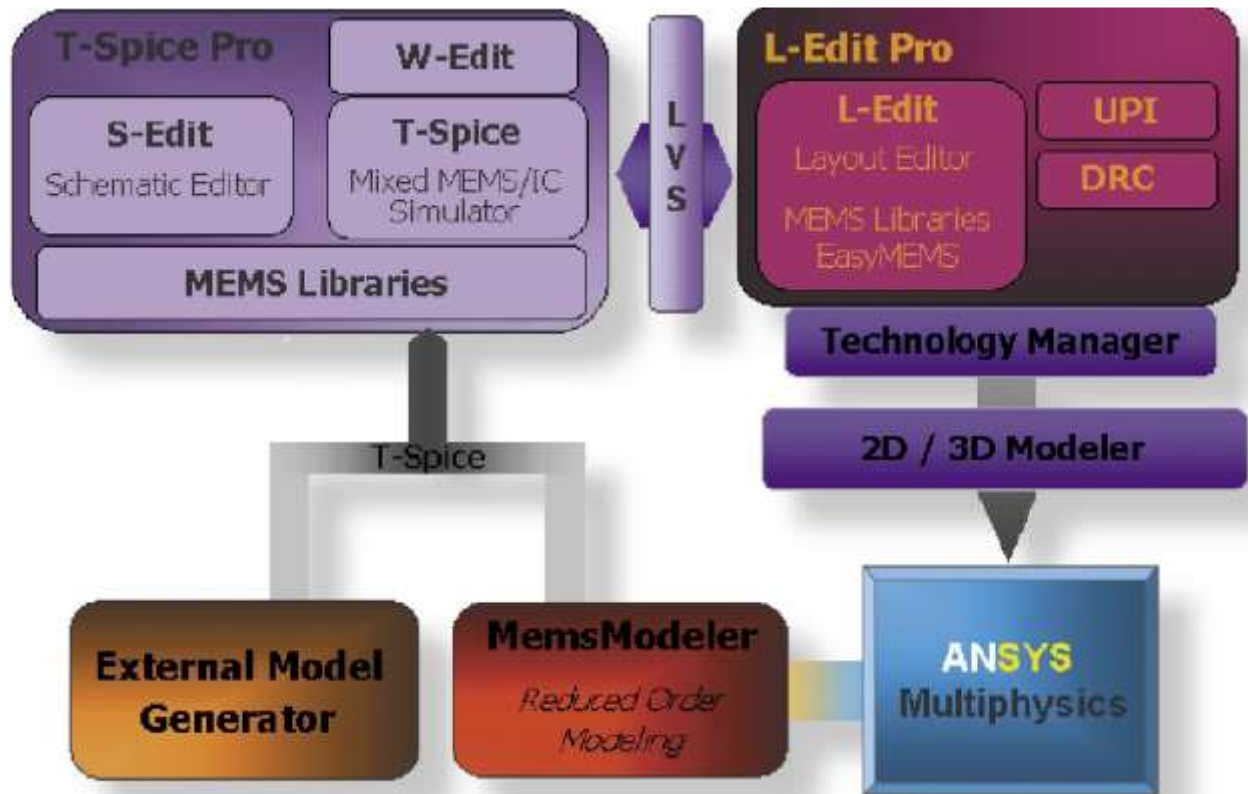


Рисунок 2,7 – Склад компонентів CAD Soft + MEMS Pro

2.2 Розробка топології приводу MEMC

Резонатори є невід’ємною частиною для пристроїв, де необхідна синхронізація роботи окремих блоків. Для розробки топології мікро механічних елементів мікросистем можна скористатись додатком L-Edit. Бібліотека L-Edit містить різноманітні параметричні елементи, якими можна використати в якості будівельних блоків для конструкції мікро приводу. Параметричні комірки можна створювати за допомогою стандартного галузевого формату iPDK (комплект для проектування процесів) або вбудованого формату T-Cell.

Набір функцій, що допомагають оптимізувати процес редагування, включають такі інструменти:

- зміна поточного шару креслення безпосередньо з макета за допомогою віртуальної палітри шарів;
- виконання операцій повороту, відображення, об'єднання, вирізання та зрізу під усіма кутами;
- вирівнювання об'єктів по горизонталі або вертикалі, рівномірного розміщення об'єктів або розміщення об'єктів мозаїкою по горизонталі, вертикалі або в двовимірному масиві;
- вказівка опорної точки для операцій редагування, таких як обертання, відображення, переміщення або розміщення екземпляра об'єкта, за допомогою функції базової точки;
- підтримка плоттера високої роздільної здатності зі схемою однакового рендерингу, що використовується в L-Edit, включаючи тексти, лінійки та заголовки;
- заповнення пластин максимальною кількістю кристалів та маркування всіх блоків на пластині за допомогою WaferTools;
- редагування елементів з CurveTools, що додає фаски та закруглення до макету.

Процес розробки мікро механічного елемента МЕМС підтримується відповідними додатками системи автоматизованого проектування(рис. 2.8).

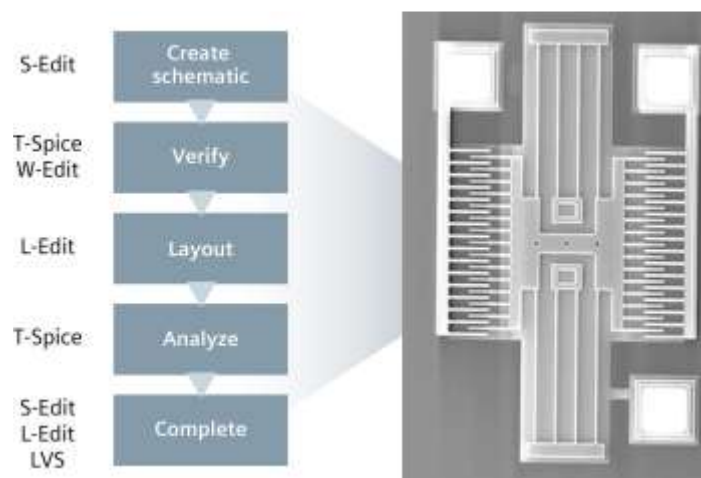


Рисунок 2.8 – Хід процесу створення проекту мікрорезонатора

Резонатор – це багатоелементна система, що складається з електричних та механічних структур. Це вимагає схематичного поєднання електричних та механічних елементів, що представлені в якості електричних еквівалентів. На рисунку 2.9 показано схематичний еквівалент резонатора, створений за допомогою схемного редактора S-Edit. S-Edit містить повну параметризовану бібліотеку MEMS, яка включає символи елементів та їх моделі для симуляції [1].

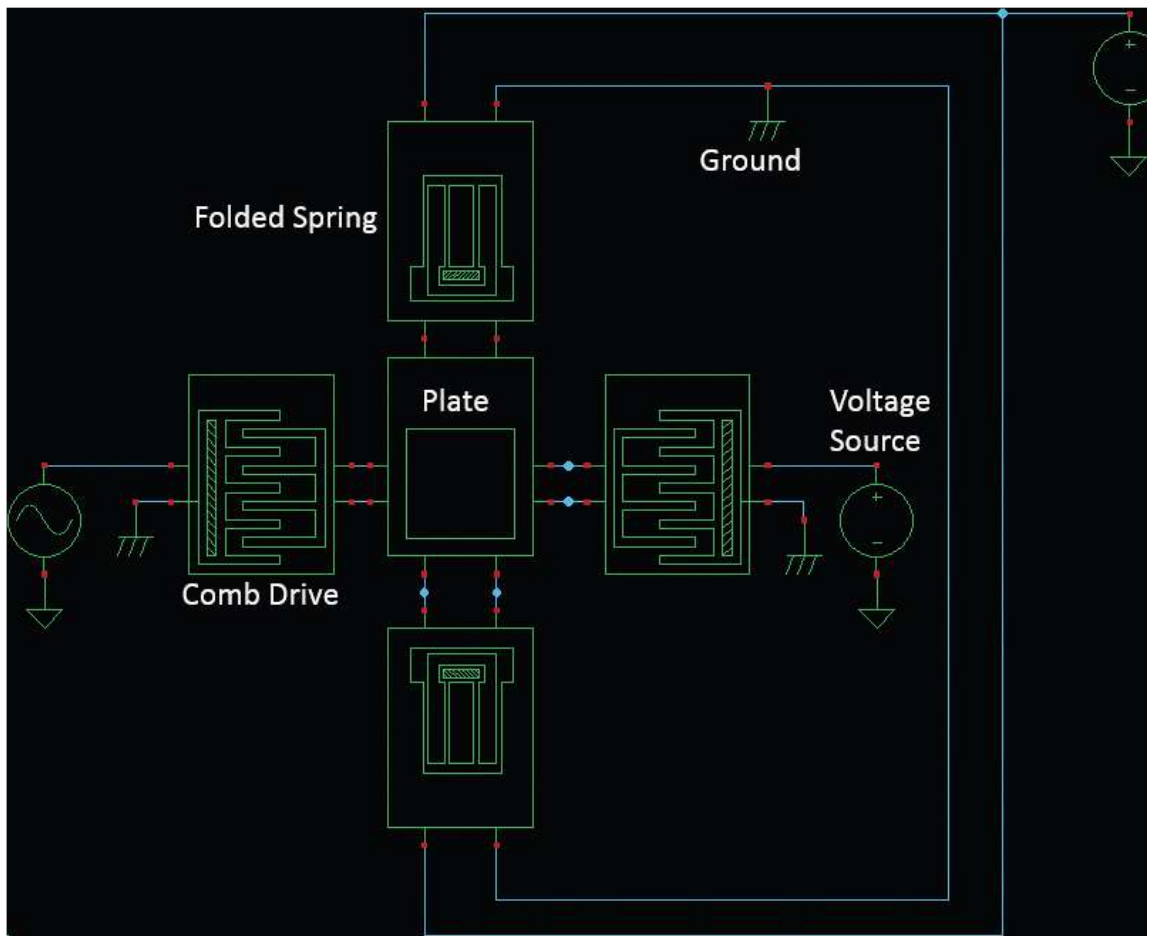


Рисунок 2.9 – Схема макету резонатора в редакторі S-Edit

Процес створення еквівалентної схеми, включає

- вибір пластини, двох гребінчастих приводів та двох складених пружин;
- додавання джерел напруги та заземлення;

- формування міжз'єднань;
- за необхідності можна змінити властивості (наприклад, назву елемента) відповідно до завдання.

Наступний крок – симуляція схеми за допомогою T-Spice, а потім аналіз конструкції за допомогою переглядача сигналів W-Edit, щоб визначити, чи працює пристрій належним чином. У T-Spice обираємо тип симуляції – аналіз за змінним струмом та побудова частотної характеристики. Для цього обирається діапазон частот від початкової 10 кГц до кінцевої частоти 100 кГц. Потім встановлюються відповідні зонди сигналів. На рисунку 2.10 показано отримані епюри амплітуду та фазовий кут для схеми, що побудовані в залежності від частоти. Пікова амплітуда резонатора становить приблизно 17 кГц.

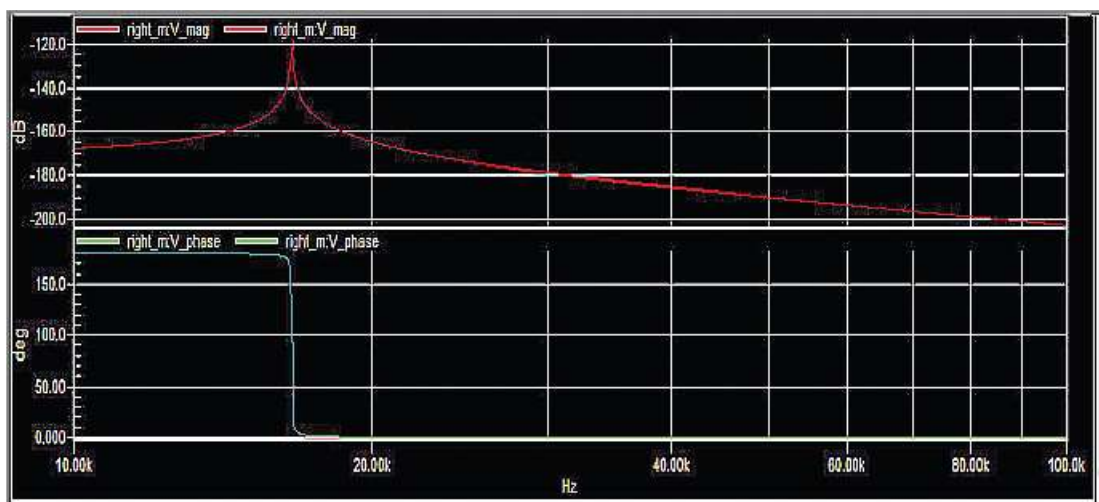


Рисунок 2.10 – Моделювання характеристик MEMS резонатора

Після перевірки схеми в T-Spice, можна перейти до створення макету топології резонатора в редакторі L-Edit.

У бібліотеці L-Edit є набір примітивів різноманітних структур елементів MEMS. Існують два типи технологій, які підтримує графічний редактор:

- мікрообробка поверхні (цей тип для резонатора);
- мікро флюїдна технологія.

Бібліотека містить понад 40 параметризованих примітивів для створення пристрою MEMS. Примітиви бібліотеки постійно додаються до бібліотеки з кожним випуском інструменту. Примітиви, доступні в бібліотеці MEMS, згруповані за різними категоріями. Активні елементи: двигуни: лінійний гребінець з прямим та боковим приводом одно напрямлені, дво напрямлені та обертові. Пасивні елементи: лінійний храповий механізм та складена балка, подвійна Архімедові спіраль, підшипник ковзання та серпантинна пружина. Тестові елементи: діелектрична ізоляція, кросовер, колони, кільце Гуккеля та багат шарова площадка. Теплові елементи: горизонтальні та вертикальні теплові приводи, теплові прямі та зворотні двигуни. Оптичні елементи: прямі та непрямі, бічні відхиляючі дзеркала, елементи резонатора, пластина, гребінчастий привід, складена пружина, заземлююча пластина та сполучна площадка. Флюїдні елементи: канал, коліна, Т-подібні та Y-подібні з'єднання, хрестовина, U-подібний поворот, перехід та резервуар.

Щоб створити макет резонатора, потрібно обрати необхідні примітиви з елементів резонатора в бібліотеці, використовуючи відповідну категорію (рис.2.11).

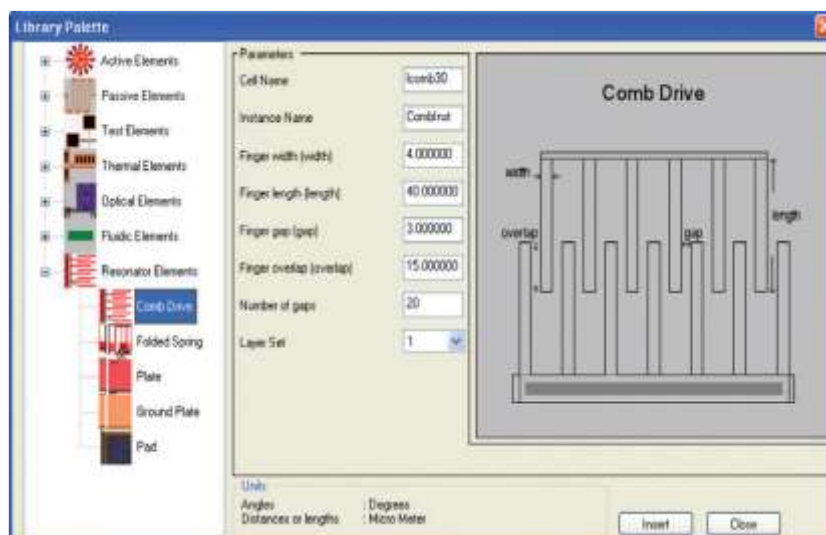


Рисунок 2.11 – Меню бібліотеки примітивів для складання резонатора

Для проекту обрано резонатор з гребінчастим приводом, який має високу добротність (рис. 2.12).

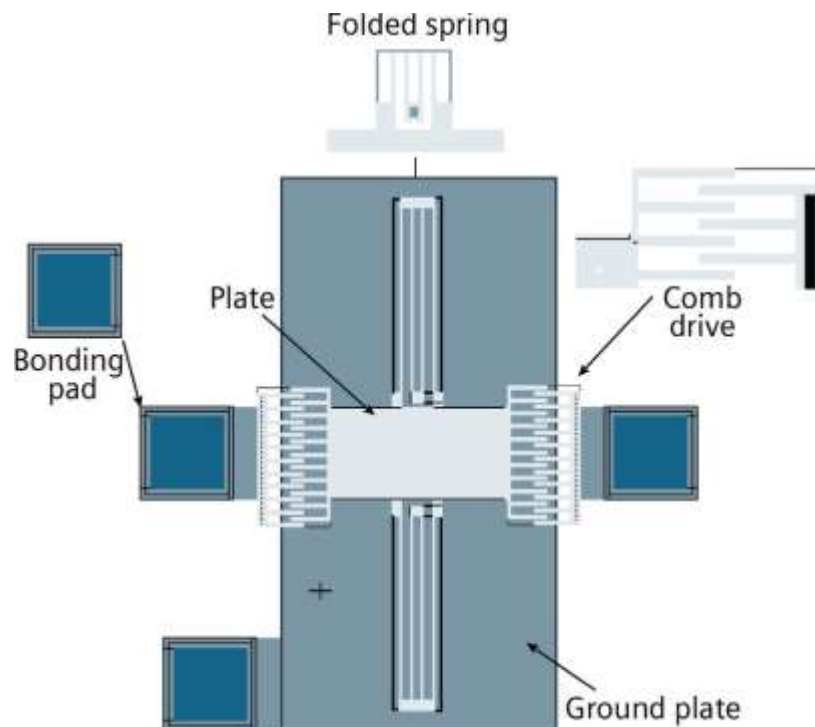


Рисунок 2.12 – Топологія резонатора з гребінчастим приводом

Хід процесу має наступні етапи:

- генерація шару основи;
- вибір гребінчастого приводу:
- з'єднання з основою:
- обрати пружину:
- з'єднання пружин з основою;
- обрати шар заземлення та з'єднати з приводом;
- вибір контактів та підключення до відповідних шарів та елементів;
- налаштування параметрів примітивів.

Параметризовані примітиви дозволяють швидко створювати структури MEMS, генеруючи їх, копіюючи та додаючи, змінюючи орієнтацію, а потім змінюючи параметри, щоб задати необхідну конфігурацію. Кожен примітив міс-

тять набір значень параметрів за замовчуванням, що дозволяє швидко генерувати та розміщувати їх, а потім вибрати кожен примітив та змінювати параметри згодом.

Після компоновання необхідно імпортувати інформацію обраного технологічного процесу та виконати статистичний аналіз за допомогою T-Spice для розробки кутів процесу для моделювання і вибору конструкцій масок, задля оптимального розміщення на підкладці. Наприклад, можна дослідити вплив варіацій процесу на частоту резонатора. Варіація вигину складеної пружини представлена випадковим гаусовим розподілом. На рисунку 2,13 показано приклади результатів цього аналізу: ми бачимо, що варіація процесу виготовлення призводить до варіації резонансної частоти резонатора.

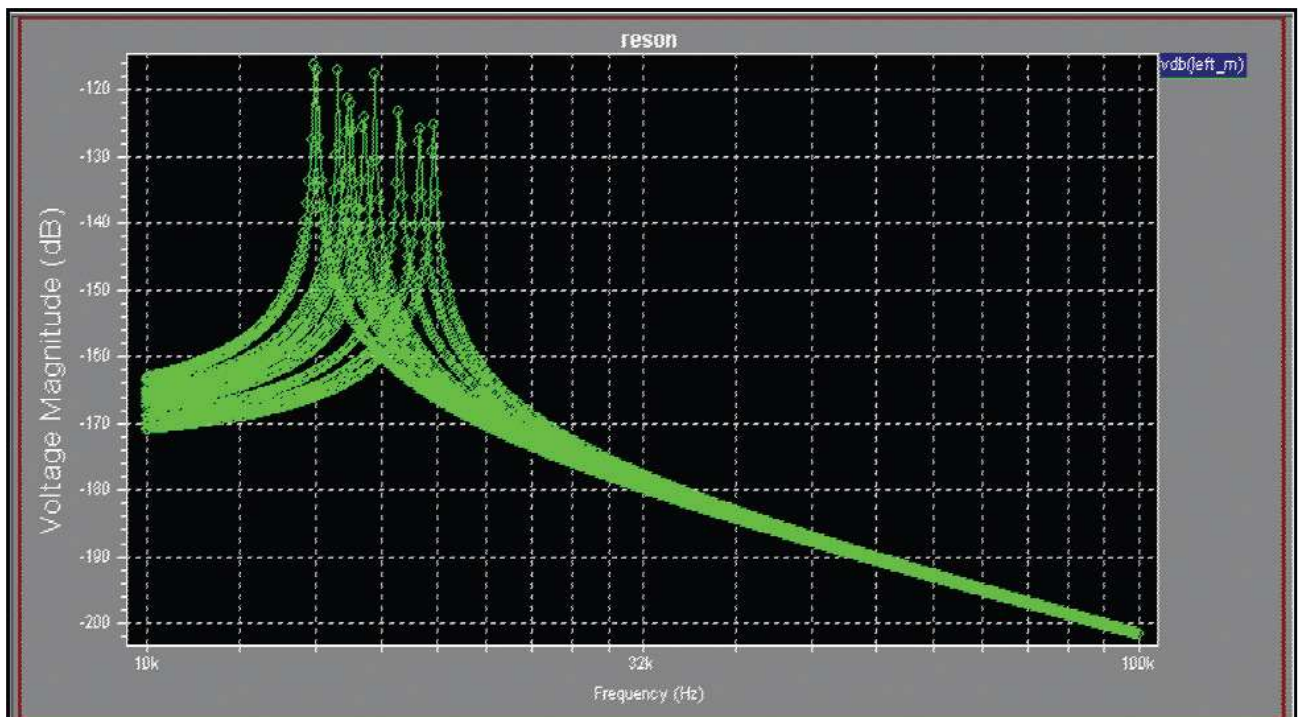


Рисунок 2.13 – Моделювання впливу варіацій процесу

Після того, створена мікро механічна структура і проведено дослідження проекту, необхідно провести компоновку схеми всієї структури MEMС. Завер-

шення процесу включає підготовку до а потім запуск інструменту компоунвання зі схеми (LVS, layout vs. schematic) (рис.2.14)

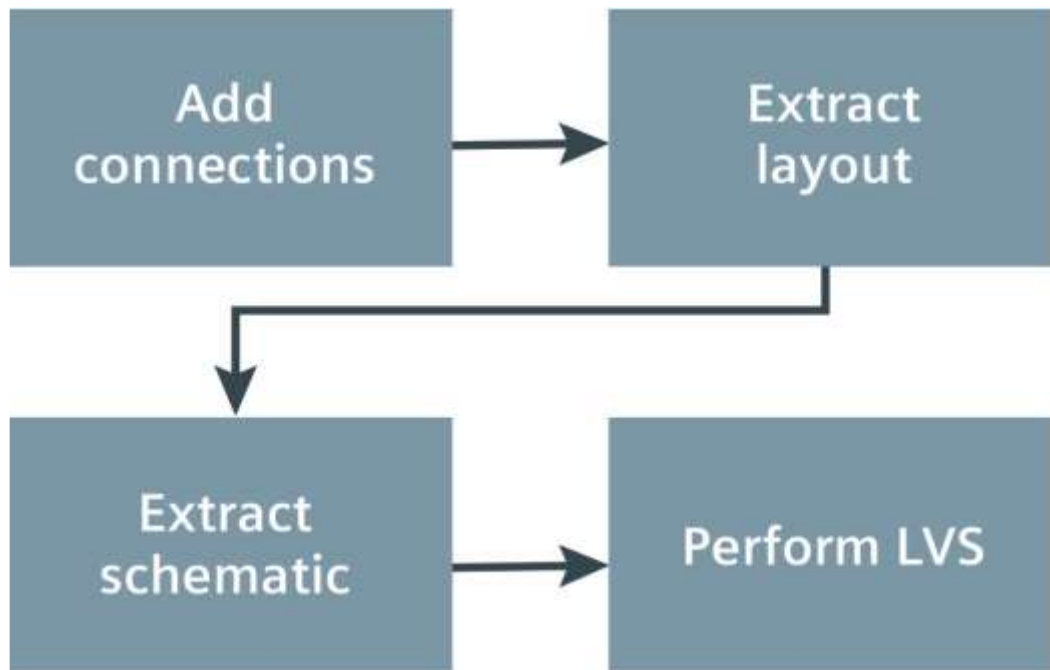


Рисунок 2.14 – Процес компоунвання схеми

Формування з'єднань проєкту. Дуже важливий крок у процесі завершення проєкту – це додавання з'єднань між примітивами для правильного вилучення списку з'єднань SPICE. Кожен примітив, що створено за допомогою бібліотеки автоматично формуються відповідні порти. L-Edit може створювати з'єднання між двома або більше примітивними портами.

Вилучення макета за допомогою L-Edit створює SPICE список з'єднань, який складається з інформації про пристрій MEMS та підключення.

Вилучення схеми для LVS відбувається за допомогою S-Edit. Цей список з'єднань містить опис пристрою, підключення та геометричні параметри.

Для підтримки початкового моделювання MEMS/IC, можна використовувати конструктор системних моделей для створення моделі MEMS за допомогою аналітичних рівнянь у SPICE або Verilog-A. У поєднанні з бібліотекою симуляції MEMS це дозволяє перевірити, чи повністю конструкція спочатку працює належним чином.

Використовуючи бібліотеку MEMS PCell, можна розміщувати конструкцію в L-Edit. Крім того, склад бібліотеки надає базові примітиви генераторів макетів для багатьох пристроїв MEMS, які можна використовувати як відправну точку для розробки (рис.2.15).

Потім створюється 3D-геометричну модель для перегляду, віртуального прототипування та експорту в інструменти аналізу скінчених елементів/

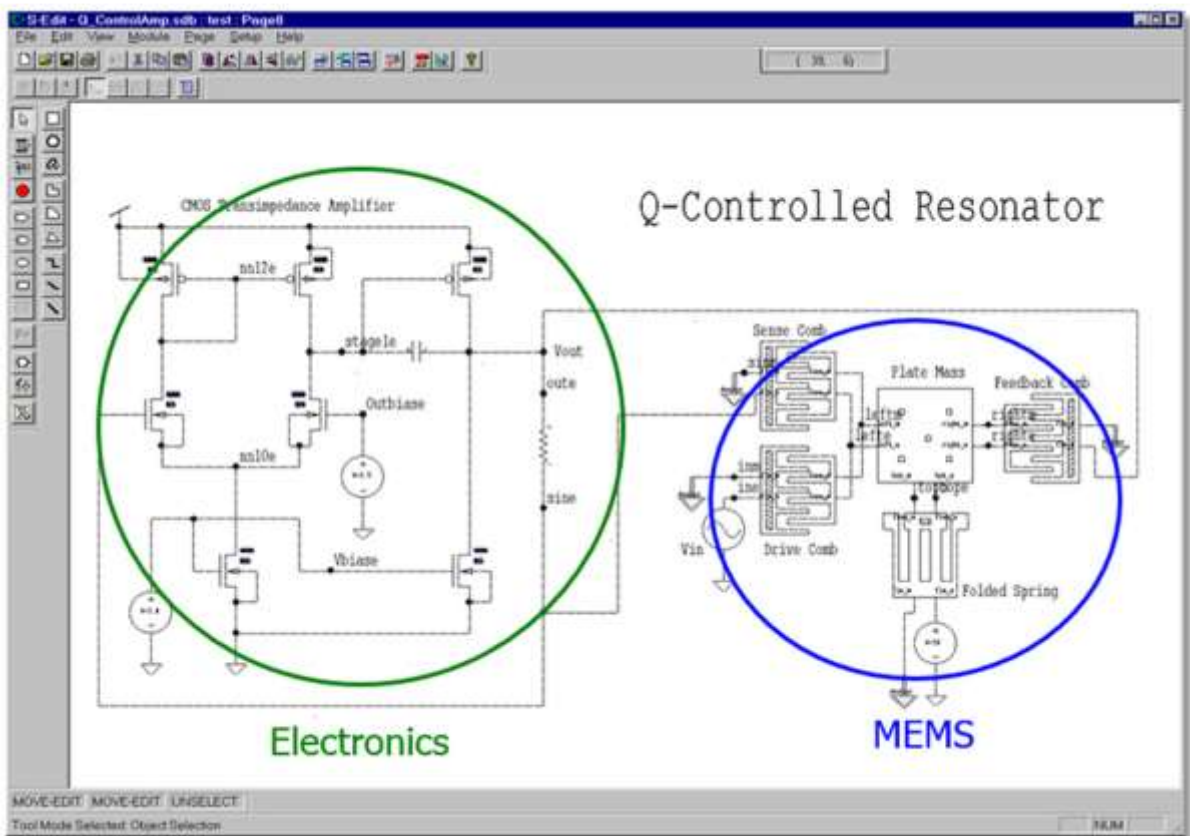


Рисунок 2.15 – Електроніка та MEMS на одній схемі

ВИСНОВКИ

В ході виконання кваліфікаційної роботи бакалавра було розглянуто сучасні системи автоматизованого проєктування мікросистем. Проведено порівняльний аналіз їх можливостей.

Розроблено проєкт мікро резонатору МЕМС із застосуванням САПР L-Edit.

Проведено моделювання роботи пристрою і розроблено сумісний проєкт мікросистеми.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

- 1 Бондаренко І.М., Бородін О.В., Карнаушенко В.П «Мікропроцесорні системи контролю та керування»: Навч. посібник для студентів ЗВО. – Харків: ХНУРЕ. – 2020. – 248с.
- 2 Елементи інтелектуальної радіоапаратури. Пристрої мікросистемної техніки[Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» / С. М Перегудов, Ю. Ф. Адаменко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 11,08 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 195 с.
- 3 <http://www.eda.com>
- 4 Hardware for Providing Smart Farming Technologies. / Volodimir Karnaushenko, Liudmyla Sviderska. DOI: 10.35598/mcfdga.2023.003
- 5 Бондаренко І.М., Бородін О.В., Карнаушенко В.П. Проектування напівпровідникових приладів та інтегральних схем: Навч. посібник для студентів ЗВО. – Харків: ХНУРЕ. – 2019. – 241с.
- 6 Combining ASIC and SoC / Volodimir Karnaushenko, Hennadii Bendeberia, Ihor Bondarenko, Oksana Babychenko / VI Міжнародна науково-практична конференція MC&FPGA-2024. 27-28 червня 2024 року, м. Харків, Україна
- 7 «Прилади та пристрої інтегральної електроніки» Карнаушенко В.П Бондаренко І.М., Бородін О.В., Васильєв Ю.С. Навч. посібник для студентів ЗВО. – Харків: ХНУРЕ. – 2020. – 248с.
- 8 Головні тенденції у виробництві електроніки. Васильєв Ю.С., Горбенко Є.О., Карнаушенко В.П., Пятайкина М.І. Збірник матеріалів IV форуму «Автоматизація, електроніка та робототехніка. Стратегії розвитку та інноваційні технології» AERT-2022. – Харків, ХНУРЕ, 2022. – 178.