

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

І.М. Бондаренко, О.В. Бородин, О.В. Грицунов, В.П. Карнаушенко

СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ
МІКРОСИСТЕМ

Харків 2021

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

І.М. Бондаренко, О.В. Бородін, О.В. Грицунов, В.П. Карнаушенко

**СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ
МІКРОСИСТЕМ**

Навчальний посібник

для студентів спеціальностей

«Мікро – та наносистемна техніка», «Електроніка»

РЕКОМЕНДОВАНО
Вченою радою університету.
Протокол № 3/1 від 9.04.2021 р.

Харків 2021

УДК 621. 396.67

Бондаренко І.М., Бородін О.В., Грицунов О.В., Карнаушенко В.П.
Системи автоматизованого проектування мікросистем: Навч. посібник для
студентів ЗВО. – Харків: ХНУРЕ. – 2021. – 144 с.

ISBN 978-966-659-328-6

У посібнику викладено основні принципи проектування та моделювання мікроелектронних систем на базі мікро – та наноелектромеханіки, сучасні та перспективні напрями розвитку засобів автоматизації проектних процедур. Визначено методи та засоби аналізу мікросистем, базові варіанти реалізації проектів та приведений огляд комп'ютеризованих систем проектування.

Розглянуто методи наскрізного проектування, що поєднують сучасні засоби створення віртуального образу мікромеханічних компонентів, – сенсорів та актуаторів, з засобами проектування електроніки на системному та схемному рівні з урахуванням наступних технологічних процесів, що супроводжують процеси виробництва інтегральних схем.

Розглянуто особливості застосування засобів проектування мікросистем та наведені приклади реалізації пристроїв мікромеханіки в найпоширеніших автоматизованих системах.

Рекомендовано як навчальний посібник для студентів усіх форм навчання спеціальностей 153 «Мікро – та наносистемна техніка», 171 «Електроніка».

Рецензенти:

Обод І.І., доктор технічних наук, професор кафедри МТС, лауреат
Державної премії України;

Хорошайло Ю.Є., професор кафедри ПЕЕА, кандидат технічних наук.

Іл. 119 . Бібліогр. 23 назв.

ISBN 978-966-659-328-6

© І.М. Бондаренко,
О.В. Бородін,
О.В. Грицунов,
В.П. Карнаушенко, 2021

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 ВИМОГИ ДО ЗАСОБІВ ПРОЕКТУВАННЯ MEMS.....	8
1.1 Особливості проектування MEMS.....	9
1.2 Процес автоматизації проектування MEMS.....	13
1.3 Пакети програм для розробки пристроїв MEMS.....	15
1.4 Контрольні запитання і завдання.....	20
2 ОГЛЯД СИСТЕМИ ПРОЕКТУВАННЯ MEMS COVENTOR.....	21
2.1 Складові частини програми Coventor MP.....	21
2.2 Додаток MEMS+®.....	24
2.3 Приклади застосування програми Coventor MP для розробки пристроїв MEMS.....	27
2.3.1 Розробка технологічних процесів виготовлення MEMS в пакеті SEMulator3D.....	27
2.3.2 Проектування акселерометрів MEMS.....	28
2.4 Додаток CoventorWare.....	31
2.5 Приклади проектування пристроїв MEMS у пакеті Coventor MP.....	32
2.5.1 Проектування MEMS гіроскопа у пакеті Coventor MP.....	32
2.5.2 Проектування магнітометрів, принцип функціонування яких базується на силі Лоренца.....	35
2.5.3 Проектування MEMS мікрофонів.....	39
2.5.4 Розробка та моделювання резонаторів MEMS.....	42
2.5.5 Проектування та моделювання оптичних MEMS.....	48
2.5.6 Проектування та моделювання приводу MEMS.....	52
2.5.7 Проектування та моделювання радіочастотних комутаторів та конденсаторів змінної ємності.....	57
2.5.8 Проектування та моделювання п'єзоелектричних вібраційних електромеханічних акумуляторів.....	61
2.5.9 Проектування та моделювання мікроболометрів.....	65
2.6 Контрольні запитання і завдання.....	69
3 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВИГОТОВЛЕННЯ МІКРОСИСТЕМ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПРОГРАМИ SEMulator3D.....	70
3.1 Додатки програми SEMulator3D для моделювання.....	71
3.2 Розширене моделювання технологічних процесів виготовлення сучасних елементів ІС в програмі EMulator3D ...	78
3.3 Моделювання комірки мікродзеркала цифрового оптичного процесора (DLP).....	89
3.4 Контрольні запитання і завдання.....	94
4 ЗВ'ЯЗОК ПРОГРАМИ MEMS+ З ПРОГРАМАМИ	

MATLAB, SIMULINK TA CADENCE VIRTUOSO.....	95
4.1 Програма MEMS+ для спільного моделювання пристроїв MEMS з програмами MATLAB та Simulink.....	95
4.1.1 Моделювання пристрою в MATLAB.....	98
4.1.2 MEMS+ симуляція системи в програмі Simulink.....	99
4.2 Програма MEMS+ для спільного моделювання пристроїв MEMS та IC у програмі Cadence Virtuoso.....	102
4.3 Анімація результатів у додатку MEMS+ Scene3D.....	107
4.3 Контрольні запитання і завдання.....	109
5 ПАКЕТ COMSOL MULTIPHYSICS.....	110
5.1 Аналіз мікро електромеханічних систем в модулі MEMS.....	111
5.1.1 Моделювання мікро електромеханічних систем.....	111
5.1.2 Стандартний алгоритм моделювання пристроїв MEMS в COMSOL Multiphysics®.....	112
5.2 Програмний пакет для електродинамічних розрахунків і оптимізації радіочастотних систем (RF MODULE – радіочастотний модуль).....	120
5.3 Мультифізичне моделювання термоактюаторів.....	128
5.4 Контрольні запитання і завдання.....	134
6 СЕРЕДОВИЩЕ РОЗРОБКИ SoftMEMS.....	135
6.1 Пакет MEMS Pro v6.0.....	136
6.2 Засоби моделювання і редагування пакету MEMS Pro v6.0.....	137
6.3 Контрольні запитання і завдання.....	140
РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА.....	141

ВСТУП

Протягом останніх років індустрія мікроелектроніки активно розвивається як у напрямі мініатюризації мікро– та наноелектронних пристроїв, так і у напрямі інтеграції в єдине ціле різних за фізичними принципами дії функціональних пристроїв на системному рівні. Таким чином народилась індустрія інтегральних пристроїв, названа мікроелектромеханічними системами (MEMS, MEMS – Microelectromechanical systems). У галузі MEMS за останні роки відбулися суттєві зміни, зокрема: значно вдосконалені технології їх виготовлення, стрімко розвинулася інфраструктура. Великий стрибок розпочався з впровадження у виробництво великої кількості різних конструкцій пристроїв мікроелектромеханіки (сенсори тиску і прискорення, струменеві друкувальні головки, цифрові дзеркальні системи) та складних систем промислового масштабу на базі MEMS.

Використання мікро електромеханічних систем викликало неабиякий інтерес на багатьох ринках. Наскільки важлива технологія MEMS ще в 1998 році сформулював Гордон Мур, почесний голова ради директорів і засновник корпорації Intel: "MEMS – це дійсно інтригуюча (інноваційна) технологія, і я вважаю, що це матиме значний вплив у наступному столітті". Насправді багато інженерів вважають, що пристрої MEMS матимуть такий же глибокий вплив на наше повсякденне життя у наступному, як мікросхеми сьогодні. Дизайнерські команди в фірмах Xerox, Texas Instruments, Dallas Semiconductor, ST Microelectronics і багато інших активно впроваджують MEMS в потенціальні проекти, що варіюються від літаків без пілотів до будівель, які саморегулюються під час землетрусу. Агентство прогресивних дослідницьких проектів у галузі оборони Пентагону (DARPA) активно сприяє розробці інтегрованої програми розробки мікросистем.

MEMS – це крихітні механічні системи: датчики, двигуни, форсунки, клапани та ін., які розміщаються на поверхні звичайних мікросхем та створені з використанням тієї ж напівпровідникової технології, що і звичайні інтегральні схеми.

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 (IC). Інженери мікросистем ретельно визначають властивості матеріалу та граничні умови щоб визначити вихідні дані для 3D– аналізу розробок методом скінчених або граничних елементів, прогнозують величину напруження в конструкціях, діючі сили або будь–які інші можливі ефекти. Але ця інформація марна без засобів включення даних в електронний формат дизайну, який можуть використовувати інші інструменти аналізу системного і схемного рівня.

Мікросистеми складаються з окремих елементів, таких як сенсори і актюатори, які інтегровані і упаковані разом з керуючою і обчислювальною

електронікою, в одно, або багато кристальному корпусі. Розвиток мікросистем, має високий потенціал щодо зменшення витрат (на матеріали і обладнання, кількість технологічних операцій) і поліпшення функціональних властивостей (точність, робочий діапазон, чутливість сенсорів) при одночасному підвищенні надійності.

Однак, не всі етапи проекту можуть бути автоматизовані однаково. Значною мірою концептуальне проектування і визначення принципів дії засновано на творчій здатності розробника і, отже, не може бути стандартизовано. Однак, цей етап можна деякою мірою підтримати середовищем проектування. Наявність широкої підтримки за рахунок бібліотек компонентів дозволяє розробникам повною мірою використовувати існуючу інтелектуальну власність (Intellectual Property, IP) у розробці MEMS. Можливість м'якого інтегрування IP – ядр в архітектуру «система–на–кремнії» забезпечує дизайнерам як найновіший функціонал, так і значний приріст продуктивності, що може прискорити вихід продукту на ринок.

Необхідно не тільки поєднання різних дисциплін, необхідних для створення мікросистем, але і впровадити новий підхід, орієнтований на розробку повної системи таким чином, щоб дизайн MEMS міг бути справжньою підсистемою в рамках загального проекту. Використання правильної методології проектування значно підвищує ефективність та багаторазове використання проміжних результатів проекту, зменшуючи витрати та ризик помилок, що все ще вважаються основними бар'єрами для ширшого впровадження технологій мікромеханіки у багатьох сферах промислового та побутового застосування.

Для ширшого впровадження то зростання ринку MEMS необхідно, щоб труднощі навколо проекту були мінімізовані. Потенціал зростання цього ринку величезний. Згідно з дослідженнями Ernst & Young Entrepreneurs Conseil, Paris, France, до 2025 р. ринок виробів мікро механіки зросте до 1 трлн. одиниць. В зв'язку з цим Доктор Бенерерт з Європейської Комісії наголошував на нагальній потребі в широкому використанні IP–блоків: "В даний час кожна нова розробка MEMS – це новий процес, нова конструкція пристрою, яка починається з нуля. Це дуже неефективно, дуже дорого і супроводжується помилками. Наявність інтерфейсів у вигляді IP–блоків для конкретних технологій та високо прецизійних, налагоджених будівельних блоків MEMS буде вирішальним фактором як для пришвидшення часу розробки, так і для збільшення шансів на негайний успіх".

У посібнику розглянуті сучасні системи автоматизованого проектування пристроїв MEMS та засоби їх моделювання. Особлива увага приділяється можливостям наскрізної розробки конструкції, моделюванню, сумісної роботи з електронною частиною інтегральних схем, урахуванням впливу технологій та зовнішніх факторів.

В наступних главах ми розглянемо найбільш актуальні засоби розробки мікроелектромеханічних систем, їх склад і можливості, сторонні інструменти

моделювання конструкцій MEMS та середовища проектування інтегральних схем з елементами мікромеханіки на системному та схемному рівні.

1 ВИМОГИ ДО ЗАСОБІВ ПРОЕКТУВАННЯ МЕМС

Проектування МЕМС майже на всіх своїх фазах автоматизовано. Тому треба зосередитися на методології, алгоритмах, методах опису та моделювання, які використовуються при автоматизованому проектуванні. Все вище вказане об'єднується в ємне поняття "CAE - Computer aided engineering" (автоматизоване проектування). Специфічні характеристики і відмінності між проектуванням, виробництвом і застосуванням мікросистем в порівнянні з традиційними (макро) реалізаціями впливають з їх розмірів. Особливості проектування мікросистем:

1. 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.

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

3. 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.

4. Вартість заводів з виробництва висока. Виробниче обладнання вимагає дуже високої точності і чистих виробничих приміщень. Крім того, високих витрат потребує обслуговування і контроль виробництва (наприклад, управління виробничим процесом, контроль над нанесенням покриття).

5. Мікросистеми економічно вигідно виробляти тільки у великих обсягах. Низька вартість однієї одиниці пристрою досягається за рахунок масовості групового виробництва.

6. 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.

7. 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.

8. 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. 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.

9. Висока вартість дослідного зразка для мікросистем і частою складності більш ніж декількох фізичних рівнів вимагають великого використання інструментальних засобів моделювання для того, щоб надійно прогнозувати функціонування системи на більш ранніх етапах.

10. 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.

1.1 Особливості проектування MEMS

Зі збільшенням складності пристроїв, можна очікувати, що проектування мікросистем займе таку ж позицію, яку на сьогодні має проектування НВІС. Мікросистеми, однак, на протигагу чисто електронним (особливо цифровим) схемами відрізняються різноманітністю застосувань. Для розробників систем, таким чином, виникає питання, якою мірою окремі етапи проектування можуть бути стандартизовані і автоматизовані. На основі аналізу розробок в галузі автоматизації проектування мікроелектромеханічних систем можна визначити формальний взаємозв'язок між процедурами проектування і моделювання пристроїв MEMS (рис 1.1).

Є кілька ключових особливостей, на які дизайнер 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 – мікро машинні елементи, такі як емнісні 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.

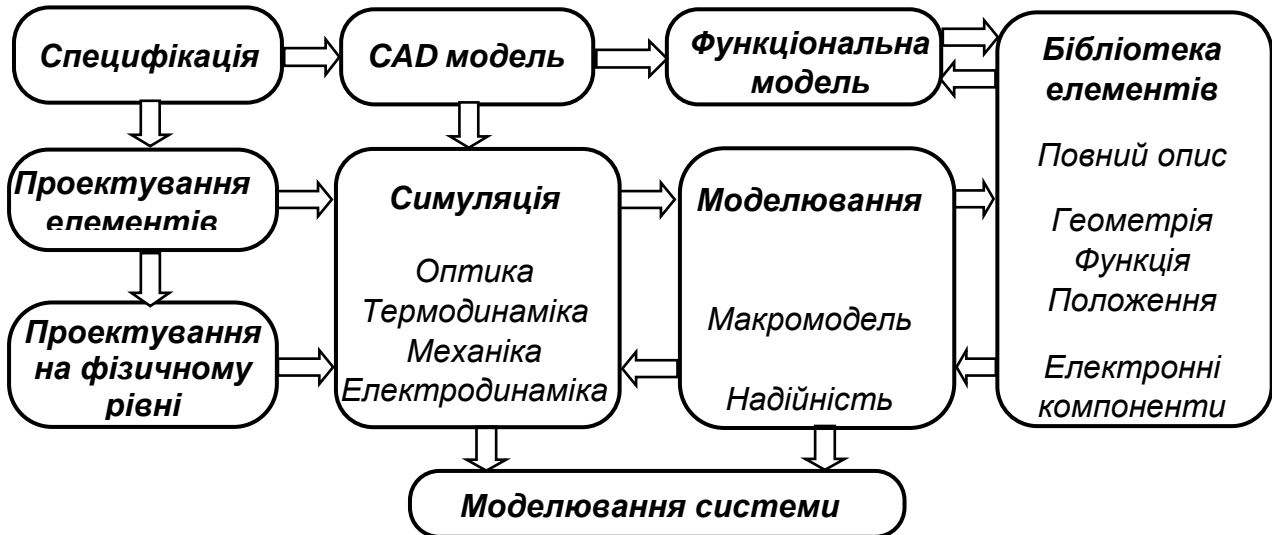


Рисунок 1.1 – Зв'язок між проектуванням і завданнями моделювання та симуляції в середовищі проектування

Ще одна істотна вимога – це постійний потік дизайну від початку до кінця (*from front-- to back-end*). Поєднання потоків безпосереднього обміну даними між середовищами дизайну електромеханіки та ІС, усуває похибки за рахунок зворотного зв'язку між ними. Як результат, конструкція MEMS може безперешкодно переходити від структурної моделі до конструювання, при цьому багато дисциплінарні команди, включаючи механічні, електричні, компонентні та системні команди, працюють разом в одному середовищі та безпосередньо обмінюються результатами. Наявність інтерфейсів, визначаючих прив'язку проекту до конкретних технологічних процесів, прискорює час виходу продукту на ринок.

Починаючи розробляти конкретну конструкцію MEMS/NEMS, бажано відповісти на ряд запитань на першому етапі:

- 1) призначення конструкції;
- 2) вибір принципів перетворення енергії;
- 3) концепція функціонування конструкції;
- 4) макет компонентів конструкції;
- 5) матеріали для компонентів конструкції та їх характеристики;
- 6) технології, придатні для обробки (нанесення, видалення, модифікації) матеріалів та їх сумісність;
- 7) основні характеристики виробу (наприклад, чутливість, споживання енергії, розмір і т. п.);

8) способи досягнення характеристик на основі вибору попередніх пунктів;

9) потреба в додаткових коригувальних елементах характеристики відповідно до п. 7;

10) параметри додаткових елементів і можливість їх досягнення за результатами попереднього аналізу;

11) способи поєднання і складання всіх елементів конструкції;

12) способи розміщення виробу в корпус.

Основні характеристики виробу зазвичай встановлюються за допомогою методів оцінки та моделювання. Обидва методи використовують математичні вирази, які пов'язують параметри виробу або технологічного процесу. Оцінки дозволяють визначити параметри в певному діапазоні. Однак вони не дають повної інформації. Проте математичні рівняння дають можливість отримати рішення для будь-якої точки або їх сукупності, в тому числі на всієї поверхні діафрагми. В даний час це робиться практично за комп'ютерними технологіями з використанням автоматизованих систем моделювання та проектування. І тут дві речі є значними: адекватність математичної моделі до фактичної поведінки об'єкта і обґрунтованість вибору параметрів моделі. Наприклад, при моделюванні діафрагми з використанням моделі пластин не враховується наявність внутрішніх напружень. Використання табличних пружних характеристик (модуля Юнга і коефіцієнта Пуассона) не враховує їх реальну значущість, пов'язану з технологією виготовлення пластини.

На відміну від виробів мікроелектроніки, які були спочатку планарними за конструкцією та технологією (2D), MEMS, головним чином, найчастіше є тривимірною конструкцією (3D). Необхідно розрізняти прояви розмірності 2D і 3D в конструкції і технології. Конструкцію 3D, що проектується, можна розділити на серію 3D блоків або 2D блоків (перерізів). У технології, процес створення 3D-структури, як правило, робиться на базі 2D елементів, які наносяться або видаляються в цьому процесі. Пошарове видалення характерно для механічної обробки, лазерної обробки, травлення.

Пошарове нанесення є основою процесів напилення, електроосадження, полімеризації, стереолітографії. Проте 3D-елемент можна отримати і безпосередньо (тобто без 2D-шарів) у процесах лиття та штампування. Таким чином, пошарове формування 3D-конструкції шляхом нанесення і видалення 2D фрагментів можна вважати основою технології MEMS. При моделюванні і проектуванні об'ємного елемента MEMS, природно, потрібна 3D-модель, але зазвичай спочатку використовують 1D і 2D наближення. Фрагменти розкладання конструкції при моделюванні можуть не збігатися з технологічними фрагментами.

Це знайшло своє відображення в розподілі систем проектування на різновиди – САПР функціонального, схемотехнічного, топологічного, технологічного проектування і САПР для виробництва. Планарність кристалів ІС дозволяє зробити кореляцію етапів САПР через топологічне проектування фотошаблонів. Прозорість в технології створення ІС відбувається через

послідовні етапи фотолітографії – це зробило методи обробки поверхонь привабливими в мікросистемних технологіях, особливо в кремнієвих технологіях. У цьому випадку конструкцію MEMS можна розглядати як "псевдо-планарну", вона може бути просто планарною, наприклад, в хімічних датчиках, сенсорів магнітних полів і т. п.

MEMS припускає елементи, які роблять механічний просторовий рух, тому їх слід розглядати як 3D-конструкцію. Різні матеріали можуть бути використані в ІС, але в основному важливі тільки їх електрофізичні властивості. В MEMS повинні враховуватися відмінні властивості різних матеріалів. Таким чином, проблеми селективності методів обробки, а також структурно-технологічної сумісності, які є важливими для виробництва ІС, стають особливо важливими для MEMS.

Корпус ІС повинен виключити вплив навколишнього середовища на її параметри. Навпаки мікросистема має бути в контакті з навколишнім середовищем. Тому, крім ізоляції від дії шкідливих (з точки зору функціонування) факторів навколишнього середовища, корпус MEMS повинен забезпечити найкращий можливий контакт з навколишнім середовищем з необхідними (функціональними для MEMS) факторами. Таким чином, вимоги до корпусу MEMS часто повинні бути враховані вже на стадії проектування. Всі ці обставини роблять процес створення САПР для MEMS більш важким завданням, ніж САПР ІС.

Вимоги до розмірів елементів сучасних мікросхем та до технології їх виготовлення потребують попереднього 3D моделювання структур у САПР і в цьому збігаються з потребами проектування MEMS.

Функціонування пристроїв MEMS засновано на різноманітних фізичних ефектах і відповідно для їх виготовлення необхідно використання різноманітних технологій обробки (рис. 1.2). У одному пристрої можливо застосування декількох відмінних за своєю природою фізичних ефектів. Для вірного моделювання та конструювання САПР для MEMS потрібно враховувати цю мультифізичну поведінку пристроїв MEMS.

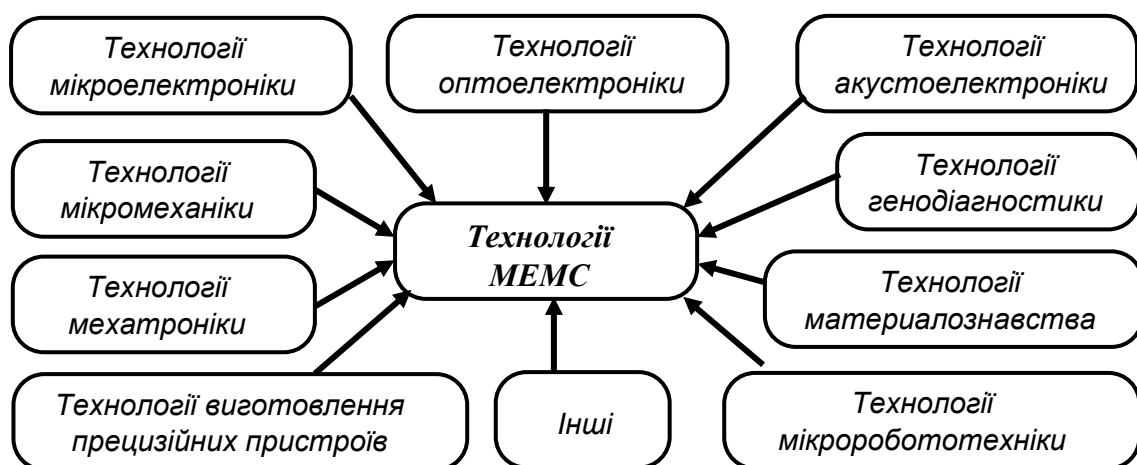


Рисунок 1.2 – Технології, що використовуються для виготовлення MEMS

1.2 Процес автоматизації проектування МЕМС

Розроблення МЕМС, на відміну від розроблення стандартних інтегральних схем (ІС), має свою специфіку та особливості. Для визначення цих особливостей порівняємо автоматизоване проектування МЕМС зі стандартним процесом розроблення ІС.

Сьогодні найналагодженішими є інформаційні технології автоматизованого проектування цифрових ІС. В цьому випадку відомий та розроблений набір програмних засобів, методологій, методів та математичних моделей з використанням підходу на основі базових елементів, стан яких добре відомий і які виготовляють за типовою мікротехнологією. Зрозуміло, що виникають проблеми з упровадженням нових інтегральних пристроїв через зменшення їхніх лінійних розмірів, використання нових фізичних принципів роботи елементів тощо.

Інформаційні технології проектування інтегральних пристроїв, у яких одночасно використовують аналогові та цифрові сигнали (змішаний сигнал), менш автоматизовані, але добре зрозумілий підхід, який має використовувати розробник через широку різноманітність базових елементів у галузі проектування ІС змішаного сигналу, і зрозуміло, що методи, математичні моделі та підходи значно складніші.

У галузі інформаційних технологій автоматизованого проектування МЕМС, де елементи функціонують за різними фізичними законами та принципами (змішана природа елементів), найменш автоматизовані порівняно з технологіями розроблення ІС, і характеризуються наявністю багатьох ітераційних циклів. Процес проектування МЕМС складніший через розроблення різноманітних підсистем, які належать до різних наукових галузей та функціонують за різними фізичними законами. Особливо гострі ці проблеми на етапах узгодження роботи елементів МЕМС між собою, їх виготовлення, комплексного проектування об'єкта розроблення тощо.

Є два основні підходи для організації механізму проектування будь-якого складного технічного об'єкта: висхідний (знизу догори) і спадний (згори донизу).

Відповідні підходи широко використовують сучасні розробники МЕМС. Зауважимо, що з накопиченням досвіду та проектних рішень у галузі розробки та виготовлення МЕМС все частіше використовуються елементи розроблення знизу догори і частка цього підходу з часом лише зростатиме. Реальний процес автоматизованого проектування МЕМС використовує змішане розроблення, яке передбачає як проектування знизу догори, так і проектування зверху донизу. Разом з тим, у низці робіт запропоновано використовувати підходи, пов'язані з паралельним та наскрізним розробленням МЕМС, що зумовлено специфікою галузі МЕМС та дає змогу значно прискорити процес розроблення інтегрального виробу. Паралельне проектування МЕМС поки що можна

зреалізувати лише на окремих ієрархічних рівнях з етапами синхронізації проектних робіт на початку та в кінці розроблення кожного з рівнів.

Наскрізне проектування ефективно використовується під час проектування ІС, тому все ширше і масштабніше застосовується для розроблення мікроелектромеханічних систем.

Кожен із наведених вище методів використовує блочно-ієрархічний підхід до автоматизованого проектування МЕМС, який передбачає розподіл процесу проектування на ієрархічні рівні.

Верхній рівень абстракції називають системним. На цьому рівні розроблення МЕМС розв'язують задачі, пов'язані із синтезом структури та визначенням її основних параметрів (задача аналізу).

На сучасному етапі розвитку автоматизованого розроблення для розв'язання задач системного рівня, зокрема у структурному синтезі, доволі часто використовують *експертні системи*. До складу такої системи входить база даних, у якій розміщена інформація про елементи структури, база знань та монітор. Відповідну інформаційну технологію синтезу структури використати для розроблення МЕМС поки що неможливо, оскільки відсутнє наповнення бази знань. Пояснити цю особливість можна з тих позицій, що науково-прикладна галузь МЕМС з'явилась не так давно і в цей час триває активний її розвиток та наукові дослідження МЕМС і триває накопичення та збирання знань про об'єкти розробки.

Деякі інші інформаційні технології синтезу структури об'єкта проектування *грунтуються на інтерактивній роботі* інженера-розробника з програмною системою, яка дає змогу визначити вихідні параметри сформованої структури. В цьому випадку інженер-розробник, на основі досвіду та попередньо спроектованих об'єктів подібного типу, генерує структуру та за допомогою системи визначає основні параметри і комплексний показник якості об'єкта проектування на основі розв'язання оптимізаційної багатокритеріальної задачі. Відповідну інформаційну технологію здебільшого використовують у сучасному проектуванні МЕМС на системному рівні.

Для визначення основних параметрів будь-якого об'єкта проектування на системному рівні використовують теорію масового обслуговування та теорію мереж Петрі, які варто використати і для розв'язання задач аналізу МЕМС.

Інформаційні технології проектування систем сенсорних та актюаторних пристроїв і, зокрема, для аналізу перехідних процесів використовують методи, які дають змогу побудувати схематичні моделі (макромоделі) та макрооб'єкти. Називають цей рівень *схемотехнічним*, на ньому фізика процесів описується системою звичайних алгебричних чи диференціальних рівнянь. На відміну від системного рівня абстракції, моделювання компонентів близьке до фізики, через те, що ми можемо розпізнати фізичні частини, для прикладу резистори і транзистори, або маси чи пружини. Під час проектування МЕМС, як правило, на цьому рівні використовується метод аналогій та теорія коливних процесів. Стосовно МЕМС на схемотехнічному рівні проектування використовують,

зазвичай, методи та алгоритми, які дають змогу побудувати VHDL–AMS моделі елементів мікроелектромеханічних систем. Наступний метод синтезу моделей елементів МЕМС ґрунтується на використанні інформації з компонентного рівня проектування і зменшенні кількості рівнянь. На цей час відповідний метод активно використовується та розвивається.

Найнижчий рівень абстракції автоматизованого проектування МЕМС відзначений як *компонентний рівень*. Фізика процесів у елементах описується диференціальними рівняннями в частинних похідних з відповідними початковими та крайовими умовами. На цьому рівні використовують метод скінченних різниць, метод скінченних елементів та граничних елементів, які дають змогу врахувати нелінійні та нестационарні процеси в конструкціях елементів МЕМС. Разом з тим, застосування наведених вище методів потребує значних затрат ресурсу комп'ютера та найбільше підходить для визначення розподілу напружень, деформацій, власних частот у конструкції МЕМС тощо. Необхідно додати, що існують проблеми під час синтезу ММ компонентного рівня для елементів МЕМС з розмірами, співмірними із розмірами зерна матеріалу його конструкції.

1.3 Пакети програм для розробки пристроїв МЕМС

Появі перших програмних систем для проектування МЕМС сприяло швидке зростання інтеграції МЕМС (програма моделювання має допомагати розробляти мікропристрої, які містять елементи, що діють за різними фізичними принципами: електричним, механічним, тепловим тощо), а також збільшення точності моделювання з метою зменшення витрат на розроблення та виготовлення.

Швидкий прогрес у сфері проектування, моделювання та виготовлення МЕМС тісно пов'язаний з використанням програмних засобів, які дають змогу істотно підвищити конкурентоздатність пристроїв цього типу. Найчастіше для проектування МЕМС використовуються такі системи: SUGAR, IntelliSuite, NODASv1.4, Coventor, Tanner Research, ANSYS, CFD–ACE, Abaqus, MEMCAD, Solidis, Simulink, Sabe, ALLTED. Коротко розглянемо деякі з них.

Програмна система SUGAR основана на методах вузлового аналізу, який широко використовується у проектуванні та моделюванні інтегральних схем. Підкладки, компоненти інтегральних схем, електростатичні пристрої тощо моделюють з використанням систем диференціальних рівнянь. Програма SUGAR успадковувала назву і філософію від програми SPICE.

До переваг цієї системи можна зарахувати те, що розробник описує пристрій у компактному форматі таблиці з'єднань; нескладно моделювати поведінку пристрою, легко знаходити недоліки в конструкції елемента МЕМС або випробувати нові ідеї.

Недоліком цієї системи є те, що для використання програмного засобу SUGAR потрібен також MATLAB версії 5.0 або новішої версії; відсутні бібліотеки математичних моделей базових елементів МЕМС.

Програмний продукт під назвою *EM3DS 4.2* розробила дослідницька група мікроелектромеханіки (MEM Research). Він призначений для електромагнітного аналізу MEM–перемикачів і конденсаторів. Цей програмний інструмент використовує рівняння повної хвилі та новий підхід: узагальненої поперечної резонансної дифракції (Generalised Transverse Resonance Diffraction (GTRD)), призначений для розв’язання квазіпланарних багатошарових схем. На відміну від інших програмних продуктів для планарних структур, ця система дає змогу побудувати тривимірні пристрої з розрахованою підсумковою товщиною і кінцевою провідністю реальних провідників.

Переваги цієї програмної системи такі: зручний інтерфейс; запропонований новий підхід до розроблення та моделювання забезпечив високу точність вихідних результатів для MEM – ємнісних перемикачів порівняно з аналогічними системами.

Недоліком програмної системи EM3DS 4.2 є: відсутність можливості конвертації отриманих результатів для використання в інших програмних системах; вузька область моделювання роботи MEMC–пристроїв (електромагнітні двигуни).

Система автоматизації проектування MEMC *IntelliSuite* є однією з перших комерційних систем, була розроблена фірмою Corning IntelliSense Corporation. Вона призначена для проектування, моделювання й оптимізації MEM–пристроїв. Основною особливістю системи IntelliSuite є те, що процес конструювання починається не з геометрії пристрою, а з параметрів виготовлення інтегрального пристрою. IntelliSuite оптимізує конструкції MEMC до виготовлення, скорочуючи цикл часу розвитку дослідного зразка і зменшуючи виробничі витрати. Об’єднуючи шаблони технологічного процесу виготовлення, дані про матеріали, топологію фотошаблону й аналіз пристрою, IntelliSuite надає проектним групам інструментальний комплекс для розроблення технологічних пристроїв з вищим коефіцієнтом корисної дії (ККД). Недоліком цього програмного продукту є обмежена кількість технологій виготовлення MEM–пристроїв та неможливість зміни технологічного процесу розробником.

Програма *NODASv1.4* (Nodal Design of Actuators and Sensors) – це бібліотека параметризованих компонентів для використання у програмі моделювання вузловим методом SABER MEM–пристроїв, для виготовлення яких використовується поверхнева мікрообробка. Бібліотека складена з підкладок, фотошаблонів, анкерів, електростатичних гребневих мікродвигунів (горизонтальних і вертикальних) та електростатичних пристроїв. Особливістю проектування є те, що користувач спочатку синтезує схемне рішення, використовуючи позначення компонент, застосовує статичні моделі для розрахунку розміщення кожного компонента і потім генерує новий опис поведінки, використовуючи набір динамічних моделей, в яких розміщення автоматично визначено як статичний параметр компонента. Запропонований підхід зменшує кількість вузлів і змінних для множини

моделей, збільшуючи тим самим загальну швидкість моделювання, а також допомагає виправляти помилки розміщення, які зробив користувач.

Серед переваг цієї системи такі: компоненти можуть бути з'єднані для представлення складних систем; електричні властивості, враховані в моделях компонентів, надають можливість одночасного електричного та електромеханічного аналізу.

Недоліком системи NODASv1.4 є відсутність: можливості моделювання гідравлічних та інших процесів у мікродавачах та актуаторах; засобів для розв'язання задач синтезу на системному рівні тощо.

Система для проектування MEMS Coventor дає змогу використати підхід до розроблення “згори донизу” і “знизу догори”. Вона має чотири основні модулі та декілька додаткових, які забезпечують розробника усіма необхідними засобами для реалізації наведених вище підходів.

Під час побудови макромоделей елементів MEMS, які функціонують на основі різних фізичних процесів та законів, можна використати мову VHDL–AMS (Very High Speed Integrated Circuits Hardware Description Language Analog–Mixed Signals). У цьому випадку можна скористатися програмними продуктами для налагодження VHDL–AMS – моделей елементів MEMS, зокрема: AMSWizard, hAMSter та інші.

Прості структури MEMS може бути розроблено з використанням модифікованого САПР IC (пакет Magic VLSI). З цією ж метою, популярні CAD було використано для проектування, наприклад, AutoCAD, з шаблоном, що генерує інтерфейс, PATRAN і I-DEAS. Використовувався для моделювання процесів пакет SAMPLE. Основні фізичні процеси були змодельовані за допомогою відповідних пакетів, таких як ABAQUS для теплових явищ за допомогою методу кінцевих елементів або FAST-CAP (MEMCAP) для електростатичних явищ за методом граничних елементів (boundary element). Потім з'явилися САПР, розроблені спеціально для MEMS: Oyster (IBM), MEMS CAD (MIT), CAEMEMS (Univ. Michigan), SESES (ETH). Вони були зосереджені на об'ємній мікрообробці кремнію та поверхневої обробці полікремнію з урахуванням таких явищ, як струм рідини, тепловіддача, горіння, взаємодії рідини з різними структурами.

У рамках розробки MEMS-CAD був випущений програмний пакет *MEMS Pro* для імітації впливу навколишнього середовища на IC і MEMS. Нові САПР MEMS повинні інтегрувати 2D системи для IC з 3D системами для MEMS в широкому спектрі видів мікрообробки і матеріалів. Композиційна складність MEMS призводить до необхідності підключення різних пакетів програм до САПР MEMS. Однією з основних проблем наскрізного моделювання MEMS є задача узгодження параметрів моделей різних програм. Етапи процесу моделювання однакові для всіх програм: по-перше, при моделюванні мікроемеханічних приладів, необхідно визначити, які фізичні ефекти є важливими і які з цих ефектів взаємопов'язані. Це зазвичай визначає вибір програми моделювання (або програмного модуля), яка буде використовуватися. Потім формується геометрія пристрою, що є або

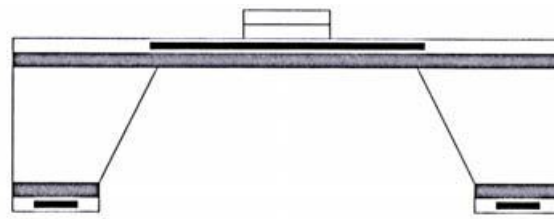
результатом проектування в геометричному редакторі, або результатом моделювання технології виготовлення.

Після цього підключаються вхідні параметри (межові умови, властивості матеріалів), і виконується розбиття на сітку для обчислення. Властивості матеріалів – це дані, отримані експериментальним шляхом. Далі відбувається моделювання за допомогою таких програм, як Nastran, Coventor, Ansys, Comsol. Для розв'язування системи диференціальних рівнянь, всі ці програми використовують метод кінцевих елементів, граничних елементів, скінченних відмінностей або кінцевих об'ємів. Відповідно до результатів моделювання виробляються спрощені моделі, які використовуються для розробки систем. Моделювання на рівні систем здійснюється за допомогою програми для моделювання електричної схеми SPICE або більш загальних програм Simulink і Saber, які використовують стандартну мову опису вхідного файлу для моделювання VHDL-AMS.

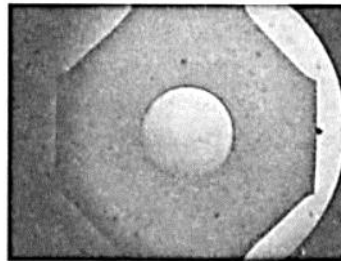
Для аналізу елементів MEMS на компонентному рівні проектування, як правило, використовують *програмний комплекс Ansys*. Основними недоліками цієї системи є: значні затрати ресурсу ПК для розв'язання задач аналізу MEMS; неточність вихідних результатів для пристроїв з розмірами конструкції елементів MEMS відповідних до розмірів зерна кристалічної структури матеріалів; низький рівень автоматизації робіт на системному рівні проектування MEMS.

Компанія ANSYS Inc. була першою в реалізації пов'язаних міждисциплінарних завдань, куди включила власну мову програмування APDL, розробила інтегрований модуль гідроаеродинаміки (CFD) і модуль оптимізації, а також почала підтримку розрахунків на персональному комп'ютері. Особливістю програми є сумісність файлів усієї лінійки продуктів ANSYS для всіх підтримуваних платформ. Універсальність програми дозволяє використовувати ту ж саму модель для вирішення таких пов'язаних проблем, як міцність за тепловим навантаженням, вплив магнітних полів на міцність конструкції, тепломасоперенесення в електромагнітному полі. Модель конструкції, яка створена на персональному комп'ютері, може бути змодельована на суперкомп'ютері. Програмна платформа ANSYS Workbench дозволяє інтегрувати модулі в єдиний інформаційний простір для пов'язаного міждисциплінарного аналізу.

Це виключає витрати на передачу даних з однієї програми в іншу на рівні текстових файлів, і інтерпретацію файлів результатів, коли вони рухаються з однієї системи до іншої. Як приклад розглянемо моделювання мембранних структур – структури діафрагми з жорстким центром (рис. 1.3). Ця структура може бути використана в датчиках тиску, мікрофонах та акселерометрах. Параметрами змінної може бути форма діафрагми, товщина шарів діафрагми, розмір жорсткого центру, матеріал шарів діафрагми і жорсткого центру, розмір і характер навантаження чутливого елемента. Спочатку проводиться аналіз плавних діафрагм з геометрією круга, восьмикутника, шестигранника і квадрата.



а)



б)

Рисунок 1.3 – Кристал з діафрагмою на основі комбінації тонких плівок діелектрика з круглим відбиваючим покриттям: а) схема перерізу діафрагми; б) планарна поверхня діафрагми після виготовлення (площа мембрани 7 мм², товщина діафрагми 0,45 мкм, діаметр дзеркала 1 мм, товщина дзеркала разом з основою 5 мкм)

Вибір фігур діафрагми дозволяє порівнювати результати з теоретичними аналітичними розрахунками для діафрагм подібної форми. Встановлено, що зміщення для однорідних однакової товщини мембран зменшується в такій послідовності: квадрат, коло, шестикутник, трикутник. Аналогічна послідовність спостерігається в цьому обчисленні для шару SiO₂ товщиною 0,2 мкм. При товщині 0,1 мкм, послідовність інша: восьмикутник, коло, квадрат, шестикутник. Після низки тестів з однаковими геометричними параметрами моделі, але різної щільності сітки, можна визначити оптимальну кількість елементів, необхідних для отримання результатів з задовільною точністю. У цьому прикладі це приблизно 20 000 пунктів.

Є дві причини, чому результати аналітичних розрахунків і машинного моделювання можуть бути розходяться при зміні товщини діафрагми. Спочатку вибираємо тільки одну товщину для чисельного розрахунку за аналітичною формулою. По-друге, іншу формулу розрахунку закладено у ЕОМ, яка пов'язує значення, що характеризують модель. Відсутність інформації про математичні залежності, що лежать в основі моделі, є досить поширеною практикою комерційних програм САПР. Ще більш неадекватність моделі MEMS з її реальною поведінкою виникає при комплексному моделюванні на основі поєднання різних програм моделювання.

Наприклад, при моделюванні діафрагми використовується модель з зосередженими параметрами, тобто нехтується реальна форма деформованої діафрагми. При видобутку електричних параметрів, таких як ємність або

електричний опір, буде унаслідуватися ця невідповідність моделі. У машинної моделюванні часто забувають, що аналітична модель дійсна тільки в діапазоні параметрів. Наприклад, лінійна модель пружної деформації діафрагми є вірною для переміщень, що менше 0,1 товщини. Або модель ємнісних радіоелементів не враховує обмеження зсуву через феномен нестабільності (прилипання).

Висновки. Основне завдання будь-яких методів проектування полягає в тому, щоб зробити експериментальний зразок скоріше. У переході від проекту до прототипу, дуже важливими є випробування структури, які дозволяють регулювати процеси і конструкції MEMS, що розробляється. Як правило, створення тестових структур супроводжує проектування і створення прототипу.

Основним завданням використання САПР на різних етапах створення є скорочення періоду виходу продукту на ринок. Удосконалена САПР зменшує ці терміни в декілька разів. Вже зазначалося, що варто попереднє оцінювати параметри конструкції. САПР надає інструмент для більш гнучкого аналізу моделі проекту. Однак при використанні стандартних програм залишається проблема адекватності моделі до параметрів обраної конструкції. Реальною гарантією є тільки використання параметрів моделі, отриманих від експерименту і адекватність поведінки моделі реального компонента MEMS.

1.3 Контрольні запитання і завдання

1. Які особливості проектування мікросистем?
2. Назвіть вимоги, які потрібно сформулювати на початку розробки пристроїв MEMS.
3. Які фізичні принципи і технології використовуються для виготовлення MEMS?
4. Назвіть та охарактеризуйте два основні підходи для організації механізму проектування MEMS.
5. Охарактеризуйте схемотехнічний рівень проектування MEMS.
6. Охарактеризуйте компонентний рівень проектування MEMS.
7. Які відміни існують у конструкції інтегральних схем пристроїв MEMS?
8. Що становить основну проблему наскрізного моделювання MEMS?
9. Які програмні пакети застосовують для розробки та моделювання пристроїв MEMS?
10. Охарактеризуйте процес моделювання на прикладі мембранної структури.

2 ОГЛЯД СИСТЕМИ ПРОЕКТУВАННЯ MEMS COVENTOR

2.1 Складові частини програми Coventor MP.

Протягом двох десятиліть фірма Coventor розробляє та постачає розробникам мікросистем інструменти для моделювання, які точно прогнозують складну мультифізичну поведінку пристроїв мікроелектромеханічних систем (MEMS).

Програмний продукт фірми, що має назву 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 вимірювання та керування в промислових і побутових об'єктах. 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 (*finite element method, FEM*) або метода граничних елементів (*boundary element method, BEM*), 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.

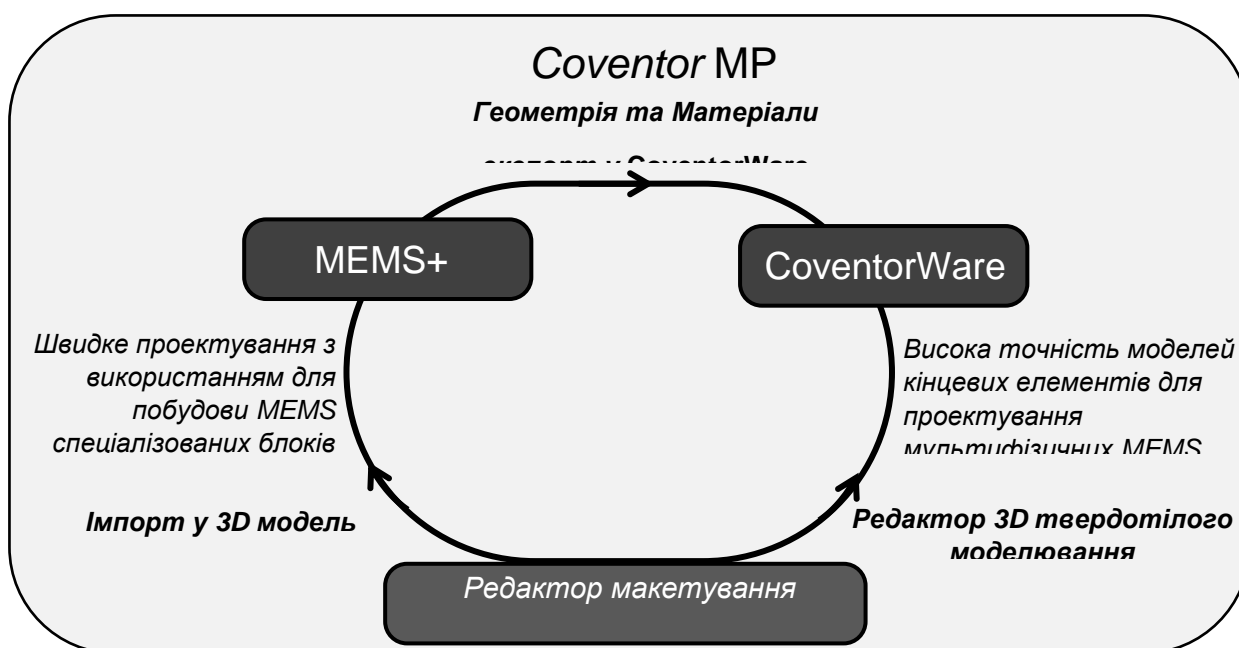


Рисунок 2.1 – Структура платформи розробки мікросистем Coventor MP

Для розробника мікросистем програма Coventor *MP* надає всі переваги наскрізного проектування за рахунок об'єднання можливостей додатків MEMS+ та CoventorWare на всіх етапах еволюції проекту.

Платформа Coventor *MP* суміщає в собі єдине потужне середовище для автоматизації проектування MEMS, об'єднуючі в єдиному пакеті міцні сторони програмних засобів розробника мікросистем MEMS + ® та CoventorWare®. Нова платформа забезпечує об'єднане середовище, до якого конструкції розробляемого проекту можна вводити один раз і використовувати для створення нормальних моделей з граничними елементами у додатку CoventorWare і спрощених моделей на базі скінчених елементів у додатку MEMS+.

Особливості програмного забезпечення.

– Проект, що розробляється, можна ввести один раз у MEMS+ і далі використовувати як для спрощеного моделювання у додатку MEMS+, так і для детального моделювання в CoventorWare.

– Платформа Coventor *MP* підтримує передачу моделей пристроїв одним клацанням миші з додатку MEMS+ у додаток CoventorWare для розв'язання впливу електромагнітних полів.

Дослідження різновидів конструкції можуть бути автоматизовані за допомогою скриптів, написаних на мовах скриптів MATLAB® або Python.

Платформа Coventor *MP* забезпечує всі стадії проектування, починаючи з введення повністю параметричної моделі конструкції до створення окремих функціональних моделей, які можна використовувати на всіх рівнях абстракції.

По суті, отримані в Coventor *MP* дані проектування служитимуть єдиною базою для всіх типів моделювання, що виключає необхідність трудомісткої та схильної до помилок ручної конвертації даних між різними програмними середовищами проекту (рис. 2.2).

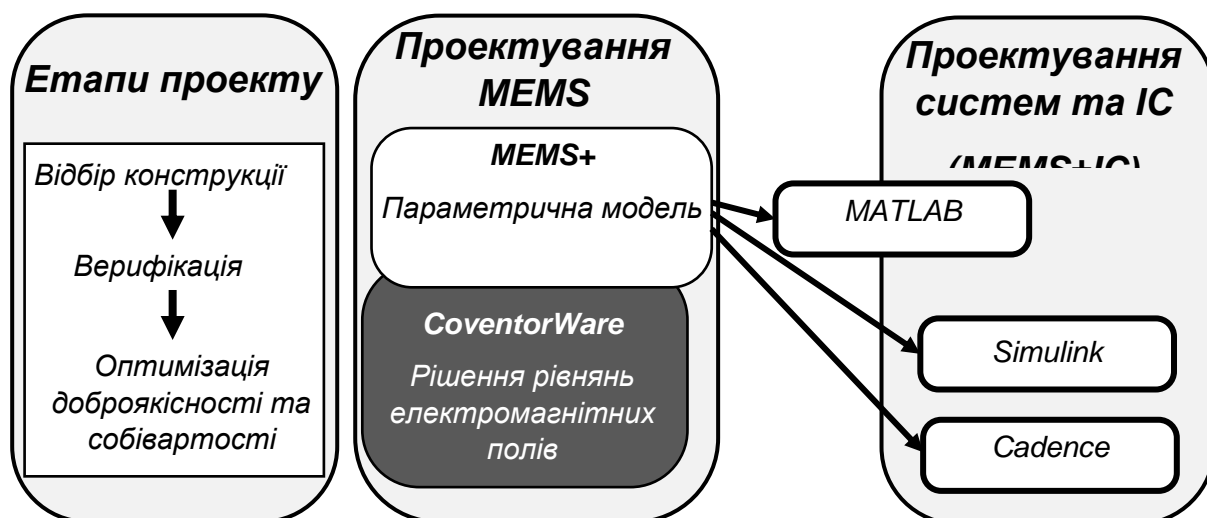


Рисунок 2.2 –Зв'язок додатків платформи Coventor *MP* з іншими засобами розробки пристроїв MEMS

Моделі пристроїв MEMS, створені в Coventor *MP*, можна опрацьовувати за допомогою вбудованих додатків або автоматично переносити до програми MATLAB®, середовища моделювання систем Simulink®, середовища моделювання електричних кіл Cadence Virtuoso® та в симулятори SPICE, що підтримують VerilogA. Порівняльну характеристику додатків MEMS+ та CoventorWare системи проектування Coventor *MP* наведено у табл.2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняльна характеристика додатків MEMS+ та CoventorWare системи проектування Coventor *MP*

<i>MEMS+</i>	<i>CoventorWare</i>
<p>Швидке дослідження та оптимізація конструкції. Моделі складаються з бібліотеки параметричних скінчених елементів високого порядку, що дозволяє проводити:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Модальний аналіз; ▪ Аналіз квазістатичної поєднаної електромеханіки; ▪ Гармонічний аналіз; ▪ Дослідження чутливості змінних елементів конструкції та технології виготовлення; ▪ Симуляція в часі електромеханіки в сукупності з ефектами демпфірування повітрям; ▪ Моделювання системи із зворотнім зв'язком у програмах Simulink та Cadence; ▪ Аналіз шуму в симуляторах програм Cadence та APS; ▪ Дослідження впливу деформації корпусу/підкладки на якісні показники приладу. 	<p>Детальний аналіз пристрою з набором рішень, які одержано методами скінчених або граничних елементів. Конструктор 2D і 3D моделей, рішення рівнянь Максвела, які оптимізовані для структур MEMS та різноманітних фізичних процесів (мультифізики) для більшості типів MEMS:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Модальний аналіз; ▪ Квазістатична сполучена електромеханіка (втягування, піднімання, електростатичне пом'якшення пружини); ▪ Гармонічний аналіз; ▪ Алгоритм швидкого зчитування частоти для п'єзоелектричних резонаторів ПАВ; ▪ Повітряне демпфірування для тривимірного моделювання геометрії об'єктів; ▪ Розсіювання енергії від термопластичного демпфірування та втрат на анкерах; ▪ Аналіз чутливості п'єзорезистивних перетворювачів; ▪ Детальний аналіз впливу різноманітних зовнішніх факторів.

2.2 Додаток MEMS+®.

Додаток MEMS+® – це програмна платформа для інженерів – розробників пристроїв MEMS, що створюють та інтегрують пристрої MEMS із схемами CMOS в купі з пакуванням в корпус. Програма ідеально підходить для проектування та оптимізації компонентів на основі MEMS, таких як датчики руху (акселерометри та гіроскопи), мікрофони, мікродзеркала, мікроперемикачі, пристрої синхронізації та енергогенеруючі пристрої.

Додаток *MEMS+* дозволяє проектувати вдосконалені конструкції на основі *бібліотечних елементів або блоків*, характерних для MEMS. Ці конструкції забезпечують отримання результатів моделювання значно швидше, ніж звичайні інструменти аналізу методом скінчених елементів, прискорюють аналіз складної мультифізичної поведінки та підвищують якість та надійність конструкції виробів. Конструкції, які розроблені у додатку *MEMS+*, можуть бути безпосередньо включені до моделей систем MathWorks та конструкцій кіл Cadence.

Бібліотека компонентів MEMS+. Для прискорення та полегшення розробки пристроїв MEMS існує бібліотека компонентів. Бібліотека компонентів MEMS+ складається з базових структурних компонентів і блоків. Кожен компонент має тривимірний вигляд і базову модель, яка фіксує механічну, електричну та/або фізичну поведінку. Подібно до того, як розробник IC 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 (рис. 2.3). На рис. зображено, як з компонентів бібліотеки побудовано складну конструкцію акселерометра.

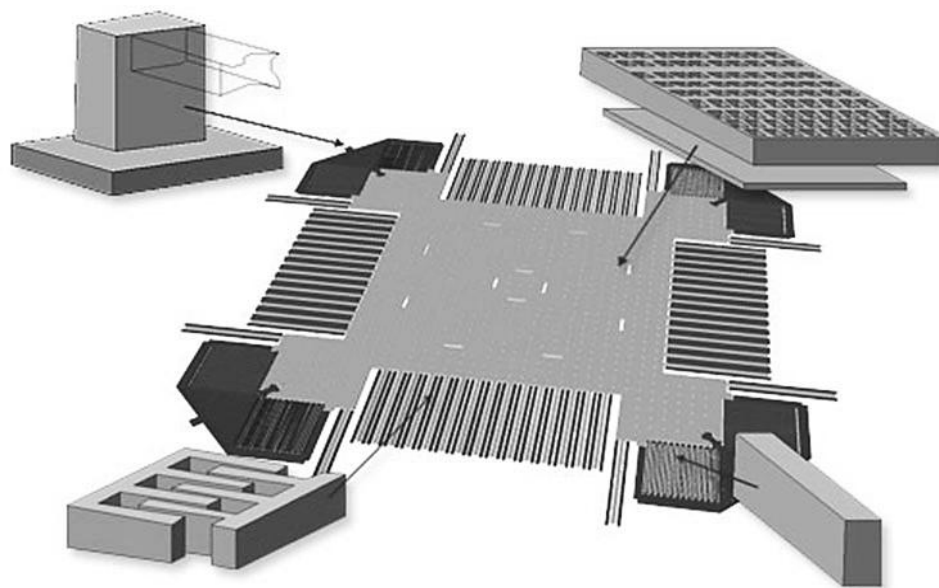


Рисунок 2.3 – Конструкція акселерометра, складена з компонентів бібліотеки MEMS+

Поверхня пластини використовується для створення довільних фігур шляхом складання параметричних геометричних примітивів, таких як прямокутний сегмент, трикутні сегменти, прямі та вигнуті, гребінчасті штирі, тощо. Завершальна конструкція є результатом з'єднання окремих примітивів.

До другої групи механічних елементів відносяться підвіси – це параметричні примітиви для прямих балок, меандрів, горизонтальних і вертикальних балок та багатьох інших. Всі моделі підвісів засновані на лінійній теорії пружності балки Бернуллі–Ейлера.

До третьої групи механічних елементів належать вигинисті поверхні, основною формою яких є кола, дуги, прямокутники та чотирикутник, які можна використовувати для створення складних вигинистих структур (рис. 2.4).

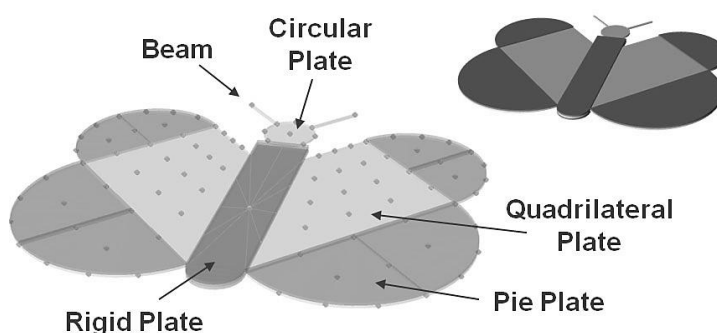


Рисунок 2.4 – Створення складних вигинистих структур

Усі вигинисті форми пластин моделюються єдиним готовим елементом оболонки зі змінним порядком кривої обвідної, відомим як МІТС (змішана інтерполяція тональних компонентів). Конструювання підвіски вимагає мінімізації ефектів, пов'язаних з технологічним процесом, такі як викривлення аспектного співвідношення, попереднє напруження матеріалу, багатошарова структура, а також нелінійні форми поведінки гнучких елементів (рис. 2.5).



Рисунок 2.5 – Структура бібліотеки механічних компонентів додатка MEMS+

Компоненти сімейства механічних моделей можуть бути доповнені електростатичними, п'єзоелектричними та контактними моделями (рис. 2.6).



Рисунок 2.6 – Доповнення механічних моделей бібліотеки компонентів MEMS+ електростатичними, п'єзоелектричними та контактними моделями

Поведінка компонентів моделюється за допомогою аналітичних формул, числових обчислень та застосуванням методу скінчених елементів.

Особливості бібліотеки моделей компонентів MEMS +. На відміну від інших продуктів, MEMS + містить великий набір фізичних моделей у кожному з розділів бібліотеки. Деякі особливі компоненти бібліотеки:

- лінійні та нелінійні моделі;
- кульові структури;
- довільні поперечні перерізи та опори кутових стінок;
- моделі зі зменшеною кількістю заданих параметрів;
- гнучкі поверхні змінного порядку, засновані на методі скінчених елементів;
- контактні моделі;
- моделі стресових навантажень та градієнтів механічної напруги;
- повні електростатичні моделі;
- дослідження крайових ефектів у всіх електростатичних моделях та інше.

Простота проектування полягає в тому, що створені моделі можуть бути експортовані до симуляторів кіл або систем для інтеграції схем управління з пристроями MEMS. Існує три варіанти створення таких моделей:

- Аналітичні моделі розроблені вручну, що реалізовані в SPICE або Verilog-A;
- Моделі зі зменшеною кількістю заданих параметрів, отриманих з FEA;
- Дискретне модулювання елементів (поведінкові моделі MEMS+).

Особливість програми MEMS + в тому, що, моделі зібрані на базі бібліотеки компонентів з визначеними електричними, механічними параметрами, вхідними та вихідними портами проекту у додатку MEMS+ Innovator, автоматично готові до симуляції. Інтеграція програми MEMS+ з програмами Simulink і Cadence дає можливість автоматично перетворити задану схему програмою Innovator в символ і відповідну модель, не вимагаючи трудомісткого FEM аналізу. (Докладніше про функції MEMS+ Innovator в розділі 4).

Розглянемо декілька прикладів застосування платформи Coventor MP для проектування пристроїв MEMS.

2.3 Приклади застосування програми Coventor MP для розробки пристроїв MEMS

2.3.1 Розробка технологічних процесів виготовлення MEMS в пакеті SEMulator3D.

У процесі розробки інтегральної схеми (ІС) інженери – технологи можуть передбачити вплив кожного з етапів процесу виготовлення інтегральної схеми на кінцеву топологію пристрою. Але, коли знані етапи об'єднані у новій послідовності, остаточну топологію важко передбачити. На відміну від процесів виготовлення ІС, процеси виготовлення MEMS мають специфічні особливості, пристосовані до конкретного класу пристроїв, тому важливо, щоб розробники MEMS повністю розуміли і враховували фактори сумісності технологій. Для скорочення терміну розробки та зменшення кількості прототипів застосовується програмне забезпечення SEMulator3D, що спрощує побудову структурних 3D–моделей із 2D–конструкторських даних.

Пакет SEMulator3D створює 3D–моделі, які включають дійсні дефекти обробки, такі як округлення форм, небажані порожнечі та ін. Моделі SEMulator3D використовуються для прогнозування, діагностики та вирішення складних проблем обробки. Найголовніше, є те, що пакет SEMulator3D використовуються для перевірки моделі конструкцій MEMS до закінчення остаточної розробки проекту. Пакет SEMulator3D в сучасному вигляді є частиною стандартного циклу верифікації файлів проекту, отриманих в додатку MEMS+ та сторонніх програмних продуктах.

На рис. 2.7 надано вигляд 3D–моделі рухомого проекційного дзеркала, побудованого у програмах Coventor MP та SEMulator3D. Модель, розроблена у

програмі Coventor *MP* ідеально підходить як для моделювання зі зменшеною кількістю змінних, так і для моделювання за методом граничних елементів, водночас модель SEMulator3D включає деталі конструкції, структури яких мають більш реальний вигляд.

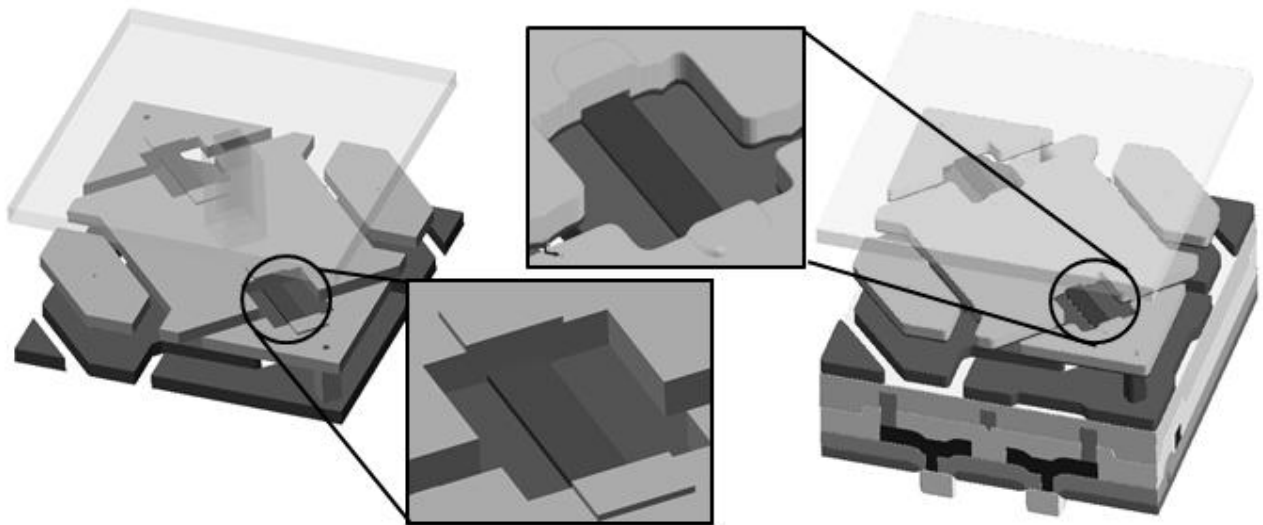


Рисунок 2.7 – 3D–моделі рухомого проекційного дзеркала, побудованого програмами Coventor *MP* (ліворуч) та SEMulator3D (праворуч), з окремо виділеними деталями шарніру.

2.3.2 Проектування акселерометрів MEMS

Акселерометри MEMS широко використовуються на транспорті, наприклад, в автомобілях для розгортання подушок безпеки, та в побутовій електроніці, наприклад, ноутбуках, смартфонах, ігрових пристроях. Крім того, зростає попит на високоефективні акселерометри MEMS в промислових, аерокосмічних та оборонних програмах, таких як розвідка нафти, структурний моніторинг стану конструкцій мостів та інерційні вимірювальні апарати для навігації.

Coventor *MP*[®] може імітувати широкий спектр критичних параметрів, пов'язаних з успішною розробкою акселерометра MEMS: від концептуальної розробки до оптимізації та підвищення доброякісності. Досліджуються наступні моделі та показники:

- Розробляється концептуальна модель для досліджень і вивчення різних конфігурацій пристроїв;
- Чутливість;
- Пропускна здатність;
- Шум;
- Лінійність;
- Нелінійні фізичні ефекти, включаючи демпфірування та похибки лінеаризації;
- Механічна стійкість;
- Температурні показники.

В якості прикладу розглянемо модель акселерометра, побудовану з використанням мільтифізичних елементів в модулі MEMS + програми Coventor MP[®] (рис. 2.8). Сенсорний елемент складається з перфорованої рухомої пластини, що закріплена на кінцях на двох пружинистих підвісах – анкерах. Чотири гребінчастих конденсатори сформовано на рухомій пластині, два для зондування та два для контролю за зворотним зв'язком. Модель є повністю параметричною, тобто параметри конструкції можна змінювати для оптимізації чутливості, лінійності та пропускної здатності.

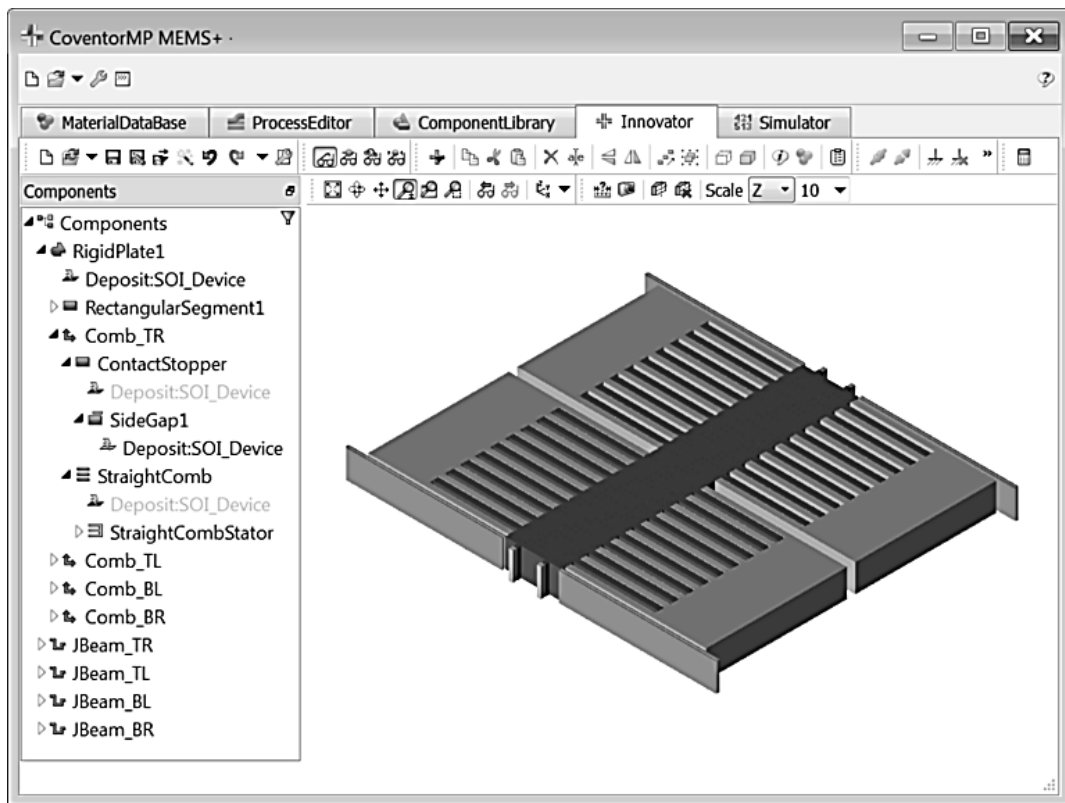


Рисунок 2.8 – Модель MEMS+ акселерометра, де виділено інерціальну масу рухомої пластини, сенсорні та керуючі гребінці, підвіси та контактні бампери (виводи).

Модуль *MEMS* + має вбудовані рішення для мультифізичного моделювання, включаючи статичний, модальний, лінійний та нелінійний гармонічний аналіз та аналіз шуму. Модель також може бути безпосередньо проаналізована відповідними інструментами у програмах Mathworks MATLAB[®] для швидкого опрацювання конструкторського рішення за допомогою сценаріїв DOE та алгоритмів оптимізації. У цьому прикладі конфігурація гребінчастого елемента дозволяє утворювати механізми електростатичного та механічного демпфірування за рахунок напруженості стиску інерційної маси [1]. Це дає можливість імітувати та відображати зміни смуги пропускання в залежності від тиску, використовуючи інтерфейс MATLAB для *MEMS*+. На рис.2.9 наведено графік чутливості до зміни ємності гребеневої структури у

залежності від частоти опорної напруги (зліва) та смуги пропускання (добротності) від тиску у порожнині корпусу

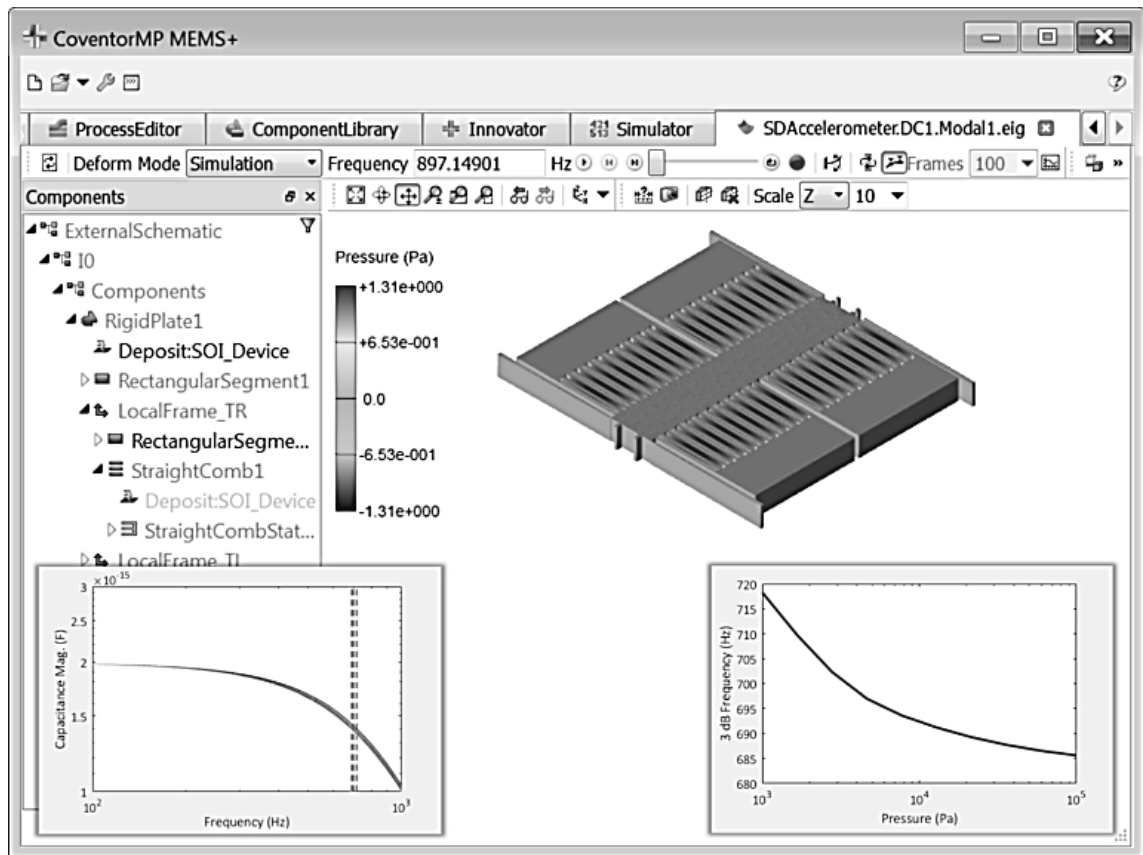


Рисунок 2.9 –Графік чутливості до зміни ємності гребеневої структури у залежності від частоти опорної напруги (зліва) та смуги пропускання (добротності) від тиску у порожнині корпусу

Спільне моделювання механічної системи з електричними колами у симуляторі системи. Використовуючи нову методологію закладену у Coventor, первинний перетворювач акселерометру можна моделювати разом із системою управління та/або електронікою контролю та керування за допомогою середовища Mathworks Simulink[®]. Для оптимізації роботи системи можна використовувати стандартні панелі інструментів Simulink. Рівним чином електроніку керування та контролю можна моделювати завантаживши модель MEMS+ безпосередньо в Cadence Virtuoso[®] або автоматично експортуючи з додатку MEMS+ в модель для роботи в програмно – сумісному симуляторі VerilogA.

На рис. 2.10 надано зображення вікна симулятора Simulink, що містить MEMS+ модель акселерометра, яка враховує механічне, контактне і нелінійне демпфірування рухомої маси. В схемі модель з'єднано з простим контролером – перетворювачем сигма–дельта другого порядку, що складається з ідеального компаратора і тригера D – типу. Два протифазних сигнали зворотного зв'язку генеруються з вихідного бітового потоку за допомогою ідеальних комутаторів

і подаються через коло до керуючих гребінців на акселерометрі. Праворуч додано графік, що відображає вхідне прискорення (зверху) та керуючу зворотним зв'язком напругу (знизу).

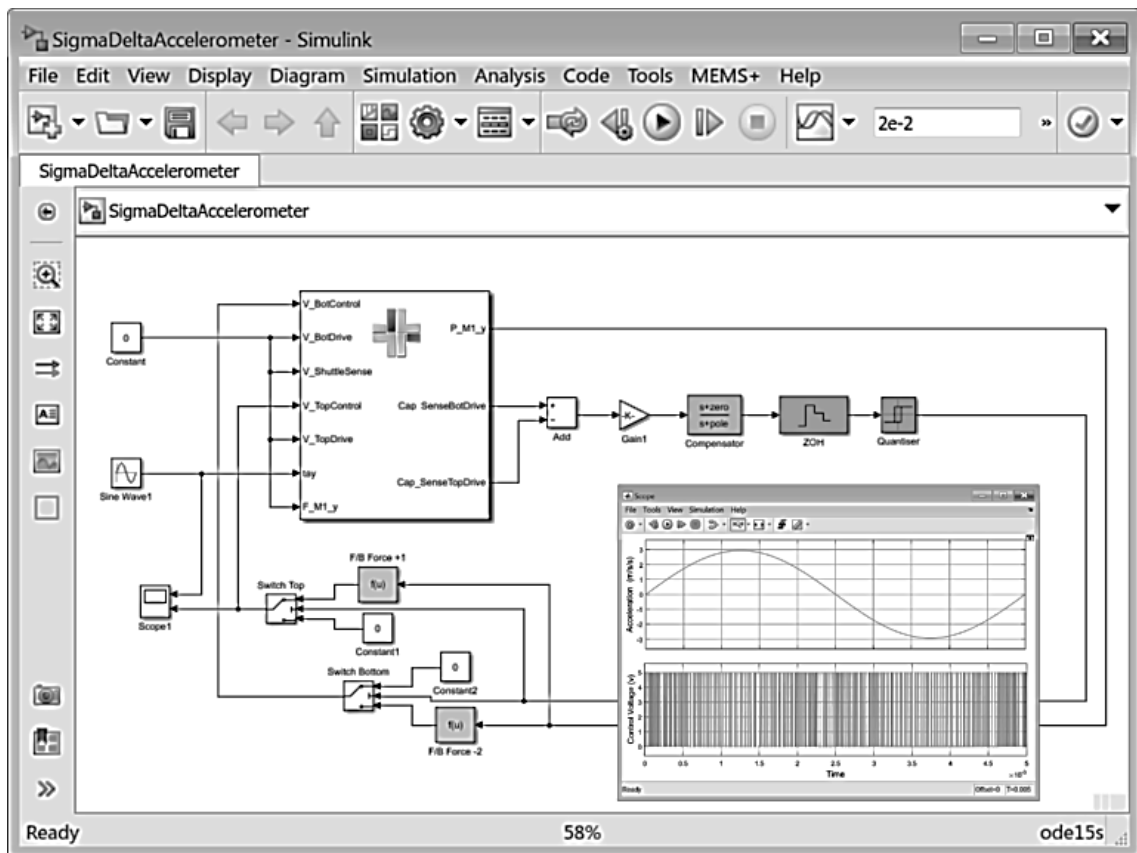


Рисунок 2.10 – Вікно симулятора Simulink, що містить *MEMS+* модель акселерометра та схему обробки сигналу

2.4 Додаток CoventorWare.

До складу додатку CoventorWare входять:

- Бази даних властивостей матеріалів, що зазвичай використовуються в конструкціях MEMC;
- Графічний редактор для забезпечення геометричного опису процесу виготовлення;
- Повнофункціональний ієрархічний редактор макетів із специфічними для MEMS функціями, такими як підтримка справжніх кривих;
- Препроцесор для перегляду 3D – моделей і підготовки їх до аналізу;
- 2D та 3D імпорт / експорт файлів широко використовуваних форматів, таких як GDS2, DXF, SAT, IGES та STEP.

Можливості проектування додатку CoventorWare базуються на рішеннях рівнянь Максвела для електромагнітних полів, але створені моделі також можуть використовуватися для аналізу за допомогою сторонніх інструментів аналізу за методом скінчених елементів (FEA), таких як Ansys.

Платформа для конструювання Coventor поєднує якісні моделі MEMS та підтримує розробку пристроїв MEMS за рахунок швидкого і надійного

моделювання складної мультидоменної, мультифізичної структури чутливих елементів та пов'язаної з ними електроніки, точно прогнозуючи чутливість, пропускну здатність, шуми, стабільність контуру управління та інше.

2.5 Приклади проектування пристроїв MEMS у пакеті Coventor MP.

Як приклади, розглянемо проектування поширених пристроїв MEMS у пакеті Coventor MP: гіроскопа, магнітометру, мікрофона, резонатора.

2.5.1 Проектування MEMS гіроскопа у пакеті Coventor MP.

Гіроскопи MEMS – це важливий клас інерційних датчиків, який знаходиться у широкому наборі споживчих пристроїв, включаючи смартфони, камери та навігаційні системи широкого профілю а також прилади та пристрої воєнного та аерокосмічного призначення. Застосування на транспорті відкриває широке поле діяльності для виробників і розробників гіроскопів та водночас вимагає від пристроїв високої швидкодії, високого рівня відтворювання характеристик точності і надійності.

Пакет Coventor MP ® надає можливість наскрізної процедури розробки – від концепції проекту, до оптимізації та підвищення якісних властивостей, а також вирішує широкий спектр ключових питань, пов'язаних з успішною розробкою MEMS гіроскопа за рахунок вбудованих інструментів моделювання. До них належать:

- Процедура концептуальних досліджень, яка пристосована для вивчення різних конфігурацій пристроїв, частотних режимів та фізичних процесів функціонування первинного перетворювача (електростатичного або п'єзоелектричного);
- Зменшення впливу електростатичних ефектів для налаштування та узгодження режимів руху і чутливості;
- Гістерезис;
- Визначення чутливості, швидкодії, впливу ефекту лінійного прискорення;
- Модулювання ефектів зумовлених механічними характеристиками пластини, корпусу, бокових підвісок і механічної опори інерційної маси;
- Визначення конфігурації електростатичних компенсаційних електродів;
- Оцінювання поведінки конструкції контактів – стопорів від перевантаження для підвищення ударних характеристик та надійності;
- Виявлення впливу демпфірування повітряного середовища, термопружного демпфірування та втрат на анкерах для прогнозування коефіцієнта добротності;
- Температурні ефекти, включаючи вплив деформації корпусів;
- Обчислення паразитної ємності з'єднань, контактів та корпусу.

На рис. 2.11 наведено приклад конструкції мікроелектромеханічного 3х-вісьового гіроскопа фірми Murata в модулі MEMS+ CoventorMP з додаванням характеристик симуляції статичної ємності та чутливості (зміни частоти генератора) у залежності від напруги зсуву вздовж вісі X.

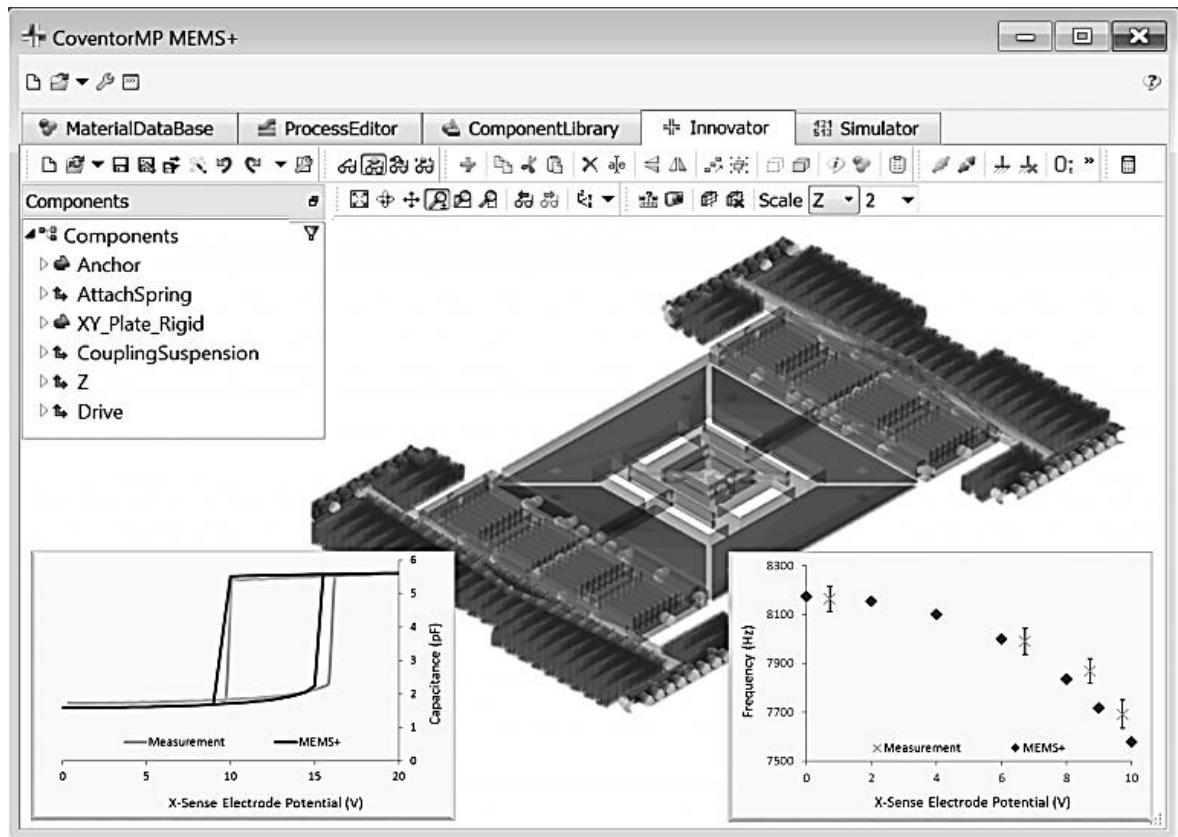


Рисунок 2.11 – Вікно в модулі MEMS+ з зображенням конструкції гіроскопа.

Спільне моделювання з електричними колами та симуляція системи. Для якісного моделювання системи в цілому, потрібно враховувати електричні параметри пристроїв зчитування, керування і перетворювачів сигналів вкупі з вбудованою моделлю гіроскопа. Схеми зчитування та електронні системи, побудовані навколо первинного перетворювача гіроскопа, мають свої власні характеристики і не враховують нелінійності вбудованої моделі гіроскопа. Для вирішення цієї проблеми Coventor MP генерує мультифізичні комірки програмованих запам'ятовуючих пристроїв (ПЗП), які враховують інерційну нелінійність механіки гіроскопа (рис. 2.12). Моделі забезпечують швидку оптимізацію конструкції, що займає, як правило, не більше 30 хвилин процесорного часу. Моделі Coventor MP надаються у форматі програми VerilogA або як S-функція для роботи з програмою Simulink (S-функція – це гладка монотонно зростаюча нелінійна функція, що має форму літери «S», яка часто застосовується для «згладжування» значень деякої величини).

Порти на символу гіроскопа (рис. 2.11) позначають: виходи, що налаштовують чутливість (вгорі), керуючі виводи та входи кутової швидкості (ліворуч) та додаткові виходи ємностей (праворуч). У верхній частині вікна показано пілотний керуючий сигнал, у нижній – диференційну реакцію на швидкість руху ємнісної складової Y – чутливості та поперечної X – чутливості [1,2].

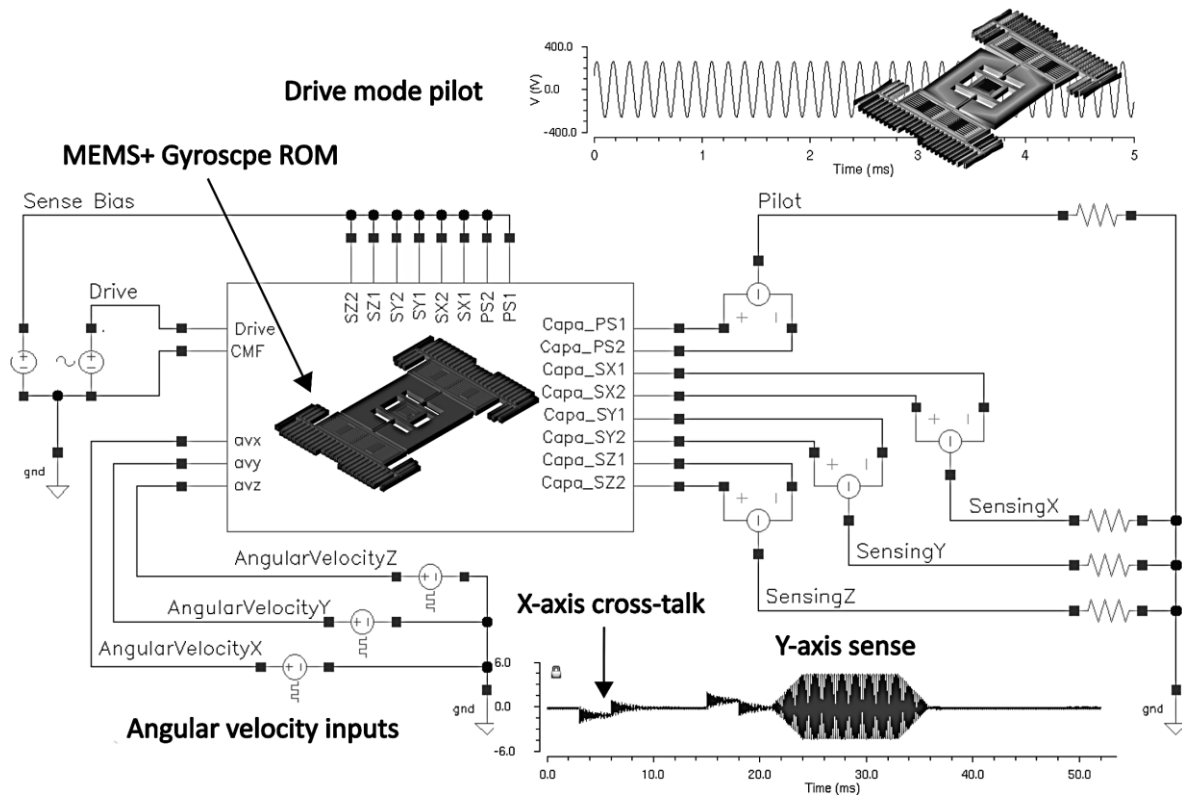


Рисунок 2.12 – Проекти схемного і системного рівня моделі гіроскопа

Важливим фактором для будь-якого пристрою MEMS є термостабільність та його стійкість до зовнішніх механічних впливів. Пакет Coventor MP дозволяє поєднати моделі корпусів з моделлю гіроскопа. Параметричний аналіз для визначення реакції гіроскопа на перемену температури дозволяє розробникам отримувати моделі для корекції результатів вимірювання (рис. 2.13).

Таким чином, пакет Coventor MP дозволяє дизайнеру розв'язувати ключові проблеми, характерні для гіроскопів MEMS, починаючи від вибору частотних параметрів і урахування впливу електростатичної взаємодії на зменшення пружності електродів, закінчуючи оцінюванням квадратурної помилки, що спричиняється впливом бокової стінки, та спільним моделюванням з електронними схемами. Автоматизований експорт елементів постійного запам'ятовуючого пристрою (ПЗП) дозволяє користувачеві генерувати спрощені для швидкого моделювання моделі, які використовуються в модулях, сумісних з програмами Verilog–A та SIMULINK для побудови схеми пристрою та системи загалом.

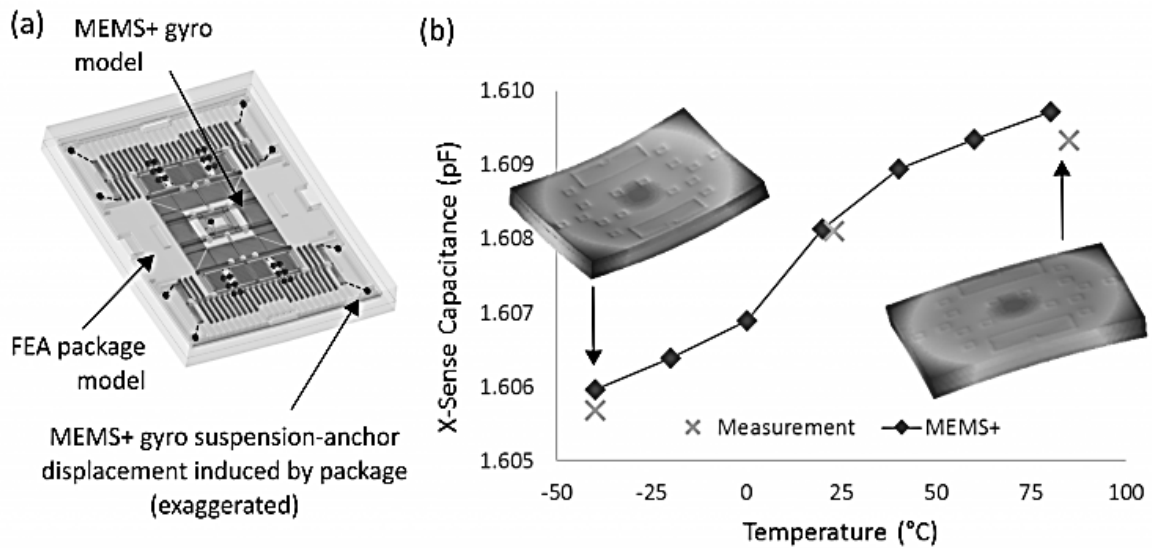


Рисунок 2.13 – Результати розробки гіроскопа у пакеті Coventor MP: (a) тривимірна візуалізація корпусу гіроскопа матрицею FEA; (b) зміщення ємності сенсора по осі X внаслідок теплових деформацій пластини, результат вимірювання та симуляції [3].

2.5.2 Проектування магнітометрів, принцип функціонування яких базується на силі Лоренца.

Ринок недорогих датчиків MEMS швидко зростає, зокрема, через зростання ринку складної побутової техніки. Компас або магнітометр є важливою складовою для надання послуг навігації та місцезнаходження на різних пристроях. У магнітометрах застосовують магніторезистивний ефект, ефект Холла, ефект, що обумовлений силою Лоренца.

Переваги магнітометрів, що вживають для функціонування силу Лоренца:

- відсутність особливих вимог до будь-якого спеціалізованого магнітного матеріалу,
- відсутність у потребі магнітних концентраторів для первинного перетворювача,
- легка інтеграція з гіроскопами та акселерометрами MEMS.

Для магнітометрів важливі наступні параметри: чутливість, шуми, гістерезис, лінійність, динамічний діапазон, надійність.

Магнітометри також мають мультифізичну природу, тому проектування пристрою, як правило, включає аналіз резонансних частот конструкції, моделювання дії сили Лоренца на первинний перетворювач та фактори узгодження вихідного сигналу, що має комплексний вигляд. Схема узгодження та обробки сигналу вимагає точної моделі магнітометра для розробки системи керування приводом змінного струму, підсилювача сигналу ємнісного перетворювача, ЦАП, інтерфейсу та ін. Вимоги до проекту системи

зазвичай включають аналіз шуму для датчика та схеми обробки, а також аналіз температурної стабільності.

Конструкцію сенсорного елемента магнітометра Девіса, який застосовує для вимірювання магнітних полів сили Лоренца, та схема його підключення наведено на рис. 2.14. Для вимірювання двовісного магнітного поля вживається єдина мікροструктура. Білими стрілками на рис.2.13 показано базовий струм змінної напруги, що проходить у напрямку y^+ .

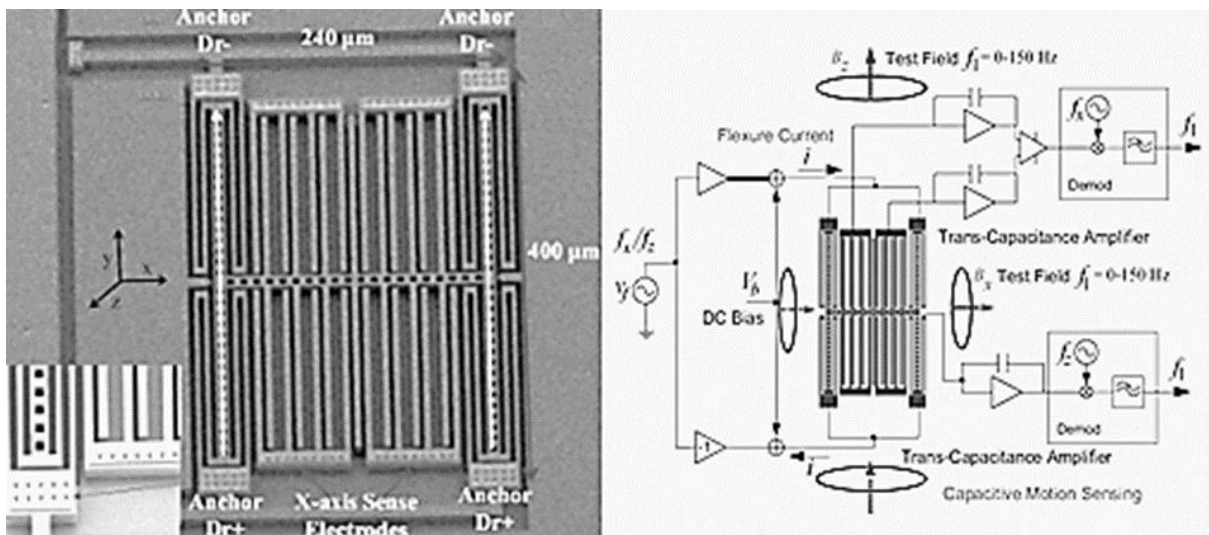


Рисунок 2.14 – Конструкцію сенсорного елемента магнітометра Девіса, та схема його підключення для визначення величини магнітного поля

Додаток MEMS+ відображає сили Лоренца F , що діють на рухомі частини магнітометра (рис. 2.15) у залежності від напрямку магнітного поля B , та будує модель магнітометра (рис. 2.16).

Для визначення оптимальної частоти змінного струму проведено модальний аналіз. Модальний аналіз – це один з основних інструментів структурного аналізу, метою якого є виявлення динамічних параметрів – мод коливань, рівня демпфірування та жорсткості системи.

Результати модального аналізу для досягнення максимальної чутливості у залежності від частоти змінного струму керуючого сигналу та частоти власних механічних коливань за переміщенням у площині – напрям X та поза площиною – напрям Z у додатку MEMS + наведені на рис. 2.17.

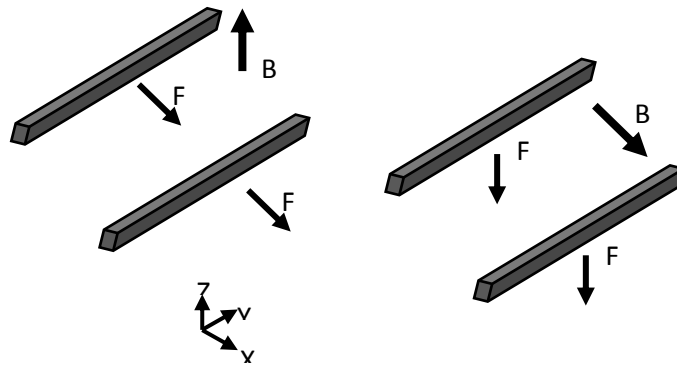


Рисунок 2.15 – Сили Лоренца F за рахунок взаємодії полів струму приводу та магнітних полів B_z і B_x

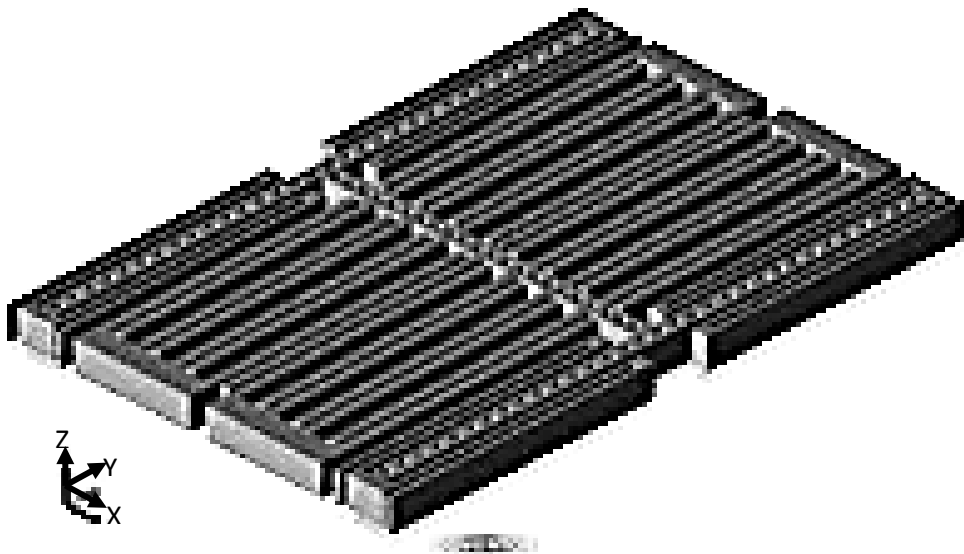


Рисунок 2.16 – Модель магнітометра Девіса у додатку MEMS+

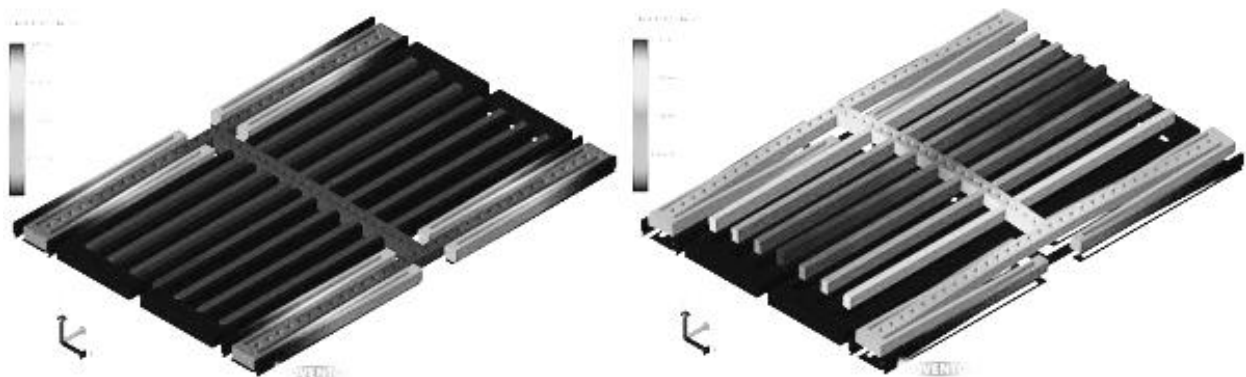


Рисунок 2.17 – Результати модального аналізу у додатку MEMS+ для визначення впливу частоти змінного струму в режимі за рухом в одній площині в напрямі руху X на частоті 49,7 кГц (ліворуч) та в напрямі руху Z на частоті 112 кГц (праворуч)

Визначення величини складової магнітного поля B_z забезпечується диференційною ємністю між X^+ і X^- електростатичними гребінцевими електродами, а визначення складової магнітного поля B_x забезпечується ємністю між гребінцевими електродами та загальним електродом під мікроструктурою, як показано на рис. 2.18.

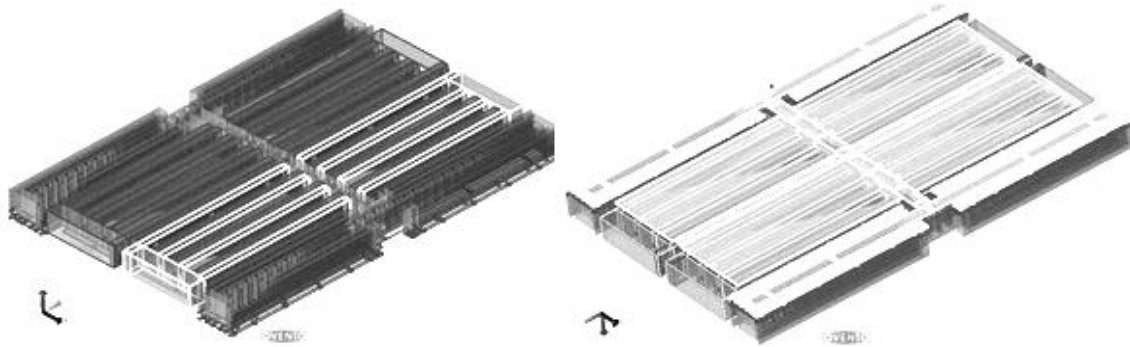


Рисунок 2.18 – Модель гіроскопу у додатку MEMS+, що показує зміну диференціальної ємності для складової магнітного поля B_z (ліворуч, виділені лише координата X і конденсатор) та визначення ємності одиничного електрода для складової магнітного поля B_x через загальний електрод під мікроструктурою (праворуч).

Результати симуляції залежності величини ємності та фази від частоти змінного струму керуючого сигналу для складових магнітного поля B_z та B_x для моделі первинного перетворювача, отримані в додатку MEMS+ показані на рис. 2.19. Треба зауважити, що оптимальна частота змінного струму для зондування кожної складової поля є такою ж, як частота, передбачена модальним аналізом для кожного режиму зондування.

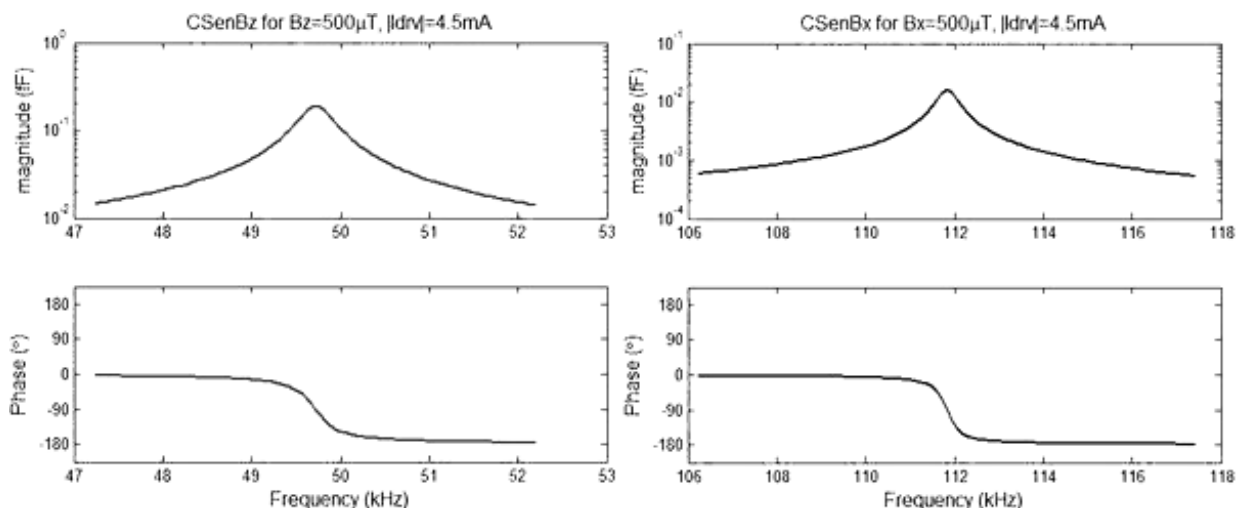


Рисунок 2.19 – Залежності величини ємності та фази від частоти змінного струму керуючого сигналу для складової магнітного поля B_z (ліворуч) та B_x (праворуч) для моделі первинного перетворювача, що отримані в додатку MEMS+

2.5.3 Проектування MEMS мікрофонів.

За останні роки ринок мікрофонів MEMS швидко зростає. Вони знайшли широке використання як в мобільних пристроях, так і в побутовій електроніці де все частіше вбудовуються мікрофони, наприклад, домашні акустичні системи, керовані голосом. Розумні пристрої тепер використовують два або більше мікрофонів MEMS для поліпшення чутливості до напрямку та активного зниження шуму для покращення якості звуку. Мікрофонні масиви також використовуються в інших споживчих продуктах (наприклад, Amazon Echo і Google Home), з функціями багато спрямованості для підвищення ефективності роботи.

Принцип дії більшості сучасних MEMS мікрофонів засновано на конденсаторах з повітряним зазором з однією нерухомою фіксованою обкладинкою та рухомою мембраною. Більш складні конфігурації можуть мати подвійні обкладинки або подвійні мембрани. Останнім часом також спостерігається все більша зацікавленість до використання п'єзоелектричного ефекту як механізму перетворення акустичних хвиль в електричний сигнал.

Для вирішення ключових питань, пов'язаних з успішною розробкою конструкції мікрофона MEMS необхідно дослідити широкий спектр проблем – від концепції розробки до оптимізації та підвищення якості виробництва пристрою. До цих питань належать:

- Вибір конструкції: ємнісна (або п'єзоелектрична) з однією, або подвійною конфігурацією нерухомої обкладинки та мембрани;
- Діапазон частот при різних режимах навантаження;
- Механічні деформації, контактні ефекти та засіб перетворення;
- Чутливість, в залежності від динамічного діапазону;
- Перехідний тиск при перевантаженні;
- Демпфірування та аналіз пов'язаного з ним термоакустичного шуму в чутливому елементі для прогнозування співвідношення сигнал/шум (SNR – signal to noise response);
- Моделювання на платформі розробки ІС з використанням Cadence Virtuoso® або на сторонньому симуляторі, сумісним з VerilogA;
- Дослідження загальних гармонійних спотворень (THD – total harmonic distortion) з використанням Cadence Virtuoso.

У ємнісних мікрофонах напруга збудження, є ключовим параметром, який необхідно оптимізувати під час проектування. Високий ступінь нелінійності поведінки діафрагми в поєднанні з контактними явищами і напругою збудження ускладнює моделювання поведінки пристрою за допомогою стандартних алгоритмів на засаді постійного струму. Для вирішення цієї проблеми пакет Coventor MP® пропонує надійний алгоритм симуляції, який знаходить як стабільні, так і нестабільні умови, з можливістю урахування ефектів, обумовлених величиною електричної напруги зсуву.

Модель чверті конденсаторного мікрофона MEMS наведено на рис. 2.20. Для наочності модель масштабована за координатою Z з коефіцієнтом 20, а контактні бампери приховані. Лівий графік показує ємність як функцію напруги, змодельовану за допомогою алгоритму для визначення як стабільного, так і нестабільного станів. Правий графік показує зміну чутливості на частоті 1 кГц в залежності від напруги зсуву.

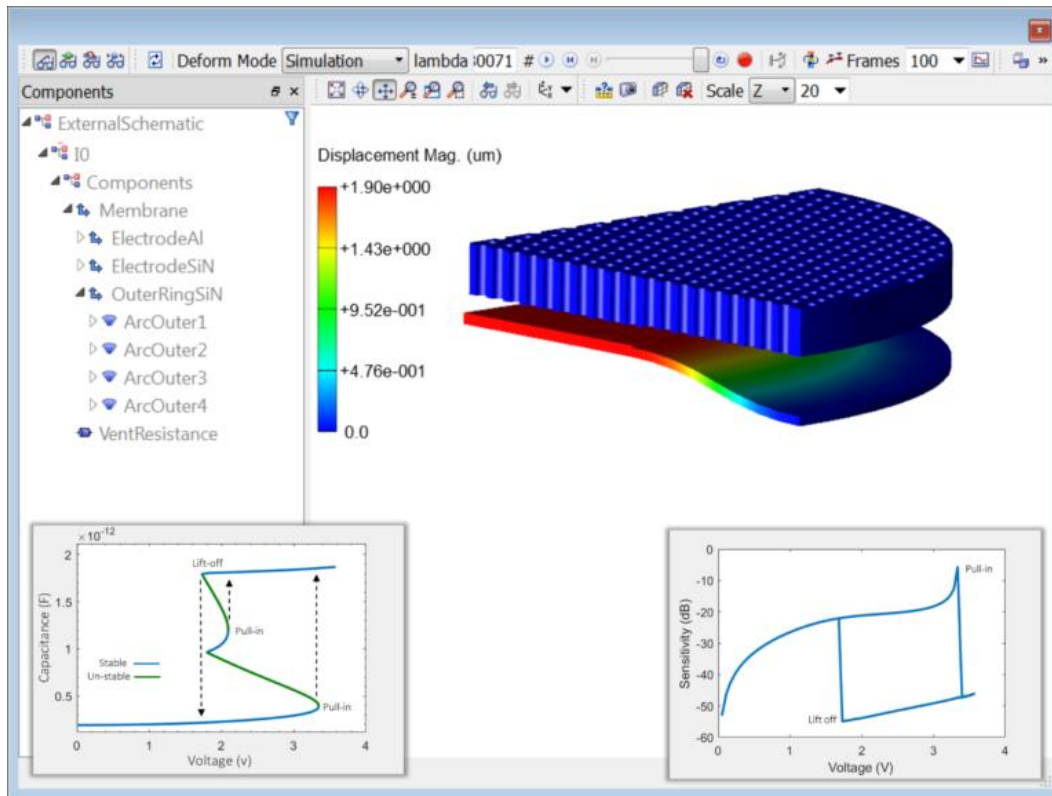


Рисунок 2.20 – Модель чверті конденсаторного мікрофона MEMS.

Ще одним ключовим моментом проектування мікрофонів є визначення співвідношення сигнал/шум. Одним з поширених підходів до моделювання SNR є побудова моделі електричного еквівалента з зосереджених компонентів в симуляторі, подібному Spice. Цей підхід зазвичай вимагає спеціальних знань в області проектування і значного часу для створення повної еквівалентної моделі. В якості альтернативи CoventorMP пропонує модель з декількома фізичними елементами, яка дозволяє досліджувати чутливість і шумові характеристики безпосередньо та дає можливість обчислити SNR.

Модель чверті конденсаторного мікрофона MEMS, що відображає плівкові демпфіруючі елементи, нижню камеру (масштабовано для наочності) та лінії опору демпферу наведено на рис. 2.20. Залежності від частоти ємності та шумів, що генеруються у мікрофлюїдній системі демпфера, зображено у нижній частині на рис. 2.21.

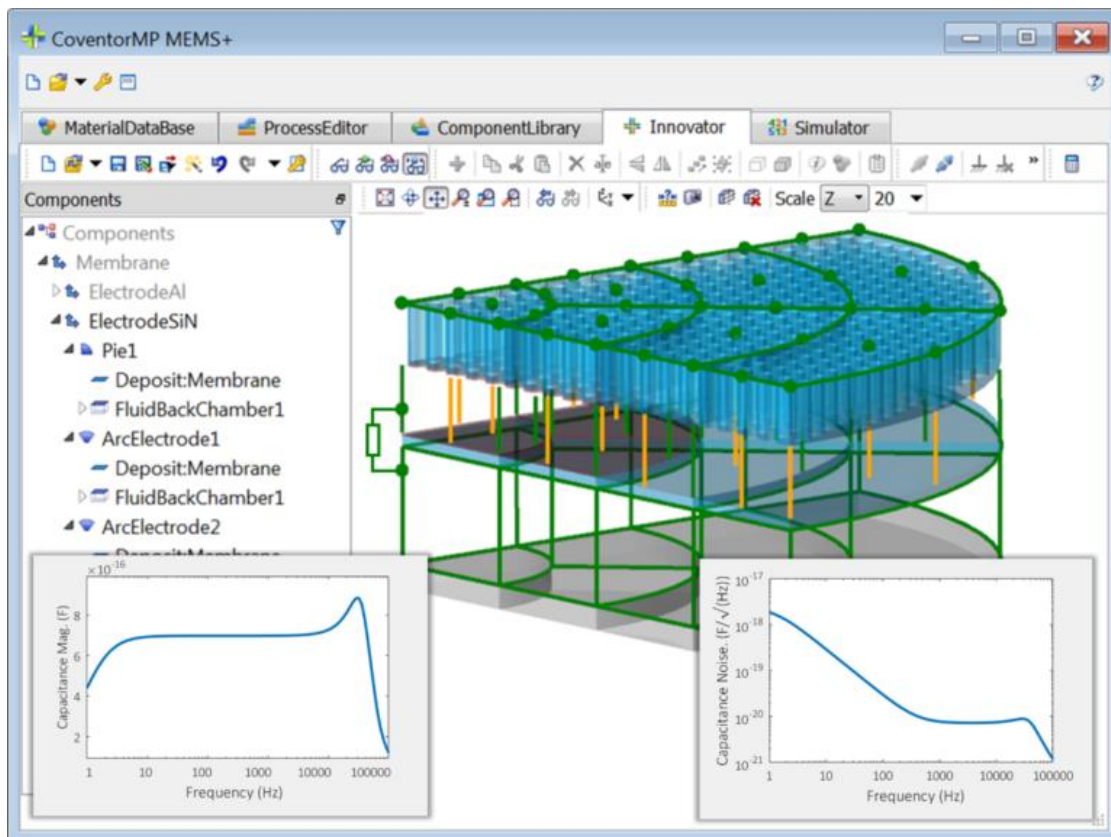


Рисунок 2.21 – Модель конденсаторного мікрофона з елементами демпфера та графіки залежності чутливості (ліворуч) і шумів вихідної ємності від частоти (праворуч)

Спільне моделювання з електричними схемами. Моделювання співвідношення с/ш SNR також можна отримати, завантаживши мультифізичну модель безпосередньо в пакет Virtuoso. Перевага цього методу полягає в тому, що вплив паразитних навантажень і будь-якого елемента кола або схеми зміщення на результат можна моделювати безпосередньо, використовуючи програму Cadence Spectre®. Всі нелінійні фізичні моделі, включаючи моделі демпфірування для аналізу шуму, вбудовані в модель за замовчуванням. Крім того, оскільки моделі MEMS+ за своєю суттю нелінійні, коефіцієнт гармонік також можна змоделювати разом із аналізом в часовій області, наприклад, для симуляції перехідних процесів при флуктуаціях живлення. Структурну модель конденсаторного мікрофона зі сталою напругою зсуву в пакеті Cadence Virtuoso наведено на рис. 2.22.

Моделюється вплив на вихідні характеристики присутності паразитної ємності і внутрішнього опору конденсаторного мікрофона. Для обчислення співвідношення сигнал-шум включено ваговий фільтр А-типу. На вставці симулятора, показано початкові дані моделювання для обчислення чутливості, співвідношення сигнал-шум та гармонійних спотворень.

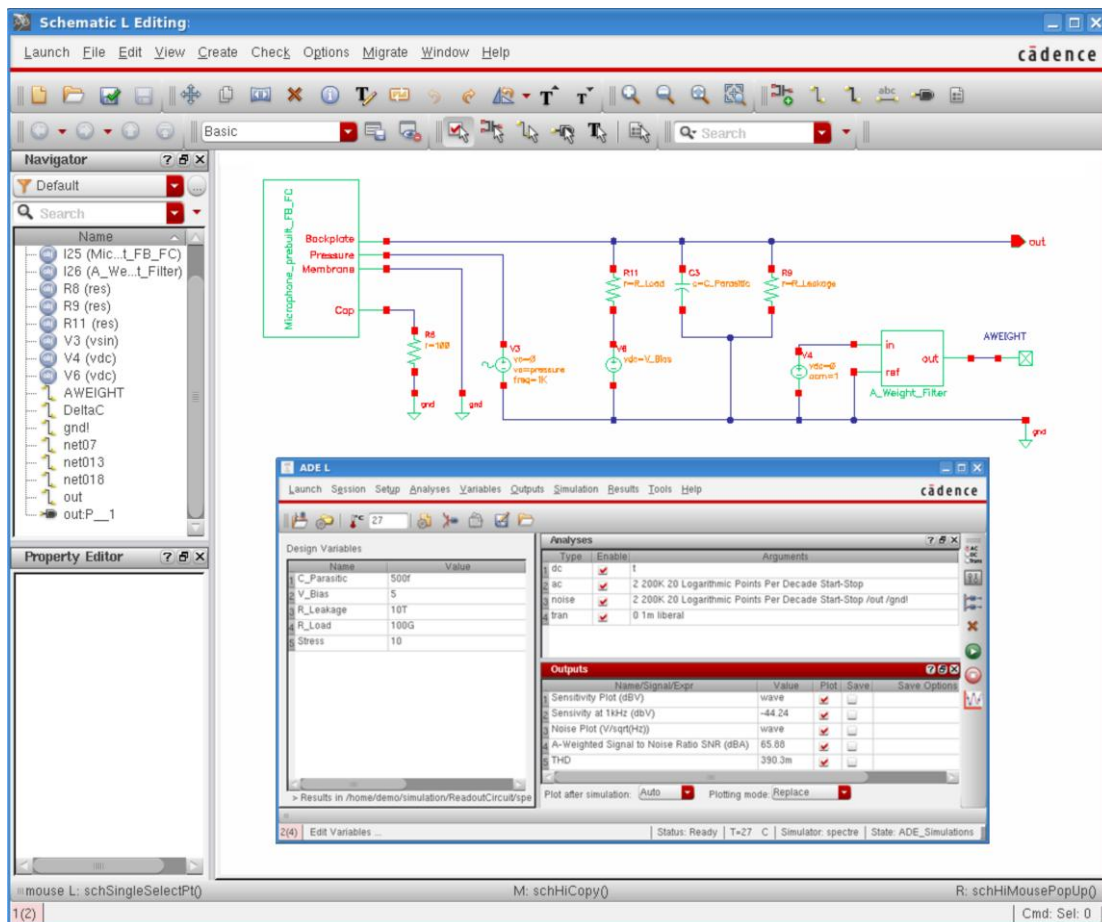


Рисунок 2.22 – Структурна модель конденсаторного мікрофона зі сталою напругою зсуву в програмі Cadence Virtuoso

Таким чином, Coventor MP дозволяє завдяки існуючим моделям розв'язувати ключові проблеми, характерні для MEMS мікрофонів, від оптимізації напруги живлення до розрахунків чутливості та шуму, включаючи спільне моделювання за допомогою прямого експорту моделі до пакету Cadence Virtuoso або до сторонніх продуктів через експорт у пакет Verilog A.

2.5.4 Розробка та моделювання резонаторів MEMS.

На відміну від кварцових, резонатори MEMS можуть мати менші габарити (площу та висоту) для кращої інтеграції з технологіями виготовлення ІС для портативних бездротових пристроїв. Резонатори на базі MEMS також можуть бути інтегровані разом зі схемами керування, пропонуючи повне інтегроване рішення в одному корпусі, заощаджуючи цінний простір на кристалі, або платі. Ці переваги (рис. 2.23) разом із зменшенням споживаної потужності, що притаманні пристроям MEMS, є переконливим фактором для застосування резонаторів на основі MEMS-структур.

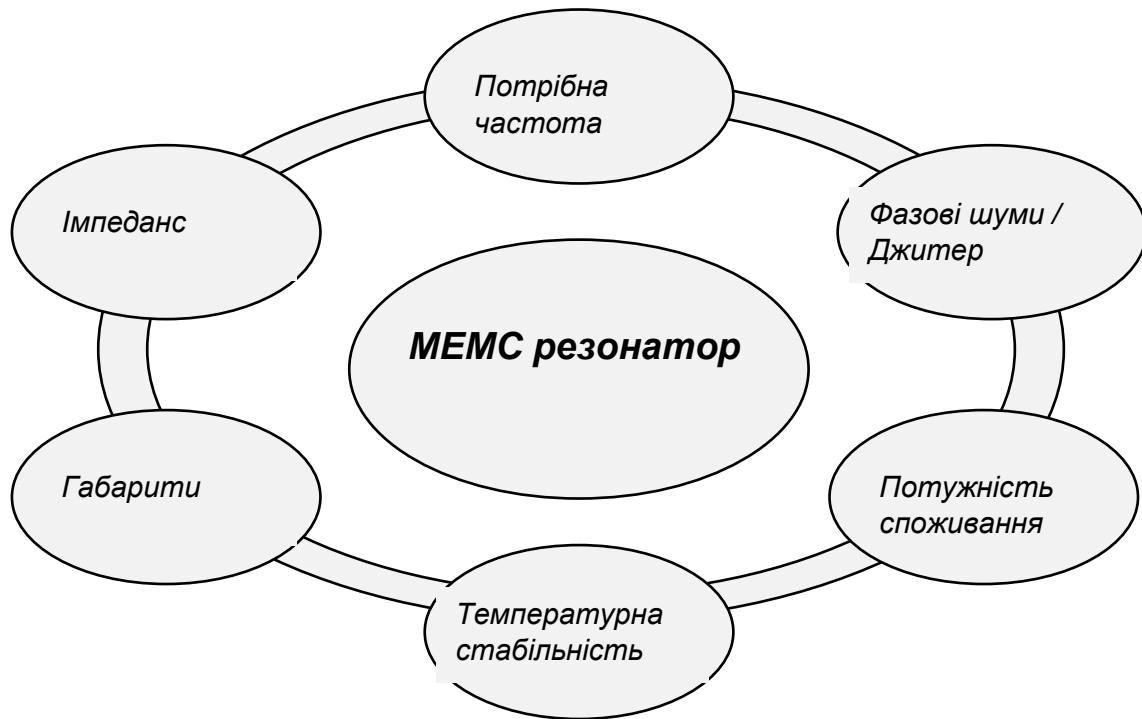


Рисунок 2.23 – Переваги MEMS–резонаторів

Для широкого розповсюдження резонаторів на базі мікросистем, розробникам необхідно перевершити або досягнути характеристик фазової і температурної стабільності та точності підтримки частоти кварцових кристалів, використовуючи при цьому переваги за габаритами, вартістю та споживаною потужністю, які забезпечують технології MEMS.

Після визначення початкових вимог (розмір, належна частота та імпеданс) розробники вивчають компроміси між потужністю споживання електроенергії, величиною фазової нестабільності, стабільністю частоти та залежністю частоти від температури.

Зазвичай для досягнення оптимальних показників проекту конкретного приладу використовується метод аналізу скінчених елементів та інструменти симуляції типу Spice. Проблема полягає в тому, що ці інструменти дуже повільні, вони вводять нові невизначеності, і дуже часто розробники просто повертаються до випробуваного підходу складання і тестування. Це значно обмежує розробки конструкції та значно збільшує витрати та час на розробку.

Гібридна інтегрована платформа Coventor забезпечує швидку експериментальну розробку (DOE – design-of-experiment), високоточну та детальну перевірку та можливість інтеграції системи MEMS+ та IC.

Етапи гібридного проектування резонатора у платформі Coventor.

1 Вибір геометрії резонатора.

На першому етапі створюється геометрія резонатора. Геометрія створюється за допомогою бібліотеки електромеханічних елементів, можливості яких можуть бути розширені за рахунок використання змінних, рівнянь та допусків для проведення параметричного проектування. На цій

повноцінній електромеханічній системі проводиться моделювання в поєднанні зі статистичними рішеннями для оптимізації конструкції. Для досягнення бажаної продуктивності виробництва використовуються алгоритми оптимізації за методом Монте-Карло. Геометрії резонаторів, що відповідають різним робочим частотам наведено на рис. 2.24.

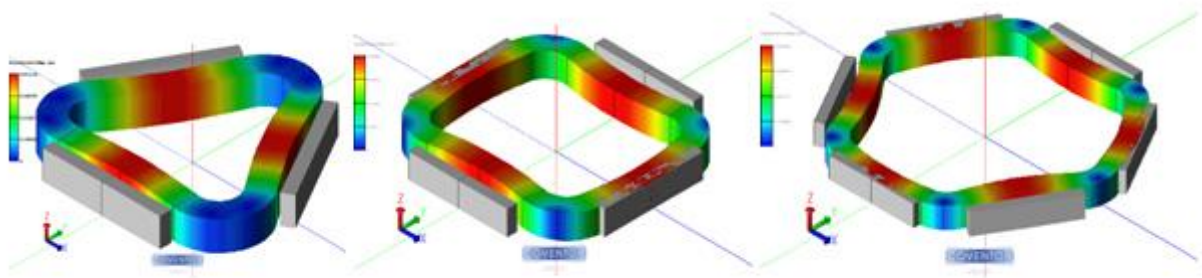


Рисунок 2.24 – Геометрії резонаторів на робочі частоти 3,37 МГц, 2,40 МГц, 2,80 МГц відповідно

Оскільки процеси симуляції надзвичайно швидкі та включають критичні нелінійності, вони дозволяють розробнику створити сотні можливих рішень та визначити взаємозв'язки електромеханічних ефектів та встановити інші критерії, що мають значення, перед тим, як перейти до конкретної архітектури.

Наприклад, на рис. 2.25 показані ефекти впливу довжини траверзу з'єднання на резонансну частоту. Для цього було використано інтерфейс MathWorks, моделювання запускається за допомогою сценарію MATLAB, де встановлюється режим симуляції і визначається довжина траверзу з'єднання. Такий підхід автоматично визначає частоту для кожної довжини, а загальний час розв'язання значно зменшується (розмір кроку 10μm). З наведеного прикладу виходить, що мінімальний вплив конструкції резонатора на резонансну частоту відбувається за довжиною балки траверзу 250 мкм.

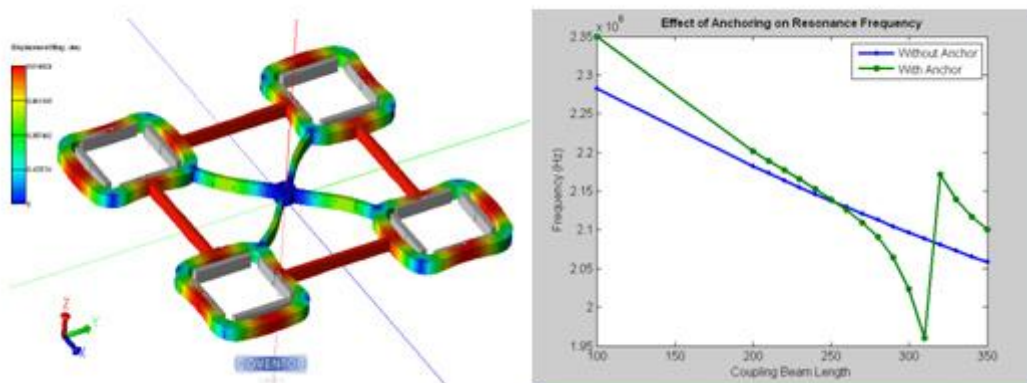


Рисунок 2.25 – Модель резонаторної системи та зсув резонансної частоти від довжини траверзу з'єднання

Детальний аналіз проекту здійснюється за допомогою рішень рівнянь Максвела. Програми для рішення задач електромагнітних полів (рішатели) є спеціалізованими програмами для безпосереднього розв'язання рівнянь Максвела. Вони є частиною області електронного проектування, або EDA, і широко використовуються у розробці ІС та друкованих плат.

Моделювання нелінійних процесів, що виникають внаслідок електромеханічного пом'якшення пружних деформації елементів конструкції є надзвичайно важливим етапом розробки конструкції резонатора. Для забезпечення впевненості в чисельних результатах потрібна додаткова перевірка за допомогою FEA. Наприклад, моделювання FEA забезпечує переконливе підтвердження припущення про лінійність, яке застосовується у подальших поєднаних електромеханічних моделюваннях. Об'єднане моделювання електромеханічних елементів у пакеті Coventor базується на підході об'єданого застосування FEM (finite element method – метод скінчених елементів) та BEM (boundary element method – метод граничних елементів) методів.

На цьому етапі розробник також може досліджувати різні механізми втрат: демпфірування існуючим середовищем, акустичне випромінювання через анкери (тобто втрати на анкерах, рис. 2.26) та термопружне демпфірування (TED – thermoelastic damping). Програма Coventor пропонує спеціалізовані алгоритми та інструменти дослідження для вирішення цих завдань. Нижче показано декілька варіантів конструкції резонаторів, які були досліджені для мінімізації впливу TED та відповідних їм прогнозованих значень добротності (рис. 2.27).

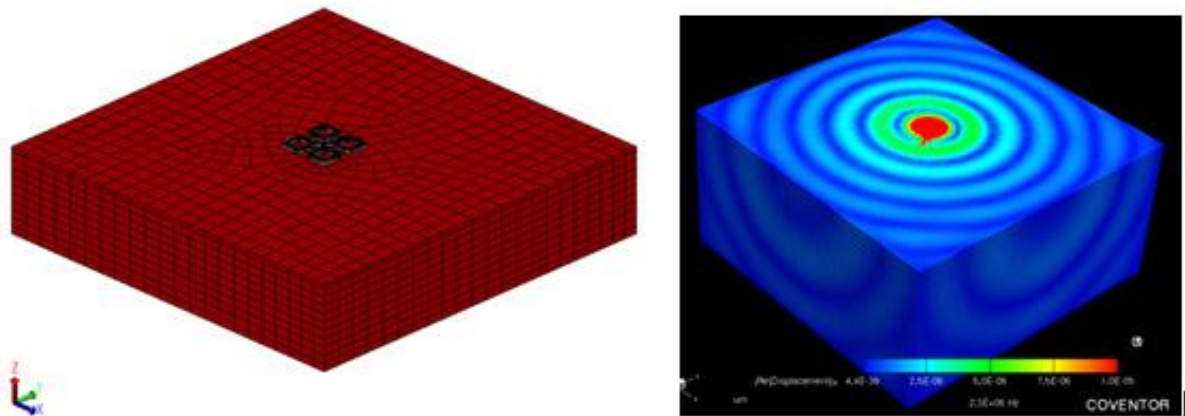


Рисунок 2.26 – Моделювання величини механічного зсуву в пластині, яке відтворює вихідну акустичну хвилю

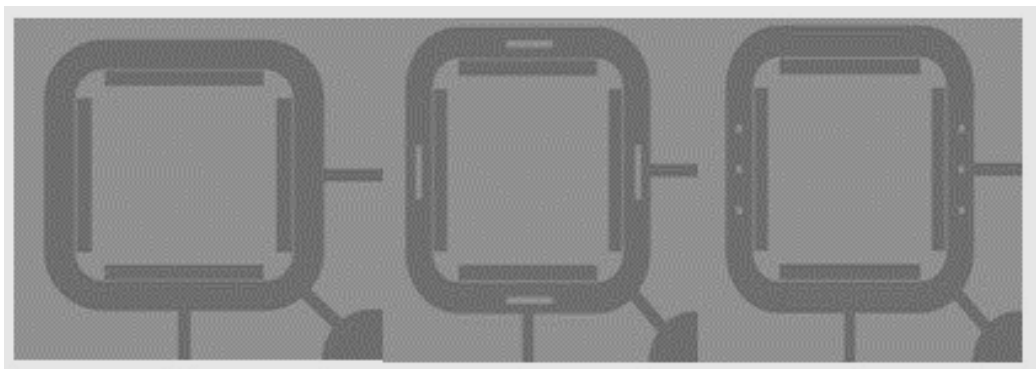


Рисунок 2.27 – Варіанти конструкції резонатора для мінімізації термопружного демпфірування з різною величиною добротності: $Q = 26550$, 30300 та 26800 (відповідно зліва праворуч)

Крім того, можна використовувати рішення FEA для аналізу відмов, наприклад змінювати профіль, щоб мінімізувати вплив механічного навантаження (рис. 2.28). Повністю інтегрована платформа також надає можливість імпортувати сітчасті або суцільні моделі конструкцій корпусів, проводити термомеханічний аналіз та передавати результати дослідження «напруга/деформація» інструментам системного рівня для вивчення їх впливу на якість пристрою.

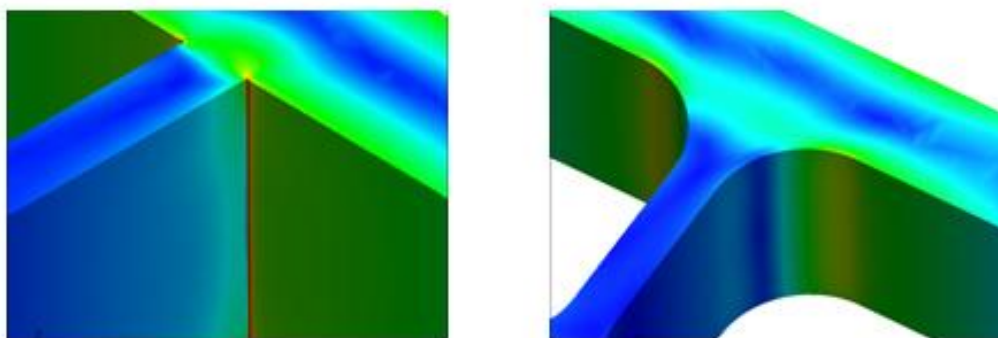


Рисунок 2.28 – Дослідження впливу конфігурації профілю на розподіл механічної напруги.

Для оцінювання впливу електронної схеми на параметри резонатора проводиться моделювання інтегрованої системи резонатора MEMS+ сумісно з електронною схемою мікросхеми (моделювання MEMS+ IC).

Інтеграція 3D-структури MEMS з колом управління сенсору та перевірка якості проектування за допомогою точного моделювання в додатку тестування SOC є ще одним важливим елементом успішного застосування MEMS резонаторів в нових пристроях. На цьому етапі проводяться випробування моделі для оптимізації параметрів швидкодії та потужності у інструментах програм Cadence або Mathworks, що у свою чергу потрібно для оптимізації конструкції пристроїв (рис. 2.29). Цей підхід дає можливість

відмовитись від відокремлення моделей та генерації еквівалентних моделей схем, акцентуючи увагу на дослідженні оптимальних рішень на рівні схеми, конструкції, або їх обох. Методологія пакету Coventor використовує повністю параметричні та нелінійні кінцеві елементи високого порядку на основі FEA, які уникають традиційної методології, такої як аналіз еквівалентних схем. Наведені на рис. 2.29 моделі відображають механіку та електростатичні нелінійності розробки.

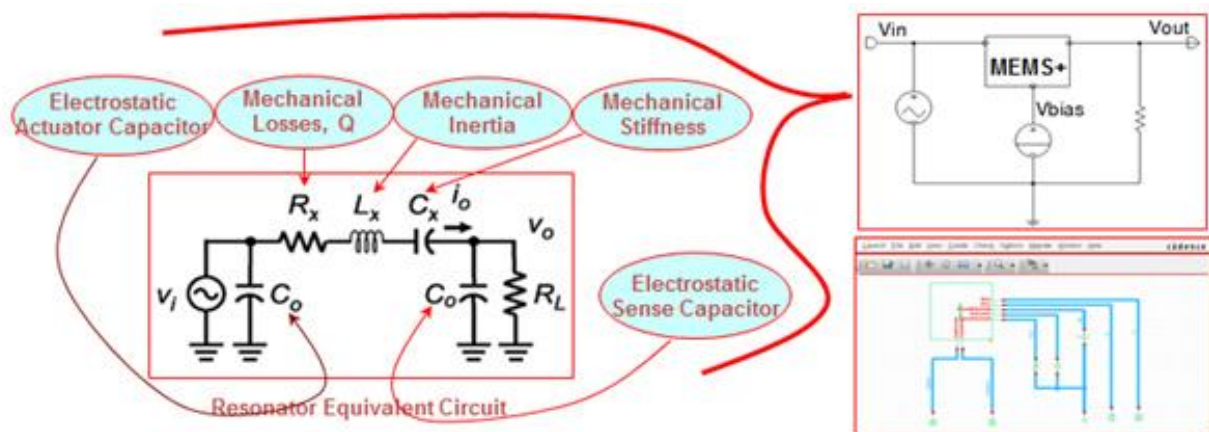


Рисунок 2.29 – Інтеграція моделі MEMS та IC в Cadence Virtuoso

Переваги конструювання резонаторів MEMS у пакеті Coventor.

1. Повна платформа для проектування резонаторів MEMS.

Пакет Coventor застосовує вбудовану платформу розробки для резонаторів MEMS, яка має рішення для широкого кола критичних проблем проектування. Вони змінюються від моделювання складної багатодоменної, мультифізичної структури чутливого елемента та пов'язаної з нею електроніки до моделювання на системному рівні, аналізу пакетів та підвищення продуктивності виробництва.

2. Оскільки основна фізика резонатора MEMS включена в 3D-модель, на яку посилаються в моделюванні на системному рівні, дизайнерам більше не потрібно створювати моделі зменшених порядків або еквівалентні модельні мережі з даних FEA та/або аналітичних виразів. Це економить цінний час та ресурси. Крім того, ці моделі є повністю параметричними, що дозволяє розробникам швидко отримувати результати зміни конструкції та технологічних процесів, що було просто неможливо зробити за допомогою інших методів.

Нарешті, вибираючи платформу, яка використовує найкращі симулятори, такі як Spectre та/або Matlab/Simulink, розробники отримують найкращу постійну комбінацію точності та продуктивності процесу проектування.

2.5.5 Проектування та моделювання оптичних MEMS.

Яскравим прикладом пристроїв з MEMS актюатором є DLP-проектори (DLP, Digital Light Processing – *цифрова обробка світла*) фірми Texas Instruments. Вони базуються на MEMS під назвою DMD (Digital Micromirror Device, цифровий мікродзеркальний пристрій).

Оптичні MEMS або MOEMS все частіше вживають для інших застосувань, включаючи технології пасивного світла, оптичні мережі, механізми фокусування та масштабування мініатюрних камер та сканерів, системи корекції викривлень зображення для оптичних телескопів (рис. 2.30). Для задоволення складних вимог щодо розробки конструкції пристроїв MOEMS інженери також застосовують гібридну методологію проектування, яка забезпечує значні переваги перед класичними підходами та зменшує потребу у трудомістких та дорогих циклах виготовлення та тестування прототипів.



Рисунок 2.30 – Приклади оптичних пристроїв MEMS

Проблеми розробки конструкції пристроїв.

Основна проблема процесу проектування типового пристрою MOEMS полягає в оптимізації швидкості перемикання. Інші важливі конструктивні параметри включають динаміку зрушень, частотні характеристики перемикання та гістерезис, температурний дрейф, динаміку вібрацій, деформацію геометрії конструкції та вплив середовища, потужність. Для досягнення максимальної якості технологічного процесу, вже на стадії проектування слід вбачати максимальні відхилення властивостей матеріалів. Крім того, для успішного проекту MOEMS необхідно враховувати особливості

інтеграції пристроїв MEMS та ASIC (*Application-specific integrated circuit, інтегральна схема спеціального призначення*), особливо для масивів MEMS, де затримки у паразитних RC – колах та перехресні спотворення знижують якість відтворення зображення на екрані.

Комбінований підхід до виконання процесу розробки у середовищі проектування Coventor дозволяє пристроям MEMS відповідати заданим критеріям ефективності та одночасно скорочує витрати та термін виходу виробу на ринок. Методика використання MEMS + Coventor забезпечує швидку розробку пристроїв та спільне моделювання з електронікою приводу. Моделювання системи електронного управління разом із механічною частиною пристрою MEMS з самого початку проектування, дозволяє уникнути проблем з переробки частини або всього проекту в кінці циклу розробки. Макет з пакету MEMS+ може бути переданий пакету аналізатору Coventor Analyzer для отримання доступу до специфічних MEMS-рішень за методом скінчених елементів для детальної розробки пристрою. На рис. 2.31 наведено програмні продукти і їх зв'язок, які можна залучати для розробки MOEMS.

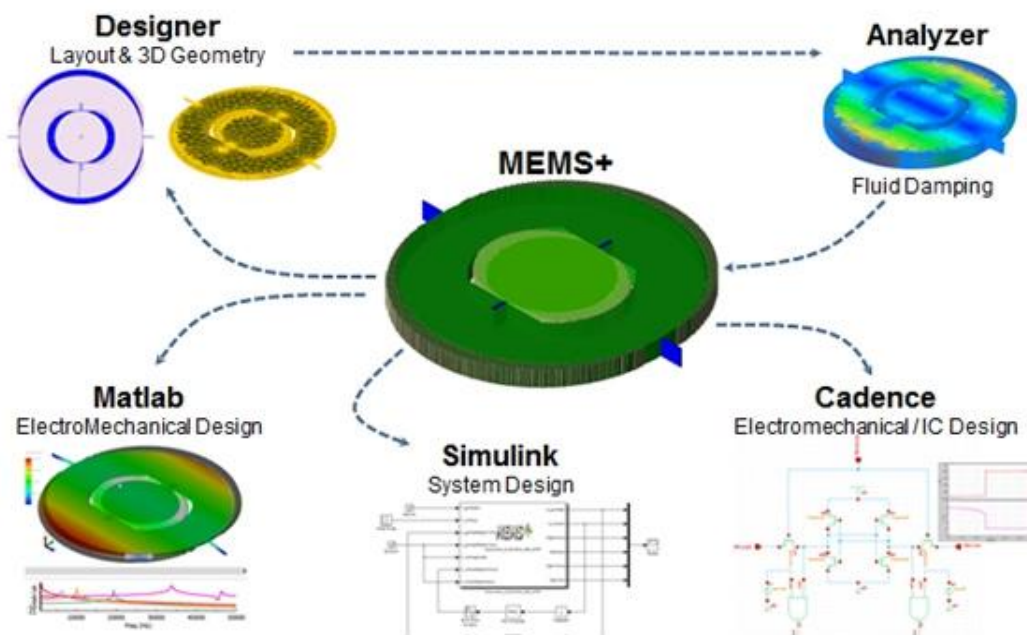


Рисунок 2.31 – Гібридна методологія Coventor для проектування MOEMS застосована до дзеркала DLP

Етапи розробки за новою гібридною методологією у пакеті Coventor.

1. Розробка моделі на базі модулів з прикінцевими елементами високого порядку.

На початку необхідно створити геометричну модель приладу в додатку MEMS+, використовуючи компоненти з бібліотеки рухливих електромеханічних елементів. У прикладі розробки системи керування дзеркалом (рис. 2.32) механічні елементи утворюють підвіску і двобічну

систему гребінцевих штирів, розташованих на круглій рухомій пластині для моделювання нелінійного електростатичного приводу каркаса дзеркала. Елементи використовують конформне (що точно повторює форму елементів моделі) зображення для імітації ємності облямівки підвіски та гребінцевих штирів поза межами площини дії електростатичних сил. Оскільки замість традиційного аналізу скінчених елементів використовуються параметричні елементи високого рівня, користувачі можуть опрацювати сотні рішень за час, необхідний для запуску одного моделювання із застосуванням FEA.

Бібліотечні моделі додатку MEMS+ оптимізовані для роботи в MATLAB/Simulink або Cadence. Для електростатичного мікродзеркала, на цьому етапі зазвичай оцінюють частотну характеристику, кут відхилення у залежності від напруги на приводі та перехідну характеристику. Аналіз ефективності за допомогою моделювання за методом Монте–Карло надає користувачам САПР можливість швидко оцінювати відмінності в якісних характеристиках пристрою, використовуючи інформацію виробника щодо можливого застосування процесів та матеріалів.

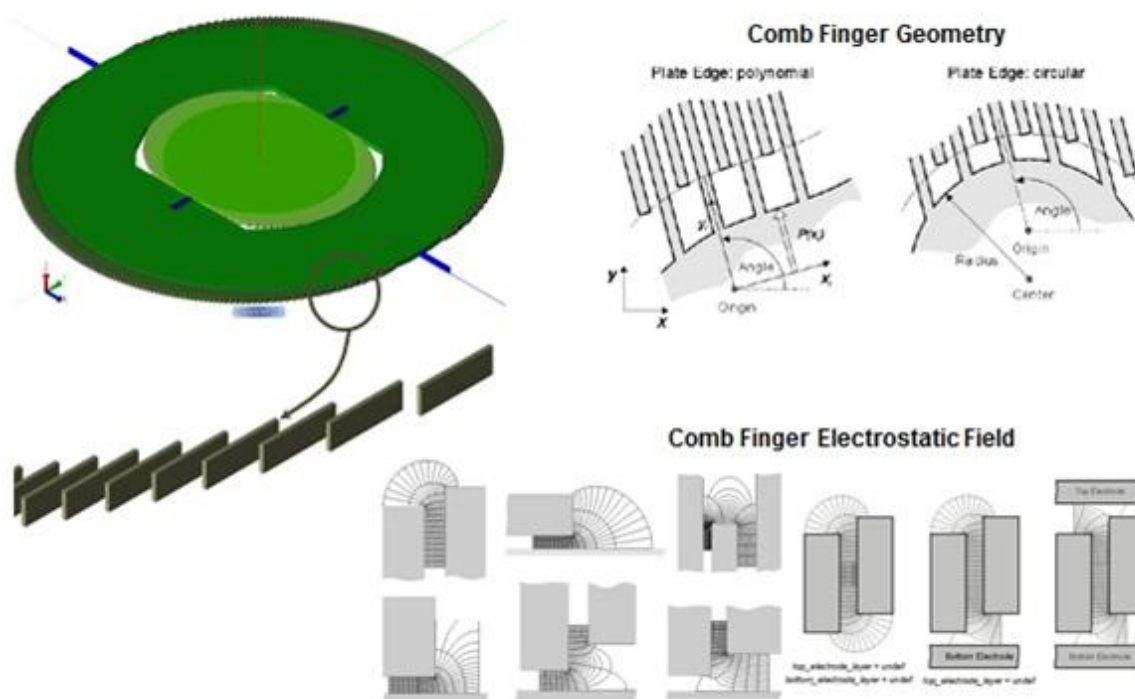


Рисунок 2.32 – MEMS+ компоненти високого рівня, з яких збирається модель мікродзеркала для DLP

2. Детальний аналіз та верифікація за допомогою рішень рівнянь Максвела для електромагнітних полів.

Наступним кроком є використання рівнянь електромагнітних полів для проведення детального аналізу пристрою MEMS. Програма MEMS+ для отримання коефіцієнтів демпфірування дзеркального приводу та дослідження механічних напружень у балках підвіски використовує аналізатор Coventor

Analyzer. Для забезпечення додаткової певності у вірності моделювання до початку виготовлення, порівнюють рішення у пакетах MEMS+ та Analyzer для різноманітних частот резонансу.

Для оцінювання впливу повітря на точність роботи пристрою в додатку CoventorWare обчислюються коефіцієнти демпфірування повітря та моделюється їх залежність від положення структури (рис. 2.33). Ці значення можуть бути додані в модель MEMS+ та інтерпольовані для моделювання перехідного режиму пристрою.

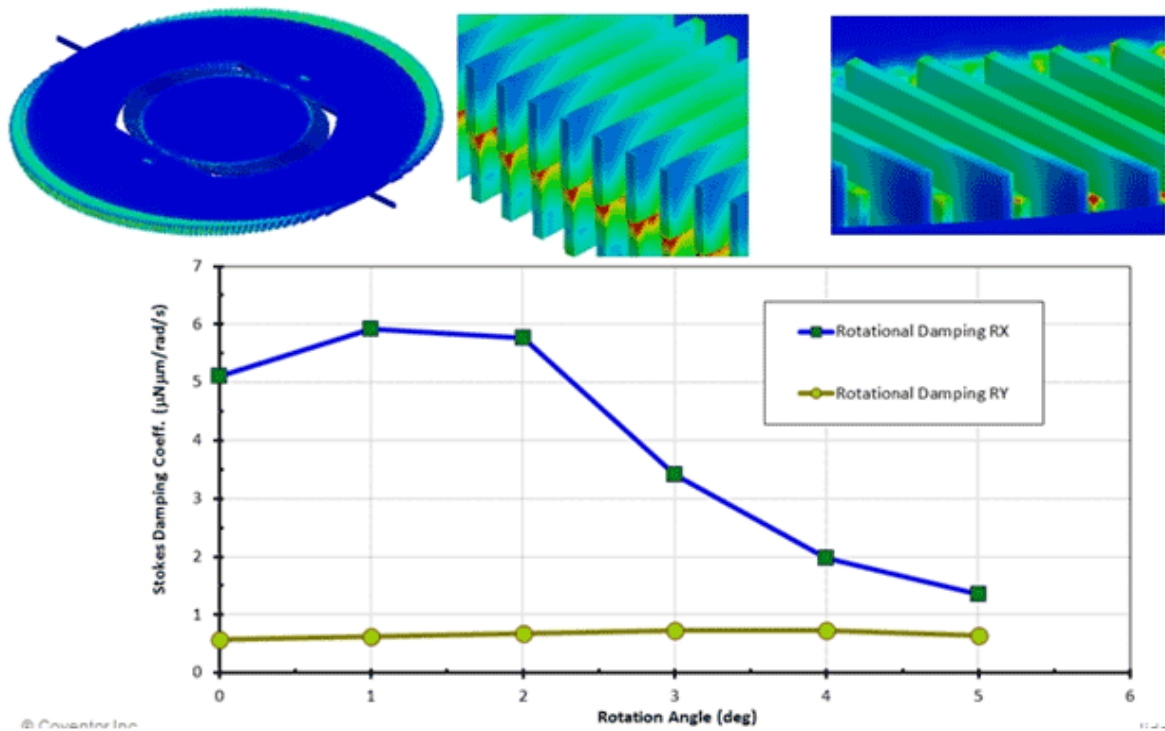


Рисунок 2.33 – Коефіцієнти демпфірування повітря та їх залежність від положення структури, які змодельовані в додатку CoventorWare

3. Спільне моделювання системи MEMS + IC.

Далі здійснюється спільне моделювання MEMS пристрою з електронікою за допомогою пакетів Cadence або Simulink. Цю ж модель можна також використовувати для створення загального масиву для повного системного аналізу всього пристрою (рис. 2.34). Масив моделі MEMS+ підключається до керованого SRAM кола актюатора та мережі RC, що моделює розподілений опір лінії. Оскільки ці моделі є параметричними, розробник може швидко та легко налаштувати схему та/або змінити конструкцію пристрою або технологію (матеріали), щоб дослідити, які конфігурації дають найкращі показники.

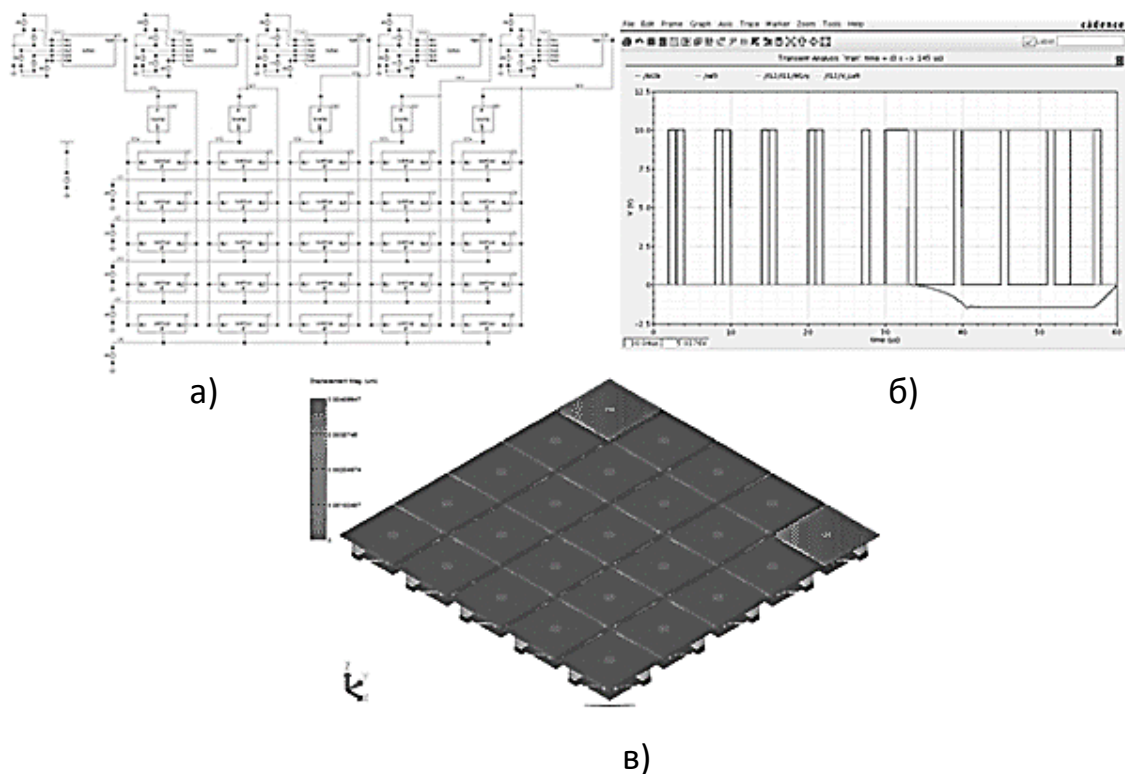


Рисунок 2.34 – Імпортований в програму Cadence: а) масив дзеркал; б) моделювання перехідного процесу на графіку; в) 3D–моделювання

Переваги платформи Coventor для проектування MEMS.

Програми MEMS+ і Coventor Analyzer забезпечують потужну платформу для проектування MOEMS та вирішують критичні проблеми дизайну, які неможливо вирішити за допомогою загальних інструментів FEM. Використовуючи цю платформу, дизайнери можуть моделювати складну мультифізичну структуру механізму приводу разом з електронікою. Крім того, аналіз методом Монте–Карло може бути використаний для вивчення шляхів покращення продуктивності виробництва.

Ця методологія має численні переваги. *По–перше*, інженерам не потрібно вручну створювати зменшені, або еквівалентні моделі з FEA або аналітичні вирази; всі істотні фізичні процеси, що відбуваються у пристрої, включені в модель MEMS+. Це економить час розробки та ресурси. *По–друге*, можливе швидке опрацювання переміни технологічних процесів та конструкцій, оскільки MEMS+ моделі повністю параметричні та мають більшу швидкість процесу моделювання порівняно зі звичайними моделями FEA. *По–третьє*, використовуючи платформу, яка інтегрується з найкращими в своєму класі симуляторами, такими як MATLAB, Simulink та Cadence Spectre, інженери отримують доступ до системного аналізу своїх розробок.

2.5.6 Проектування та моделювання приводу MEMS.

Актuatorні приводи – це механічні пристрої, що перетворюють різні види енергії у механічний рух. Вони складають більше 50% швидко

зростаючого ринку MEMS. Актюатори використовуються в різних технічних сферах – оптиці, радіотехніці та інших галузях промисловості. Приклади застосування включають конденсатори змінної ємності (varactors), мікрореле для мікросхем VLSI (*Very Large Scale Integration – IC надвеликого рівня інтеграції*) з малою потужністю споживання, оптичні фазоперетворювачі, дисплеї наступного покоління, мікрозахвати для роботизованої хірургії, механізми фокусування для камер у мобільних пристроях, оптичні комутатори та ін. У залежності від застосованого принципу дії актюатори поділяють на такі основні види: п'єзоелектричні, електростатичні, термомеханічні, електромагнітні, пневматичні актюатори.

Приводи MEMS мають широкий спектр механізмів приводу: п'єзоелектричні, ємнісні, термомеханічні, електромагнітні, пневматичні.

Проблеми розробки конструкції пристроїв. Ключовим завданням для конструкторів приводів MEMS є створення пристрою, який відповідає сучасним критеріям якості параметрів за силою, переміщенням, часом перемикання, споживаною потужністю, розміром, температурною стабільністю та має високу надійність. Для успішного проектування актюатора розробники зобов'язані належним чином враховувати тривимірне електростатичне оточення, контактні ефекти у електромеханіці, втрату структурної стійкості та ефекти демпфірування повітря в корпусі IC.

Платформа Coventor дозволяє підвищити продуктивність розробки, дозволяючи одночасно проводити швидкі дослідження на рівні моделі MEMS пристрою з оптимізацією схеми управління та моделювання наслідків змін процесу та/або матеріалів (рис. 2.35). Розглянемо етапи розробки актюатора MEMS.

1 Вибір та оптимізація архітектури пристроїв. На першому етапі потрібно оцінити та оптимізувати кінцевий виконавчий привід MEMS. Як правило, це відбувається через велику кількість змін топології, конструкції, матеріалів та допусків технологічного процесу, що впливають на якість та технологічність пристрою. Ключовою перевагою інтегрованого процесу розробки є швидкість та продуктивність моделювання. Можливість швидкого дослідження компонентів проекту та визначення найбільш вигідної комбінації з великої кількості змінних допомагає розробникам уникнути неоптимальних та/або надмірно затратних підходів вже на початковій стадії проектування. На початку за допомогою великої бібліотеки базових компонентів MEMS створюється параметрична конструкція пристрою. Компоненти, що використовуються, є готовими елементами вищого порядку, які спеціально створені для швидкого виконання алгоритму симуляцій багатьох пов'язаних фізичних процесів в програмах MATLAB, Simulink та/або Cadence Spectre. Це дає значний вигравш в швидкості моделювання порівняно зі звичайними підходами FEA та дозволяє досліджувати сотні варіантів технологічних процесів та конструкцій протягом одного дня. Симуляція перехідних процесів, що включають ефекти демпфірування, неможлива для звичайних методів FEA, втім є звичайним атрибутом для моделей у програмі *MEMS +*.

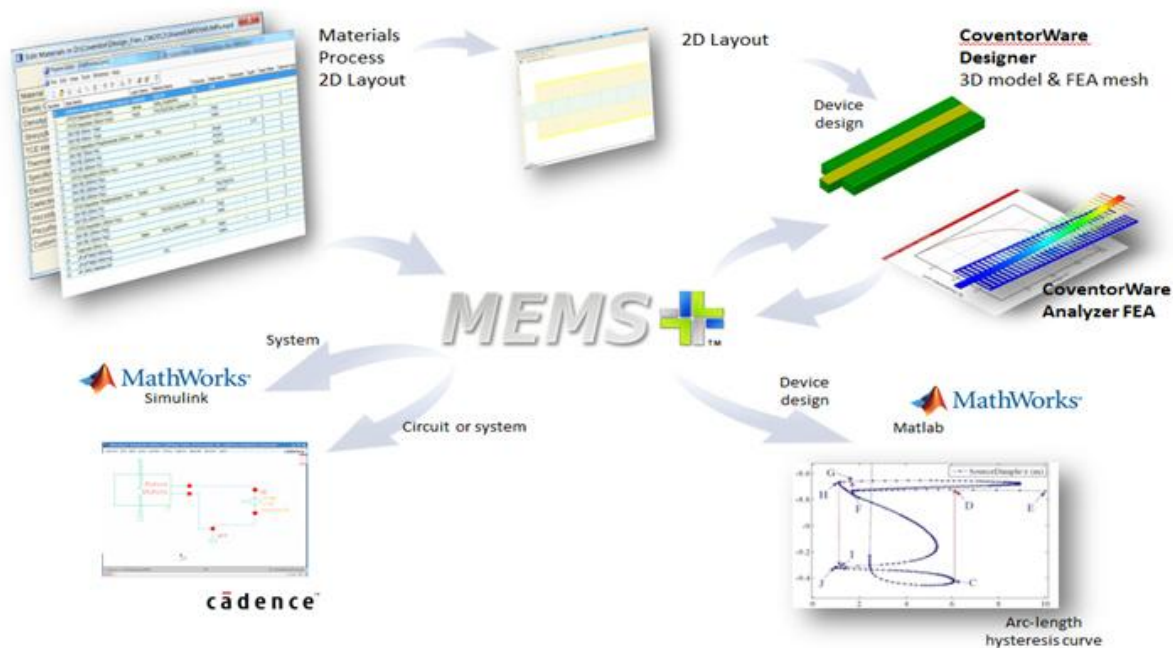


Рисунок 2.35 – Інтегрована платформа процесу розробки електростатичного приводу гребеневого типу

2 Дизайн та верифікація на рівні пристрою. Наступним етапом є більш детальний аналіз та моделювання, що включає вплив анкерів, урахування типу корпусу та вплив різних механізмів демпфірування. На цьому етапі точність симуляції є критичною, а тому для досконалого налагодження та верифікації проекту використовуються спеціальні засоби аналізу FEA (Designer та Analyzer) Coventor. Спеціалізовані алгоритми відзначають ефекти контактної електромеханіки та відповідних тривимірних електромагнітних полів, забезпечують оптимальне рішення зв'язку між елементами на основі найкращого сполучення електричних та механічних систем, внаслідок чого відбувається максимальне наближення до заданих параметрів. Платформа Coventor досягає цього за допомогою гібридного FEM & VEM обчислювача. Цей алгоритм адаптивно вдосконалює сітку кінцевих елементів, що використовується для аналізу електростатичних ефектів (рис. 2.36), забезпечуючи максимально точний результат, не обтяжуючи користувача непотрібним доопрацюванням решітки. В додаток, на відміну від традиційних підходів FEM, загальний об'єм повітря в корпусі пристрою в гібридному методі Coventor не розбито на окремі частини. Це є важливим при визначенні впливу контактної гістерезису та оцінці інших тонких деталей, пов'язаних з рухом елементів та надійністю пристроїв. Вживаючи такий підхід, процес моделювання є більш точним, надійним та значно швидшим.

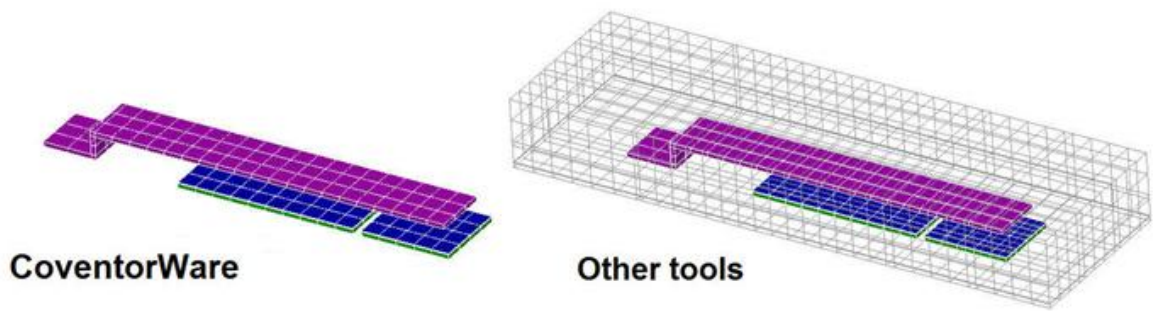


Рисунок 2.36 – Сітка Coventor для електростатичного моделювання, що оптимізована для проектування MEMS – структур з електростатичним керуванням в порівнянні з іншими інструментами проектування

Нелінійні ефекти в п'єзоелектричних та термоелектричних приводах, можна досліджувати, використовуючи відповідні моделі (рис. 2.37). В обраній моделі можна визначити контактні сили, внесені втрати, час перемикання (аналіз перехідних процесів) та провести аналіз ударного впливу (випробування на падіння). Крім того, інструменти для імітації демпфірування стиснутої плівки, ефекти ковзання та кількісний розрахунок нестационарних аеродинамічних процесів в корпусі пристрою за формулою Стокса, дозволяють користувачам калібрувати або перевіряти моделі *MEMS+*, не покладаючись на прості аналітичні формули чи експериментальні вимірювання.

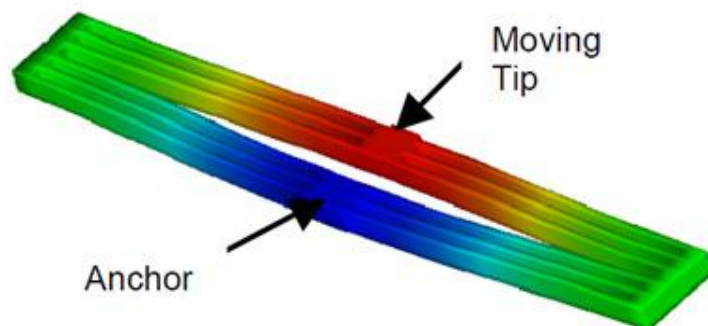


Рисунок 2.37 – Термоелектричний привід в процесі симуляції

3 Інтеграція та верифікація на рівні системи. Приводи MEMS не працюють ізольовано; вони виконують свої завдання в складі системи, що включає електронну схему керування, обробки і сполучення пристрою з іншими об'єктами. Отже, перед початком випробувань на реальному пристрої, потрібно провести повний цикл моделювання та налаштування системи в цілому. Для цього розробники традиційно будували дослідну партію лабораторних прототипів пристроїв, що були засновані на аналітичних виразах або отримані шляхом моделювання FEA. Проблема такого підходу

двостороння. По-перше, щоб виготовити дослідну партію лабораторних прототипів пристроїв потрібно багато часу. По-друге, і що важливіше, уживані аналітичні рівняння є надмірно спрощеними, а створені моделі зменшених порядків не включають нелінійні ефекти, що обумовлює неоптимальні характеристики прототипів. У сукупності цей традиційний підхід суттєво може збільшити ризик кошовного оновлення та перепроектування наприкінці циклу розробки. Рішення програми Coventor призначене для скорочення часу на розробку і підвищення якості самого проекту. Параметрична модель, яка включає нелінійну поведінку механічного приводу MEMS, створена в MEMS+, імпортується і запускається у програмах Simulink або Cadence Spectre. Розробники проекту системи в цілому можуть оцінити повну поведінку пристрою, включаючи електричну схему. Змінні величини пристрою та системи можуть параметрично змінюватись для контролю лінійності та проведення аналізу чутливості. Конструктори також можуть імітувати зусилля приводу та переміщення разом із струмом/напругою живлення, імітувати керування приводу, а також переглядати рухома 3D – модель. Такий підхід також дозволяє імітувати масив пристроїв MEMS (рис. 2.38).

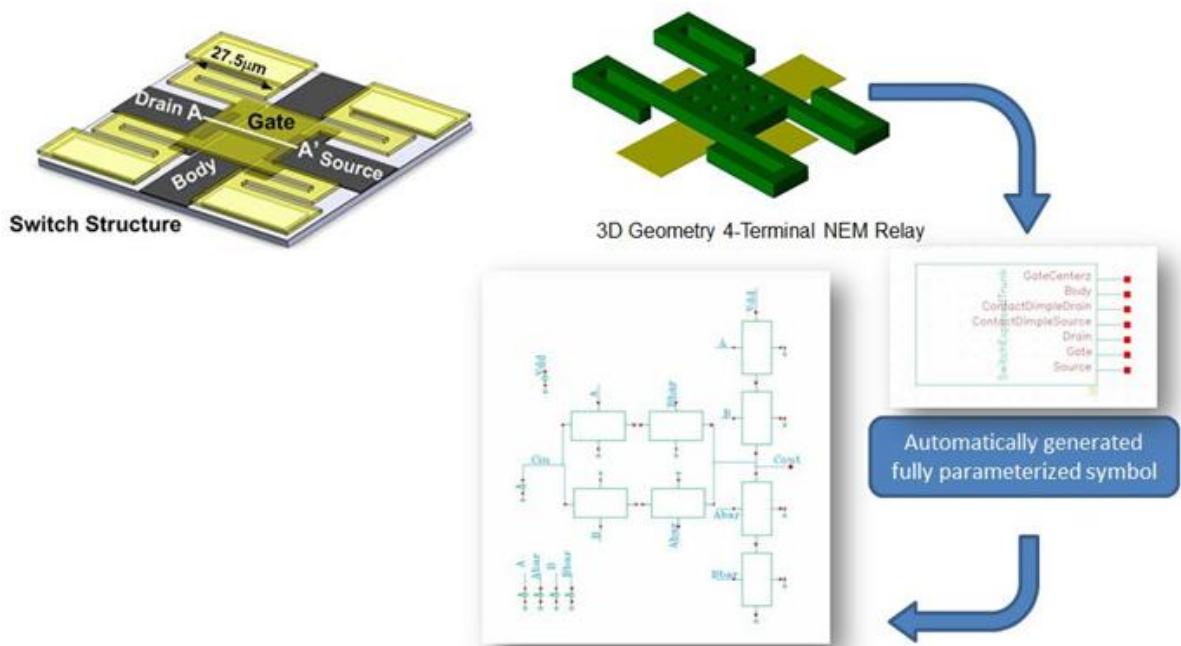


Рисунок 2.38 – Масив чотирьох контактних реле, складений додаванням моделей *MEMS* + в схему Cadence

4. Повна платформа. Використовуючи платформу Coventor, розробники можуть швидко, точно та всебічно імітувати окремі приводи та масиви MEMS приводів разом із схемою управління. Ця нова інтегрована методологія, заснована на специфічних для MEMS інструментах, дає можливість сучасним конструкторам електромеханічних приводів оптимізувати продуктивність

пристрою та максимально відповідати все більш складним вимогам ринку електроніки.

2.5.7 Проектування та моделювання радіочастотних комутаторів та конденсаторів змінної ємності.

В останнє десятиліття радіочастотні комутатори отримали широке розповсюдження завдяки програмам у аерокосмічній, оборонній, телекомунікаційній інфраструктурі та в специфічній галузі RF ATE (радіочастотне автоматизоване випробувальне обладнання – Automated Test Equipment). Зараз зростає інтерес до RF MEMS (радіочастотні МЕМС) для великого ринку мобільних пристроїв, як інноваційного рішення для вирішення проблем конструювання у радіочастотному діапазоні, які в даний час обмежують функціональність та продуктивність сучасних радіоелектронних технологій. Наприклад, радіочастотні пристрої мікромеханіки пропонують засоби налаштування антен з малими втратами для різних базових діапазонів частоти та регульованих підсилювачів потужності. Радіочастотні перемикачі та реле MEMS забезпечують широку смугу пропускання, малі внесені втрати, відмінну ізоляцію та високу лінійність.

Виробництво радіочастотних пристроїв мікро механіки здійснюється за типовими процесами на базі стандартного обладнання та технологічних процесів для виготовлення напівпровідникових ІС, тому надають можливість високо об'ємної, низько затратної інтеграції за допомогою технологій System on Chip, MEMS on CMOS або інтегрованих пасивних пристроях (IPD – Integrated Passive Devices). Агенція Yole Development передбачає, що ринок комутаторів/змінних конденсаторів RF MEMS для мобільних пристроїв зростатиме щорічно (рис. 2.39).

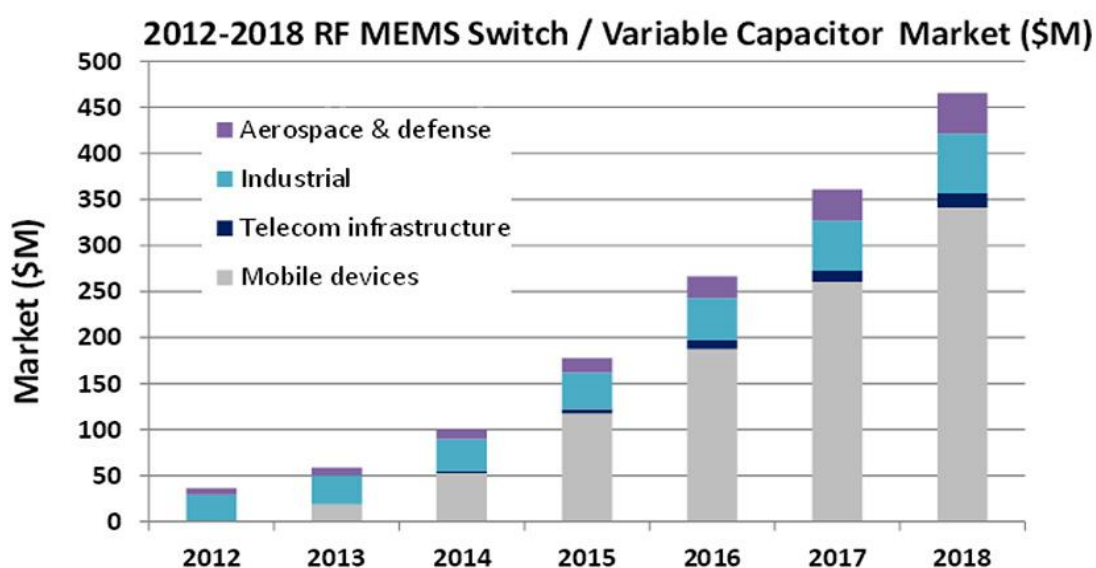


Рисунок 2.39 – Прогноз ринку комутаторів та конденсаторів змінної ємності (Yole Development)

Проблеми проектування. Радіочастотні перемикачі MEMS з електростатичним керуванням та конденсатори змінної ємності, як правило, використовують так звану рухому нестабільність для досягнення низької потужності керування та замикання. Висока ступінь нелінійності керування в поєднанні з механічними контактними та технологічними ефектами виробництва, такими як градієнти напруженості тонких плівок, особливо ускладнює досягнення високоякісних і надійних конструкцій перемикачів. Отже, ці пристрої було виведено на ринок лише через роки після дорогих циклів модифікації кремнієвої технології. Швидке, точне моделювання цих пристроїв, що випереджає процес виготовлення може усунути трудомісткі повторювання циклів попередніх етапів проектування.

З одного боку, складну фізику та перехідні процеси в цих пристроях неможливо точно моделювати за допомогою аналітичних формул. З іншого боку, дуже важко імітувати перехідні процеси під час замкнення та розімкнення ключа комутатора звичайними інструментами аналізу методом скінчених елементів через різку зміну повітряного зазору між відкритим і закритим станами пристрою, що вимагає складних перетворень за кожної ітерації обчислення. Тільки моделювання статичних станів комутатора може зайняти багато годин обчислювального часу, тоді як моделювання перехідних станів майже неможливо. Це суттєво обмежує значення звичайних інструментів моделювання методом скінчених елементів для розробки та оптимізації конструкції мікромеханічних пристроїв. Сумісне застосування MEMS+ та Coventor Ware вирішує ці проблеми та одночасно забезпечує комплексну платформу для проектування комутаторів та варакторів.

Дослідження та оптимізація конструкції перемикачів та змінних конденсаторів за допомогою MEMS+. Програма *MEMS+* дозволяє легко скласти 3D-модель пристрою з декількох елементів високого рівня (рис. 2.40). Після побудови моделі з'являється можливість проведення моделювання повного спектру пов'язаних між собою складних фізичних процесів у пакетах в *MEMS+*, MATLAB, Simulink або Cadence.

Точність та швидкість моделювання у програмі *MEMS+* дозволяють виконувати велику кількість симуляцій, необхідних для повного дослідження проекту, оптимізації конструкції пристрою та дослідження чутливості до змін технологічних процесів. Наприклад, кінцеві і перехідні позиції перемикачів та метастабільні стани комутатора або варактора дуже чутливі до змін технологічних процесів і мають вирішальне значення для досягнення бажаної продуктивності виробництва.

Обчислення проекту шляхом зміни багатьох параметрів у звичайному традиційному підході методом кінцевих елементів може зайняти тижні. За допомогою програми *MEMS+* ці симуляції із застосуванням гібридної технології моделювання, можуть бути завершені протягом кількох годин, з тим що обчислення кожної точки займає лише кілька хвилин.

Радіочастотні комутатори також містять складні компоненти перехідних процесів, наприклад, стрибки та фіксація (залипання) контактів. Ці явища, разом із контактними силами та механічним опором елементів конструкції та матеріалів, повинні бути точно змодельовані для пристроїв, виготовлених із багат шарових тонких плівок, та елементів перетворювача, таких як кулькові контакти, розташовані на кристалі.

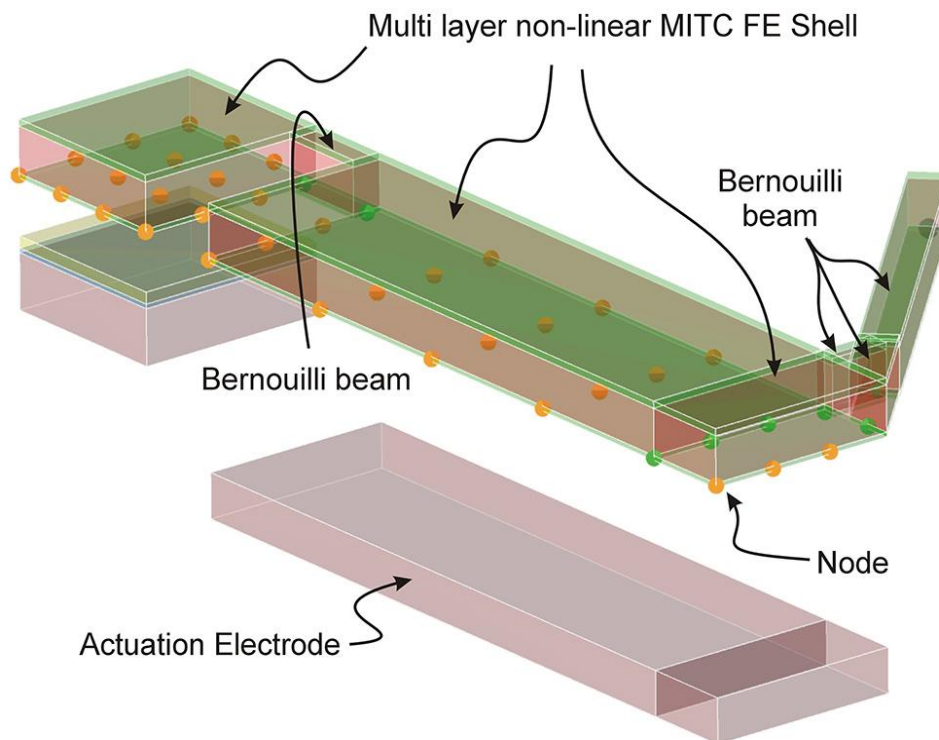


Рисунок 2.40 – Модель INP Nanotech RF Switch в MEMS+.

Крім механіки, модель також містить електростатичні та флюїдні елементи, які для наочності не проілюстровані.

Перевірка конструкції та детальний аналіз за допомогою CoventorWare. Алгоритми розробки проектів в програмі *MEMS+* не виключають використання звичайного аналізу за методом скінчених елементів. Програма *MEMS+* дозволяє експортувати конструкції у широко використовуваних 2D та 3D форматах для подальшого аналізу в інших інструментах моделювання. Всередині CoventorWare можна безпосередньо генерувати сітку точок симуляції моделі *MEMS+* для додатку Analyzer. Тут можуть бути проведені остаточні симуляції для перевірки квазістатичних результатів, таких як вплив сил замкнення та розімкнення контакту, і дослідження точок концентрацій механічної напруги (рис. 2.41).

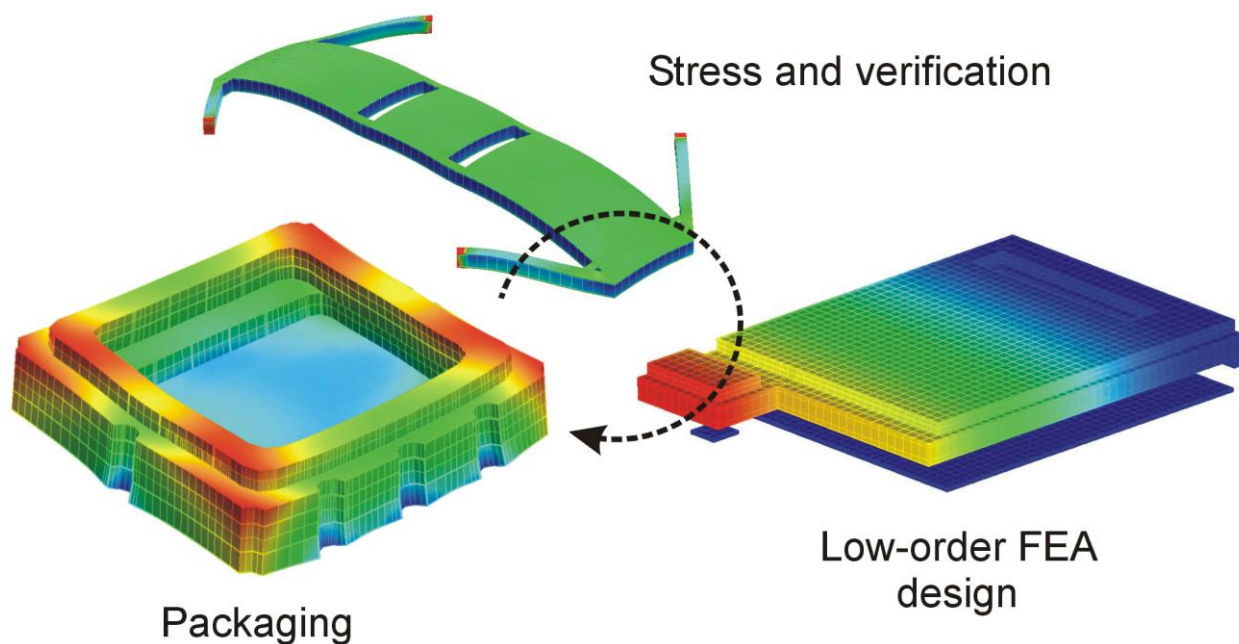


Рисунок 2.41 – Результати моделювання у програмі CoventorWare Analyzer для детального дослідження точок концентрацій механічної напруги з урахуванням впливу корпусу

Поєднання механіки та електричної схеми і моделювання на системному рівні. Радіочастотні перемикачі та варактори часто поєднують у масиви і вони повинні бути інтегровані з керуючою електронікою. Для визначення загальних властивостей кінцевого продукту і перевірки на відповідність технічним характеристикам потрібний спільний процес моделювання пристроїв MEMS з інтегрованою електронікою. Як показано в попередніх розділах, моделі *MEMS+* можуть бути легко включені до режимів симуляції системних потоків Simulink та моделювання електроніки на схемному рівні Cadence (рис. 2.42). На відміну від поведінкових моделей низького рівня, моделі *MEMS+* точно описують складну фізику роботи комутаторів і варакторів, що забезпечує оптимальний дизайн електроніки.

Програма Coventor є повною платформою для проектування перемикачів радіочастотного випромінювання та розробки варактора.

Параметри в моделях *MEMS+* можуть включати технологічні відзнаки, такі як властивості матеріалу та градієнти напруженості тонких плівок, а також геометричні властивості конструкції. Функціональність та точність цих моделей дозволяють оптимізувати конструкцію MEMS та IC, як с точки зору відповідності параметрів, так і продуктивності виробництва. Засоби розв'язання рівнянь Максвелла, застосовані у програмі CoventorWare, доповнюють *MEMS+* моделі, і їх можна використовувати для дослідження елементів конструкції та загальної перевірки точності RF пристроїв MEMS. Це є значною перевагою проектування радіочастотних пристроїв мікромеханіки із застосуванням середовища Coventor для розробки RF MEMS продуктів (рис.

2.42), включаючи омичні перемикачі і варактори та пов'язані з ними схеми управління.

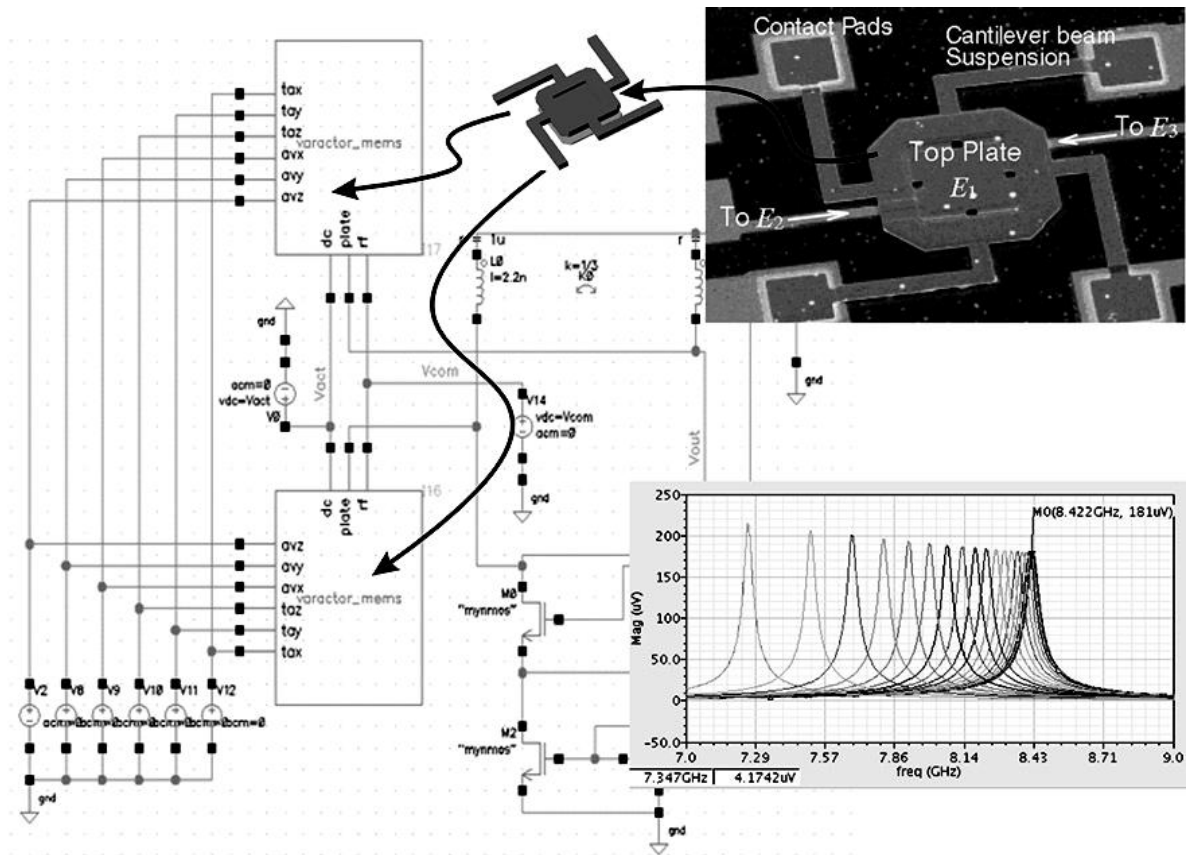


Рисунок 2.42 – Генератор частоти, керований напругою, реалізований в програмі Cadence за допомогою MEMS+ моделі варактора на основі конфігурації конденсатора з двома паралельними пластинами

2.5.8 Проектування та моделювання п'єзоелектричних вібраційних електромеханічних акумуляторів.

Електромеханічні акумулятори на базі MEMS можуть забезпечити електричне живлення невеликих електронних систем. Подібних рішень потребують медичні, побутові, автомобільні та екологічні пристрої. Особливу зацікавленість становлять бездротові сенсорні мережі (WSN) (рис. 2.433) для контролю навколишнього середовища, стану здоров'я, де батареї електроживлення важко або недоцільно змінювати.

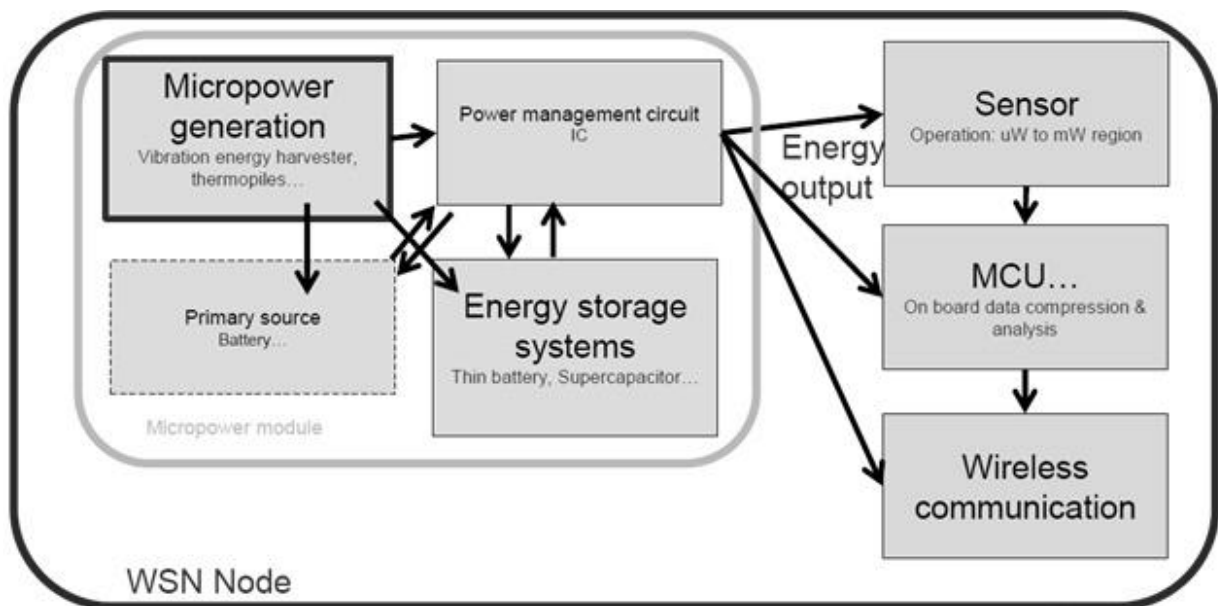


Рисунок 2.43 – Типовий вузол бездротової сенсорної мережі WSN

Експерти вважають, що застосування п'єзоелектричних вібраційних акумуляторів є одним з найбільш перспективних варіантів для рішення питань живлення малих систем. Прогрес в цій галузі залежить від можливостей максимального підвищення рівня накопиченої енергії з урахуванням конкретних умов використання.

Проблеми розробки конструкції пристроїв. Критеріями, за якими проектується п'єзоелектричний накопичувальний елемент, є робоча частота, потужність енергії, що виробляється, та потужність, що передається в кола управління. Оптимальну робочу частоту можна визначити, виконавши модальний аналіз із застосуванням звичайних інструментів аналізу методом кінцевих елементів. Однак енергія, що генерується та передається, значною мірою залежить від схеми керування живленням, і, отже, схема повинна моделюватися в замкнутому контурі. Таким чином, конструкторська платформа повинна одночасно імітувати п'єзоелектричну механіку з'єднану з електронікою, щоб задовольнити вимоги щодо проектування вібраційних акумуляторів.

Гібридна методологія розробки пристроїв генерації енергії.

Розробка проекту починається з побудови параметричної моделі п'єзоелектричного вібраційного пристрою у додатку MEMS+. Створення параметричної моделі здійснюється в графічному 3D – середовищі. Модель складається з характерних для MEMS готових елементів (п'єзомеханічні оболонки). Кожен елемент об'єднаний з описом технологічного процесу MEMS та базою використовуваних матеріалів, щоб автоматично пов'язати між собою п'єзоелектричні властивості матеріалу та електродів. Елементи високого рівня мають точний математичний опис фізики поведінки пристрою і включають нелінійну механіку, притаманну цим пристроям. Крім того, ці компоненти високого рівня спеціально створені для сумісної роботи з

MATLAB®, Simulink® і Cadence® Spectre® щоб пришвидшити процес симуляції роботи пристрою в цілому. Використання у MEMS+ готових елементів високого рівня забезпечує ряд переваг. По-перше, групам проектувальників більше не потрібно витратити цінний час на ручну розробку моделей для експериментальних зразків. По-друге, моделі MEMS+ включають нелінійні ефекти, які можуть вплинути на якість кінцевого продукту, що підвищує ефективність проектування, тоді як експериментальні моделі, зроблені вручну, часто є лише лінійними. На рис. 2.44 наведено взаємозв'язок інструментів проектування енергоакумулюючих пристроїв у програмі Coventor MEMS+.

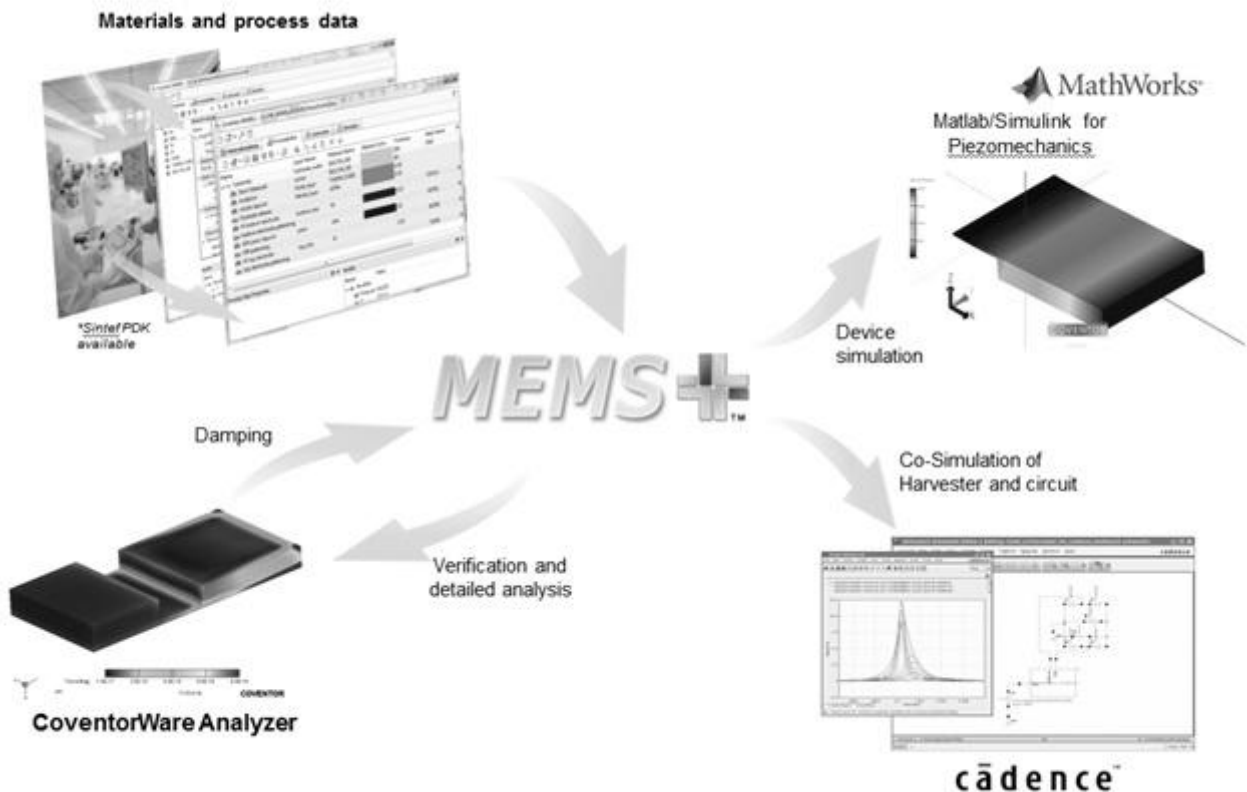


Рисунок 2.44 – Взаємозв'язок інструментів проектування енергоакумулюючих пристроїв у програмі Coventor MEMS+

Управління живленням та схема побудови структури пристрою за допомогою програми Cadence.

Модель MEMS+ можна перенести до середовища Cadence Virtuoso за допомогою декількох маніпуляцій та розмістити в робочому полі, що відображає схему обробки. Далі система, що об'єднує енергоакумулюючий пристрій та електронні кола обробки, моделюється в Cadence Spectre. Параметри акумулятора та кола обробки можуть одночасно змінюватись для оптимізації роботи пристрою. Наприклад, конструктор може змінити геометричні параметри пристрою та резистивне навантаження таким чином, щоб отримати максимальну передачу потужності від акумулятора до контуру

обробки (рис. 2.45). Для досягнення більшої ефективності можна також перевірити різні конфігурації електричної схеми та технологічних процесів.

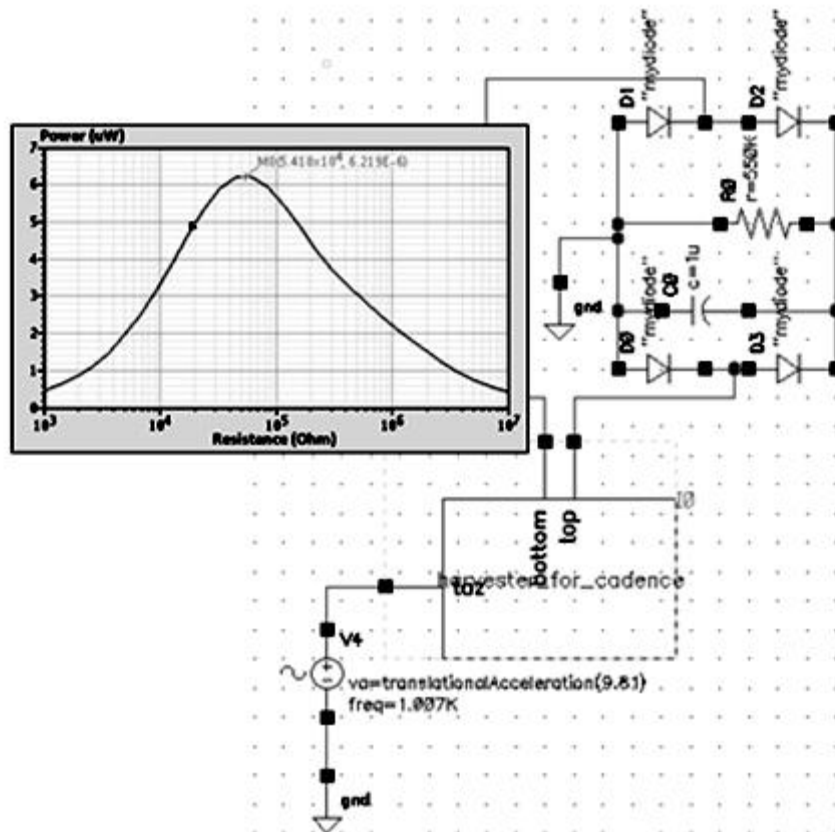


Рисунок 2.45 – Відтворення схеми пристрою в програмі Cadence Virtuoso та аналіз залежності потужності, що передається на резистор навантаження, від його опору у графічному вигляді

Перевірка та остаточний аналіз за допомогою додатку CoventorWare.

Подальше детальне моделювання можна здійснити за допомогою інструментів рішення рівнянь електричних полів у додатку CoventorWare. Наприклад, конструкцію можна перевірити на місця з високою механічною напруженістю, щоб уникнути збоїв у роботі при перевантаженні пристрою через ударну дію. Коефіцієнти демпфірування повітря також можна отримати за допомогою CoventorWare та включити їх у модель MEMS+ для більш точного прогнозування добротності (рис. 2.46). За необхідності результати моделювання у програмах MEMS+ та CoventorWare можна порівняти один з одним, щоб забезпечити підвищену впевненість в кінцевому результаті.

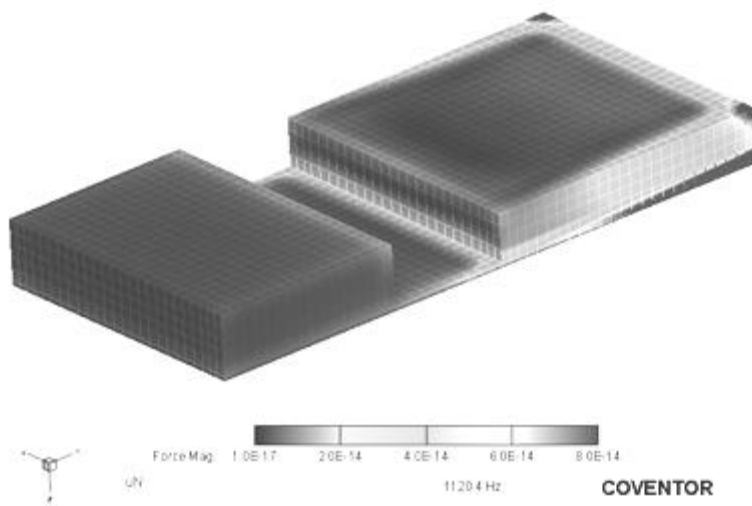


Рисунок 2.46 – Моделювання енергоакумулюючого пристрою в Coventor. Розподіл сил демпфірування повітряного середовища, що діють на вібраційний перетворювач

Висновки.

Програма *Coventor* є повною платформою розробки *MEMS* акумулювання енергії. Для забезпечення повного циклу розробки пристроїв акумулювання п'єзоелектричної енергії поєднуються додатки *MEMS+* і *CoventorWare*. Вони об'єднують низку мультифізичних процесів, які не можливо розв'язати лише звичайним FEA– аналізом. Такий підхід дозволяє спільно проектувати та спільно моделювати пристрій, що накопичує енергію, разом із електричними колами усієї системи живлення. Моделі є параметричними і результати симуляції, дослідження і порівняння перемін у конструкції та технологічному процесі є доступними в реальному часі. Таким чином, використання платформи, яка поєднує найкращі в своєму класі засоби моделювання, такі як *Cadence Spectre* та/або *Matlab/Simulink* з механічними моделями, характерними для *MEMS*, забезпечує найкраще поєднання точності та якості.

2.5.9 Проектування та моделювання мікроболометрів.

Від камер нічного бачення, що застосовуються військовими та правоохоронними органами, до таких медичних технологій візуалізації, як цифрові інфрачервоні тепловізори, теплові сенсори зображення стають незамінними в промисловості, біомедицині та побуті. Зі збільшенням комерційних застосувань цієї технології виробництво мікроболометрів постійно зростає, і очікується, що це зростання прискориться протягом наступних років (рис. 2.47).

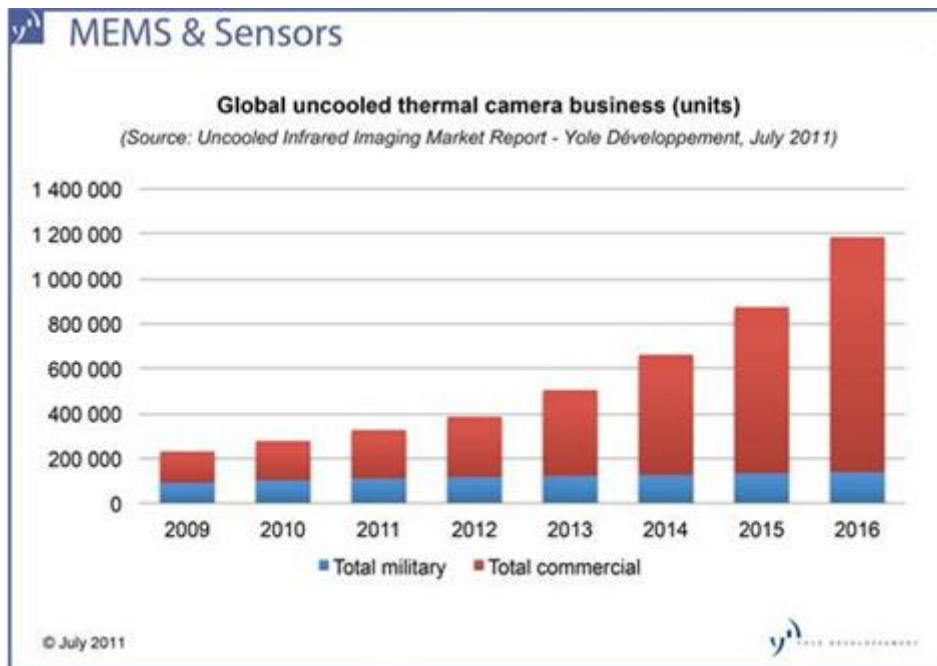


Рисунок 2.47 – Прогноз ринку неохолоджених теплових камер у мільйонах одиниць (Yole Development)

Для сканування і зондування різноманітних поверхонь або об'єктів в теплових (інфрачервоних) камерах широко застосовуються неохолоджені мікроболометри. Масив мікроболометрів створює сітчасту структуру, фасету, що дозволяє сформувати двовимірний тепловий образ.

Проблеми розробки конструкції мікроболометрів. Мікроболометр – це насамперед тепловий датчик, тому отримання його термоелектричних характеристик є однією з ключових проблем проектування. Ключові характеристики якості, які потрібно оптимізувати – це вольт–амперна характеристика (IV), залежність напруга–температура (VT) та тепла константа часу (TC), – величина, що характеризує теплову інерційність термодатчиків. Теплова константа – це час, необхідний сенсору для зміни інформаційного сигналу (інформаційного параметру) на 63,2% від загальної різниці між початковою та кінцевою температурою тіла, під час стрибкоподібної зміни температури, в умовах нульової потужності.

Пакет CoventorWare має інтегроване рішення для моделювання цих характеристик та дослідження варіантів конструкції. Рішення базується на характерному для MEMS твердотілому моделюванні та обчислювальних інструментах, що ґрунтуються на методі FEA аналізу. Властивості матеріалу, інформація про технологію та макет пристрою визначаються за допомогою керованої процедури проектування, яка є орієнтованою на виробничій процес. Ці дані використовуються для побудови тривимірної моделі, яку користувач може створити, вживаючи вбудовані генератори сітки обчислень, оптимізовані для MEMS. Моделювання можна провести користуючись інструментом MemMech, а результати переглянути у різних варіантах: табличному форматі, двовірному зображенні або 3D–візуалізаціях (рис. 2.48).

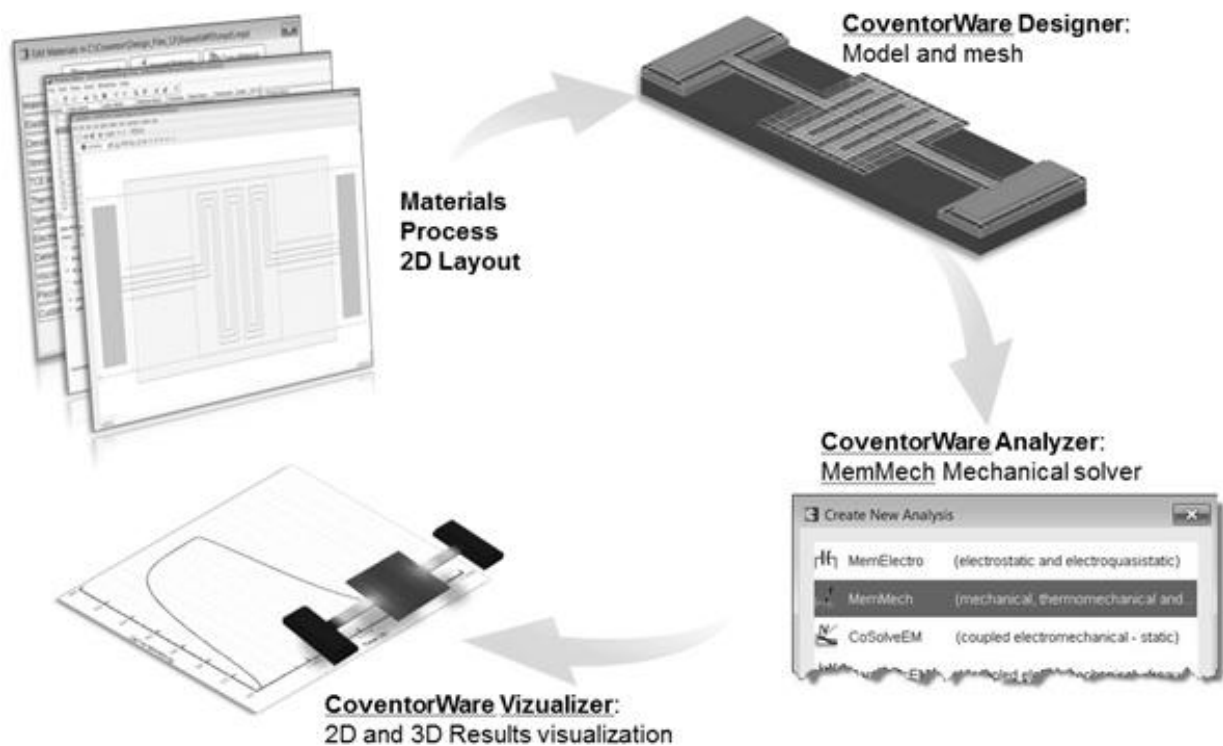


Рисунок 2.48– Процес проектування мікроболометрів у CoventorWare (приклад проекту Університету Преторії)

Інструменти MemMech використовується для імітації електротермічної та термомеханічної поведінки мікроболометра. Цей універсальний інструмент дозволяє призначати профілі напруги та температури як вхідні параметри для імітації стаціонарних та перехідних процесів. До процесу моделювання також можна включати ефекти передачі тепла за рахунок провідності та конвекції.

У модулі MEMS Design Exploration призначаються граничні умови симуляції впливу температури, струму і тощо для моделювання залежностей струм-напруга та напруга-температура. Робоча напруга в процесі симуляції змінюється у заданому користувачем діапазоні і в результаті симуляції визначається залежність струму живлення та пов'язану з ним, згідно за законом Джоуля, температуру нагрівання. Аналіз кривої струм–напруга (рис. 2.49а), нахил якої є опором мікроболометра, є надзвичайно важливим, оскільки визначає чутливість пристрою. Залежність напруга–температура (рис. 2.49б) дозволяє розробникам оцінити вплив власного підігріву на характеристику болометра та визначити приріст температури в стаціонарному стані.

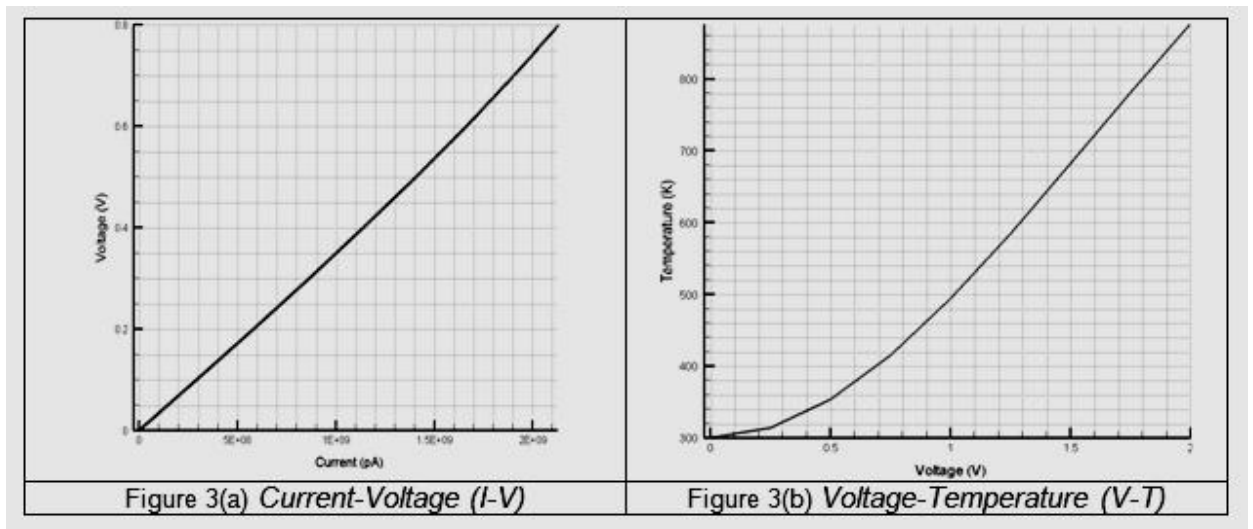
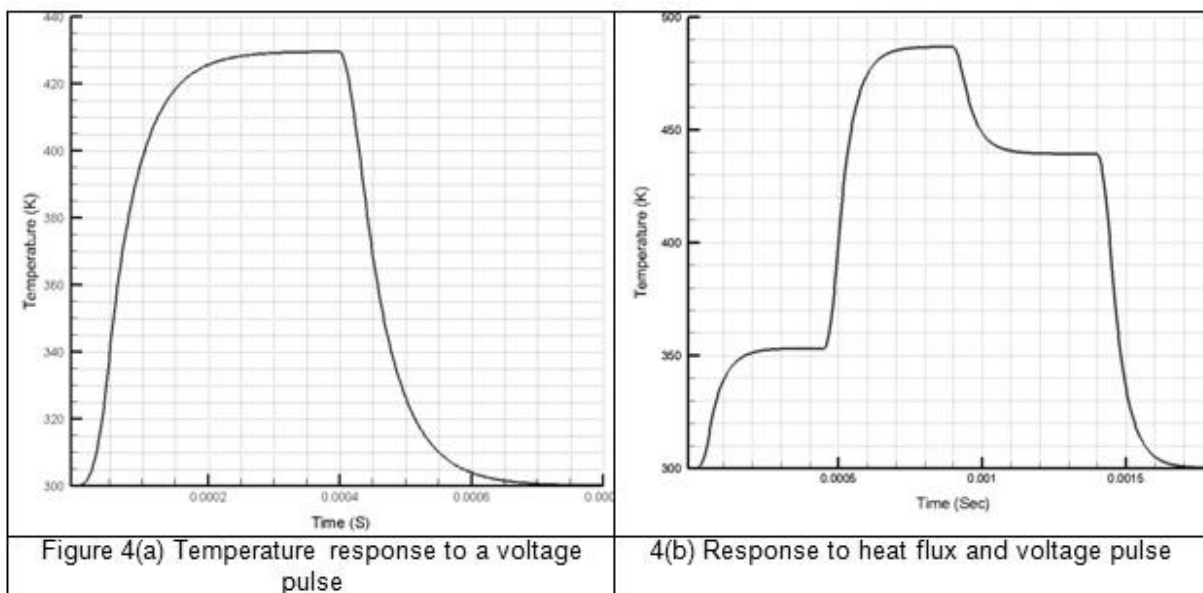


Рисунок 2.49 – Приклади характеристик болометра: а) вольт–амперна характеристика; б) залежність напруга–температура

Для моделювання нестационарного теплового режиму (рис. 2.50а) разом з параметрами імпульсу напруги вводяться механічні та температурні граничні умови. Далі проводиться електротермічне моделювання в часовій області. Тепловий коефіцієнт дає розробникам інформацію про час відгуку датчика та допомагає їм розробити відповідні керуючі електронні системи та схеми зчитування. Наведені нижче криві показують, що передбачувана стала часу для наведеного прикладу болометра становить кілька мілісекунд (рис. 2.50б).



а)

б)

Рисунок 2.50 – Результати модулювання нестационарного теплового режиму: а) відгук температури на імпульс напруги; б) відповідність відгуку (теплового потоку) температури на імпульс напруги попередньо нагрітого болометра

Програма **CoventorWare Analyzer** також використовується для моделювання реакції пристрою в заданому інтервалі часу. Спочатку імітується характеристика збудження, що генерує тепловий потік, як аналог падаючого інфрачервоного випромінювання. Коли досягається температура стаціонарного стану, подається імпульс напруги з метою вимірювання опору, пов'язаного з підвищенням температури, викликаним падаючим випромінюванням (рис. 2.48,б).

Програма Coventor пропонує специфічний проектний потік розробки MEMS для спрощення процедури моделювання, налаштування та оптимізації мікроболометрів MEMS. Додаток CoventorWare Analyzer здатний передбачити основні характеристики пристрою, використовуючи специфічні для MEMS мультифізичні рішення та засоби візуалізації. Критичні параметри працездатності, такі як різниця температурних перепадів та коефіцієнт теплової ємності, можуть бути обчислені на основі результатів моделювання аналізатора.

2.6 Контрольні запитання і завдання

1. Які особливості програми Coventor MP?
2. Наведіть зв'язки програми Coventor MP з іншими засобами розробки пристроїв MEMS.
3. Порівняйте додатки MEMS+ та CoventorWare системи проектування Coventor MP.
4. Охарактеризуйте бібліотеку компонентів додатку MEMS+.
5. Розробка технологічних процесів виготовлення MEMS в пакеті SEMulator3D
6. Охарактеризуйте проектування акселерометрів MEMS
7. Яке призначення, устрій та етапи розробки MEMS гіроскопа у пакеті Coventor MP?
8. Які конструктивні та електричні характеристики магнітометра Девііса моделюються?
9. Що включає моделювання та проектування MEMS мікрофонів?
10. Які особливості моделювання та розробки MEMS резонаторів?
11. Охарактеризуйте особливості, етапи проектування та моделювання оптичних MEMS.
12. Які переваги проектування та моделювання приводу MEMS на платформі Coventor?
13. Охарактеризуйте засоби, які об'єднує платформа Coventor у процесі проектування та моделювання радіочастотних комутаторів та конденсаторів.
14. Якої методології дотримуються розробник у процесі проектування та моделювання п'єзоелектричних вібраційних електромеханічних акумуляторів?
15. Проектування та моделювання мікроболометрів.

3. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВИГОТОВЛЕННЯ МІКРОСИСТЕМ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПРОГРАМИ SEMulator3D

Процеси виробництва MEMS, як правило, мають специфічні налаштування для кожної конструкції пристрою. Можливість моделювання потоків нових технологічних процесів, документування рішень щодо процесів та перевірка конструкції за допомогою додатку SEMulator3D надає вагомі переваги перед традиційним підходом «зразок та тестування».

Спеціалісти в галузі промислового виробництва зауважують, що віртуальний технологічний процес з додатком SEMulator3D "...дозволяє інженерам легко розробляти та тестувати велику кількість комбінацій типового технологічного процесу та нових технологічних процесів, використовуючи декілька фізичних моделей проектування, що було б дуже коштовно, або неможливо в реальному процесі виробництва. Модель для кожного етапу процесу може бути калібрована за допомогою експериментальних досліджень, що призводить до отримання дуже надійних результатів, які можна використовувати повторно в різноманітних комбінаціях." – Teledyne dalsa

Програма SEMulator3D[®] – це платформа для тривимірного моделювання процесів створення MEMS, яка пропонує широкі можливості для прискорення розробки пристроїв мікромеханіки з урахуванням технологічних процесів виготовлення напівпровідникових ІС. Програма SEMulator3D використовує два основні типи власних технологій моделювання: об'ємне моделювання – Voxel та трансформація поверхні (еволюція поверхні – *surface evolution*). Об'ємне моделювання є надзвичайно ефективним та мабуть ідеальним для симуляції етапів процесу, які можна охарактеризувати геометрично, наприклад, літографія та рідинне травлення. Еволюція поверхні – це більш потужна техніка моделювання, яка ідеально підходить для таких методів формування кремнієвих структур, як плазмове травлення та селективна епітаксія, які мають більш складну фізичну поведінку. Обидві фази моделювання можуть бути об'єднані разом в одному потоці процесу моделювання для досягнення оптимальної точності та ефективності. На основі високоефективної технології фізичного моделювання на базі кубиків невеличкого розміру, вокселів, SEMulator3D має здатність імітувати цілісні потоки технологічних процесів (рис. 3.1).

Починаючи з вхідних даних проекту, програма SEMulator3D послідовно виконує етапи інтегрованого опису технологічного процесу для створення віртуального еквівалента складних 3D-структур. Оскільки моделюється повна послідовність процесів виробництва, SEMulator3D дає можливість передбачати наслідки змін процесів та їх параметрів.

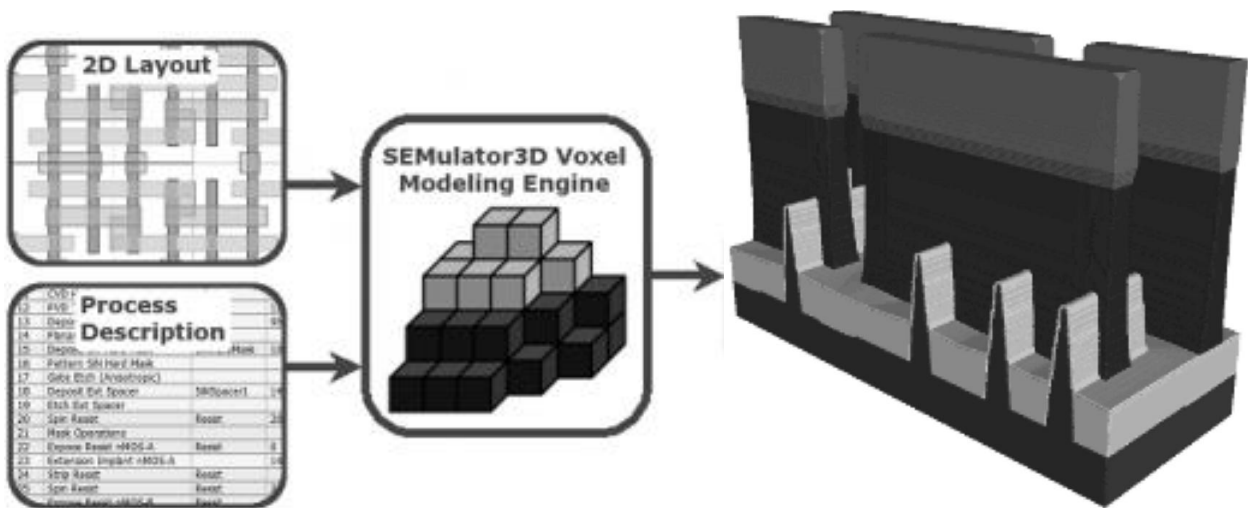


Рисунок 3.1 – Симуляція потоків технологічних процесів на основі фізичного моделювання за допомогою вокселів

3.1 Додатки програми SEMulator3D для моделювання.

Використовуючи нову технологію 3D-моделювання на основі фізики процесів, додаток SEMulator3D дозволяє досліджувати широкий спектр окремих етапів процесу виробництва. Кожен етап процесу вимагає лише декількох геометричних та фізичних вхідних параметрів, які легко визначити та налагодити. Так само, як і в реальному виробництві, параметри технологічного процесу на верхньому рівні (такі як відповідність геометрії структур осадження, анізотропія травлення, селективність тощо) комплексно взаємодіють між собою та впливають на кінцеву структуру пристрою. Деякі приклади типів окремих етапів технологічного процесу, які можна моделювати за допомогою SEMulator3D, наведено у табл. 3.1.

Модуль Viewer. Програма SEMulator3D містить у модулі Viewer програми візуалізації для відтворення тривимірного об'єкту (рендера) на кожному етапі процесу у вигляді моделі віртуального пристрою. Покрокова візуалізація може допомогти зрозуміти режими технологічних процесів за якими відбуваються відмови та інші складні явища процесу виготовлення. Дослідження поперечного перерізу та розмірів можна проводити в будь-якій точці 3D-моделі. Приклад застосування 3D-моделі для відтворення гіпотетичної 22 nm комірки SRAM на базі транзисторів FinFET у модулі візуалізації Viewer наведено на рис. 3.2.

Модуль Viewer має безліч розширених можливостей, включаючи автоматичну анімацію кроків процесу та автоматичний експорт до Microsoft PowerPoint. Модуль Viewer також може будувати тривимірні моделі у форматі SEM3D Coventor для перегляду програмою SEMulator3D Reader.

Таблиця 3.1 – Етапи технологічного процесу, які можна моделювати за допомогою додатку SEMulator3D

Етапи технологічного процесу			
Травлення (ізотропне / анізотропне)	Осадження CVD/PVD (фізичне/хімічне осадження з парової фази)	Нарощування	Загальні процеси
Рідинне травлення Плазмове травлення RIE (реактивне іонне травлення) DRIE (глибинне реактивне іонне травлення) Плазмове травлення високої щільності Травлення / розпилення	PECVD (хімічне осадження) LPCVD (осадження за низького тиску) HDPCVD (низькотемпературне плазмохімічне осадження з газової фази) ALD (атомно шарове осадження) Розпилення Випаровування	Епітаксія Термічне окислення Силіцидація (формування полікремнієвих електричних контактів між елементами напівпровідникових структур і кристалом) Гальванічне покриття	Літографія CMP (хіміко – механічна поліровка) Імплантація Дифузія З'єднання кристалів

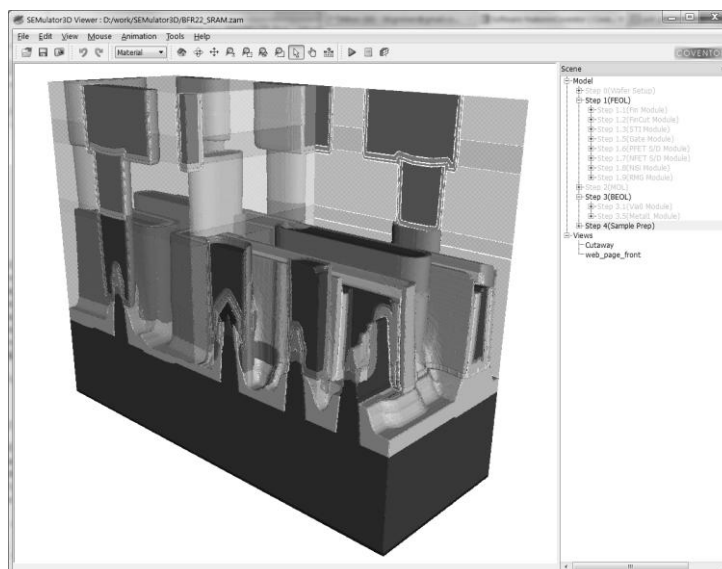


Рисунок 3.2 – Відтворення гіпотетичної 22nm комірки FinFET SRAM у модулі візуалізації Viewer програми SEMulator3D

Модуль SEMulator3D Automation (Автоматизація). Модуль SEMulator3D Automation – це додаток для автоматизації проведення віртуальних досліджень за різних умов технологічних процесів. Він керується електронними таблицями даних і дозволяє проводити масові паралельні дослідження впливу змін параметрів процесів. Програма SEMulator3D автоматично будує серію моделей, що різняться параметрами технологічного процесу. Це надає можливість модулю SEMulator3D Automation проводити віртуальні дослідження технологічних допусків, відтворюваності етапів процесу або однорідності перетинів (перерізів) пластин (рис. 3.3).

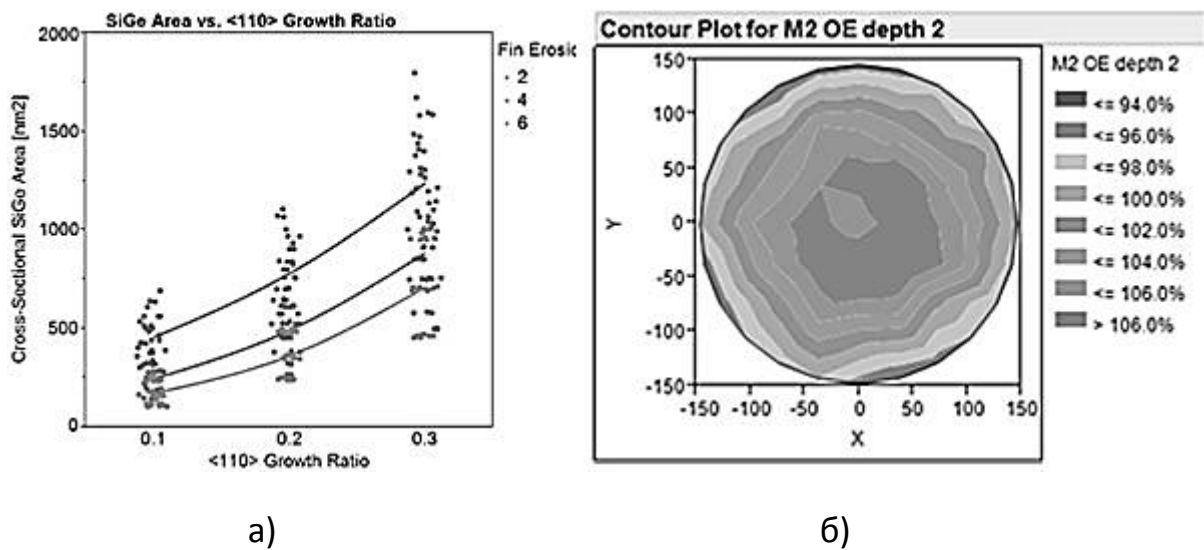


Рисунок 3.3 – Приклади досліджень варіацій процесів за допомогою модуля SEMulator3D Automation: а) багатофакторне дослідження селективної епітаксії SiGe у процесі виготовлення FinFET; б) рівномірність поперечних перетинів пластини для травлення у процесах ВЕОЛ (Back-end-of-line – означає наступну частину процесу виготовлення ІС, коли окремі елементи з'єднуються між собою за допомогою електричних кіл).

Модуль електричного аналізу. Модуль електричного аналізу додає можливості визначення електричного опору та ємності провідників для поглибленого дослідження чутливості конструкції до технологічного процесу. Модуль електричного аналізу може обчислювати параметри провідникових і ємнісних структур безпосередньо в програмі SEMulator3D, забезпечуючи єдину платформу як для 3D моделювання, так і для перевірки електричних характеристик. Отримані файли з'єднань (netlist) можна перевірити і об'єднати зі списками (CDL), отриманими із сторонніх інструментів EDA. Методи прогнозування технологічних процесів в кремнії, використовуваних в SEMulator3D, точніше відображають результати виготовлення, що призводить

до більш точних розрахунків параметрів паразитних R/C кіл, ніж ідеалізована геометрія, яка використовується в автономних рішеннях (рис. 3.4).

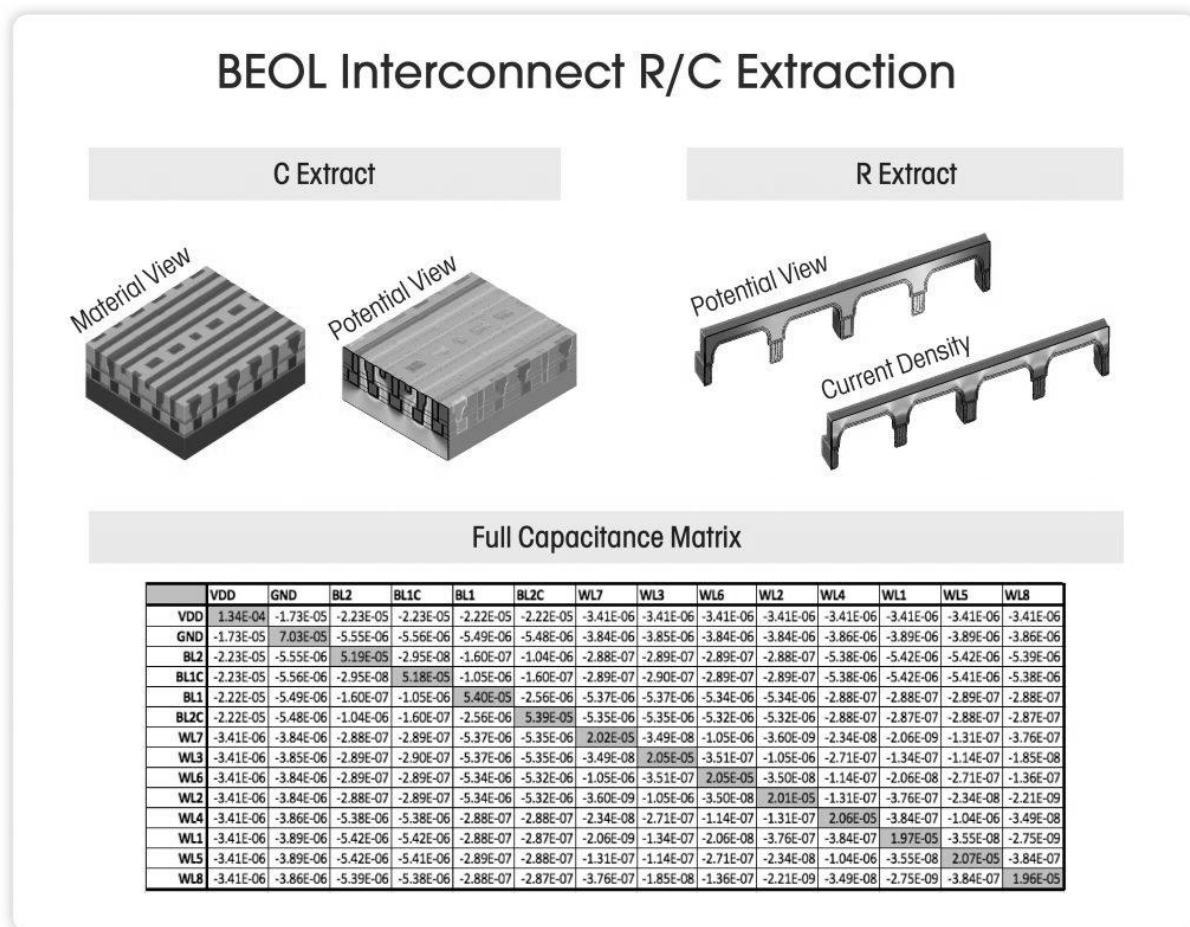


Рисунок 3.4 – Розрахунки опору та ємності в SEMulator3D на етапах BEOL

Додаток Device Analysis. Додаток Device Analysis, який вбудовано безпосередньо у програму SEMulator3D, є частиною модуля електричного аналізу. Він дозволяє отримувати електричні характеристики транзистора (характеристики передачі на постійному струмі та малосигнальні параметри), а також досліджувати варіативність технологічного процесу виготовлення транзистора та його вплив на відтворюваність характеристик пристрою (рис. 3.5). Програма враховує різноманітні фізичні явища, наприклад, залежність рекомбінації носіїв заряду від електричного поля та тунелювання, виходячи з діапазону робочих частот і смуги пропускання.

Конструктори можуть генерувати вольт-амперні характеристики транзисторів та автоматично вилучати параметри пристрою з отриманих даних (рис. 3.6). Характеристики з високою якістю можуть бути визначені через зміни в геометрії, літографії, травленні, осадженні та інших етапів технологічних процесів. Програма дозволяє встановити вплив будь-якого кроку процесу на зміну характеристик транзисторів, таких як порогова напруга пристрою, та

провести статистичні дослідження працездатності за зміною параметрів процесу у визначених межах.

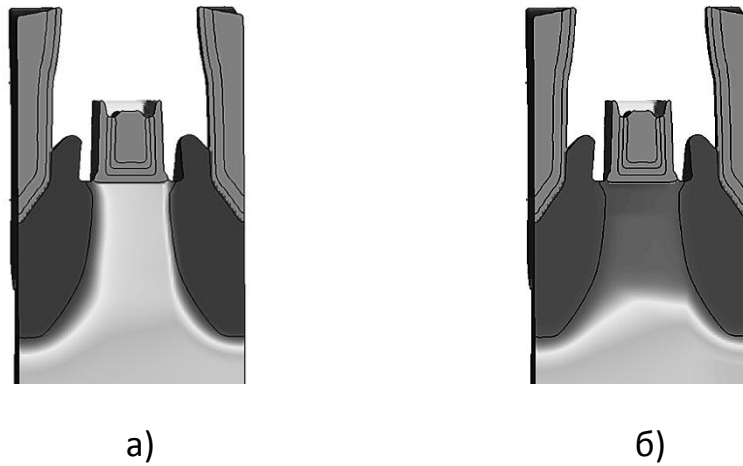


Рисунок 3.5 – Структура розподілу поля в транзисторі в залежності від режиму роботи: а) закритий транзистор (канал відсутній); б) відкритий транзистор (канал присутній)

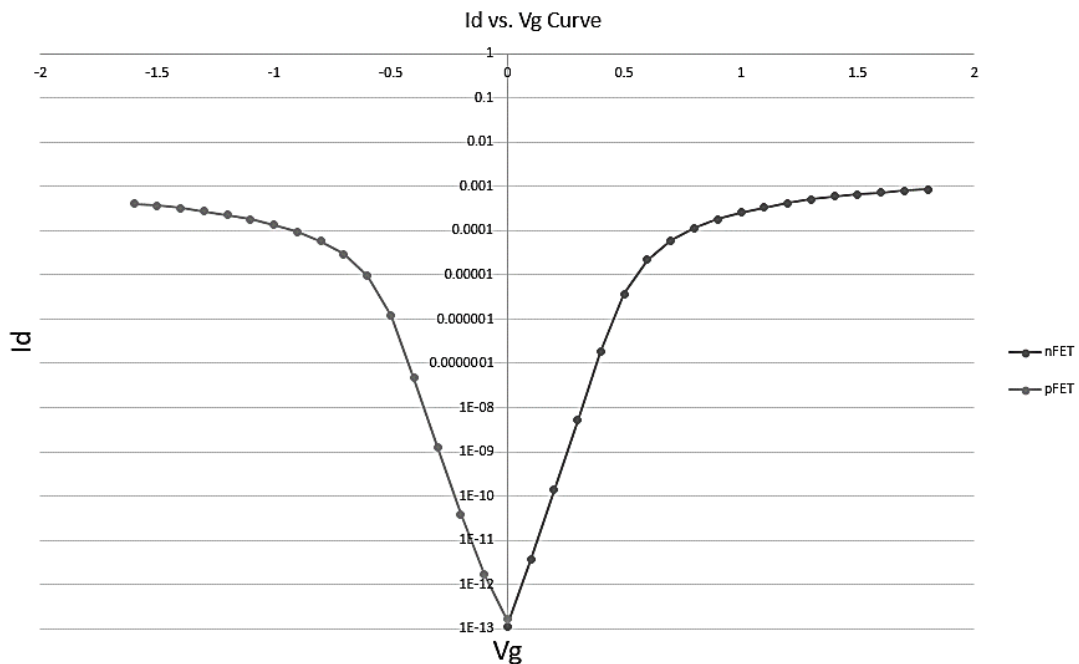


Рисунок 3.6 – Визначення залежності струму стоку від напруги на затворі для р- та n-канального транзисторів

Додаток Device Analysis повністю автоматизований та інтегрований з програмою SEMulator3D і підтримує всі типи моделювання процесів. Аналіз характеристик пристроїв дозволяє зрозуміти які процеси потрібно інтегрувати, як топографічні і структурні схеми та допустимі зміни параметрів окремого

технологічного процесу впливають на кінцеву доброякісність виробництва транзисторів.

Модуль SEMulator3D Analytics. Модуль Analytics автоматизує статистичний аналіз зміни процесів безпосередньо в програмі SEMulator3D. Новий інтерфейс користувача Analytics дозволяє проводити планування, виконання та аналіз великих статистичних експериментів з використанням різних методів, включаючи зміну параметрів процесів за методом Монте-Карло. Автоматизована багатоваріантна регресія використовується для ідентифікації важливих параметрів та ранжирування за їх впливом на зміну процесу (рис. 3.7).

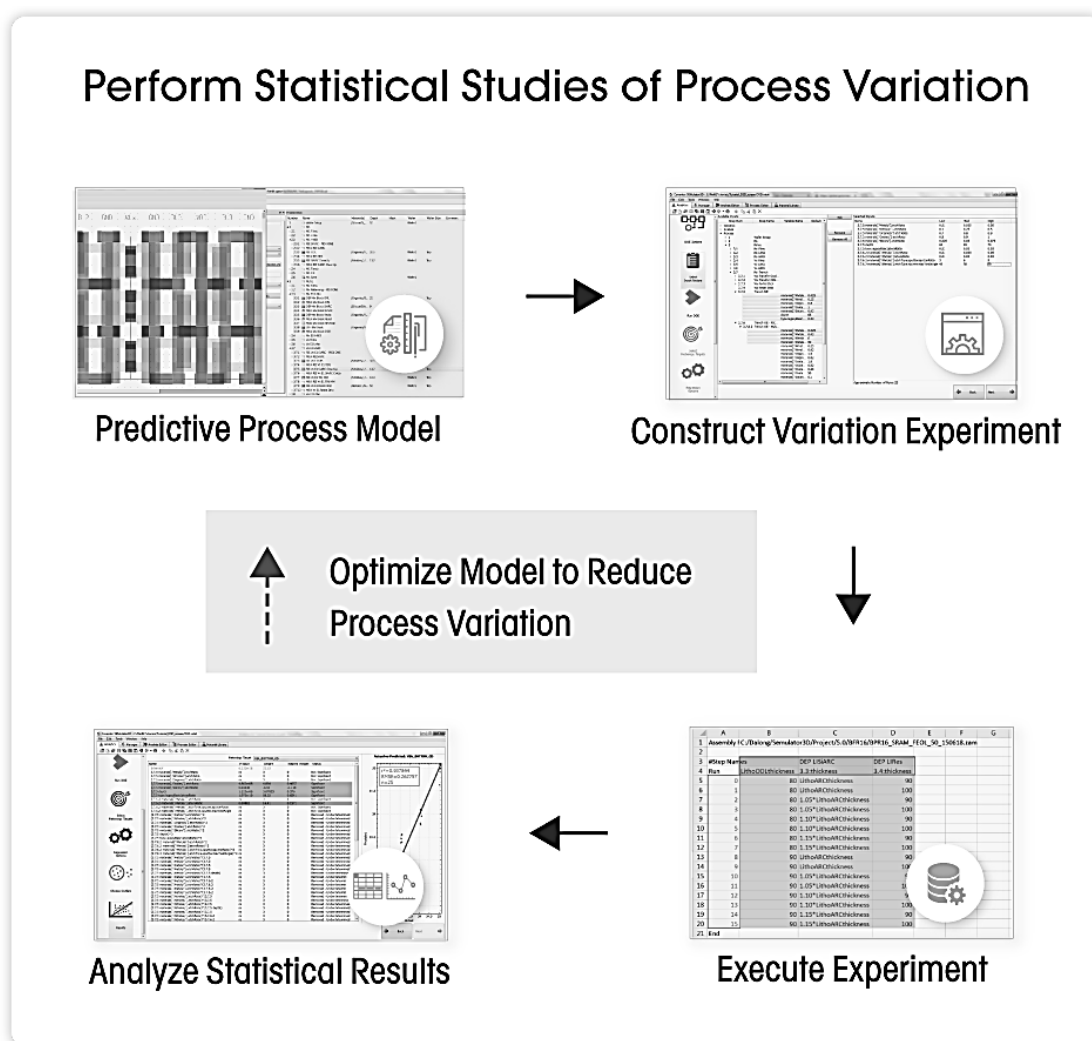


Рисунок 3.7 – Статистичний аналіз варіацій технологічного процесу

Окрім визначення важливих вхідних параметрів, користувачі можуть вживати у ході роботи калібрування моделей технологічного процесу (PMC – *Process Model Calibration*) з непрямою або прямою оптимізацією для автоматичного отримання значень параметрів, які потрібні для порівняння

даних віртуальних вимірювань з даними отриманими у процесі апаратних вимірювань, що спрощує процес створення віртуального прототипу реального кристалу.

Робоча процедура оптимізації вікон процесів (PWO – *Process Window Optimization*) може використовуватися для оцінки та визначення діапазонів вхідних параметрів (тобто вікна процесу), щоб досягти конкретних визначених користувачем параметрів або цілей, допомагаючи приймати оптимальне рішення щодо технологічних процесів.

Модуль Expeditor.

Модуль Expeditor призначено для пакетного виконання проектних процедур. Модуль Expeditor сумісно з модулем Analytics, дають можливість проводити паралельно масштабні кількісні дослідження варіацій технологічного процесу і конструкції, що дозволяє перевіряти відповідність допусків процесу, правила проектування, виробничу придатність та інше.

Програма SEMulator3D має багато додаткових можливостей:

- Генерація сітки для експорту до стандартних форматів сітки;
- Повний набір інструментів для візуалізації та редагування макетів;
- Настроювання за допомогою повного інтерфейсу програмування додатків (API – *Application programming interface*) згідно за умовами програми Python;
- Бібліотека можливостей моделювання процесів, написана на мові програми Python;
- Файли прикладів технологій виробництва.

Програма зчитувач SEMulator3D Reader дозволяє інженерам вільно обмінюватись 3D-моделями пристроїв та іншими результатами проектування всередині групи розробників та із замовниками. На відміну від використання статичних знімків екрана та презентацій у програмі PowerPoint, користувачі можуть безпосередньо взаємодіяти з моделями, опублікованими у компактному форматі файлів, використовуючи той же механізм візуалізації, що і SEMulator3D (рис. 3.8).

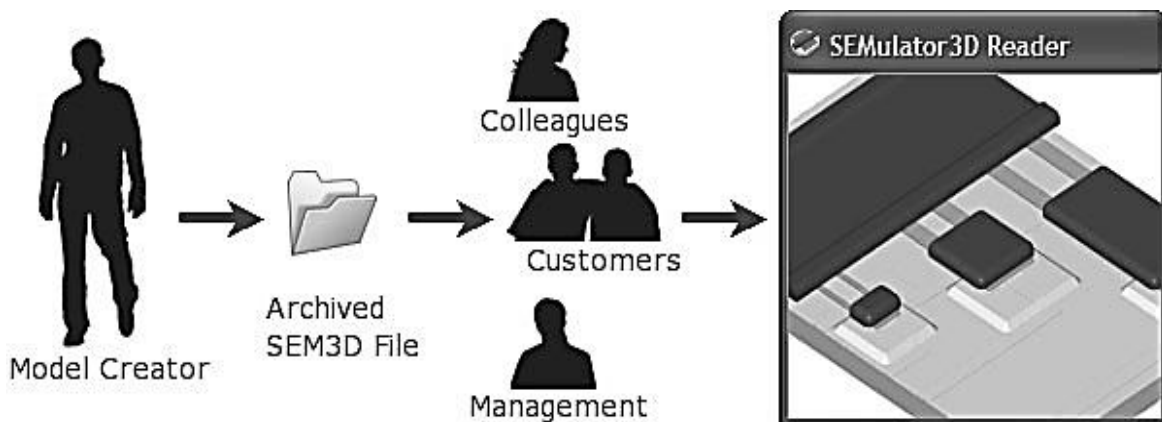


Рисунок 3.8 – Обмін результатами проектування за допомогою додатку SEMulator3D Reader

Моделі програми SEMulator3D можуть бути опубліковані у форматі файлу архіву SEMulator3D Reader з обраними характеристиками огляду, коментарями для кожного кроку процесу та декількома типами анімацій. Користувачі керують інформацією, що зберігається в архівному файлі, так що деякі деталі за бажанням можуть бути пропущені, щоб уникнути занадто великого розголошення. Весь файл також може бути зашифрований і захищений паролем для запобігання несанкціонованого перегляду.

3.2 Розширене моделювання технологічних процесів виготовлення сучасних елементів ІС в програмі SEMulator3D

Як говорилося вище, SEMulator3D дозволяє розробляти та тестувати велику кількість комбінацій типових та нових технологічних процесів. Для правильного прогнозування кінцевого результату процесу виготовлення кожен етап процесу має бути точно змодельований. Пакет розширеного моделювання SEMulator3D додає до бібліотеки два стандартних етапи процесу: MultiEtch та Selective Epitaxy. Ці два етапи забезпечують більш точне моделювання плазмового (сухого) травлення та селективного епітаксiального нарощування відповідно. Процедура вдосконаленого моделювання у додатку Coventor Surface Evolution (еволюція або перетворення поверхні) імітує фізичні процеси травлення та епітаксії, які для досягнення точного прогнозування структури пристрою ураховують крайові ефекти, що виникають на відповідному етапі виробництва. Вдосконалені етапи моделювання повністю інтегровані в редактор процесів SEMulator3D і можуть використовуватися в будь-якій точці технологічного потоку, де потрібна більш точна оцінка фізичного процесу. Це дозволяє поєднувати швидке геометричне моделювання процесу та більш детальне структурне моделювання, побудоване на фізиці процесу.

Додаток Multi Etch. Додаток MultiEtch моделює мультифізичні процеси плазмового травлення на багатошарових плівках, завдяки чому інженери можуть досягти потрібного результату, змінюючи параметри процесу. Програма MultiEtch на основі порівняно простого набору вхідних параметрів, включаючи: селективність травлення для конкретних матеріалів, бокове зміщення, кут конусу травлення, спрямованість і відповідність джерела та швидкість розпилення, здатна моделювати дуже складні процеси. Характеристика травлення може бути змодельована в залежності від матеріалу для моделі, наприклад розпилення маски, а також внаслідок порушення аспектного відношення за рахунок осадження полімеру. Похибки травлення можуть впливати на складні топології рельєфу поверхні або вузькі отвори маски, а також на залежність відтворення профілю від швидкості і матеріалу протягом етапу травлення.

Як приклад, розглянемо етапи процесів M2–V1 (позначення в бібліотеці процесів), показаний на рис. 3.9. Цей процес BEOL формує першу металеву маску з самосуміщеним перехідним отвором (TFHM–SAV).

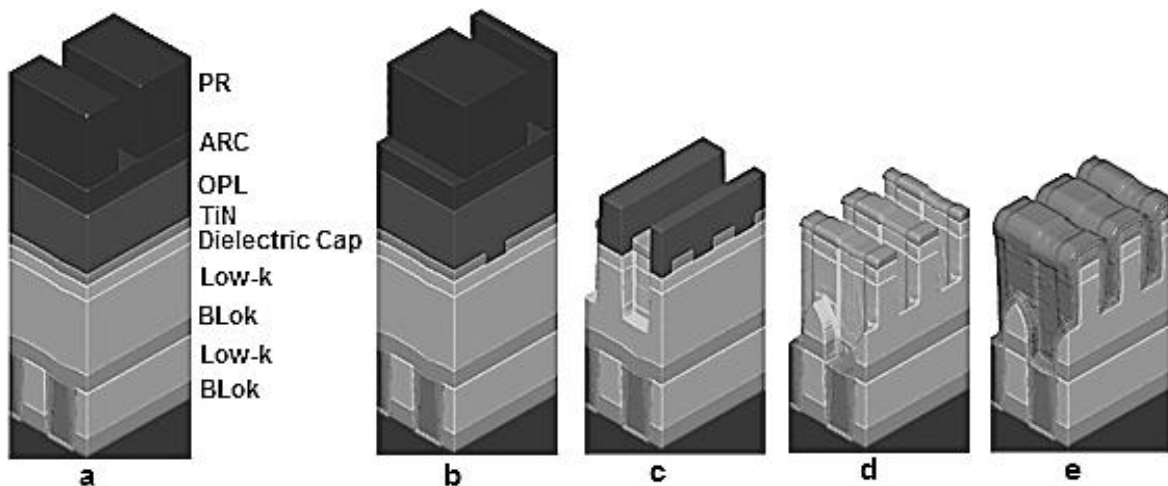


Рисунок 3.9 – Формування структури згідно з процесом M2–V1: а) після літографії M2–L1; б) після літографії M2–L2; в) після часткового травлення V1; д) відкриття BLoK; е) відкриття шару CuBS

Досягнення відповідної фаски на V1 надзвичайно важливо, щоб уникнути зайвої міграції електронів, що впливає на роботу пристрою. У цьому прикладі фаска формується головним чином розбризкуванням під час перетравлення (OE). Процес перетравлення, як правило, розроблений для уникнення травлення BLoK, і в результаті використовує хімічні процеси, що вимагають більш високої напруги зсуву. На рис. 3.10 показано еволюцію шару металу M2 OE; відзначте формування фаски та селективність травлення структури діелектрика з низьким рівнем відносної діелектричної проникності. Зауважте, що хоча селективність дуже хороша, всі матеріали на пластині піддаються дії травника, а отже є ймовірність надмірного перетравлення, наприклад, прориву жорсткої маски TiN.

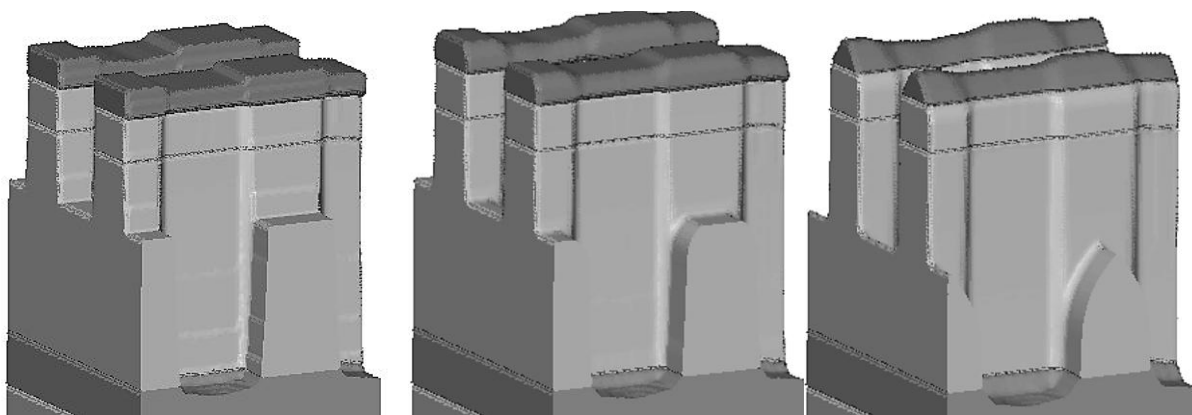


Рисунок 3.10. – Еволюція шару металу M2 OE. Зверніть увагу на формування фаски на V1 та ерозію жорсткої маски TiN та BLoK.

Візуалізація процесів формування тонких плівок. У сучасній напівпровідниковій промисловості розроблені та широко використовуються різні методи осадження тонких плівок. Профіль сформованої плівки визначається фізикою осадження з точки зору реакції поверхні та ефектів транспортування (переносу) маси. Осадження з обмеженням маси при переносі, таке як PVD та PECVD, може формувати неконформне ступінчасте покриття, що призводить до так званого ефекту хліба (bread-loaf effect), затінення, або появи порожнечі в подальшому процесі.

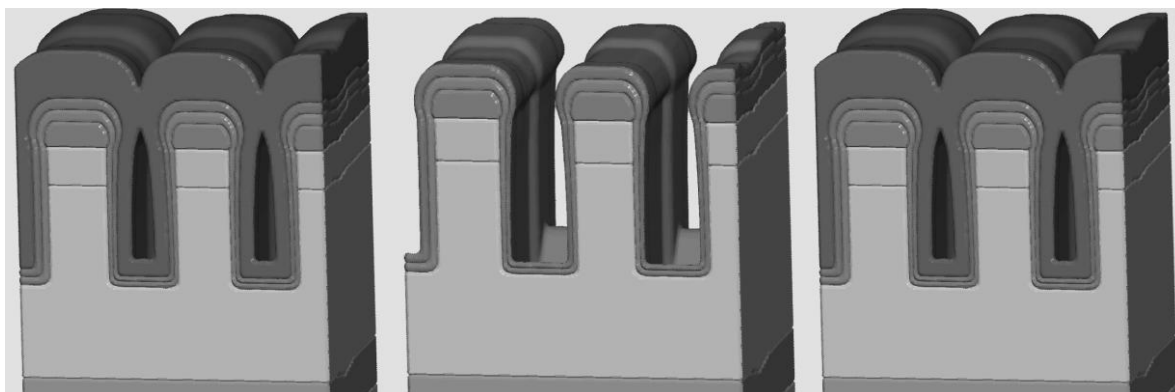


Рисунок 3.11 – Ефект «хліба» та утворення порожнеч під час формування захисного бар'єру в процесі дифузії і створення мідних контактів та міжз'єднань (Mx Barrier/Cu Fill process)

Оскільки мідь кращий провідник, ніж алюміній, мікросхеми з використанням міді для міжз'єднань мають вужчі розміри провідників і споживають меншу потужність. Разом це підвищує продуктивність ІС. Мідь в напівпровідникових ІС високого ступеня інтеграції вперше була застосована фірмою ІВМ з допомогою фірми Motorola в 1997. Навколо міді розташовано шар бар'єрного металу, який обмежує дифузію міді у навколишній простір, для запобігання погіршення його властивостей. З іншого боку бар'єрний метал повинен мати високу електропровідність з метою підтримки хорошого електричного контакту.

Процес осадження може включати характеристику направленості осадження для мінімізації невідповідності форми поверхні. Після того, як буде визначена спрямованість осадження, товщина плівки у кожній точці пластини може бути обчислена через функцію видимості (visibility function) джерела осадження для кожної точки на поверхні пластини. Крім цього, в цій моделі також підтримується ефекти положення пластини в просторі, такі як поворот та нахил, щоб імітувати практичне середовище осадження.

Моделювання вибіркової епітаксії. Вибіркова епітаксія є ключовим фактором для більшості кремнієвих технологій у планарних пристроях і залишається важливою для формування FinFET транзисторів (*Fin Field Effect Transistor* – транзистор, в якому за рахунок використання тривимірного

затвора в формі плавника підвищується ефективна ширина затвора при незмінній площі логічного вентиля). Складність технологічного процесу епітаксії та обмежена здатність виконання метрологічних досліджень на пластині є можливою причиною технологічного браку та розкиду параметрів пристрою. Моделювання може зменшити ризик браку за рахунок покращення розуміння як характеристик росту, так і джерел поліпшення технології.

Програма SEMulator3D моделює процес епітаксії шляхом модифікації характеристики темпів росту для основних сімейств кремнієвих матеріалів. На структури, отримані за допомогою епітаксії, сильно впливає швидкість росту шарів. Неоднаковість швидкості росту напівпровідникової структури у середині вікна захисного шару та на границі з некристалічними суміжними матеріалами також може контролюватися в програмі SEMulator3D.

На рис. 3.12 показано етапи формування FinFET структури на прикладі технології з роздільною здатністю 22 нм. В цьому технологічному процесі «гребінь» затвору формується з використанням розпірок-спейсерів (просторових роздільників). Структура має попередньо вбудовані витік та стік (розглядається транзистор з каналом р-типу, *PFET*), замість полікремнієвого затвору застосовано затвор з меді, замість підзатворного діелектрика із оксиду кремнію – діелектрик з більшою діелектричною проникністю (структура типу НКМГ, *high-κ / metal-gate – technology*) та використані самосуміщені локальні з'єднання.

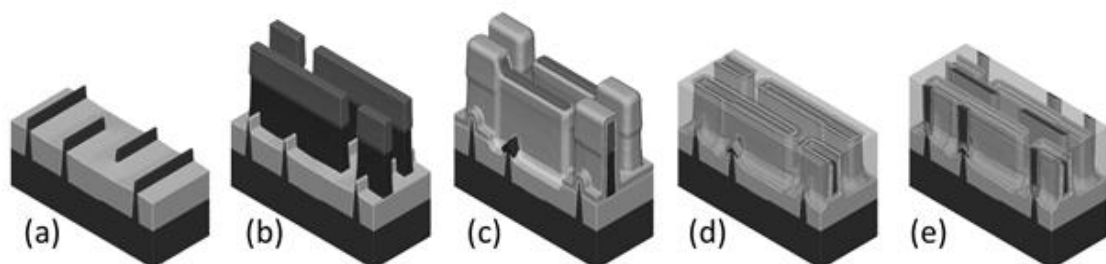


Рисунок 3.12 – Етапи потоку процесу формування FinFET структури чарунки SRAM за технологією 22 нм: а) визначення області «плавника» та приповерхневої ізоляції структури (STI – shallow trench isolation); б) жертвний шар затвору; в) ізоляційні прокладки (вставки, спейсери) та імплантація SiGe; д) формування металевого затвору; е) проміжні металеві з'єднання (MOL – middle of line) між структурою транзистора та наступним етапом формування міжз'єднань (FEOL і BEOL – metal layers between the front end transistor and back end interconnect flow) для забезпечення надійного омичного контакту.

Моделювання процесів імплантації та дифузії. Програма SEMulator3D включає етапи моделювання для прогнозування ступеня легування матеріалів та дифузії речовин з подальшою термічною обробкою. В початкових умовах процесу симуляції можуть бути визначені дози та імпантований матеріал, а також поздовжні та бічні відхилення. Ця можливість призначена не для підміни точності моделювання імплантації в технологічних САПР (TCAD), що займає

тривалий проміжок часу, а скоріше для того, щоб забезпечити швидкий аналіз чутливості до зміни домішок та реакції на попередні та наступні операції формування напівпровідникових структур. Процес моделювання іонної імплантації та термодифузії реалізуються у відповідності до алгоритму редактора процесів із власними параметрами поведінки. Також, як опція надається можливість аналізу процесу іонної імплантації за методом Монте–Карло, на додаток аналітичних методів аналізу. Під час аналізу використовують задані користувачем фізичні параметри, визначені в редакторі матеріалів. Додаток SEMulator3D Viewer дозволяє користувачеві побачити, як зміни процесу впливають на остаточну концентрацію домішок. Концентрації домішок відображаються на будь–якій площині поперечного перерізу(рис. 3.13).

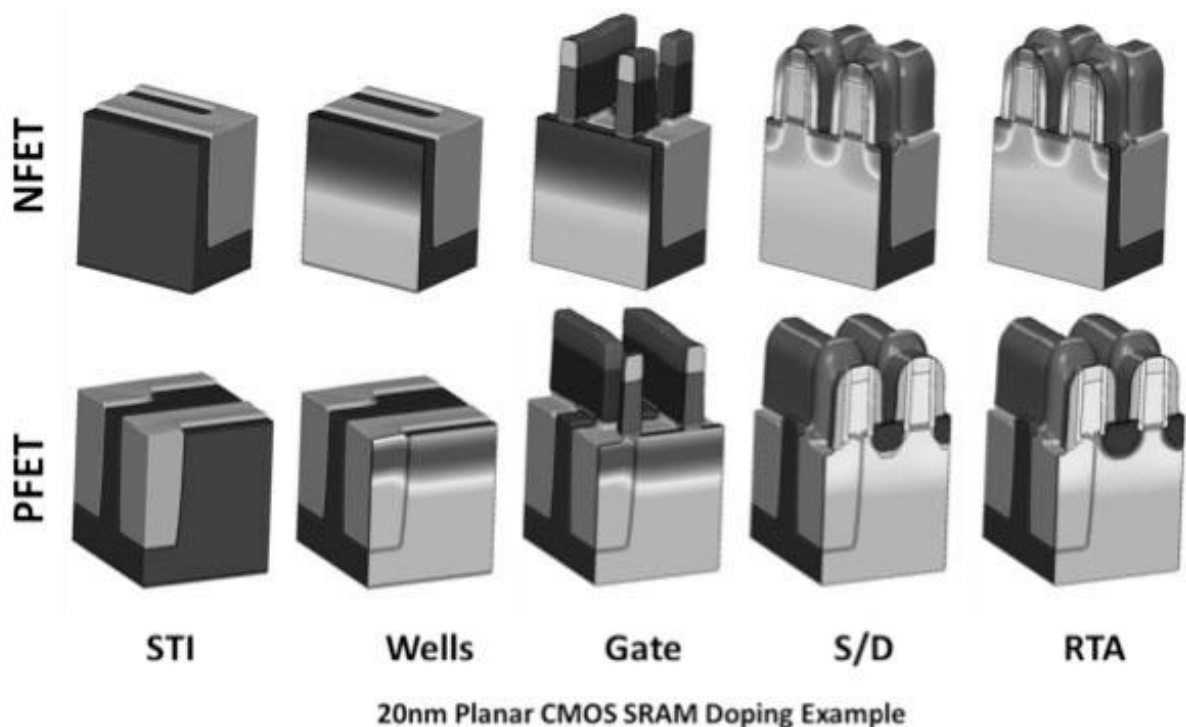


Рисунок 3.13 – Відображення концентрації домішок на прикладі імітаційної моделі комірки пам’яті за технологією 20 нм

Моделювання процесів травлення кристалічних пластин – додаток Crystal Etch. Наявність дефектів структур стік–виток у вигляді поглиблення перед селективним епітаксіальним осадженням може сприяти деформації каналів та зменшити коротко канальний ефект.

Додаток Crystal Etch моделює процес кристалографічного травлення (рис. 3.14) за допомогою використання різних швидкостей травлення для основних сімейств кремнієвих пластин. Для налаштування процесу для різних хімічних травників можуть бути визначені швидкі або повільні методи травлення. Реалістичні профілі CMOS структур стік–виток можна отримати, коли функція додатку Crystal Etch використовується у поєднанні з моделлю процесу селективної епітаксії (Selective Epitaxy).

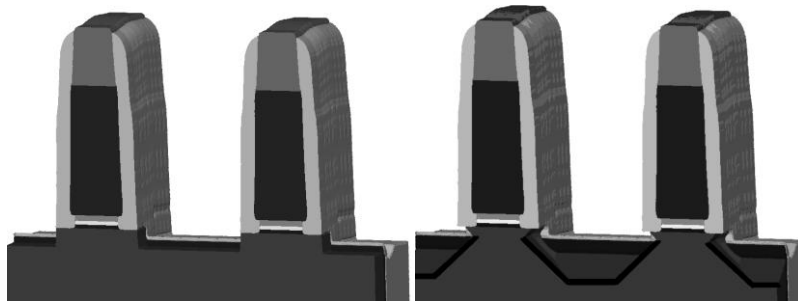


Рисунок 3.14 – Моделювання процесу кристалографічного травлення областей стік-виток CMOS структури у додатку Crystal Etch

Моделювання процесу травлення у залежності від топології інтегральних схем. На характеристики травлення кремнієвих пластин впливають фактори розміру структур та щільності компоновки елементів маски. Оскільки критичні розміри напівпровідникових структур продовжують зменшуватися, тому ефекти травлення, що залежать від топології інтегральних схем, стають все більш вираженими. Поодинокі елементи в ізоляції можуть травитись з швидкістю відмінною від елементів, що знаходяться в областях з насиченою геометрією. Ефекти насиченості та різні співвідношення сторін (аспектне співвідношення) також призводять до різнорідних глибин профілю травлення, або анізотропії, по всій пластині. Програма SEMulator3D враховує цю залежність від геометрії поєднуючи стандартні модулі травлення та Multi Etch для моделювання ефектів, таких як затримка травлення, відставання RIE (*менша швидкість травлення в малих об'єктах*) або ARDE (*залежність швидкості травлення або зменшення швидкості травлення як функція часу травлення для заданої ширини лінії*) в режимі імітації процесу (рис. 3.15).

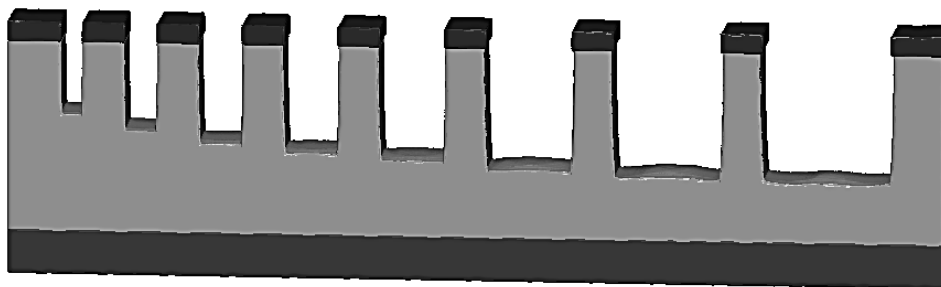


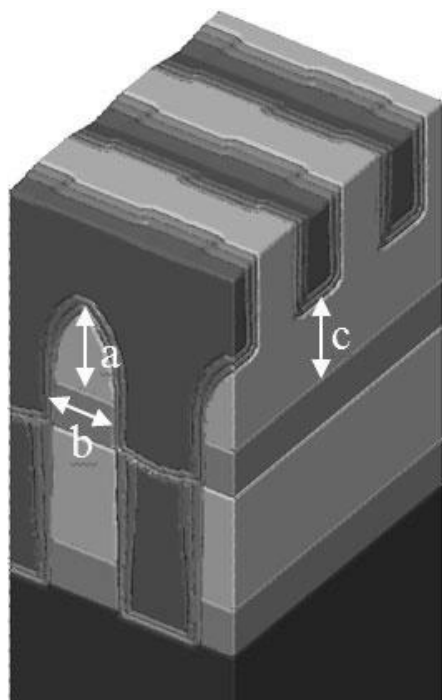
Рисунок 3.15 – Залежність профілю та глибини травлення для різної ширини та кроку лінії шаблону. Поперечний переріз моделі травлення у програмі SEMulator3D.

Висновок. Пакет розширеного моделювання SEMulator3D є потужним інструментом прогнозування, моделювання для формування розуміння процесів, зменшення ризику вибору технологій та усунення повторних циклів в розробці проекту. За мінімальної кількості вхідних параметрах, які легко змінити, інженери-технологи можуть отримати глибоке розуміння поведінки та керованості кроків травлення та епітаксії та їх наслідків у контексті повного технологічного процесу.

Модуль SEMulator3D Automation. Модуль SEMulator3D Automation забезпечує дослідження змін параметрів та пов'язаний з ними аналіз даних і містить програми SEMulator3D Metrology та SEMulator3D Expeditor. Програма SEMulator3D Metrology імітує фактичні метрологічні операції, забезпечуючи поточні геометричні вимірювання структури пристрою. Програма SEMulator3D Expeditor проводить дослідження змін параметрів, збираючи пов'язані дані для аналізу. Програми Expeditor і Metrology працюють разом, щоб максимально використовувати можливості механізму моделювання SEMulator3D і прогнозувати складні, багатофакторні явища фізичного процесу виробництва та взаємодії між конструкціями та технологіями.

"Віртуальна" метрологія SEMulator3D. Програма SEMulator3D Metrology автоматизоване реалізує метрологічні операції з вимірювання критичних особливостей структур під час виконання віртуального виготовлення, подібних до поточних вимірювань на виробництві (кремнієвій фабриці). Програма Metrology вимірює такі речі, як товщина плівки, критичний розмір (ширина), висота сходинки, кут нахилу бокової стінки, площа контакту тощо. Метрологічні операції можуть бути додані після будь-якого кроку в процесі моделювання у програмі SEMulator3D і можуть бути застосовані в будь-якому місці 3D-моделі. Кожна операція виводить дані в компактному, табличному форматі, придатному для аналізу в Excel та інших інструментах аналізу даних.

Віртуальні вимірювання у програмі SEMulator3D. На відміну від фізичних вимірювань, метрологічні вимірювання у програмі SEMulator3D не обмежені фізикою і програма може «виміряти» параметри, які можна було б визначити лише руйнівним способом в лабораторії фабрики (рис. 3.16). Наприклад: товщина плівки може бути виміряна за окремими елементами в макеті виробу; кути бокової стінки та критичні розміри можна виміряти в будь-якому місці, навіть під накладеними плівками; і також безпосередньо можна виміряти площу контактів. Оскільки метрологічні операції керуються масками, вони можуть виконуватися на будь-якому типі пристроїв і не потребують спеціальних метрологічних структур.



```

M1_DCD = 29.1000469068
M1_DCD_LE = 36.8996629246
M1_MO_CD = 33.3335230507
M1_MOCD_LE = 32.3436509895
M1_FCD_LE = 24.9009646571
M1_Area = 3914.4375
M2_L1_DCD = 29.1
M2_L1_HMO_CD = 27.9467455621
M2_L2_DCD = 29.1000312598
M2_L2_HMO_CD = 27.8743169399
L1L2_Space_CD = 36.089468749
TiN_PostHMO = 15.0
TiN_PostViaPartial = 12.0

```

Рисунок 3.16 – Приклад метрологічних вимірювань (ліворуч) на бібліотечному модулі BEOL M2–V1–M1 та приклад вихідних даних Metrology output (праворуч), де a – максимальна товщина шару діелектрика Low-k між шарами металізації; b – ширина перехідного отвору в напрямку Y; c – товщину діелектрика Low-k в шарі M2.

Метрологічні дані є корисним способом калібрування потоку процесу SEMulator3D відповідно до існуючих правил фабричних технологій. Вони також можуть бути використані для перевірки припущень щодо процесу та дослідження повних наслідків змін процесів щодо діючих правил проектування.

Програма SEMulator3D Expeditor. Більшість технологічних рішень потребують інформації про структуру і про фактичні умови технологічних процесів. Оскільки механізм моделювання у програмі SEMulator3D визначається фізикою процесів, він правильно прогнозує структуру пристрою за різними умовами технологічного процесу. Це дозволяє застосовувати програму SEMulator3D для дослідження та розуміння результатів перемін структур внаслідок варіацій технологічних процесів.

Програма SEMulator3D Expeditor включає автоматичні дослідження варіацій процесів, керованих електронними таблицями. Виходячи з початкового опису процесу у програмі SEMulator3D, один або декілька параметрів процесу, що мають особливе значення, можуть змінюватись у визначеному діапазоні протягом побудови моделі. Дані вимірювань у програмі SEMulator3D автоматично збираються та зберігаються у формі електронних таблиць, що дозволяє детально проаналізувати результати в будь який час. На рис. 3.17 показано процес формування спейсера (відокремлювача) плавника для гіпотетичної моделі технології суб–22 нм.

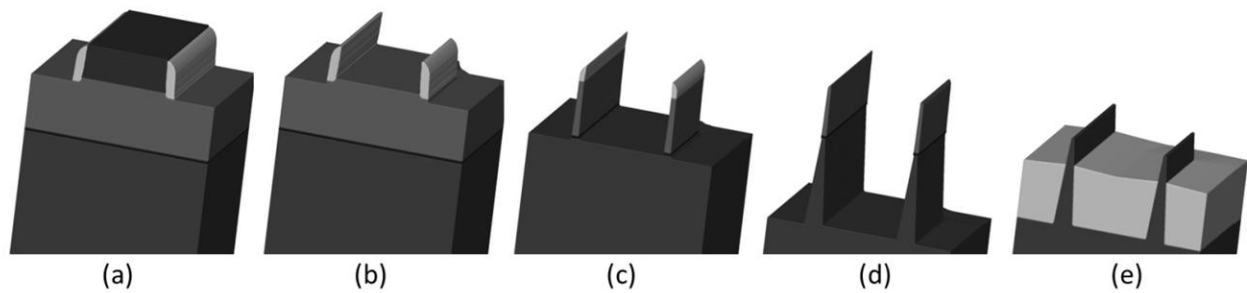


Рисунок 3.17 — Моделювання у програмі SEMulator3D процесу формування спейсерів плавника: (а) формування оправки плавника та розпірки; (b) видалення оправки; (c) формування жорсткої маски; (d) формування плавника (травлення); (e) формування модулів приповерхневої ізоляції структури (STI)

На рис. 3.18 показані дані багатовимірного дослідження варіацій процесу, виконаного в програмі Expeditor, що охоплює повний фактичний перебіг операцій для п'яти критичних параметрів осадження матеріалів в процесі виготовлення спейсера. Дані показують вплив зміни товщини спейсера на критичний розмір плавника та його висоту.

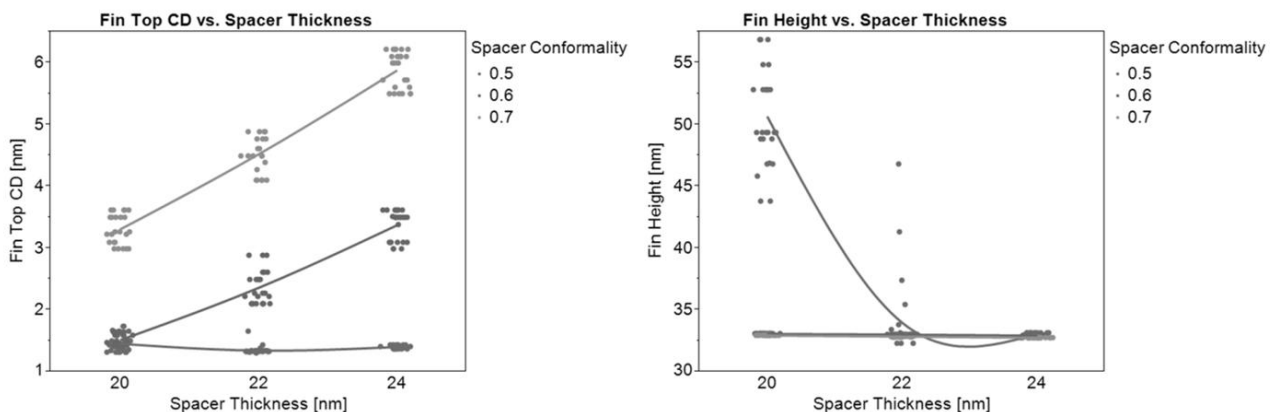


Рисунок 3.18 – Отримані результати віртуальної метрології від Expeditor моделі SEMulator3D (рис. 3.15) показують чутливість профілю осадження, що виникає внаслідок осадження спейсера

Нижча конформність забезпечує менший розкід вищих значень критичних параметрів, проте вона також демонструє значну нестабільність у висоті плавника. Ця нестабільність пояснюється тим, що тонке покриття бічної стінки є більш схильним до руйнування під час глибокого травлення кремнію, тим самим послабляючи функцію зупинки хімічного полірування поверхні, що призводить до поглиблення приповерхневої ізоляції. Цей тонкий ефект виникає внаслідок дослідження варіацій процесів, які було б важко передбачити без тривимірної, інтегрованої платформи моделювання.

Додаток Structure Search. Додаток Structure Search (дослідження структури) програми SEMulator3D автоматизує пошук можливих місць відмови на основі таких критеріїв, як мінімальна ширина лінії міжз'єднання та товщина діелектрика, мінімальна площа контакту або електричні короткі замикання. Вся 3D-модель може бути оглянута і перевірена відповідно до визначених користувачем геометричних критеріїв, а місця відмов позначаються візуальними маркерами та їх координати розташування записуються (рис. 3.19). Підтримуються наступні перевірки:

- мінімальна відстань між провідниками;
- мінімальна товщина шару;
- мінімальна ширина з'єднань;
- мінімальна/максимальна зона контактів;
- кількість компонентів – електричних або конструктивних.

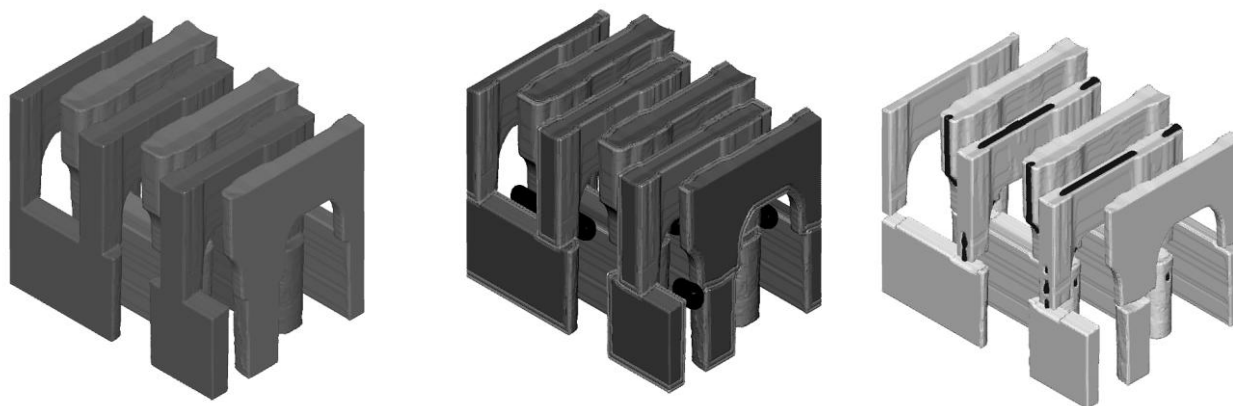


Рисунок 3.19 – Використання додатку Structure Search для пошуку можливих місць відмови у шарах міжз'єднань BEOL Metal1/Via1/Metal2 для: (а) окремих електричних мереж, (b) товщина ізоляції менше мінімальної, (с) ширина металевих ліній менше мінімальної.

Можливість паралельних варіаційних досліджень.

Додаток SEMulator3D Automation дозволяє проводити розширені паралельні дослідження варіацій технологічного процесу. Всебічні дослідження ланок виробничих процесів можуть бути виконані на машинах класу робочих станцій за кілька годин.

Експорт фізичних моделей у форматі сітки.

Додаток SEMulator3D Meshing дозволяє експортувати фізичні моделі програми SEMulator3D в різні формати для аналізу в інших інструментах моделювання (рис. 3.20). Операція Meshing має багато варіантів, що дозволяє користувачам повністю налаштувати вивід своєї сітки з точки зору роздільної здатності, точності та формату.

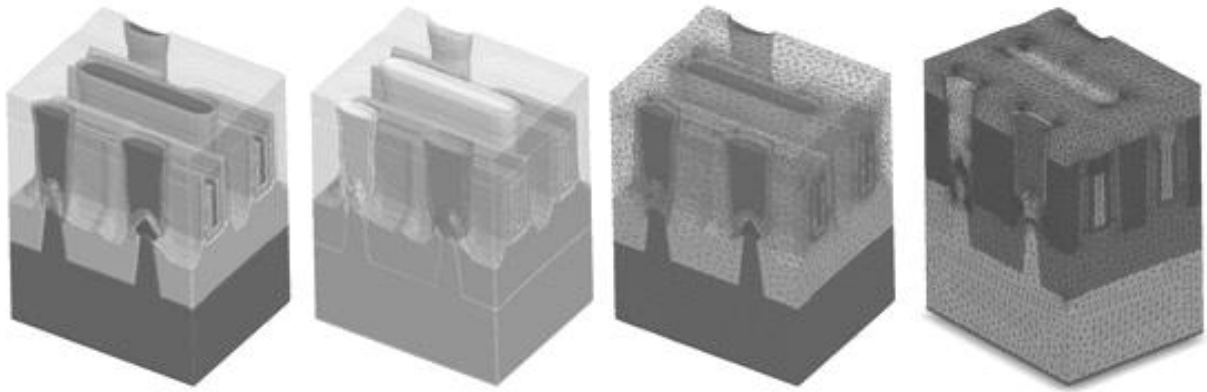


Рисунок 3.20 – Модель половини комірки 16nm FinFET SRAM у програмі SEMulator3D у різних додатках: а) у додатку Material View; б) у додатку SEMulator3D Electric View; в) у додатку SEMulator3D Volume Mesh output; г) об'ємна сітка, імпортована в CoventorWare для аналізу за методом FEA.

Завдяки цій можливості користувачі можуть застосовувати високошвидкісну технологію віртуального виготовлення у програмі SEMulator3D для створення реалістичних фізичних моделей, а потім використовувати ці реалістичні моделі в різних областях застосування – від вилучення паразитних зв'язків до 3D-друку та багато іншого (рис. 3.21).

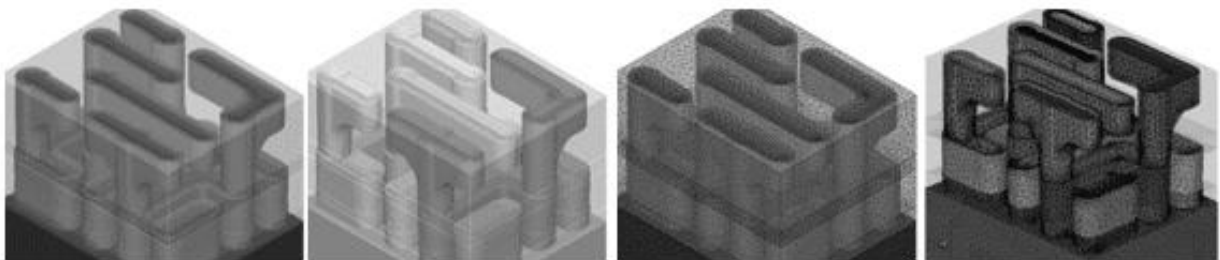


Рисунок 3.21 – Моделі міжз'єднань для 64-нм BEOL у різних додатках: а) у додатку Material View; б) електрична модель у додатку SEMulator3D; в) об'ємна сітка у додатку SEMulator3D; г) об'ємна сітка, імпортована в CoventorWare для визначення ємності 3D.

Опція Meshing SEMulator3D підтримує створення поверхневих та/або об'ємних сіток у кількох популярних форматах (табл. 3.2).

Програма SEMulator3D також підтримує прямий експорт і імпорт вокселів через формат файлу на основі XML. Експорт Voxel може бути корисним замість експорту сітки для деяких програм. Вона також може використовуватися для генерації технологічної документації, коли процес розробки закінчується і починається фаза масштабного виробництва. Якщо виробничі цілі вимагають перенесення виготовлення на нове обладнання або до іншого виробника, SEMulator3D надає можливість швидкого налагодження нового процесу.

Таблиця 3.2 – Формати, які опція Meshing SEMulator3D підтримує для створення поверхневих та/або об'ємних сіток

Тип сітки	Розширення файлу	Опис
Поверхня	ANS	Формат препроцесора ANSYS\Prep7. Не зберігає назви матеріалів чи кольори
	BND	Граничний формат DF-ISE – формат файлу, який використовується обчислювачами TCAD. Це простий формат ASCII, який містить поверхневу сітку.
	DXF	Формат обміну креслень AutoCAD. Не зберігає назви матеріалів чи кольори
	OBJ	Формат об'єкта Wavefront Зберігає назви матеріалів та кольори. Використовується багатьма програмами, включаючи Acrobat 9 Pro Extended.
Об'єм	ANS	Формат препроцесора ANSYS\Prep7. Використовує типи елементів SOLID45 (лінійні) або SOLID95 (квадратичні).
	UNV	SDRC/Ideas "Універсальний" формат. Зберігає назви матеріалів та кольори.

Щоб побачити переваги використання програми SEMulator3D для розробки проектів MEMS з урахуванням особливостей технологічних процесів та засобів перевірки конструкції пристроїв розглянемо декілька прикладів.

3.3 Моделювання комірки мікродзеркала цифрового оптичного процесора (DLP)

Програма Coventor має комплексний набір програмних засобів для проектування пристроїв мікромеханіки інтегрованих з електронними схемами. SEMulator3D використовується для побудови тривимірних моделей складних структур MEMS і технологічних процесів виготовлення CMOS – схем та для візуалізації електричного зв'язку між ними (рис. 3.20). Одним з найвідоміших прикладів комплексно інтегрованої схеми CMOS та шарнірного пристрою MEMS є серія цифрових оптичних процесорів Texas Instruments, в яких дзеркальні мікроелектромеханічні структури змінюють свою просторову орієнтацію під впливом електростатичних актюаторів залежно від стану базової комірки статичної пам'яті з довільним доступом (SRAM).

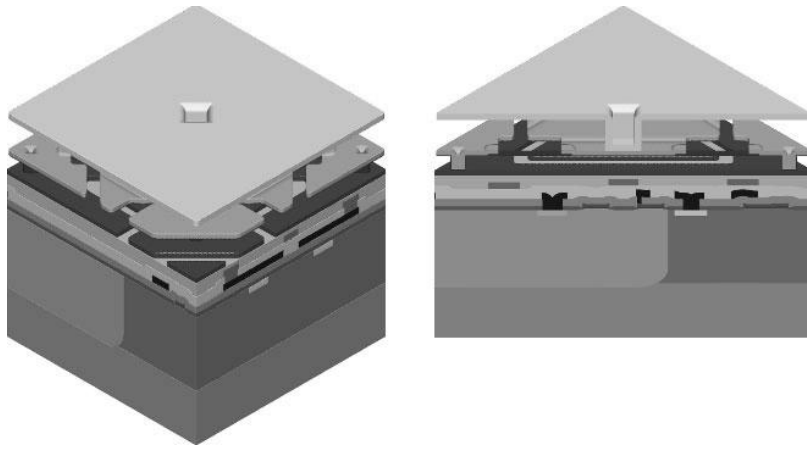


Рисунок 3.20 – Ізометрія (а) і поперечний переріз (б) одного пікселя моделі мікродзеркала з коміркою статичної пам'яті з довільним доступом, створені за допомогою SEMulator3D

Порівняння мікрофотографій реальних пристроїв цифрових оптичних процесорів Texas Instruments, отриманих за допомогою скануючого електронного мікроскопа (SEM), і моделі комірок, отримані в SEMulator3D зображено на рис. 3.21, 3.22.

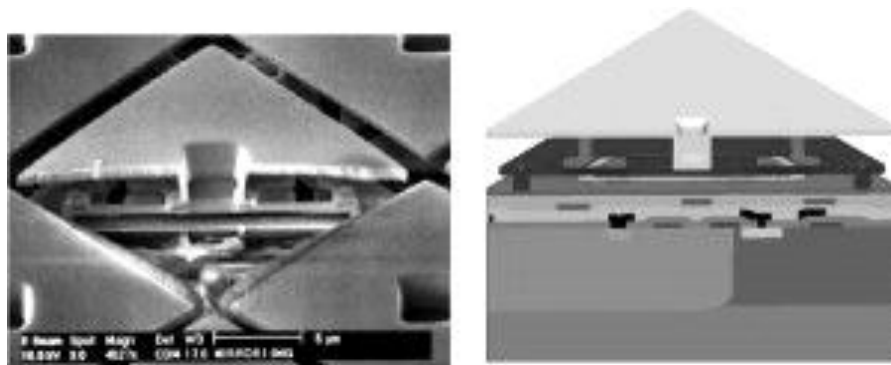


Рисунок 3.21 – Переріз структури мікро дзеркала (а) та модель у програмі SEMulator3D (б)

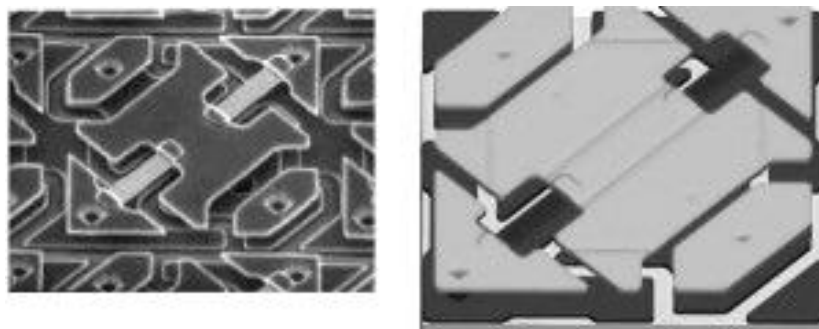


Рисунок 3.22 – Елементарна комірка цифрового мікродзеркального пристрою (DMD) зі знятим дзеркалом (зліва) та модель у додатку SEMulator3D (праворуч)

Кожен з елементів цифрового мікро дзеркального пристрою керується коміркою пам'яті SRAM. За допомогою додатку SEMulator3D можна точно моделювати як базову схему CMOS, так і вбудований над поверхнею комірки пам'яті пристрій DMD (рис. 3.23).

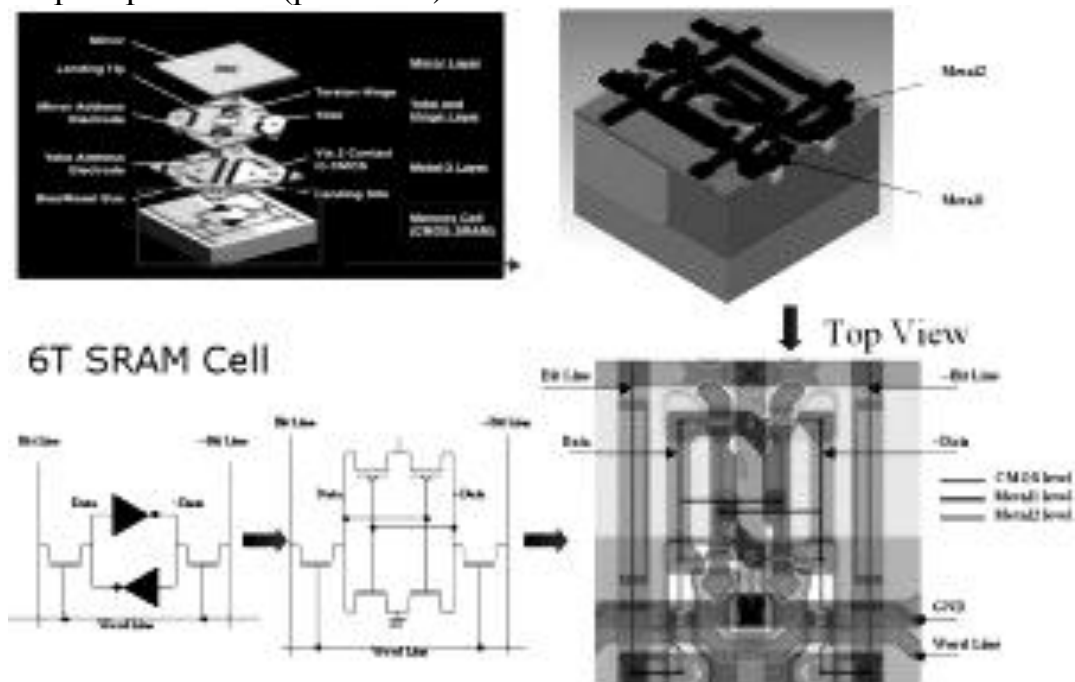


Рисунок 3.23 – Приклад моделі чарунки пам'яті ОЗП на 6 транзисторах (6T SRAM CMOS) перед побудуванням мікродзеркала: зліва вгорі – пошаровий вигляд дзеркала DLP та комірки пам'яті; зліва знизу – схема чарунки 6T SRAM; зверху праворуч – 3D-модель схеми; знизу праворуч – вид зверху 3D-моделі MEMS DLP.

Крім того, SEMulator3D здатний дискретизувати воксельну модель із сітчастими елементами для підвищення якості моделювання. З додатку SEMulator3D можна експортувати як площинні елементи трикутників, так і тетраедричні об'ємні сітки (рис. 3.24).



Рисунок 3.24 – Воксельна модель SEMulator3D та сітчаста модель

Режим розширених параметрів в додатку SEMulator3D дозволяє змінювати щільність сітки в місцях, де потрібно отримати більшу роздільну здатність симуляції (рис. 3.25).

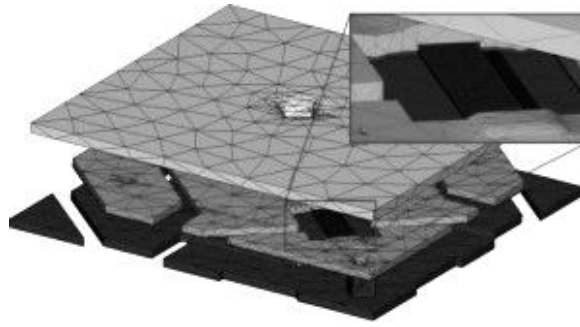


Рисунок 3.25 – Сітчастої модель форми із збільшеною щільністю сітки в місцях, де очікується розріст максимальних напружень

Сітки програми SEMulator3D можна використовувати з обраним інструментом FEA. Поверхневі сітки експортуються у формати .ans, .dxf, .stl та .obj, об'ємні сітки експортуються у форматах .unv та .ans. Зображення, надане на рис. 3.26 – це .unv-сітка, імпортована в додаток препроцесора CoventorWare.

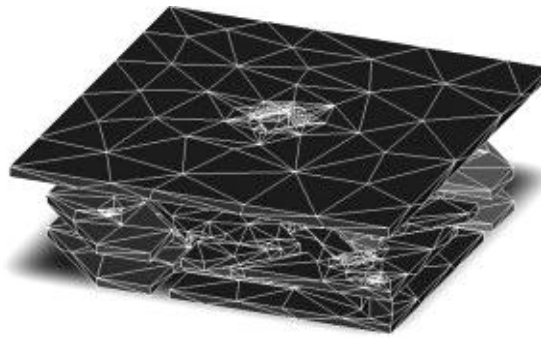


Рисунок 3.26 – Дискретна модель від SEMulator3D в CoventorWare. Модель надана для відображення окремих провідникових областей для аналізу в CoSolve.

Після імпорту дискретної моделі видаються додаткові призначення для поверхонь, деталей, провідників тощо для завдання граничних умов, які мають бути визначені як частина електростатичної складової механізму моделювання (рис. 3.27).

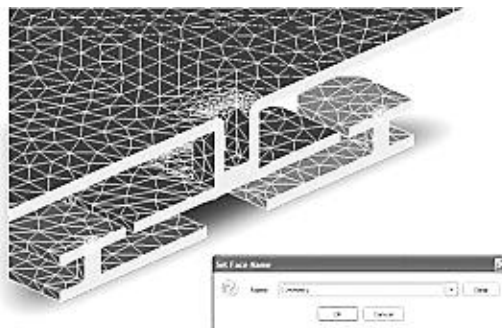


Рисунок 3.27 – Переріз структури кристалу в препроцесорі CoventorWare демонструє чітку визначеність та правильну ідентифікацію елементів конструкції комірки

Аналіз впливу напруги керування за допомогою CoSolveEM дозволяє прогнозувати механічну реакцію електростатичного приводу пристрою, включаючи максимальне відхилення до досягнення кінцевого контакту (рис.3.28).

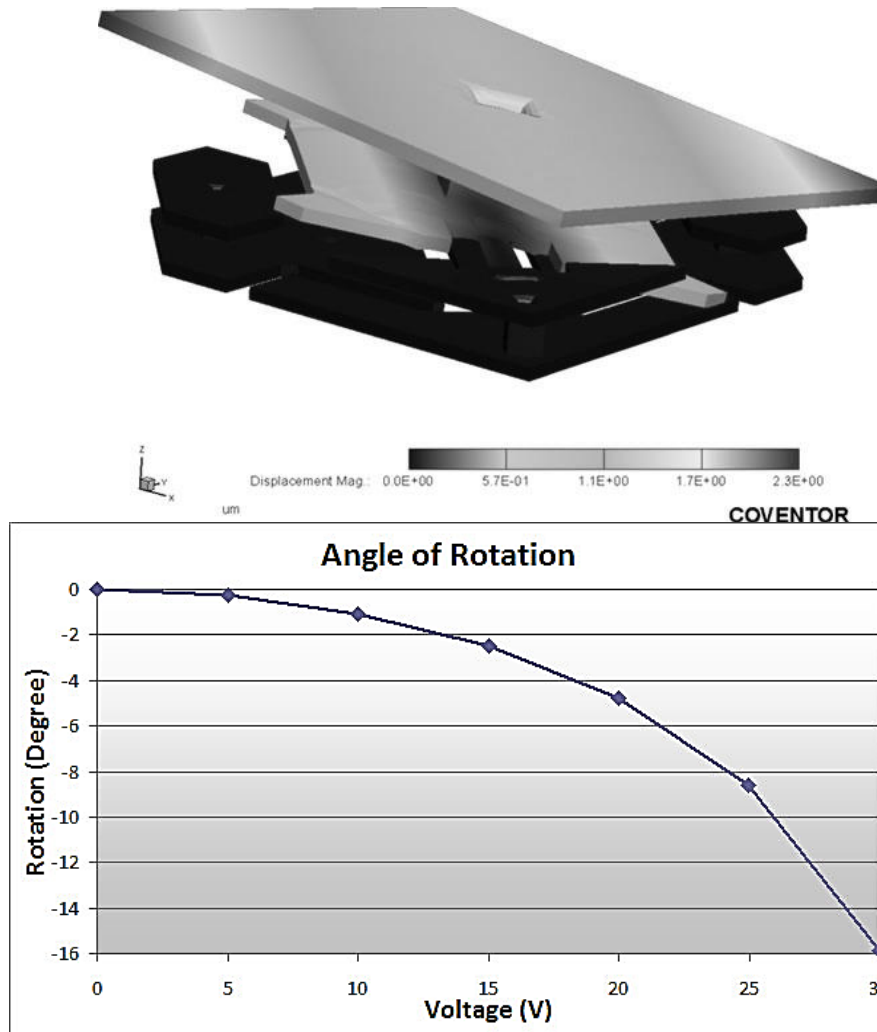


Рисунок 3.28 Вплив напруги керування на реакцію електростатичного приводу MEMS пристрою

Геометрична точність моделі SEMulator3D побудована з урахуванням всіх параметрів і характеристик пристрою, що очікуються в результаті фактичного процесу виробництва. Це покращує якість симуляції за результатами FEA, на противагу ідеалізованій геометрії, що звичайна для аналізів FEA без урахування технологічних ефектів. В результаті механічного аналізу в SEMulator3D розробник отримує детальні дані для реалістичної геометрії пристроїв MEMS щодо прогнозування областей концентрації напруження.

3.4 Контрольні запитання і завдання

1. Охарактеризуйте призначення програми SEMulator3D.
2. Які додатки включає програма SEMulator3D та яке їх призначення?
3. Охарактеризуйте додаток MultiEtch для моделювання процесу плазмового травлення.
4. Наведіть приклад формування шару металізації.
5. Наведіть та поясніть етапи моделювання вибіркової епітаксії.
6. Яким чином моделюються процеси імплантації та дифузії?
7. Моделювання процесів травлення та які фактори беруться до уваги у процесі травлення?
8. Яке призначення програми SEMulator3D Metrology?
9. Яке призначення програми SEMulator3D Expeditor?
10. Що забезпечує додаток Structure Search?
11. Охарактеризуйте процес моделювання комірки мікродзеркала цифрового оптичного процесора.

4 ЗВ'ЯЗОК ПРОГРАМИ MEMS+ З ПРОГРАМАМИ MATLAB, SIMULINK ТА CADENCE VIRTUOSO

4.1 Програма MEMS+ для спільного моделювання пристроїв MEMS з програмами MATLAB та Simulink

Програми MATLAB та Simulink від фірми Mathworks добре відомі як потужні інструменти для інженерних рішень.

Остання версія програми MEMS+ дозволяє імпортувати параметризовану модель, створену на платформі дизайну MEMS+, безпосередньо до MATLAB або Simulink. У цьому випадку додаток MEMS+ не потребує розробки програм для рішення рівнянь механіки та застосування методу кінцевих елементів для опису фізики роботи пристроїв. Він призначений лише для створення 3-D конструкції в додатку MEMS+ Innovator з використанням вбудованого інструменту тривимірного графічного інтерфейсу. Основне вікно програми MEMS+ наведено на рис. 4.1. У якості прикладу воно відображає тривимірну модель акселерометру AD DXL 202 (рис. 4.1).

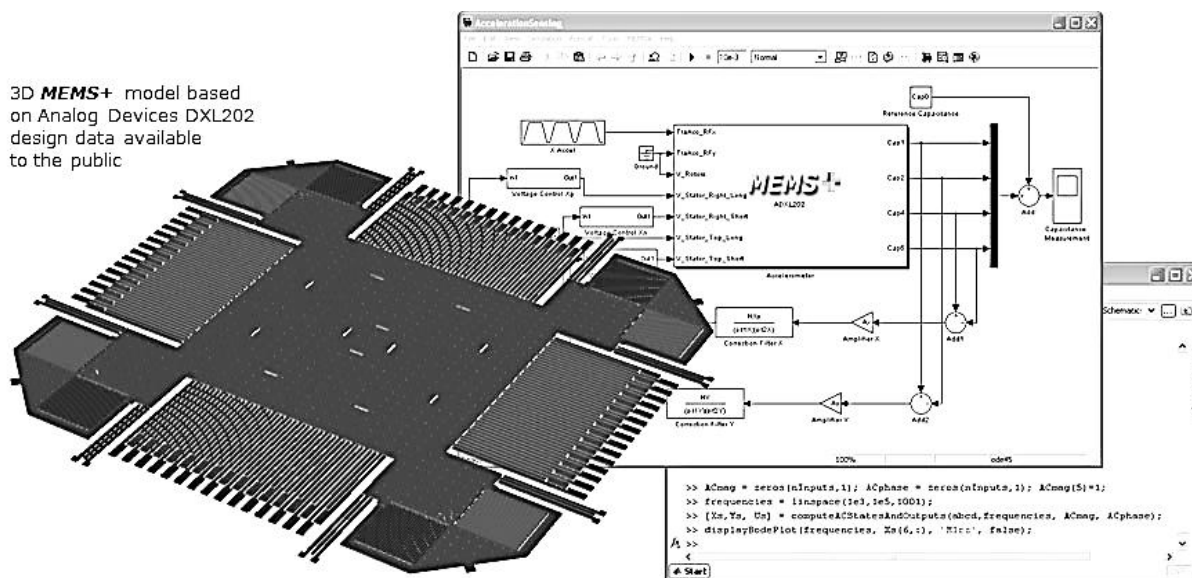


Рисунок 4.1 – Основне вікно програми MEMS+. Тривимірна модель акселерометру AD DXL 202

Програма MEMS+ для MATLAB дозволяє розробникам пристроїв MEMS моделювати свою конструкцію у звичному середовищі MATLAB та/або Simulink та передавати автоматично створені елементи високого порядку для продовження роботи в програмах проектування архітектури системи та розробки інтегральної схеми.

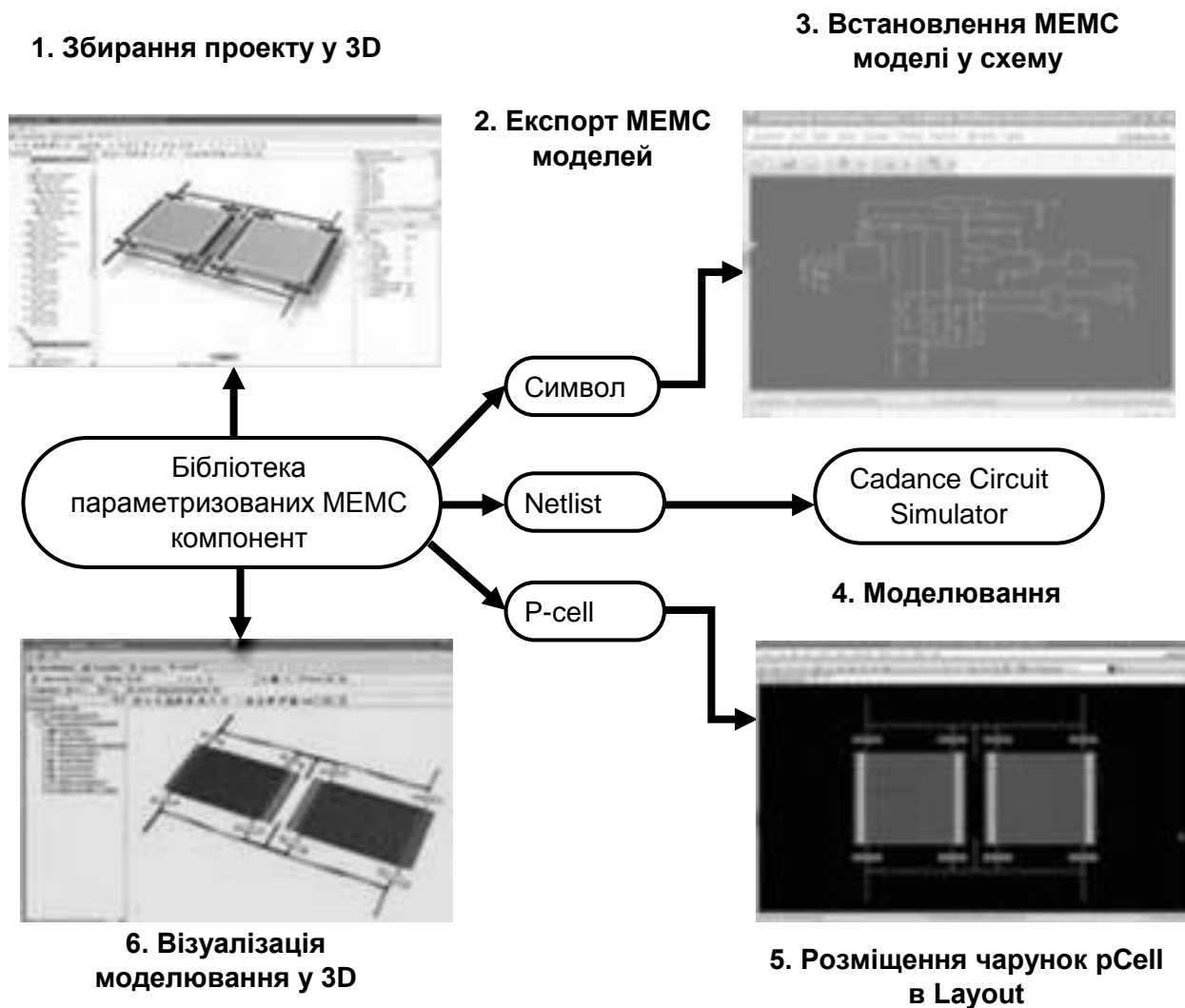


Рисунок 4.2 – Етапи проектування у програмі MEMS+

За допомогою додатка MEMS+ Scene3D всі результати моделювання, отримані за допомогою MATLAB або Simulink, можна відобразити як повну контурну тривимірну анімацію.

Програма MEMS+ – це дизайнерське рішення для швидкого моделювання мікроелектромеханіки на рівні пристрою чи системи. Завдяки MEMS+ для MATLAB та Simulink проекти, створені в додатку MEMS+ Innovator, одразу доступні як моделі, що сумісні з програмами Simulink або MATLAB. Таке рішення розширює можливості аналізу від чистого моделювання перехідного процесу до статичного, модального та змішаного аналізу. Результати моделювання в програмах MATLAB або Simulink можна завантажити в модуль MEMS+ Scene3D для аналізу тривимірної моделі.

Програма MEMS+ Innovator дозволяє побудувати потрібний MEMC-пристрій у вигляді принципової схеми з спеціальних бібліотечних блоків, що являють моделі різних елементів пристроїв MEMC. Ці моделі дають можливість моделювати електричну та механічну поведінку пристрою, також сформувати його 3D модель. Маршрут об'єднаного проектування у САПР фірм Cadence і Coventor відображено на рис. 4.3.

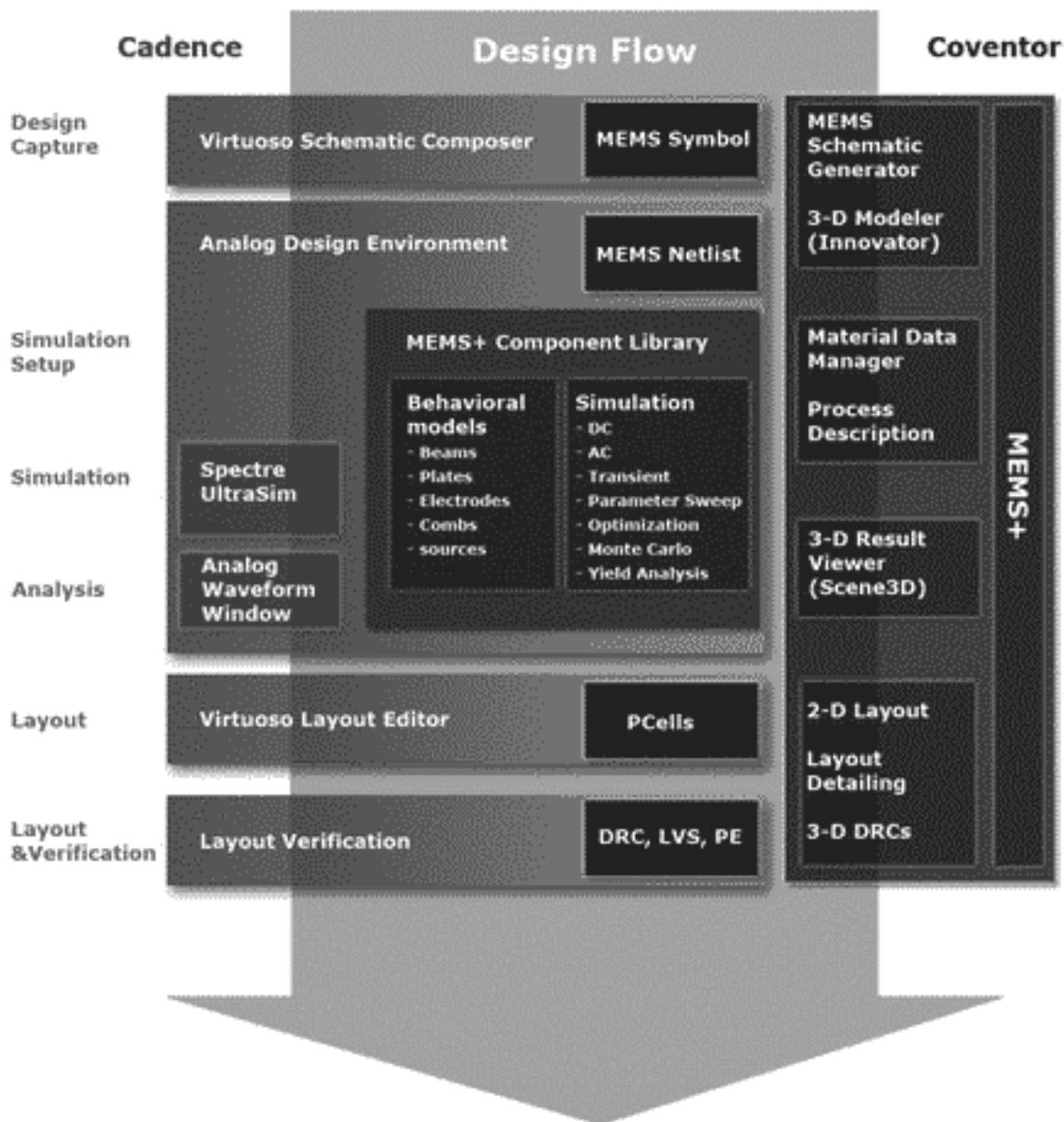


Рисунок 4.3 – Маршрут проектування, який суміщає програмні продукти фірм Cadence і Coventor

Особливості програми MEMS+ для MATLAB та Simulink:

- Графічний інтерфейс користувача MEMS+ GUI формує файли експорту в Simulink для автоматичного створення параметричної моделі;

- Кількість елементів структури та параметрів моделі формується користувачем;
- Швидке моделювання на системному рівні;
- Точне мультифізичне моделювання процесів;
- Підтримка статичних, статично-змінних моделей і моделювання перехідних процесів;
- Широкий інтерфейс сценаріїв MATLAB для імпорту: маніпулювання та корекція моделі безпосередньо з командного рядка MATLAB.

4.1.1 Моделювання пристрою в MATLAB

Програма MEMS+ для MATLAB дозволяє розробнику мікромеханіки швидко звузити кількість варіантів оптимальної геометрії пристроїв MEMS, не витрачаючи дорогоцінний час на дослідження кожної з точок сітки та обчислювання масиву параметрів інструментами FEA. Сумісне моделювання MEMS+ з MATLAB звільнює конструкторів мікросистем від дослідження фізики пристроїв, таких як механічні характеристики або ємнісні зв'язки, щоб визначити вплив зміни розміру або геометрії конструкції.

На рис. 4.4 як приклад показано частотну характеристику кільцевого гіроскопа з електростатичним керуванням, отриману із застосуванням обчислювачів MATLAB.

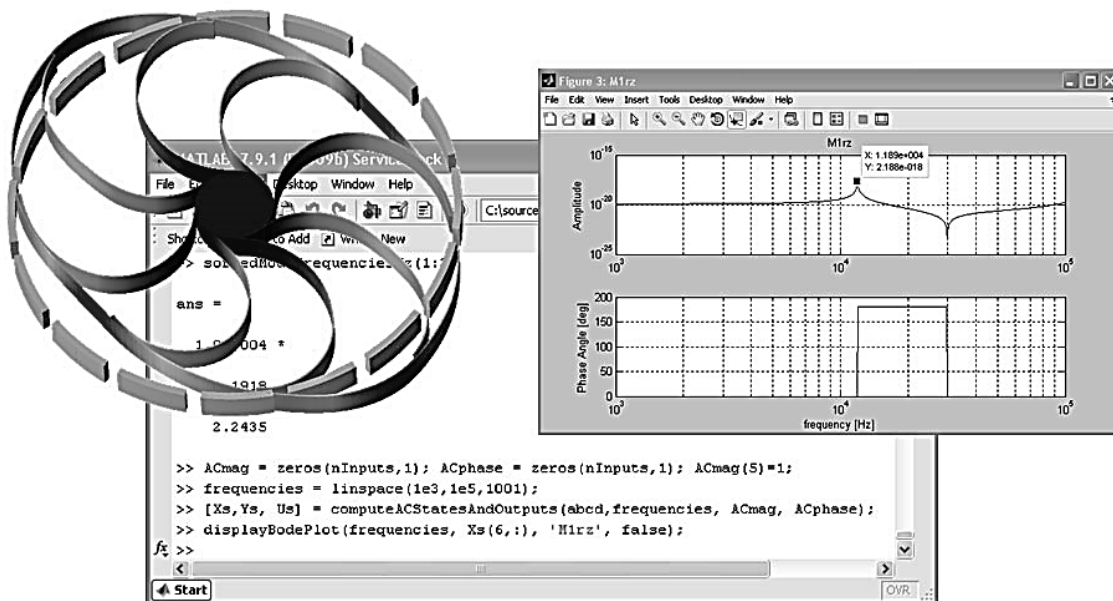


Рисунок 4.4 – Частотна характеристика кільцевого гіроскопа з електростатичним керуванням (MEMS+ плюс MATLAB)

Програма MEMS+ для MATLAB надає розробникам пристроїв MEMS інтерфейс доступу до потужної бібліотеки моделей програми Coventor безпосередньо з командного рядка. Використовуючи сценарії програми MATLAB, розробники можуть глибше досліджувати можливості конструювання.

Сценарії розрахунків підтримують обчислення процесів на постійному, змінному струмі, модальне, змішане та перехідне моделювання, не вимагаючи застосування додаткових інструментів. Всі результати моделювання MATLAB можуть бути знову завантажені у модуль MEMS+ Scene3D для двовимірного та тривимірного перегляду.

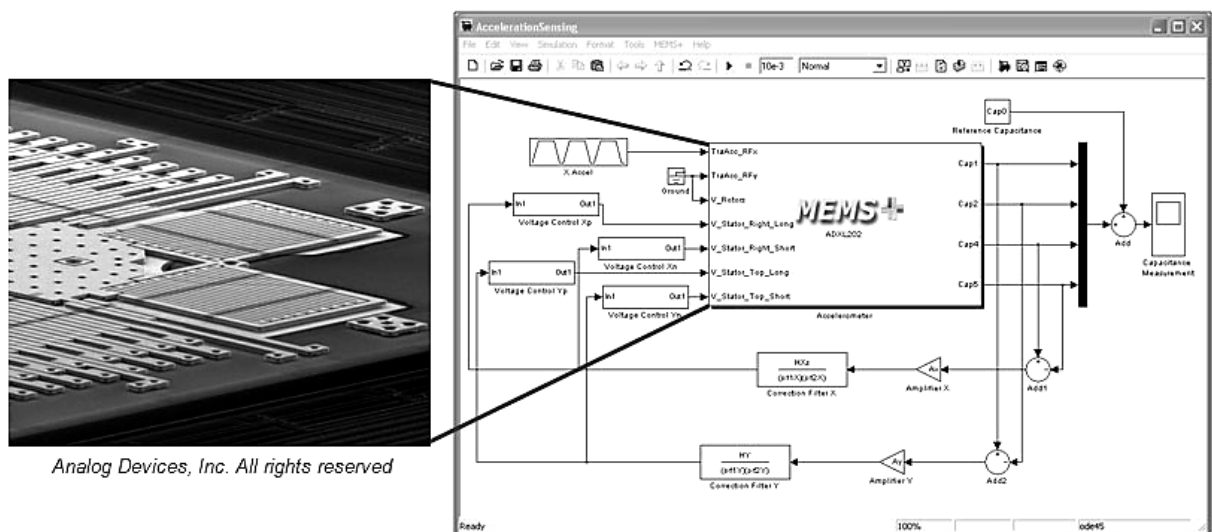
Особливості MEMS плюс MATLAB:

- Наявність сценаріїв командного рядка MATLAB для імпорту дизайну з програми MEMS+;
- Наявність сценаріїв моделювання командного рядка MATLAB для швидкого обчислення параметрів проекту;
- Можливість точного мультифізичного моделювання.

4.1.2 MEMS+ симуляція системи в програмі Simulink.

Інженери, які розробляють засоби керування та архітектуру системи, зазвичай використовують Simulink для проектування електронних контурів управління пристроїв MEMS та схем обробки сигналів. Для досягнення оптимального результату потрібна швидка і точна модель пристрою MEMS в середовищі моделювання Simulink. Моделювання MEMS на системному рівні необхідне для проектування контролерів, підсилювачів, фільтрів та для прогнозування впливу зміни виробничого процесу на якісні показники продукту.

Програма Simulink дозволяє створити потрібну модель пристрою, імпортувавши тривимірну модель з додатку MEMS+ Innovator (рис. 4.5). Моделі, створені програмою MEMS+, можна застосувати в великих системах, складених з компонентів стандартної бібліотеки Simulink або компонентів доданих користувачем. Моделі, створені програмою MEMS+ виходять далеко за рамки наближень першого порядку.



Analog Devices, Inc. All rights reserved

Рисунок 4.5 – Проектування контурів управління MEMS та схем обробки сигналів для акселерометра

Всі створені моделі за своєю суттю є параметричними. Будь-яка кількість матеріалів, процесів або геометричних змінних, застосованих у схемі Innovator, зберігається у створеному символі Simulink (рис. 4.6).

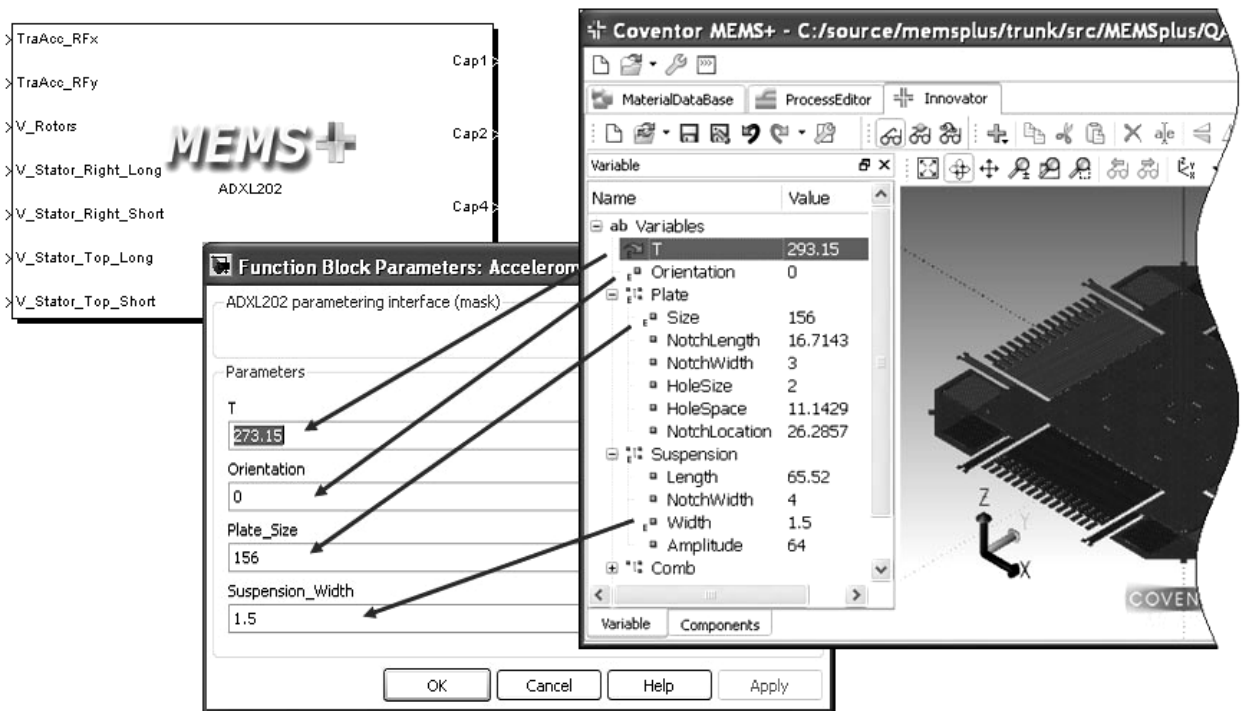


Рисунок 4.6 – Завдання параметрів моделі в програмі Simulink

Крім того, середовище моделювання MEMS Innovator дає користувачеві повний контроль над кількістю та назвами пристроїв вводу–виводу, створених під час імпорту моделі (рис. 4.5).

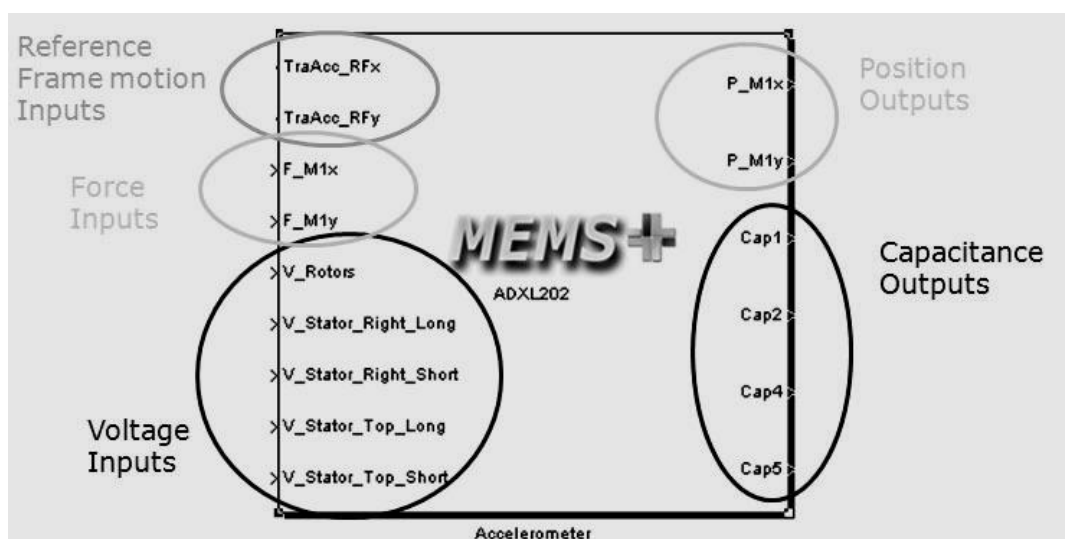


Рисунок 4.7 – Введення додаткових призначень для пристроїв вводу–виводу двовісного акселерометра

У наведеному прикладі (рис. 4.5) для моделювання системи на базі двовісного акселерометра в якості входів символу пристрою MEMS встановлено: прискорення X і Y (TraAcc_RFx, TraAcc_RFy), напругу для окремих гребінців статора (V_Stator) та інерційну масу (V_Rotors). А для вихідних даних додано 4 ємності (Cap) між інерційною масою та чотирма гребінцями статора. Для цілей діагностики виставлено точку на моделі для прямого застосування вводу зовнішньої сили та положення інерційної маси (P_M1x , P_M1y).

Після створення тривимірної моделі в MEMS+ вона готова до моделювання. Програма MEMS+ автоматично створює символ для симуляції системи в Simulink. Параметри моделі можна змінювати в залежності від матеріалів, технологічного процесу та геометрії, а це означає, що розробнику ніколи не доведеться відтворювати модель у реальному вигляді у разі зміни технологічного процесу. Програма MEMS+ для Simulink розширює можливості аналізу, які є в програмі Simulink, від чистого моделювання перехідних режимів до режимів постійного струму, коефіцієнтів передачі за напругою або струмом, модального аналізу без застосування додаткових інструментів від програми MathWorks. Результати моделювання MATLAB або Simulink можна завантажити в модуль Scene3D для тривимірного відображення та аналізу.

Особливості MEMS + для Simulink:

- Наявність графічного інтерфейсу користувача програми MEMS+ в програмі Simulink для автоматичного створення параметричної моделі;
- Довільна кількість точок та параметрів симуляції, які зумовлює користувач;
- Швидке моделювання системи;
- Точне мультифізичне моделювання на системному рівні.

Процедура проектування MEMS+ для Simulink включає наступні кроки:

1. Побудова граничних елементів високого порядку в інтерфейсі користувача MEMS+ 3-D, вибравши необхідні блоки з бібліотеки параметризованих компонентів MEMS. В рамках цього процесу конструктор MEMS може вказати, які параметри будуть експортовані в середовища MATLAB або Simulink;

2. Після завершення цього етапу проекту MEMS+ автоматично генерує символ і розміщує його у вікні редактора моделі Simulink;

3. Включити створені програмою MEMS+ символи у загальну систему, що побудована на базі компонентів стандартної бібліотеки Simulink;

4. Запустити моделювання за допомогою вбудованих рішень для Simulink. Симулятор підключиться через S-функціональний інтерфейс Simulink до бібліотеки компонентів MEMS+ для оцінювання елементів високого порядку MEMS на кожному кроці процесу. На додаток до стандартних симуляцій перехідних процесів, MEMS+ забезпечує додатково аналіз в статичному та динамічному режимах, модальний аналіз.

5. По завершенні моделювання результати можна дослідити в MEMS+ Scene3D у вигляді двовимірних графіків або контурних тривимірних анімацій.

4.2 Програма MEMS+ для спільного моделювання пристроїв MEMS та ІС у програмі Cadence Virtuoso

Пристрої MEMS поєднують елементи мікромеханіки та типові електронні схеми систем контролю та керування, інтерфейси, пам'ять, процесорні ядра тощо.

Інженери – розробники електронних схем часто використовують Cadence Virtuoso для проектування електронних схем для обробки аналогового/змішаного сигналу, які також застосовується в пристроях MEMS. Для якісної реалізації спільної розробки системи потрібні швидкі та точні моделі мікромеханіки, поєднанні з бібліотекою електронних компонентів Cadence. Таким чином, механічна модель MEMS використовується як компонент загальної схеми для виконання сумісної симуляції системи MEMS з ІС (рис. 4.8). Спільне моделювання має важливе значення для перевірки конструкції ІС та прогнозування впливу варіацій виробничих процесів на якість готової продукції.

Інтеграція набору інструментів Coventor з Cadence полегшує необхідний обмін моделями між інженерами MEMS та розробниками ІС. Формування елемента бібліотеки Cadence як параметричної моделі, так і «пакування» в корпус Pcell не потребують ніяких додаткових процедур. Використовуючи графічний інтерфейс імпорту у диспетчері бібліотек Cadence, “*symbol view*”, “*model view*” та “*layout view*”, елемент MEMS можна створити автоматично з будь-якої схеми Innovator (рис. 4.9).

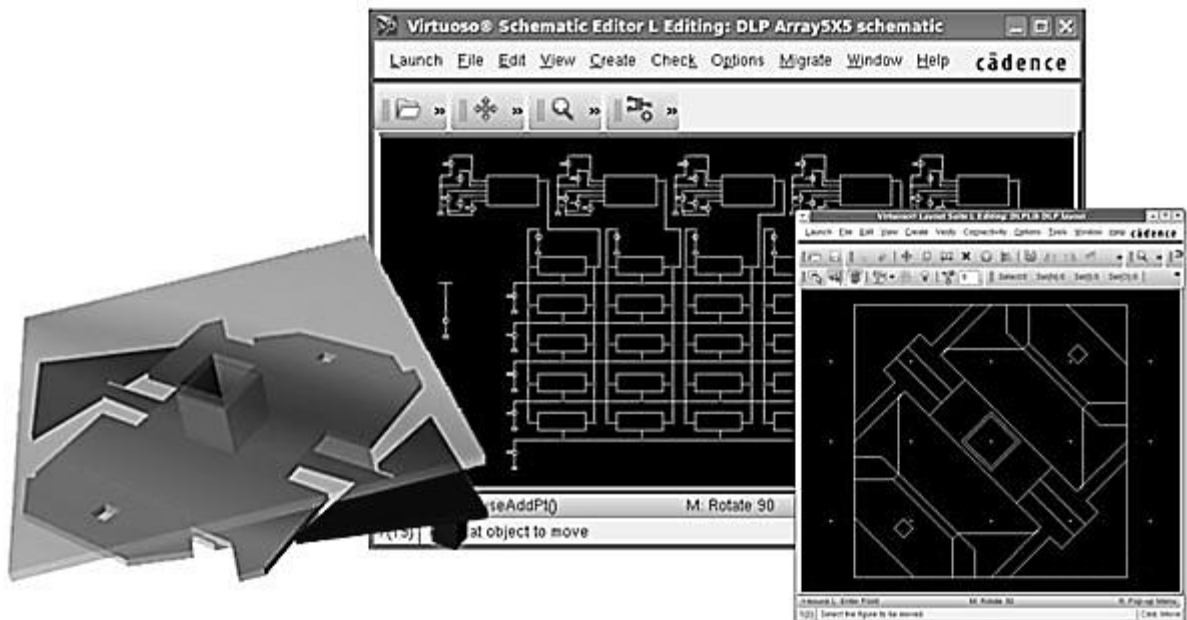


Рисунок 4.8 – Спільне моделювання мікро механіки та електронної системи контролю та керування в Cadence Virtuoso

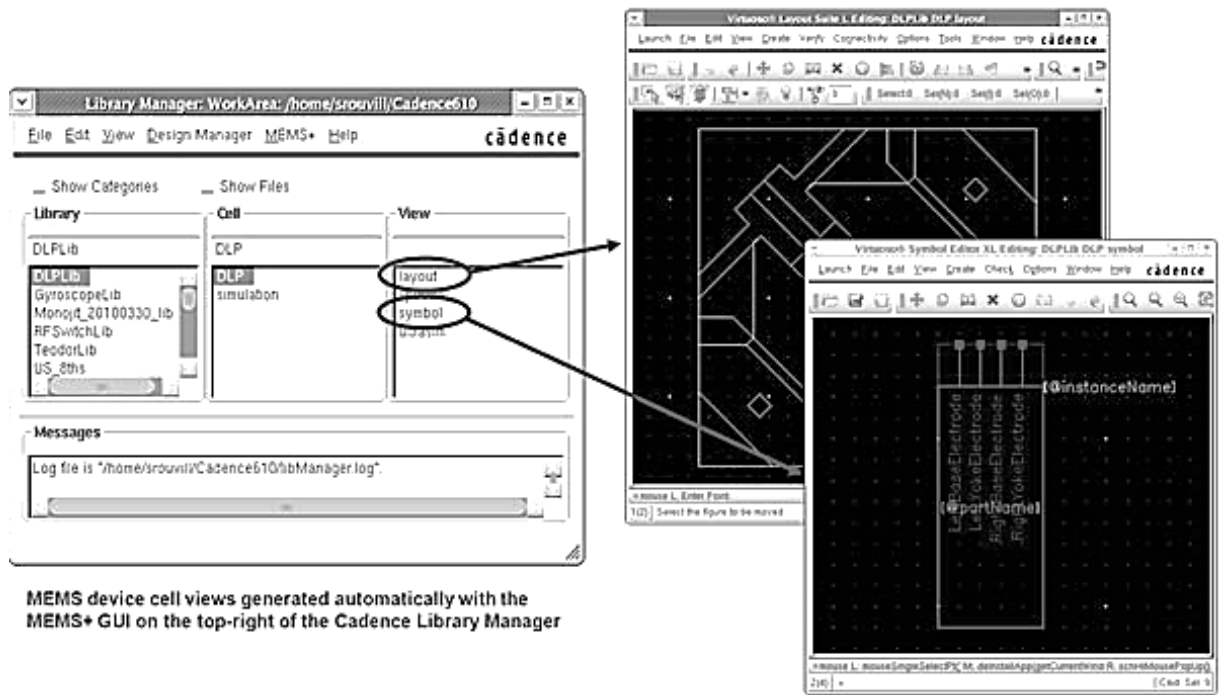


Рисунок 4.9 – Створення елемента MEMS зі схеми MEMS+Innovator

Конструкції, що входять до додатку Innovator – це складові будівельних блоків з бібліотеки моделей MEMS. Відповідний додаток Cadence генерує схематичний символ та сприймання моделі з обраної схеми Innovator, використовуючи графічний інтерфейс імпорту з MEMS+ в редакторі бібліотек (рис. 4.10). Матеріал, процес або геометричні змінні, встановлені у схемі Innovator, зберігаються у створених поданнях Cadence.

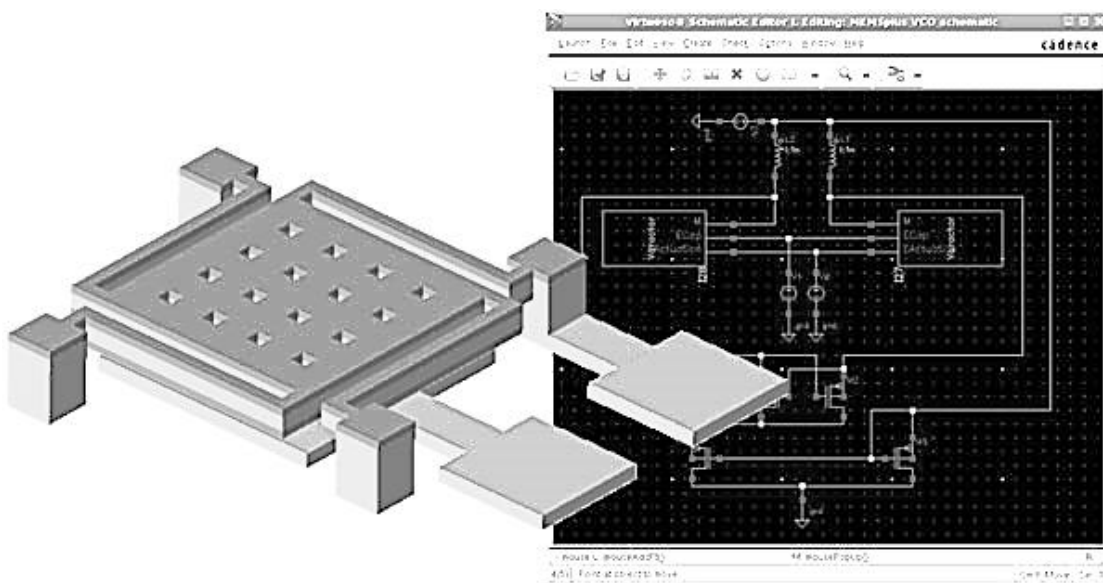


Рисунок 4.10 – Мікро механічна конструкція, побудована у додатку MEMS+ Innovator, і схема пристрою з використанням моделі в Cadence Virtuoso

Моделювання пристрою MEMS у програмі Cadence.

Програма MEMS+ для Cadence дозволяє створювати моделі пристроїв MEMS, які працюють у симуляторах Cadence Spectre та SpectreRF як елемент майбутньої інтегральної схеми.

Крім того, середовище моделювання MEMS надає користувачеві повний контроль над кількістю та призначенням контрольних точок, створених під час імпорту моделі. MEMS+ для Cadence підтримує не тільки електричні контрольні точки, але й точки, що відбивають положення, кути, сили, крутні моменти, навантаження під тиском, прискорення, кутові швидкості, а також параметри ємності та опору. Кінцеві елементи високого порядку охоплюють різні фізичні ефекти MEMS: електростатичні, механічні, п'єзоелектричні та моделювання контактних явищ.

На рис. 4.11 показано умовно-графічне позначення (символ) акселерометра, створений у програмі MEMS+, та схема управління на базі сигма-дельта модулятора, виконана з компонентів зі стандартної бібліотеки Cadence. Моделювання перехідного процесу всієї системи на стандартному ПК займає декілька секунд.

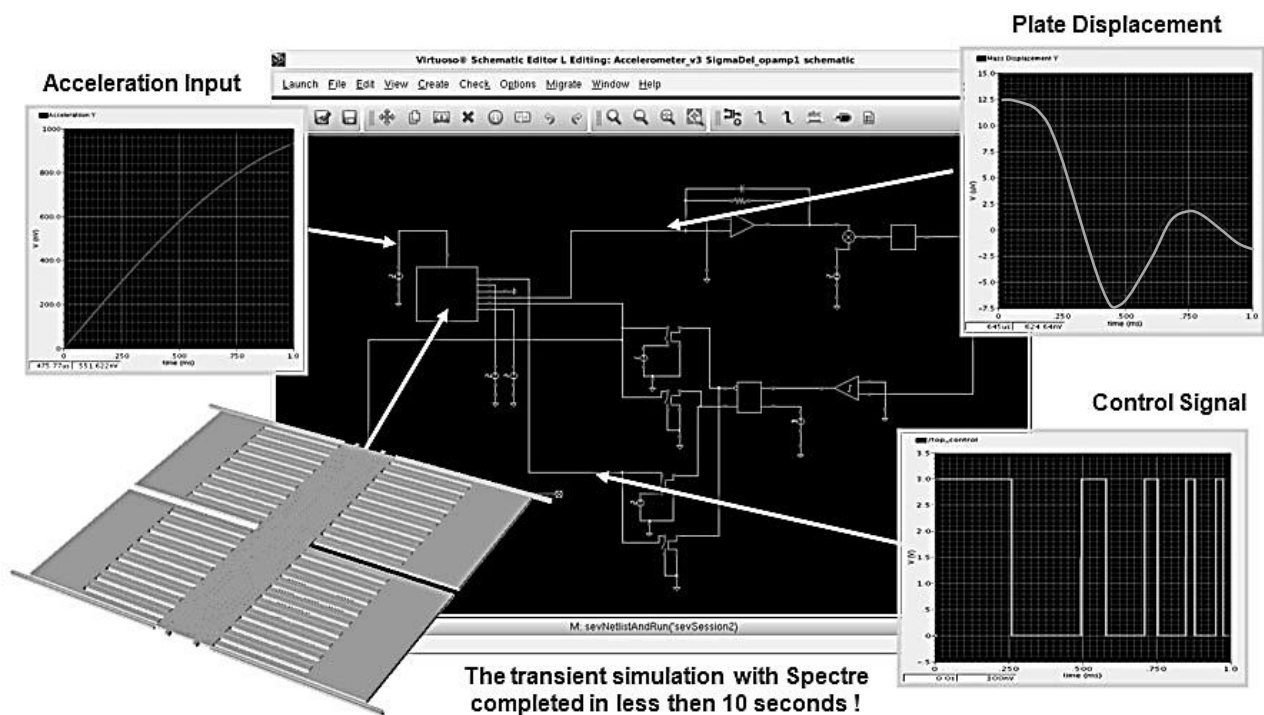


Рисунок 4.11 – Моделювання перехідного процесу всієї системи акселерометру у симуляторі Cadence

Завдяки програмі MEMS+ для Cadence, проекти, створені у додатку MEMS+ Innovator, можна автоматично перетворити на моделі, сумісні з технологіями розробки та підготовки виробництва інтегральних схем, та параметричний макет (PCells) для середовища розробки IC Cadence Virtuoso. Програма MEMS+ для Cadence підтримує спільне моделювання MEMS+ плюс

IC у програмах Spectre та SpectreRF. Результати моделювання можуть бути знову завантажені в модуль MEMS+ Scene3D для візуалізації проекту в тривимірному зображенні.

Симуляторі схеми додатку Spectre містить декілька додатків різного призначення:

- Аналоговий симулятор Spectre Accelerated Parallel Simulator (APS) забезпечує однакову точність моделювання спектру за 5-кратним скороченням часу порівняно з оригінальним обчислювачем додатку Spectre;

- Specter X Simulator вирішує масштабні завдання з імітаційної верифікації з 10-кратною швидкістю та 5-кратною ємністю, а також масштабованим та багато паралельним моделюванням для хмарних обчислень;

- Spectre (XPS), розширений симулятор розділення, забезпечує високоєфективне та потужне моделювання FastSPICE, необхідне для роботи з пам'яттю та змішаним аналого-цифровим сигналом;

- Specter AMS Designer, симулятор змішаного сигналу програми Cadence, – поведінковий симулятор системного рівня та рівня транзисторів, використовується разом із технологією імітації Cadence Xcelium[®];

- Spectre RF Option забезпечує точне та швидке моделювання для радіочастотних кіл мікросхем (RFIC кіл). Опція включає симуляцію режимів динаміки та статички, режимів малого сигналу та шуму разом із можливостями аналізу гармонійних процесів для підвищення продуктивності без втрати точності;

- Опція Specter CPU Accelerator дозволяє багатопотокове моделювання для аналізу перехідних та стаціонарних процесів, і є надзвичайно корисним для верифікації паразитних параметрів конструкцій;

- Опція Spectre Power – це спеціалізований симулятор рівня транзисторів для аналізу процесів міграції носіїв та процесів термодинаміки, який використовується в якості механізму аналізу всередині спеціального додатку Cadence Voltus[™] – Fi Custom Power Integrity.

Особливості програми MEMS+ для Cadence.

- Простий у використанні MEMS+ графічний інтерфейс користувача – GUI в редакторі бібліотек Cadence Virtuoso для автоматичної генерації моделі та параметричного макету Pcell;

- Кількість точок контролю та параметри симуляції визначаються користувачем;

- Швидке моделювання сполученої схеми пристрою в симуляторах Cadence.

Потік проектування у програмі MEMS+ для Cadence включає наступні етапи (рис. 4.12):

1. Створення проекту в додатку MEMS+ Innovator з блоків параметризованих тривимірних моделей бібліотеки компонентів. В рамках цього процесу розробник може вказати, які параметри будуть призначені для моделювання в середовищі проектування IC.

2. Імпортування закінченої схеми із додатку Innovator в диспетчер бібліотек Cadence, який автоматично створить модель та символ Cadence. Кількість та назви символічних контрольних точок задаються розробником і фізично являють собою електричні з'єднання з пристроєм MEMS.

3. Розміщення символу MEMS+ в схематичному редакторі Virtuoso. Для конструктора MEMS в схемі може бути лише кілька інших компонентів, необхідних для забезпечення електричного збудження або обробки вихідного сигналу. Однак для розробника ІС схематично має бути включено повний проект ІС.

4. Спільне моделювання в симуляторі схеми Spectre. Симулятор з'єднається через інтерфейс моделі Cadence *C Model Interface* (CMI) з бібліотекою компонентів MEMS+ для оцінки поведінки моделі пристрою у кожній точці симуляції за часом або частотою.

5. Перегляд результатів моделювання пристрою в інтерфейсі користувача MEMS+, в тому числі анімація руху мікромеханічного пристрою.

6. Створення параметризованої комірки макету пристрою MEMS (PCell).

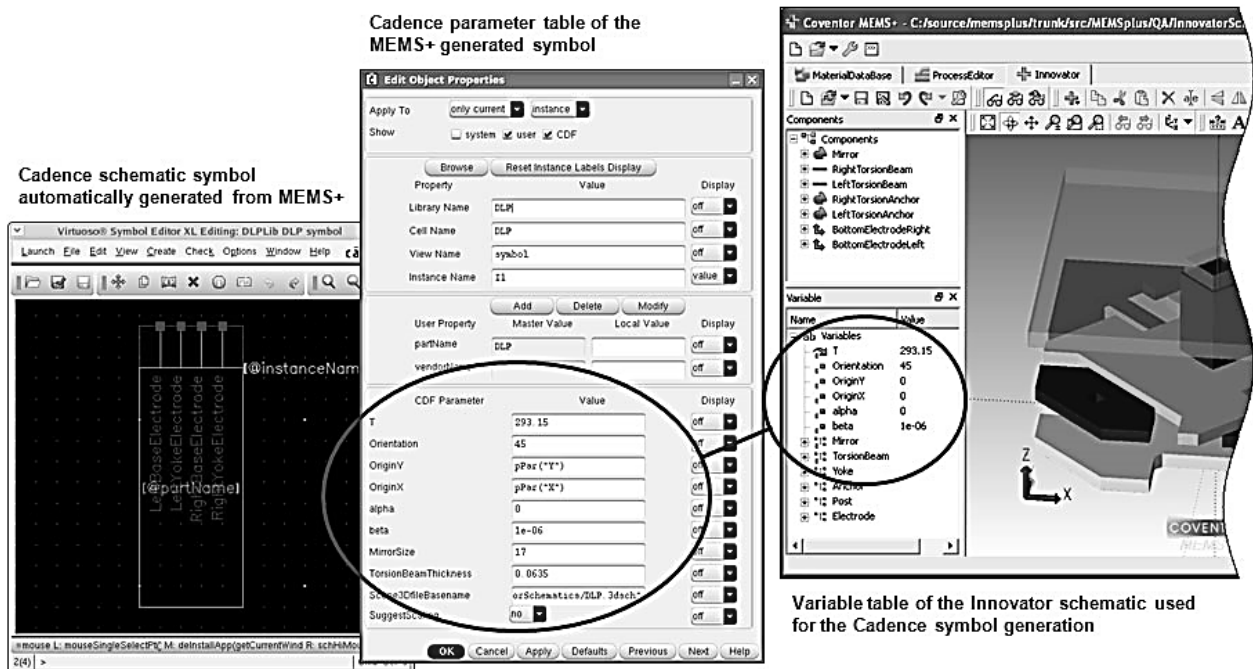


Рисунок 4.12 – Етапи проектування пристрою MEMS+ в програмі Cadence

Наслідком інтеграції програми MEMS+ та програми Cadence є автоматизована генерація параметризованої чарунки макету Cadence layout PCells.

На заключній стадії проектування комплект документації направляється на фабрику. Параметризовані чарунки (Pcells) забезпечують сучасний рівень автоматизації проектування, мінімізуючи час на трасування кристалу. Комірки Pcells дозволяють змінювати розмір, форму чи вміст комірки. Вони також підвищують рівень абстракції до рівня компонентів, що прискорює задачу компонування та зменшує похибки шляхом спрощення складних форм, які

потім можуть бути створені та відредаговані за допомогою змінних налаштувань (рис. 4.13).

4.3 Анімація результатів у додатку MEMS+ Scene3D.

Візуалізація механічного руху складна задача для стандартних засобів проектування. Результати зміни напруги та струму у часі або зміни їх частоти можуть відображатися графічно у двовимірних графіках. Таких графіків, як правило, достатньо для розуміння процесів у електричних схемах. Моделювання MEMS, однак, передбачає просторові переміщення та/або обертання механічних конструкцій. Схематичні символи, генеровані MEMS+, можуть виявляти механічні вихідні сигнали, пов'язані з кількома ступенями свободи, такими як просторові переміщення, обертання, сили або крутні моменти. Подібно до моделювання електричних кіл, ці неелектричні величини моделювання MEMS можуть відображатися на двовимірних графіках. Однак, при цьому розробник обмежується баченням руху поодинокого ступеня свободи одночасно, наприклад, рух однієї жорсткої пластини вздовж осі X як функція часу. Ці графіки є недостатніми, враховуючи, що для повного тлумачення лише одного жорсткого тіла потрібно шість двовимірних графіків (три для поступальних рухів і три для обертання).

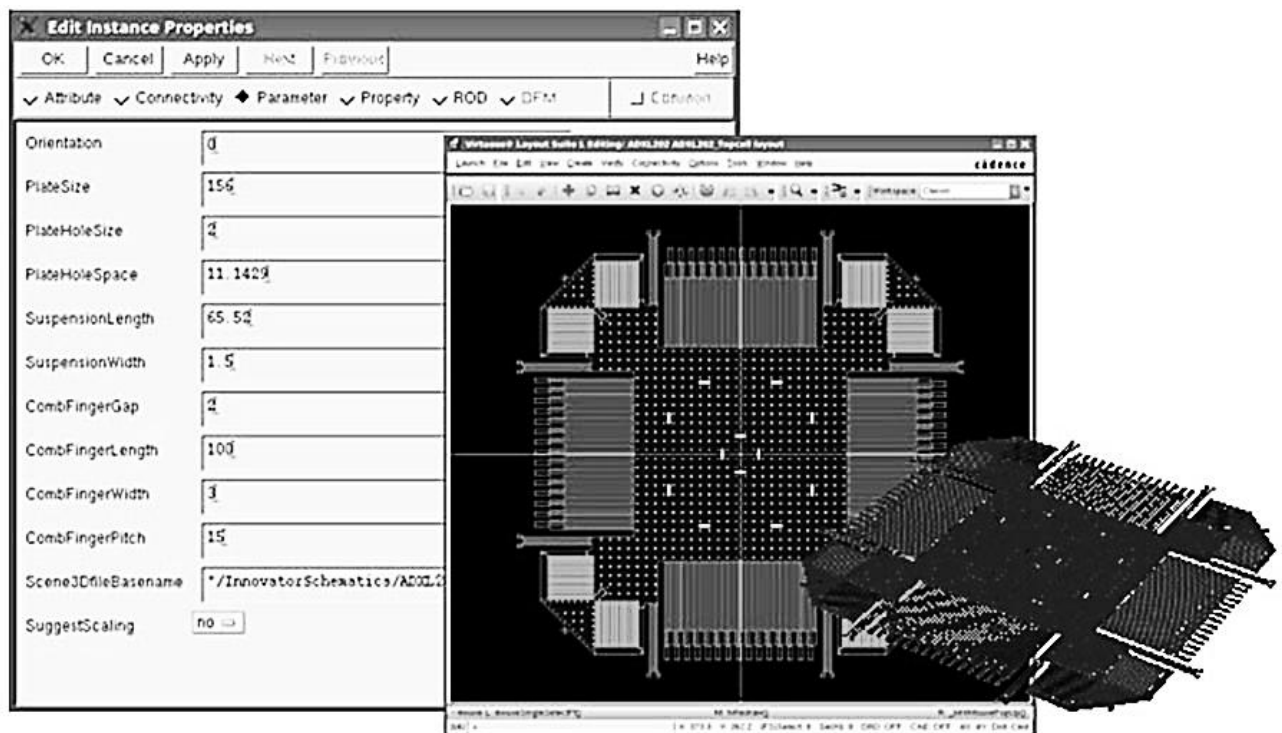


Рисунок 4.13 – Автоматизована генерація параметризованої комірки макету в layout PCells

Додаток MEMS+ Scene3D є важливим елементом візуалізації результатів моделювання для розробника. Scene3D дозволяє імпортувати результати моделювання MATLAB Simulink або Cadence Virtuoso в середовище MEMS+3D. Перетворюючи дані симуляції в тривимірні анімації, Scene3D надає дизайнеру MEMS детальну інформацію про те, що саме відбувається з пристроєм, коли він піддається електричній або механічній дії. Анімація результатів у додатку Scene3D створюються шляхом обробки даних особливим 3D-генератором, що є пов'язаним з кожним компонентом бібліотеки компонентів MEMS+ (рис. 4.14).

Перегляд результатів моделювання, отриманих у програмах MATLAB, Simulink або Cadence Virtuoso можна реалізувати за допомогою додатку Scene3D елементарно вибравши відповідний файл в інтерфейсі користувача програми MEMS+. Таким чином можна передивитись результати симуляції на постійному або змінному струмі, результати модального аналізу та результати моделювання перехідних, фазових або частотних характеристик.

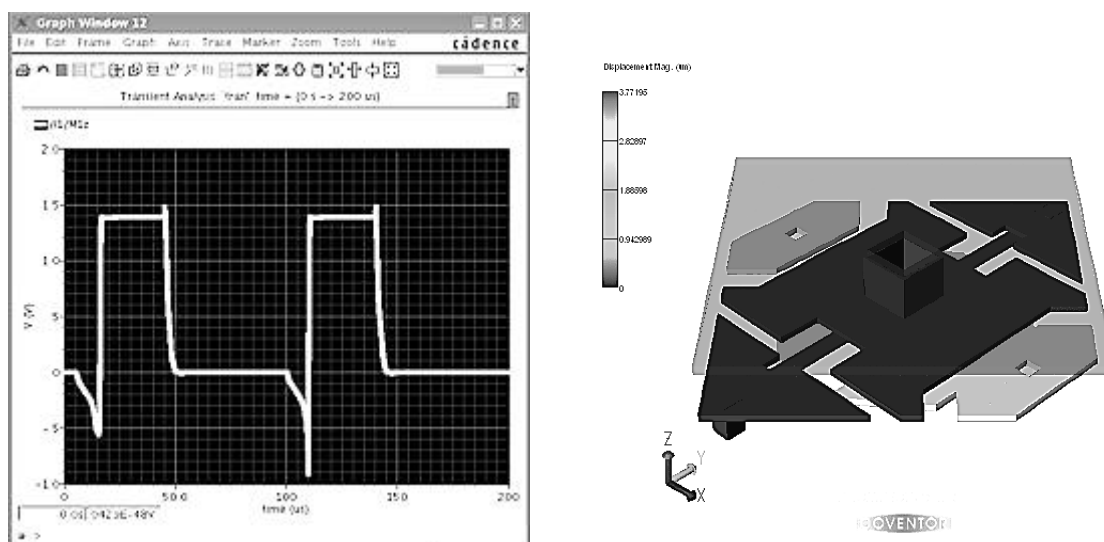


Рисунок 4.14 –Перехідна модель результату моделювання руху однієї комірки мікродзеркала DLP в програмі Cadence та візуалізація руху в додатку Scene3D (відображено один кадр анімації).

Особливості додатку Scene3D:

- Візуалізація та анімація результатів моделювання в 3–D просторі;
- Зміна масштабу моделі для кращого перегляду;
- Відображення форми сигналу;
- Запис анімації.

Результати візуалізації за допомогою вбудованого інструменту двовимірної графіки дозволяють розробнику легко та безперешкодно переходити між задачами моделювання на рівні кола, блоку та системи. Фундаментом платформи є уніфікований набір технологій, якими оперують всі інструменти – аналізатори сигналів, моделі пристроїв, поведінкове

моделювання Verilog–А, формати вхідних даних, вихідних даних та інші, гарантуючи тим самим послідовні та точні методи оцінки незалежно від вибраного засобу симуляції.

Нагадуємо, що програма MEMS+ для Cadence підтримує спільне моделювання MEMS+ плюс IC у програмах Spectre та SpectreRF. Результати моделювання можуть бути знову завантажені в модуль MEMS+ Scene3D для візуалізації проекту в тривимірному зображенні.

4.4 Контрольні запитання і завдання

1. Охарактеризуйте етапи проектування у програмі MEMS+.
2. Наведіть маршрут проектування, який суміщає програмні продукти фірм *Cadence* і *Coventor*.
3. Особливості моделювання пристрою MEMS в MATLAB
4. Охарактеризуйте кроки процедури проектування MEMS+ для Simulink.
5. Наведіть процес спільного моделювання пристроїв MEMS та IC у програмі Cadence Virtuoso.
6. Охарактеризуйте потік проектування у програмі MEMS+ для Cadence.
7. Яким чином відбувається анімація результатів у додатку MEMS+ Scene3D?

5 ПАКЕТ COMSOL MULTIPHYSICS

Пакет COMSOL Multiphysics – це інтегрована платформа для моделювання, яка містить усі його етапи: від створення геометрії, визначення властивостей матеріалів і опису фізичних явищ, до налаштування розв'язання та процесів подальшої обробки. В основі його функціонування лежить програмне забезпечення для аналізу методом скінчених елементів, розв'язування та моделювання для різноманітних фізичних та інженерних додатків, особливо для об'єднаних явищ чи поєднаних фізичних процесів. На додачу до традиційного, заснованого на фізиці користувальницького інтерфейсу, COMSOL також дозволяє введення кількох систем диференціальних рівнянь з частинними похідними (partial differential equations).

Програмний пакет COMSOL Multiphysics містить готові фізичні інтерфейси для моделювання різноманітних фізичних явищ. Фізичні інтерфейси – це спеціалізовані інтерфейси користувача для окремої інженерної діяльності або дослідницької області, які дозволяють досконально керувати моделюванням досліджуваного фізичного явища – від завдання вихідних параметрів моделі та дискретизації до аналізу результатів. Усі зміни в макеті зберігаються опісля закінчення сеансу роботи і знову відображаються за наступним запуском COMSOL Multiphysics.

Моделювання в COMSOL Multiphysics® дозволяє досліджувати в одному програмному середовищі явища електромагнетизму, конструювання механіки, акустики, гідродинаміки, тепловіддачі і хімічних реакцій, а також будь-яких інших фізичних явищ, які можуть бути описані системами диференціальних рівнянь систем в частинних похідних. Це дозволяє поєднати всі ці фізичні явища в одній моделі.

Базовий пакет COMSOL Multiphysics® містить інструменти з геометричного моделювання для створення елементів геометрії на основі твердих тіл, поверхонь, кривих та булевих операцій. Остаточна геометрія визначається послідовністю операцій, кожна з яких може отримувати вхідні параметри, що полегшує редагування та параметричні дослідження мультіфізичних моделей. Зв'язок між визначенням геометрії та фізичними налаштуваннями є двобічним – будь-яка зміна геометрії автоматично призводить до відповідних змін у пов'язаних налаштуваннях моделі.

Пакет COMSOL Multiphysics® містить інтерпретатор рівнянь, який оброблює математичні вирази, формули, рівняння та інші математичні описи перед створенням чисельної моделі. Можливо додавати і налаштовувати вирази в фізичних інтерфейсах, легко пов'язавши їх один з одним для моделювання мультіфізичних явищ.

Основним продуктом є комплексне інтегроване середовище COMSOL Desktop. Це графічний інтерфейс користувача. Він призначений для розробки пристроїв, особливо тих, що функціонують на засаді взаємодії фізичних процесів і явищ, які характерні для своїх специфічних областей фізики. Графічний інтерфейс користувача COMSOL Desktop забезпечує повний доступ

до повноцінного інтегрованого середовища для моделювання. Робочий стіл гнучке налаштовується. Вікна можливо змінювати у розмірах, двигати, закріплювати та роз'єднувати.

Середовище розробки додатків Application Builder дозволяє створювати спеціалізовані додатки, що базуються на фізичних моделях з користувальницьким інтерфейсом, що дозволяє уникати деталей імітаційної моделі з точки зору кінцевого користувача. В програмі Application Builder доступні дві процедури для створення додатків: перетягування (drag-and-drop) в редакторі форми та програмування в редакторі методу. Також є можливість додавати деталі з моделі або задавати їх програмно з редактора методу.

Пакет COMSOL також надає прикладний програмний інтерфейс (API). Інтерфейс API, вбудований у модуль Multiphysics і призначений для використання з мовою [Java](#), надає можливість запуску програмного забезпечення, компілюючи об'єктно-орієнтований код. Цей інтерфейс також використовується в редакторі методу в конструкторі додатків. Також є можливість експорту моделей до [MATLAB](#).

Фізичний конструктор, доданий у COMSOL дозволяє створювати користувальницькі фізичні моделі, які будуть доступні в Desktop і виглядатимуть точно так само, як і вбудовані. Нові версії конструктора додатків витісняють фізичний конструктор як засіб для створення користувальницьких інтерфейсів для власних потреб.

5.1 Аналіз мікро електромеханічних систем в модулі MEMS.

5.1.1 Моделювання мікроелектромеханічних систем

Проектування і моделювання мікроелектромеханічних систем (MEMS) – це особлива інженерна дисципліна. При конструюванні резонаторів, гіроскопів, акселерометрів і приводів з малими лінійними розмірами необхідно враховувати вплив декількох фізичних ефектів на їх роботу. Для успішного моделювання поведінки MEMS в модулі COMSOL Multiphysics[®] є призначені для користувача компоненти з відповідними засобами симуляції, які називаються *інтерфейсами для фізики*. Інтерфейси для фізики поєднують різні фізичні явища, включаючи взаємодію електромагнітних полів з пристроями, вплив тепла на пристрої і взаємодію з рідиною. У таку модель можна включити різні чинники фізичного впливу: демпфірування в малих газових середовищах, анізотропні коефіцієнти втрат в твердих тілах і матеріалах з п'єзоефектом, анкерні втрати і термопружне демпфірування. При пружних коливаннях і хвилях ідеально узгоджені шари (структури) забезпечують відповідну сучасним вимогам ступінь поглинання енергії пружного взаємодії.

Інструменти моделювання п'єзоелектричних і п'єзорезистивних ефектів дозволяють досліджувати будь-які комбінації композитних п'єзопружних діелектричних матеріалів. У модулі MEMS є засоби аналізу стаціонарних і

перехідних режимів, а також пов'язаних з ними засоби аналізу власних частот, параметричного аналізу, аналізу квазістатичних і частотних характеристик. Також можна визначати зосереджені параметри ємності, повного опору і повної провідності, а також моделювати підключення до зовнішніх електричних кіл з використанням додатків SPICE. Модуль MEMC можна використовувати для дослідження впливу практично всіх явищ, пов'язаних з механікою в мікромасштабі.

Для прикладу розглянемо датчик тиску. Сигнал датчика тиску змінюється через зміну електричної ємності, викликаного деформацією пристрою. Деформація залежить від тиску і температури навколишнього середовища, використовуваних матеріалів і початкових напружень в матеріалах (рис. 5.1). Крива 1 – лінійна залежність ємності датчика від тиску; крива 2 – дійсна залежність ємності датчика від тиску; 3 – залежність ємності датчика від тиску з урахуванням впливу корпусу.

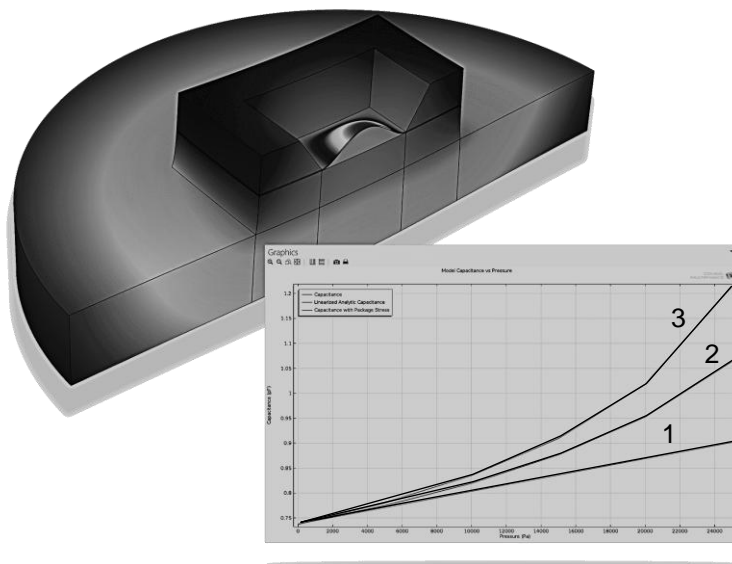


Рисунок 5.1 – Модель датчика тиску та обчислення залежності ємності датчика від тиску з урахуванням різних факторів

5.1.2 Стандартний алгоритм моделювання пристроїв MEMC в COMSOL Multiphysics®

Програма COMSOL Multiphysics містить модуль MEMC (Мікроелектромеханічні системи) з розширеними функціями. Моделювання пристроїв MEMC в модулі COMSOL Multiphysics починають з того, що в програмному додатку завдають геометрію пристрою за допомогою вбудованих засобів моделювання COMSOL або шляхом імпорту моделей сторонніх САПР. За необхідності можна імпортувати механічні моделі за допомогою модуля

CAD Import (імпорт даних з САПР) або за допомогою одного з продуктів LiveLink. Електронні схеми можна імпортувати за допомогою модуля ECAD Import (імпорт даних з ECAD). Після завдання геометричної моделі необхідно вибрати відповідні матеріали і додати відповідний інтерфейс для моделювання фізичних процесів (інтерфейс для фізики). В інтерфейсі слід задати початкові і граничні умови. Потім потрібно задати сітку координат для аналізу і вибрати спосіб обчислення. Нарешті, отримані результати візуалізуються, здійснюється їх обробка і, нарешті, вони експортуються до суміжних, або сторонніх додатків. До всіх цих етапів забезпечено доступ через середовище COMSOL Desktop. Засоби формування файлів експорту налаштовуються автоматично з угодами за замовчуванням, відповідно до кожного конкретного інтерфейсу. За необхідності досвідчений користувач може змінити налаштування додатків нижнього рівня.

Крім того, процес моделювання MEMC можна інтегрувати з Microsoft Excel. Додаток LiveLink for Excel дозволяє моделювати структури за описом, отриманим з інтерфейсу Excel, а також імпортувати і експортувати результати в графічному та текстовому (табличному) вигляді. Якщо є необхідність використовувати середовище відповідне до сценаріїв програми MATLAB, додаток LiveLink for MATLAB пропонує набір сумісних процедур, які доступні при спільній роботі обох програм. Результати моделювання можна експортувати з COMSOL в середовище MATLAB, включаючи перевірку матриці жорсткості і матриці системи.

Зображення можливо експортувати в один з поширених форматів, а анімації – в файли формату WebM або у вигляді GIF-анімацій, Adobe® Flash® або файли AVI. Звіти о проектах з моделювання можна експортувати у формат HTML (.htm, .html) або в формат Microsoft® Word® .doc.

Електростатичні приводи і електромеханіка. Зменшення розмірів пристрою викликає зростання ваги впливу електростатичних сил. Типове застосування модуля MEMC в цій області – це розробка та моделювання мікроелектромеханічних резонаторів з електростатичним збудженням. У модулі MEMC є спеціалізований інтерфейс для дослідження фізики та електромеханіки, який у випадку з резонаторами MEMC використовується для розрахунку зсуву резонансної частоти при зміні постійної напруги зміщення внаслідок зменшення жорсткості електромеханічної системи. Через малі розміри пристрою резонансна частота знаходиться в діапазоні мегагерц навіть для простої моди поперечних коливань балки. Крім того, збільшення ролі впливу електромагнітних сил при зменшенні розмірів, дозволяє створити ефективний ємнісний привід, який неможливо отримати за звичайних розмірів механічного приводу. Бібліотека моделей, що поставляється разом з модулем MEMC, містить приклади і покрокові інструкції з розрахунку мікроелектромеханічних резонаторів з електростатичним збудженням (рис. 5.2). Крім того, для аналізу роботи пристроїв можна використовувати інтерфейс Electromechanics (електромеханіка) для врахування впливу ізотропної електрострикції.

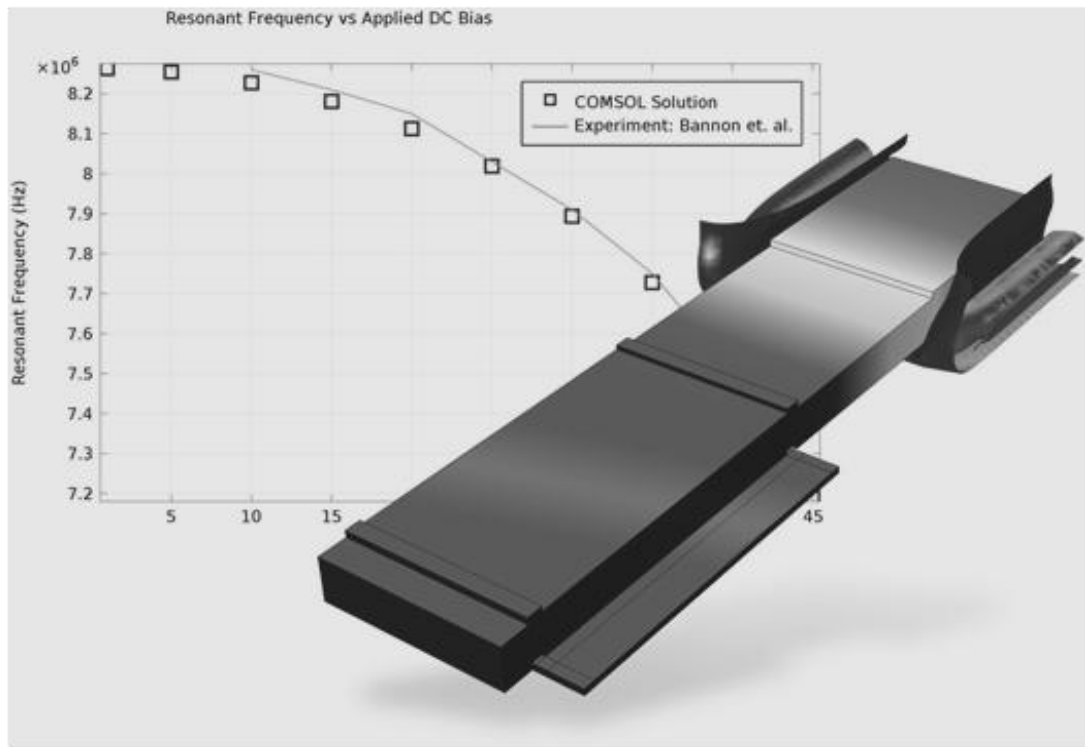


Рисунок 5.2 – Тривимірна модель електромеханічного резонатора з електростатичним збудженням і графік залежності резонансної частоти від величини прикладеної напруги зсуву

П'єзоелектричні пристрої мікросистем. Також зі зменшенням розмірів мікросистемних пристроїв зростає вплив п'єзоелектричних сил. Крім того, п'єзоелектричні перетворювачі і приводи зазвичай мають достатньо лінійні характеристики і для роботи їм не потрібен постійний струм. Серед розроблених мікроелектромеханічних пристроїв найбільш масовими є кварцові резонатори, яких випускається понад 10^9 одиниць в рік. Фізичні інтерфейси модуля MEMS ідеально підходять для моделювання кварцових резонаторів, а також багатьох інших п'єзоелектричних пристроїв.

В довіднику модуля MEMS показано механічний відгук на збудження кварцового резонатора, в якому порушуються коливання зсуву за товщиною, і до якого послідовно підключено конденсатор, а також вплив ємності цього конденсатора на частотну характеристику (рис. 5.3). Послідовно підключений конденсатор часто використовується для підстроювання або зсуву резонансної частоти кварцових резонаторів. Модуль MEMS дозволяє поєднувати двовимірні і тривимірні моделі зі схемами SPICE для комбінованих варіантів моделювання.

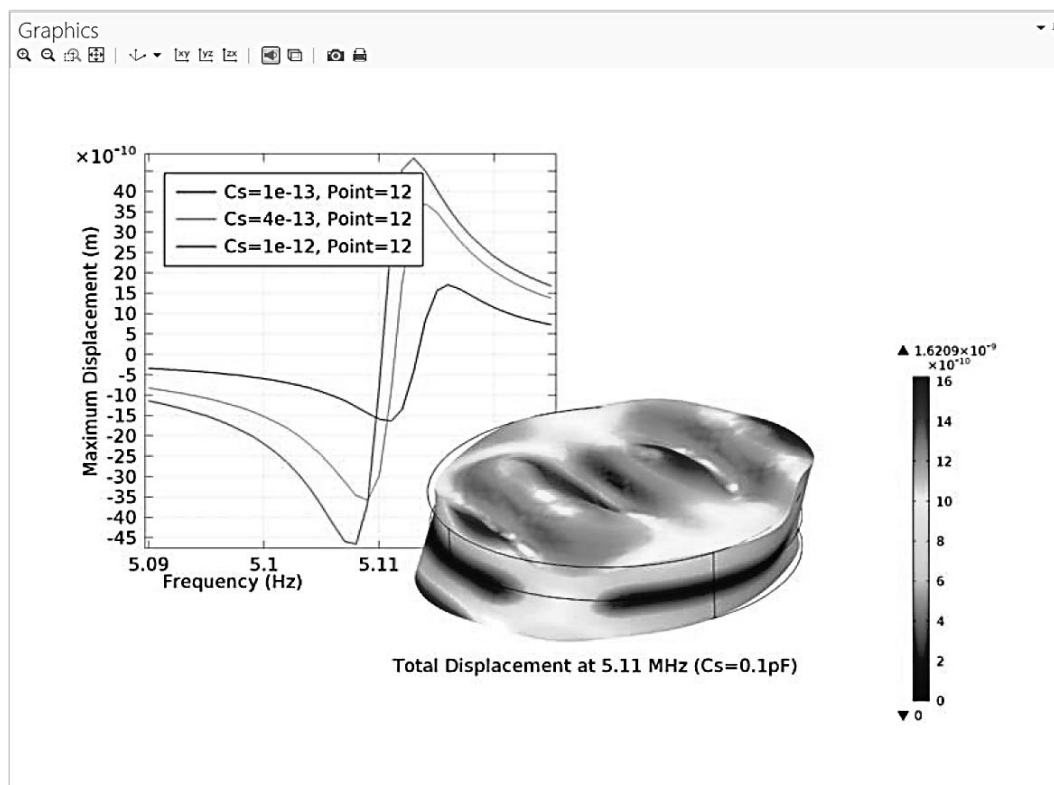


Рисунок 5.3 – Тривимірна модель кварцового резонатора, а також графік залежності величини зсуву поверхні резонатора від частоти генерації та ємності послідовного конденсатора

Термічні приводи і теплові напруги. В мікромеханіці зростає роль впливу теплових сил в порівнянні з силами інерції. Це забезпечує достатньо високу швидкодію мікроскопічних термоактуаторів для застосування в мікро масштабах, однак термічні приводи зазвичай повільніше ємнісних і п'єзоелектричних приводів. Термічні приводи легко інтегруються з напівпровідниковими структурами інтегральних схем, але також вони споживають набагато більше енергії, ніж електростатичні і п'єзоелектричні пристрої аналогічного призначення. Модуль МЕМС можна використовувати для моделювання ефектів нагріву і виникнення теплових напружень, включаючи втрати на опорі. Теплові ефекти також грають важливу роль при виробництві багатьох промислових мікроелектромеханічних систем, оскільки термічні напруження, що виникають в тонких плівках мають значний вплив в різних вживаннях.

Для прикладу на рис. 5.4 наведено модель термоприводу, на якій відображено розподіл температури (вгорі) та розподіл щільності струму в зразку (внизу).

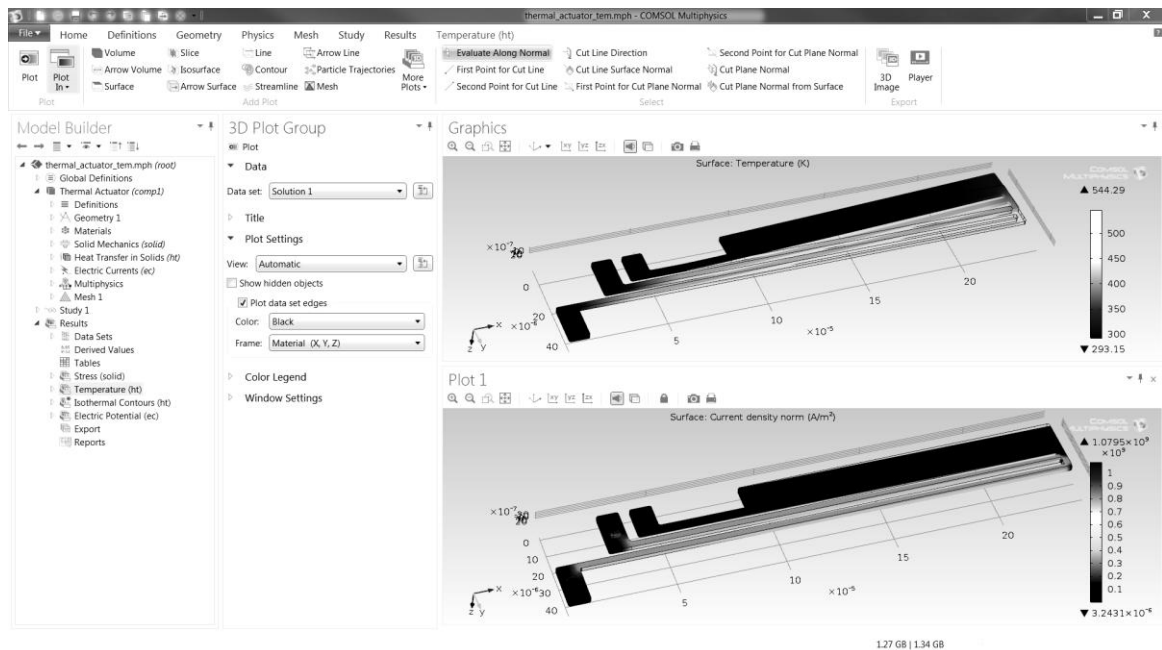


Рисунок 5.4 – Модель термоприводу. Вгорі – температура всередині приводу внаслідок нагріву, внизу – розподіл щільності струму в зразку

Проектні рішення, що забезпечені базовими системами рівнянь, також дозволяють користувачеві додавати в систему власні рівняння і математичні вирази. Наприклад, для моделювання нагріву пристрою, пружні властивості якого залежать від температури, досить просто ввести коефіцієнти пружності у вигляді функції від температури, при цьому не потрібно складати сценарії або писати програмний код. Під час компіляції, рівняння створені користувачем, автоматично включаються в загальну систему. Потім ці рівняння обчислюються з використанням методів FEA. Після отримання рішення можна використовувати різні засоби обробки отриманих даних. Попередньо задані графіки будуються автоматично для відображення характеристик пристрою. Середовище COMSOL має достатню гнучкість для обчислення широкого діапазону фізичних параметрів, що включають попередньо визначенні значення, такі як температура, електричне поле або тензор напружень та довільні вирази користувача за допомогою простого у використанні меню.

Взаємодія пристрою з рідиною і демпфірування в тонких плівках. Мікро гідродинамічні пристрої (MEMS, що містять рідини), знаходять все більш широке застосування у мікроелектроніці. Середовище COMSOL містить окремий модуль Microfluidics (мікро гідродинаміка), спеціально призначений для аналізу таких систем, проте модуль MEMS також містить значну кількість мікро гідродинамічних функцій для моделювання взаємодії пристроїв MEMS з рідинами. Мультіфізичний інтерфейс взаємодії пристрою з рідиною (*FSI – Fluid Structure Interaction*) містить елементи гідродинаміки і механіки твердого тіла, що дозволяє моделювати взаємодію між рідиною і твердотільним пристроєм. Призначені для користувача інтерфейси Solid Mechanics (механіка твердого тіла) і Laminar Flow (ламінальний потік) дозволяють моделювати поведінку

твердого тіла і рідини, відповідно. Взаємодія пристрою з рідиною на межах розділу рідини і твердого тіла може включати тиск рідини і в'язкі сили, а також передачу моменту від твердого тіла до рідини, тобто спостерігається двостороння взаємодія між пристроєм і рідиною. Для моделювання взаємодії пристрою і рідини застосовується метод, званий довільною Лагранж – Ейлеровою поведінкою (ALE).

Демпфіруючі сили, що виникають при взаємодії пристрою з рідиною, часто грають істотну роль в мікроелектромеханічних пристроях, що нерідко призводить до необхідності герметизації пристрою у вакуумі. В модулі MEMS є спеціалізовані фізичні інтерфейси для аналізу демпфірування в тонких плівках. Вони на основі рішення рівняння Рейнольдса для турбулентного потоку визначаються швидкість, тиск рідини і сили, що діють на прилеглі поверхні. Ці інтерфейси можна використовувати для моделювання демпфірування в тонкій плівці при стисканні і ковзанні в широкому діапазоні тиску аж до розрідження. Демпфірування в тонкій плівці може розглядатися на довільних поверхнях в тривимірному просторі, його можна безпосередньо пов'язати з тривимірними моделями твердих тіл.

П'єзорезистивні перетворювачі мікросистем. Простота поєднання п'єзорезисторів зі стандартними напівпровідниковими елементами мікросхем і практично лінійна характеристика перетворювача роблять цю технологію особливо перспективною при виробництві інтегральних сенсорів тиску. Для конструювання п'єзорезистивних сенсорів COMSOL має спеціалізовані фізичні інтерфейси для моделювання п'єзо ефекту в твердих тілах і оболонках (рис. 5.5).

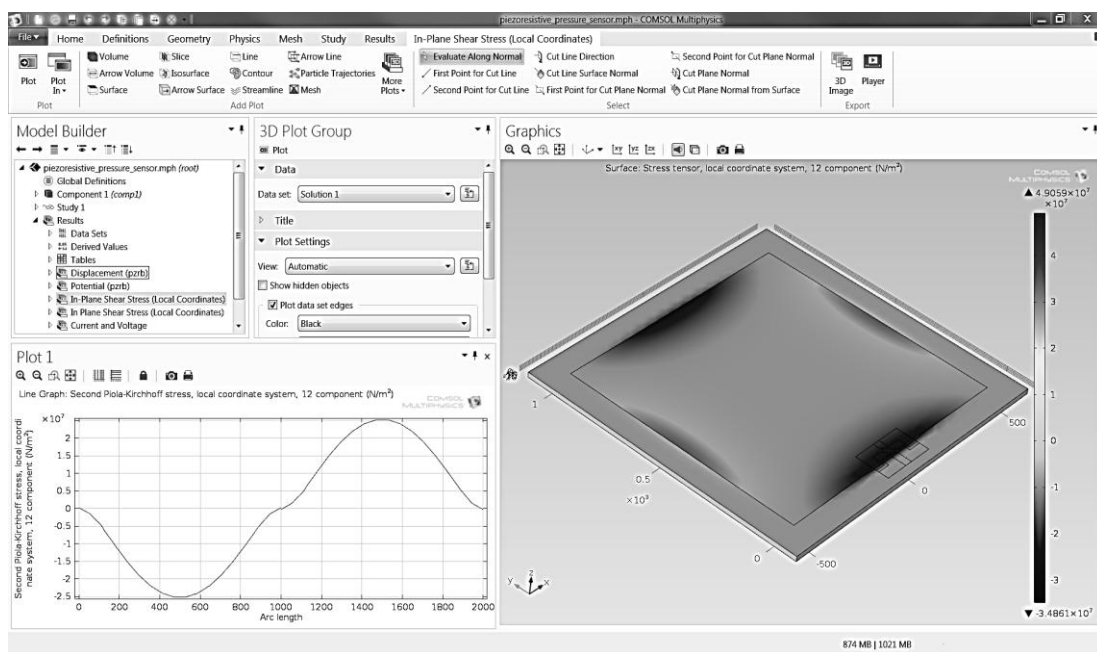


Рисунок 5.5 – Модель п'єзорезистивного первинного перетворювача сенсора тиску

Механіка твердого тіла. Інтерфейс Solid Mechanics (механіка твердого тіла) використовується для аналізу напружень, а також для розрахунку зсуву елементів структури з використанням лінійної та нелінійної механіки твердого тіла. У модулі MEMS можливий аналіз моделей лінійно–пружних і в'язкопружних матеріалів (рис. 5.6), його можна доповнити модулем Nonlinear Structural Materials (нелінійні конструкційні матеріали), що дає можливість аналізувати моделі виготовлені з відповідних матеріалів. Можна розширити існуючі моделі матеріалів, додаючи характеристики теплового розширення, демпфірування, а також початкові умови, як то напруга і деформація. Крім того, допускається наявність кількох джерел початкових деформацій, що дає можливість враховувати вплив довільних непружних деформацій від декількох фізичних джерел. Опис пружних матеріалів у модулі включає ізотропні, ортотропні і повністю анізотропні матеріали (рис. 5.6).

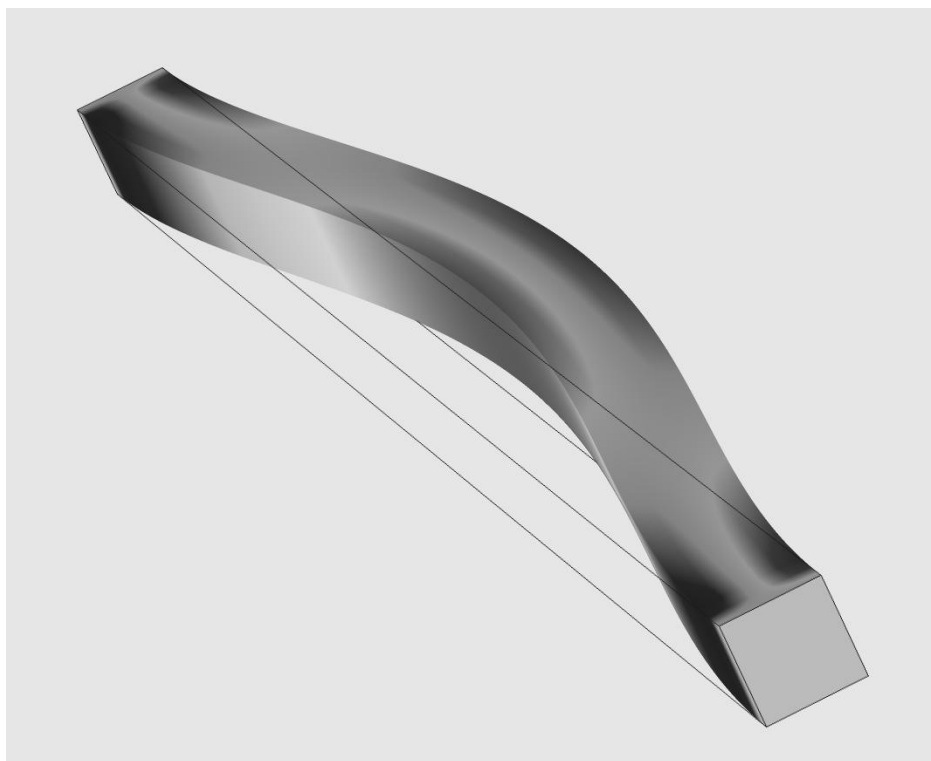


Рисунок 5.6 – Аналіз моделей лінійно–пружних і в'язкопружних матеріалів

Інтерфейс Thermoelasticity (термопружність) призначений для моделювання лінійних термопружних матеріалів. Він використовується для вирішення завдань розрахунку зміщення і температурних відхилень, а також теплопередачі, викликані взаємодією елементів системи, що важливо враховувати при моделюванні мікроелектромеханічних резонаторів, що мають високу добротність. Він дозволяє моделювати велику кількість фізичних, механічних, гідродинамічних, теплових, електростатичних, контактних, ефектів, явищ та впливів.

До цього числа належать наступні величини:

- Вигин;
- Пружні хвилі;
- Упругогідродінаміка;
- Електростатика;
- Електростатичний привід;
- Взаємодія конструкції з текучим середовищем (FSI);
- Джоулів нагрів;
- Великі деформації;
- Сила тяжіння;
- Модальний аналіз;
- Механічний контакт;
- Ідеально підібрані шари (PML);
- П'єзоелектрика;
- П'єзорезистивного ефект;
- Попередньо напружені конструкції;
- Механіка твердого тіла;
- Обертові рами з відцентровою, коріолісовою і ейлеровою силами;
- Теплова напруга;
- Термопружність;
- Амортизація в тонких плівках;
- Датчики;
- Кола SPICE;
- Вібрації;
- В'язкопружні середовища.

Ці ефекти широко застосовують наступні конструкції MEMS:

- Акселерометри;
- Приводи MEMS;
- Пристрої на основі об'ємних акустичних хвиль (BAW);
- Консольні балки;
- Конденсатори;
- Гіроскопи;
- Магнітострикційні прилади;
- Резонатори;
- П'єзоелектричні пристрої;
- П'єзорезистивні пристрої;
- Радіочастотні мікроелектромеханічні системи;
- Датчики;
- Пристрої на основі поверхневих акустичних хвиль (SAW);
- Термічні приводи.

5.2 Програмний пакет для електродинамічних розрахунків і оптимізації радіочастотних систем (RF MODULE – радіочастотний модуль).

Проектувальники і розробники СВЧ–пристроїв повинні бути впевнені, що використовувані електромагнітні моделі є надійними і достовірними. Традиційна обчислювальна електродинаміка сфокусована на дослідженні тільки електромагнітних явищ, але жоден реальний пристрій не обмежений рамками одного розділу фізики. Щоб врахувати вплив інших фізичних явищ на віртуальний прототип, потрібно мультифізичне моделювання, яке дозволяє враховувати такі ефекти, як коливання температури, механічні деформації і потоки рідин або газів.

Для розширення можливостей базової платформи COMSOL призначається Радіочастотний модуль (RF Module), який дозволяє досліджувати НВЧ–радіочастотні пристрої в єдиному інтегрованому мультифізичному програмному середовищі, що враховує різні фізичні ефекти та впливи. Завершальні вироби, різні електронні компоненти і пристрої завжди можуть бути поліпшені. RF Module дозволяє оптимізувати конструкцію електронних компонентів і пристроїв за рахунок детального дослідження фізичних явищ, наприклад, поширення електромагнітних хвиль, мікрохвильового і радіочастотного нагріву, для оптимізації розробки.

В електронній промисловості радіочастотного, сантиметрового і міліметрового діапазонів, розробка виробів повинна відповідати сучасним вимогам і технологіям. Наприклад, антени і радіочастотні тракти (включаючи фільтри, відгалужувачі, подільники потужності і кола узгодження імпедансу) повинні бути сумісними з потребами майбутнього дня: мережами п'ятого покоління MIMO 5G, Інтернетом речей і супутниковим зв'язком (SatCom).

Також важливо оцінювати радіочастотну сумісність платформ бездротового зв'язку та нових прикладних областей – переносної електроніки, безпілотного транспорту і сучасних мікрохвильових та радіочастотних пристроїв.

Модуль радіочастоти RF Module включає інструменти моделювання різноманітних пристроїв та процесів:

- Діаграми випромінювання антен в дальній зоні;
- Коефіцієнт підсилення і коефіцієнт спрямованої дії антени;
- S–параметри;
- Вхідний імпеданс;
- Фазовані решітки;
- Електричні кола;
- Радіочастотна ідентифікація (RFID);
- Біомедичні пристрої;
- Мікрохвильове спікання і спектроскопія;
- Смугові фільтри;
- Наноструктури;
- Випромінювання міліметрового і терагерцового діапазону;

- Резонатори і фільтри;
- Відгалужувачі і подільники потужності;
- Феромагнітні пристрої;
- Близький бездротовий зв'язок;
- Періодичні решітки та структури Блоха – Флоке;
- Розсіювання і перехресне випромінювання;
- Лінії передачі;
- Мікросмушкові лінії;
- Копланарні хвилеводи;
- Хвилеводи на діелектричній підкладці;
- Радіочастотні мікроелектромеханічні системи;
- Електромагнітні завади і електромагнітна сумісність (EM /EMC).

RF Module містить вбудовані та розширені функції мультифізичного моделювання:

- Електромагнітний нагрів;
- Матеріали з температурно–залежними властивостями;
- Матеріали з властивостями, залежними від електромагнітного поля;
- Матеріали з властивостями, залежними від деформації і напруги, в т.ч. деформовані геометрії пристроїв;
- Нагрівання біологічних тканин і біомедична терапія, наприклад, мікрохвильова абляція і діагностика ракових тканин хвилями міліметрового діапазону;
- Вплив термічної напруги і механічних деформацій на робочі характеристики;
- Ферити с підмагнічуванням
- Налагоджувані фільтри з п'єзоелектричним приводом;
- Мікрохвильова плазма;
- Діелектрофорез;
- Втрати тепла на випромінювання.

Для прикладу на рис. 5.7, – 5.8 наведено результати моделювання деяких НВЧ пристроїв.

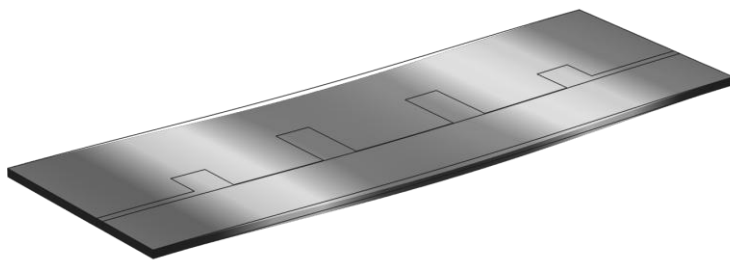


Рисунок 5.7– Модель мікрохвильового фільтра на друкованій платі

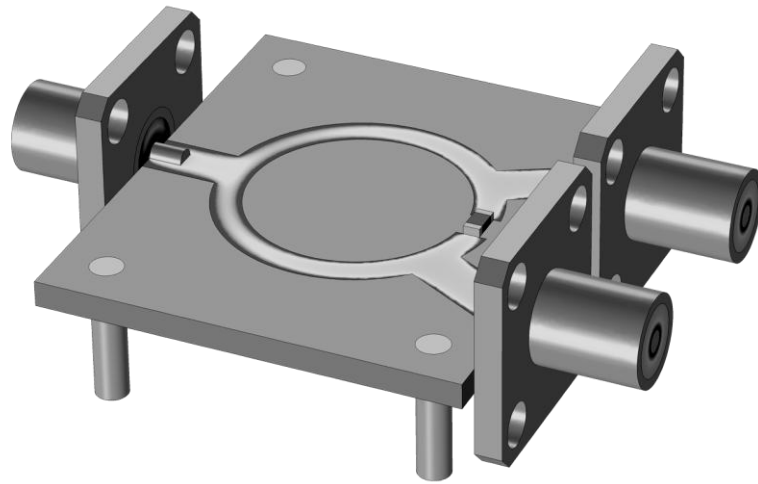


Рисунок 5.8 – Модель НВЧ подільника потужності Уілкінсона

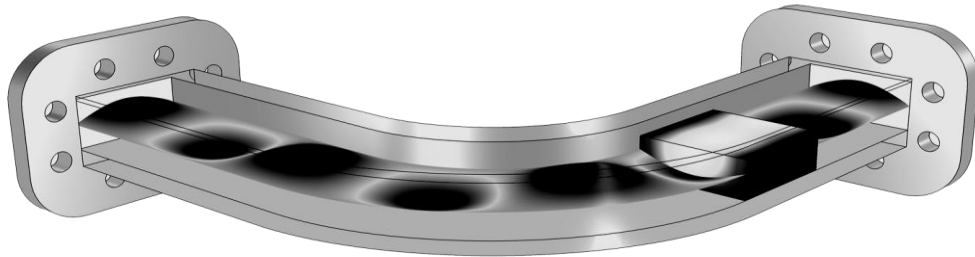


Рисунок 5.9 – Моделювання електромагнітного нагріву хвилеводу в модулі COMSOL

За допомогою модуля Радіочастоти можна проводити аналіз радіочастотних та мікрохвильових пристроїв, вибираючи в пакеті вже готові встановлені фізичні інтерфейси (рис. 5.10). Вони містять повний список зручних інженерних функцій, умов і налаштувань для різних сценаріїв моделювання, так що розрахункову модель можна побудувати, не вникаючи в її складну фізику, що базується на основі рівнянь Максвелла. Для побудови реалістичної мультифізичної моделі можливо об'єднувати різні інтерфейси, що описують фізику МЕМС та електромагнітних хвиль (рис. 5.11).

Фізичні інтерфейси модуля радіочастоти RF Module:

- Electromagnetic Waves, Frequency Domain (Електромагнітні хвилі, частотна область);
- Electromagnetic Waves, Time Explicit (Електромагнітні хвилі, часова область з явним вирішувачем);
- Electromagnetic Waves, Transient (Електромагнітні хвилі, часова область);

- Transmission Line (Лінії передачі);
- Electrical Circuits (Електричні кола);
- Microwave Heating (Мікрохвильовий нагрів).

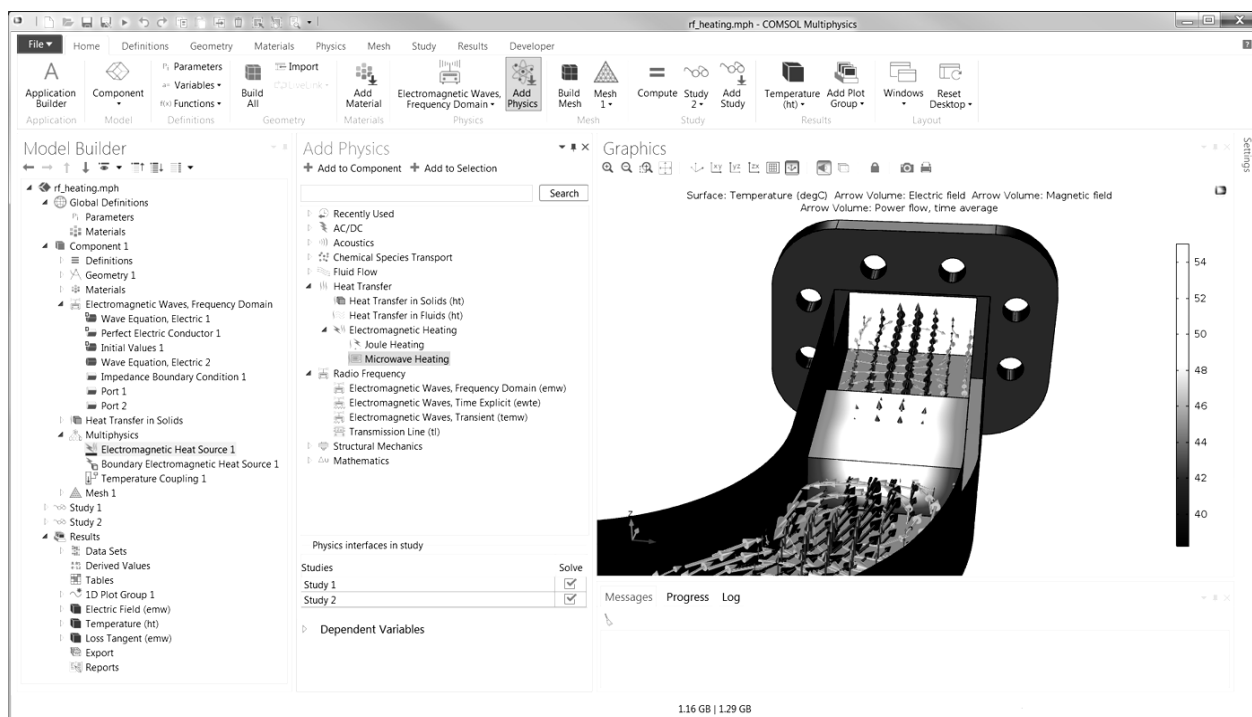


Рисунок 5.10 – Бібліотечна модель фізичного інтерфейсу хвилеводу НВЧ діапазону

Налаштування фізичних інтерфейсів. Для ефективного моделювання електромагнітних задач потрібен великий набір граничних умов і геометричних параметрів. У модулі Радіочастоти Radiofrequency присутні зумовлені геометричні функції для роботи з одновимірними та багатовимірними моделями (рис. 5.11).

Також в модулі є доступний широкий набір граничних умов для опису провідників різного роду (ідеальних електричних та магнітних), включаючи завдання границь з комплексним імпедансом, а також для випромінюючих або поглинаючих площин, наприклад, границі розсіювання (типу Зоммерфельда) і ідеально узгоджені шари (PML). Модуль підтримує завдання періодичних граничних умов, що знижують геометричні розміри моделі.

Набір граничних умов покриває широкий діапазон інженерних задач проектування, дозволяючи створювати моделі портів, кабелів, пристроїв і компонентів зі складною геометрією. Граничні умови задаються різним поверхневим конструкціям, компонентам для поверхневого монтажу, пристроям вводу/виводу та інше.

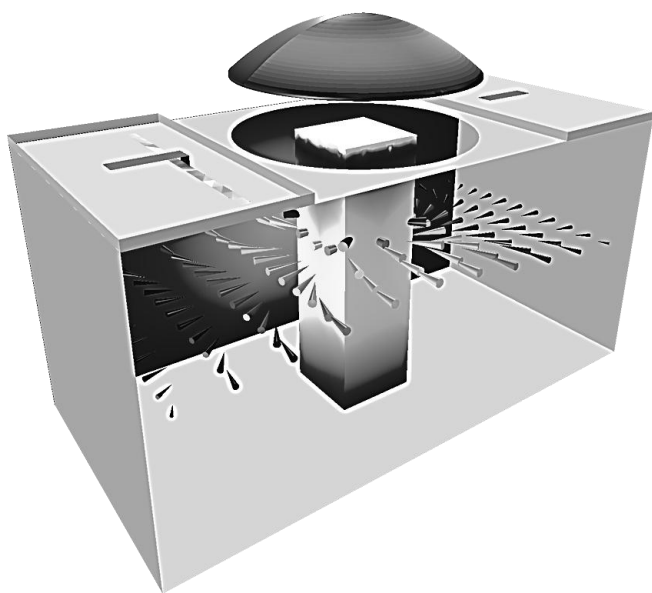


Рисунок 5.11 – Мультифізична модель перенастроюваного об’ємного резонатора, у який використовується низка інтерфейсів, що описують фізику MEMS та електромагнітних хвиль

Граничні умови, доступні в модулі радіочастоти:

1. Поверхневі конструкції:
 - a. ідеально провідні поверхні;
 - b. поверхні з кінцевої провідністю;
 - c. тонкі шари з втратами;
 - d. симетрія;
 - e. періодичність;
 - f. вільний простір;
 - g. розсіюючи (поглинаючи) границі.
 - h. ідеально узгоджені шари (PML - perfectly matched layers).
2. Зосереджені елементи (елементи для поверхневого монтажу):
 - a. ємнісні;
 - b. індуктивні;
 - c. резистивні;
 - d. з комплексним опором.
3. Порти
 - a. прямокутні;
 - b. круглі;
 - c. періодичні;
 - d. коаксіальні;
 - e. з використанням режиму розширеного;
 - f. чисельні (з розрахунком і узгодженням моди) ;
 - g. зосереджені.
4. Чотириполюсники:

- a. кабельні вводи/виводи;
- b. лінійні контури зі струмом;
- c. точкові диполі.

Моделювання на основі базових рівнянь. Моделювання на основі призначених для користувача рівнянь (equation-based modeling) надає доступ і можливість редагувати вихідні рівняння безпосередньо в програмному середовищі, підлаштовуючи модель під необхідні вимоги.

У модулі Radiofrequency для електромагнітних розрахунків зазвичай за допомогою методу скінчених елементів шукається рішення для формулювання системи рівнянь Максвелла в частотній області. Гнучкість і адаптивність методів скінчених елементів, реалізованих в COMSOL, дозволяє отримати надійні і достовірні результати при використанні призначених для користувача формул і рівнянь. Крім цього, використання закладених в пакеті рівнянь позбавляють від необхідності програмувати і створювати власні розрахункові коди з нуля, надаючи значно більш гнучкі можливості і зменшуючи час, що витрачається на створення моделей і проведення досліджень.

Гнучкість моделювання на основі призначених для користувача рівнянь в модулі забезпечує дослідження широкого кола процесів, матеріалів і пристроїв:

- Одномірні моделі;
- Рівняння ліній передачі (можна використовувати в двомірних і тривимірних моделях);
- Двомірні моделі (2D) ;
- Поширення хвиль поза площиною;
- Розрахунок поляризація в площині і поза площиною об'єкту (азимутальне формулювання) або використання повного трьохкомпонентного вектора.

У модулі Radiofrequency містяться формули для обчислення різних варіантів електромагнітного поля:

- Метод повної хвильової функції;
- Фонове поле (поле розсіювання);
- Тривимірні моделі (3D) ;
- Повна хвильова система рівнянь Максвелла, що використовує векторні (криволінійні) граничні елементи.

Можливо будувати моделі на базі різноманітних матеріалів з відмінними властивостями. До них відносяться:

- Діелектричні середовища;
- Металеві середовища;
- Середовища з дисперсією;
- Середовища з втратами;
- Анізотропні середовища;
- Змішані середовища.

Існує можливість безрозмірного моделювання зосереджених електричних кіл, в т.ч. на основі списків з'єднань програми SPICE.

Побудова сітки за аналізом методом скінчених елементів. У модулі Radiofrequency розробник встановлює параметри побудови сітки за вимогами проекту для рішення рівнянь методом скінчених елементів . Це особливо важливо при дослідженні матеріалів, властивості яких можуть змінюватися в процесі моделювання, наприклад, при розрахунку електромагнітного нагрівання.

Використовуючи можливість автоматичної генерації сітки на основі налаштувань фізичного інтерфейсу (physics-controlled meshing), в COMSOL Multiphysics® задається необхідна роздільна здатність моделювання хвильових процесів для точного розрахунку електромагнітних явищ. В процесі розробки пристрою, розробник може змінювати розміри і число сіткових елементів для досягнення необхідної точності результатів моделювання. У модулі є можливість побудови сіток на основі тетраедрів, гексаедрів, призм та прямокутників.

Чисельні методи, доступні в RF Module:

- Метод скінчених елементів;
- Методи для розрахунків в частотній області;
- Методи для розрахунків в часовій області (неявний вирішувач) ;
- Векторні/граничні елементи 1–го, 2–го і 3–го порядку, в т.ч. для обліку кривизни поверхонь CAD – геометрії;
- Дискретний метод Гальоркіна (dG) на основі явного вирішувача;
- Рішення рівнянь для ліній передач в частотній області;
- Методики зниження порядку моделі (Model order reduction) ;
- Метод асимптотичного аналізу форми гармонійного сигналу (AWE, Asymptotic waveform evaluation) ;
- Модально–частотний аналіз (Frequency domain modal).

В *RF Module* доступні різноманітні типи досліджень компонентів НВЧ:

- Дослідження власних частот;
- Резонансні частоти і добротність електронних компонентів;
- Розрахунок постійних поширення і втрат в хвилеводах;
- Розрахунок в частотній області;
- Аналіз частотних характеристик (АЧХ і ФЧХ) в заданому діапазоні;
- Пряме дослідження в часовій області;
- Нелінійні ефекти;
- Поширення НВЧ–сигналу і дослідження віддзеркалень;
- Розрахунки широкосмугових систем;
- Динамічна рефлектометрія в часовій області (TDR – time–domain reflectometry).

Інструменти після опрацювання в RF Module.

Результати моделювання надаються в наочній формі, включаючи графіки S–параметрів, візуалізацію, візуалізацію електромагнітних полів, частотних характеристик, складну візуалізацію діаграми випромінювання в дальній зоні і діаграми Сміта, вилучення потрібної чисельної інформації і т.п.

Кольорові схеми і графіки будь-яких розрахункових величин можна експортувати для подальшої обробки в сторонніх програмах.

Інструменти постобробки в RF Module:

- Матриці S-параметрів (матриці розсіювання);
- Діаграми випромінювання в дальній зоні;
- Коефіцієнт підсилення антени;
- Еліптичність антени;
- Графіки математичних виразів, які призначені для користувача;
- Ефективна площа розсіювання (RCS);

Додатки для моделювання та налаштування вхідних і вихідних даних моделі. За допомогою вбудованого в COMSOL Multiphysics® програмного середовища розробки додатків Application Builder, розробник може створювати користувацькі додатки для моделювання на основі моделей COMSOL, які спрощують процес моделювання, обмежуючись зміною вхідних даних і контролюючи вихідні дані, виводячи тільки потрібні для кінцевого користувача результати. Це дає можливість обмінюватись проміжними результатами проекту всередині групи розробників та зберігати і використовувати проміжні дані для майбутніх конструкцій.

Інтерфейс додатків для моделювання (Simulation Apps) дозволяє легко змінювати конструкційні параметри або розрахункові дані, наприклад, коефіцієнт підсилення або робочу частоту для антени, і стежити за впливом змін, не проводячи повторно процес складання та налаштування всієї моделі. За допомогою додатків можна прискорити процес проведення досліджень за рахунок впровадження паралелізму в виконанні проекту.

Робочий процес створення і використання додатків для моделювання дуже простий:

1. Створення для складної СВЧ-моделі простого користувацького графічного інтерфейсу (додаток Simulation Apps);
2. Налаштування додатку для конкретних потреб, вибираючи потрібні вхідні та вихідні дані, які будуть доступні всім користувачам моделі;
3. Відкриття за допомогою модулю COMSOL Server можливості віддаленого зберігання і систематизації додатків і надання до них доступу групі розробників/або замовникам;
4. Всі довіренні користувачі отримують можливість проводити задані в додатку типові розрахунки і проекти самостійно.

Використання функціоналу додатків для моделювання особливо привабливо для навчальних цілей в закладах вищої освіти за рахунок надання доступу до проектних процедур студентам і аспірантам в навчальній, або науковій лабораторії.

Розробка електроніки для практичних застосувань: мікрохвильових контурів, фільтрів, антен і метаматеріалів. Для симуляції роботи радіочастотних виробів, пристроїв та компонентів в реальних умовах, чисельні моделі в RF Module можна поєднувати з будь-яким модулем розширення, які повністю сумісні з базовою програмною платформою Multiphysics або модулем

інтеграції LiveLink з програмного пакету COMSOL для забезпечення сумісного моделювання зі сторонніми продуктами.

5.3 Мультифізичне моделювання термоактюаторів

В технологічних MEMS доволі часто для проведення аналізу складу рідини застосовують теплові мікро реактори для випаровування проби. Загальна схема пристрою складається з входного та випускного патрубків, мікро насоса для закачування рідини в реактор, випаровувача (нагрівача) та оптопара (рис.5.12). Рідина потрапляє в реактор через насос, випаровується нагрівачем, після чого пара проходить через канал оптичного аналізу на основі оптопара. Електричний сигнал, отриманий від фотодіода оптопара потрапляє на електричну схему обробки, де і проходить кінцевий аналіз складу рідини.

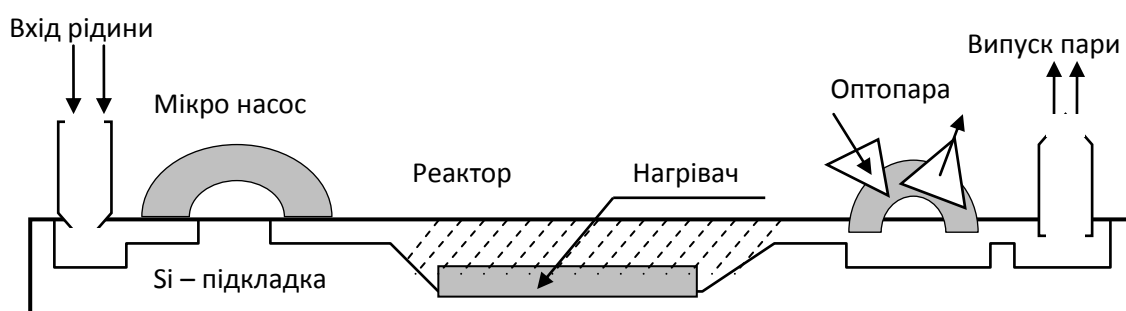


Рисунок 5.12 – Узагальнена структура теплового мікро реактора для контролю складу рідини

При аналізі конструкції реактора вкрай важливо провести розрахунок механічної міцності нагрівача під дією високих температур, що в залежності від складу рідини може значно перевищувати 100°C . Критичними параметрами можуть бути відшаровування плівкового нагрівача, тепла деформація підкладки та інше, що може призвести до пошкодження випаровувача (реактора) і відмові технологічної системи загалом.

Термічні приводи мікросистем широко застосовуються в транспортних, оптичних, біомедичних пристроях та технологічних MEMS. Як і у випадку багатьох інших нагрівальних елементів, робота цих контурів обумовлена резистивним нагріванням – мультифізичним процесом, що поєднує в собі протікання електричних струмів, теплопередачу і механічні деформації. Для того, щоб правильно розрахувати вплив цих явищ та інших ключових конструктивних факторів, інженери можуть створювати віртуальні прототипи нагрівальних контурів з використанням програмного забезпечення COMSOL Multiphysics®.

Термічні приводи можуть забезпечувати необхідний в широкому спектрі промислових застосувань локальний нагрів тіла або рідини. Часто їх

використовують спільно з датчиками температури та застосовують у наступних областях:

- Підтримка постійної температури електронних пристроїв та медичних інструментів і препаратів, виробів і зразків під час випробувань або зберігання;
- Мікро механізми, приводи керуючих пристроїв – термоактюатори;
- Інструменти нагріву для мікрореакторів в технологічних та сенсорних системах;
- Нагрівання клеїв та адгезійних матеріалів і рідин в рамках технологічних процесів та ін.

Робота таких контурів зазвичай заснована на ефекті резистивного нагріву, який поєднує в собі багато різних фізичних явищ:

- За подачі напруги по контуру починає протікати електричний струм;
- Цей струм призводить до виділення тепла в наслідок електричного опору матеріалів;
- Підвищення температури обумовлює термічні деформації пристрою.

Хоча в ряді випадків виникаючі деформації можуть бути корисними (наприклад в термічних приводах (актюаторах), вони часто виступають джерелом проблем, які мають бути вирішені на етапі проектування нагрівальних контурів. Провідні елементи контурів часто з'єднуються з матеріалом підкладки, і надмірний вигин може привести до перенапруження в клейовому шарі і відшарування провідника, що, в свою чергу, може привести до відмови пристрою. Такий аналіз досить нетривіальний через безліч фізичних явищ, пов'язаних з резистивним нагріванням, а також різних факторів (таких як напруга живлення, геометрична форма, використовувані матеріали, умови навколишнього середовища і т.д.).

Використовуючи програмне забезпечення COMSOL®, інженери можуть оцінювати і покращувати ефективність термічних приводів, беручи до уваги всілякі явища і розглядаючи різні конструктивні рішення. У даному розділі розглянуто один характерний приклад: мультифізична модель термоактюатора. Для створення цієї моделі будуть потрібні наступні модулі розширення: Heat Transfer (теплопередача), Structural Mechanics (механіка конструкції), а також AC/DC (електрика), або MEMS.

Мультифізичне моделювання нагрівального контуру.

Геометрія даної моделі складається з двох частин: провідний шар і підкладка (рис. 5.13). Провідний шар виконаний з ніхромового матеріалу для резистивних нагрівальних елементів – і має товщину 10 мкм і ширину 5 мм. Як показано нижче на рисунку, нагрівальний елемент має форму меандру, на кінцях якого сформовано срібні контактні площадки.

Після відтворення геометрії наступним кроком є опис фізичного процесу генерації і передачі тепла в наслідок дії напруги (в даному випадку 12 В). Для розрахунку втрат, які є джерелом нагрівання і виникають в результаті протікання струму в провідному шарі, можна використовувати фізичний інтерфейс *Electric Currents, Layered Shell* (електричний струм та багатошарові

тонкі оболонки). Цей інтерфейс призначений для обчислень струму в тонких плівках. В даному випадку товщина шару досить мала, щоб вилучити його як геометричний 3D-об'єкт, що значно спростить роботу з цими вузлами моделі. У той же час, нульова товщина не є коректним наближенням з фізичної точки зору. Це пов'язано з великим контрастом властивостей матеріалу провідного шару і підкладки. При вирішенні рівнянь інтерфейси *Electric Currents, Layered Shell* використовує задану товщину, ніяк не відображену геометрично, як параметр. Для розрахунку теплопередачі використовується аналогічний підхід.

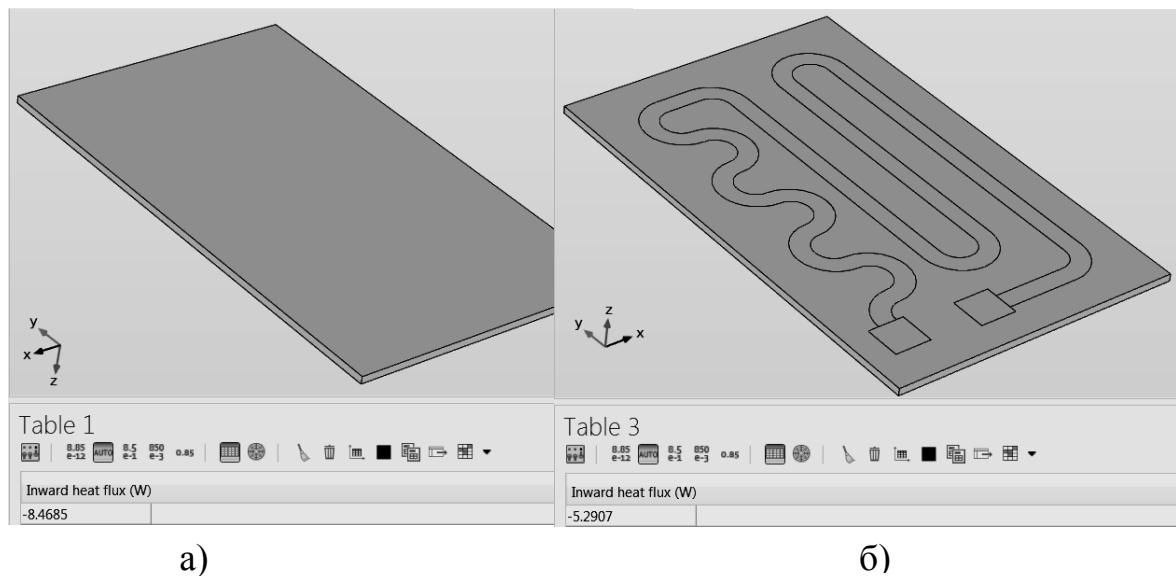


Рисунок 5.13 – Геометрія моделі: а) підкладка; б) провідний шар.

Обчислення кількості тепла, що розсіюється крізь підкладку (~ 8.5 мВт) і з боку нагрівального контуру (~ 5.3 мВт).

У моделі використовується ефективна гранична умова *Thin Layer* (тонкий шар) у фізичному інтерфейсі *Heat Transfer in Solids* (теплопередача в твердих тілах), а також *Electromagnetic Heating* (електромагнітний нагрів), що забезпечує автоматичне сполучення фізичних явищ в процесі Джоулевого нагріву (рис. 5.14). Зазначена гранична умова дозволяє зв'язати розрахунок тепла в провідному двовимірному шарі і підкладці для коректного розрахунку теплопередачі. У моделі також враховується, що тепло розсіюється в навколишнє середовище за допомогою природної конвекції.

Для розрахунку термічних деформацій (і оцінки можливого розшарування) аналіз міцності реалізований через два фізичних інтерфейси. В даному випадку, для скляної пластини використовується інтерфейс *Solid Mechanics* (механіка твердого тіла), а для провідного шару – інтерфейс *Membrane* (мембрана), який призначений для опису тонких шарів.

Аналіз результатів розрахунок нагрівального контуру – теплопередача і нагрів. Після проведення розрахунку моделі можна візуально дослідити процес виділення тепла, що генерується в провідному шарі. Максимальне тепловиділення виникає там, де щільність струму найвища, – на

внутрішніх вигинах провідних доріжок (рис. 5.15). Така концентрація струму обумовлена тим, що градієнт потенціалу обернено пропорційна відстані між заземленням і електричним контактом для підведення напруги. Оскільки внутрішні вигини є найкоротший шлях, то в цьому місці природним чином концентрується струм. Взяти інтеграл по поверхні резистивного шару, можна отримати сумарну теплову потужність, що генерується на електричному опорі, яка дорівнює приблизно 13,8 мВт.

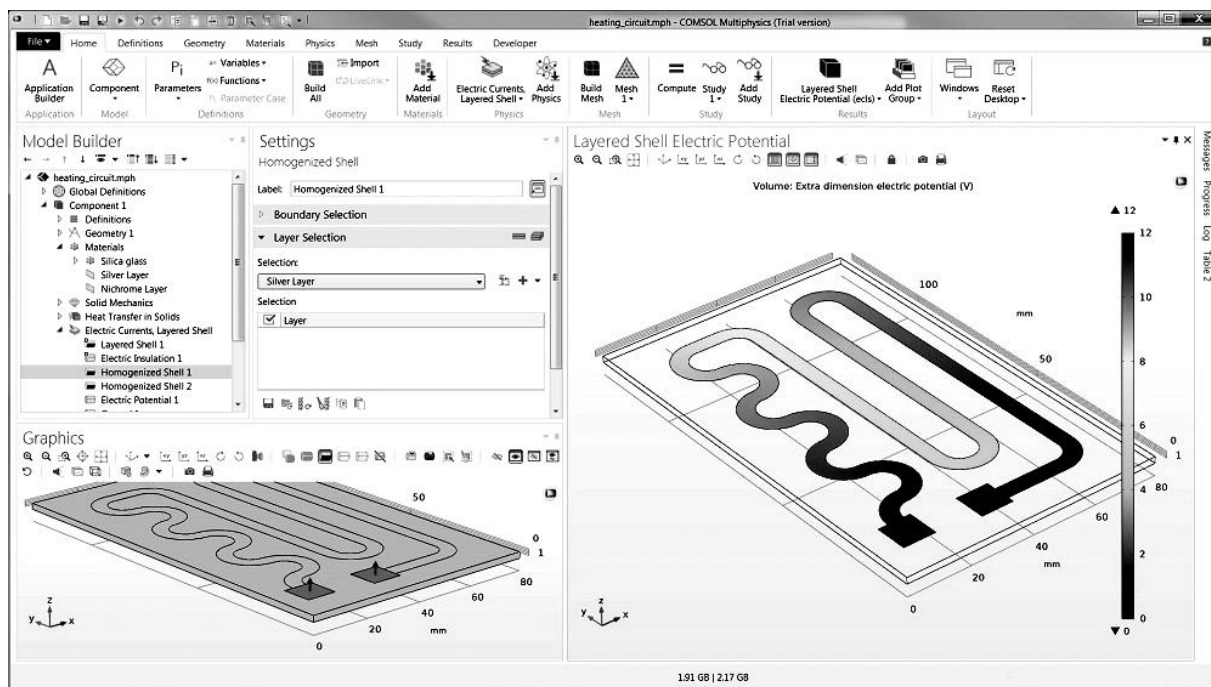


Рисунок 5.14 – Налаштування моделі нагрівального контуру.

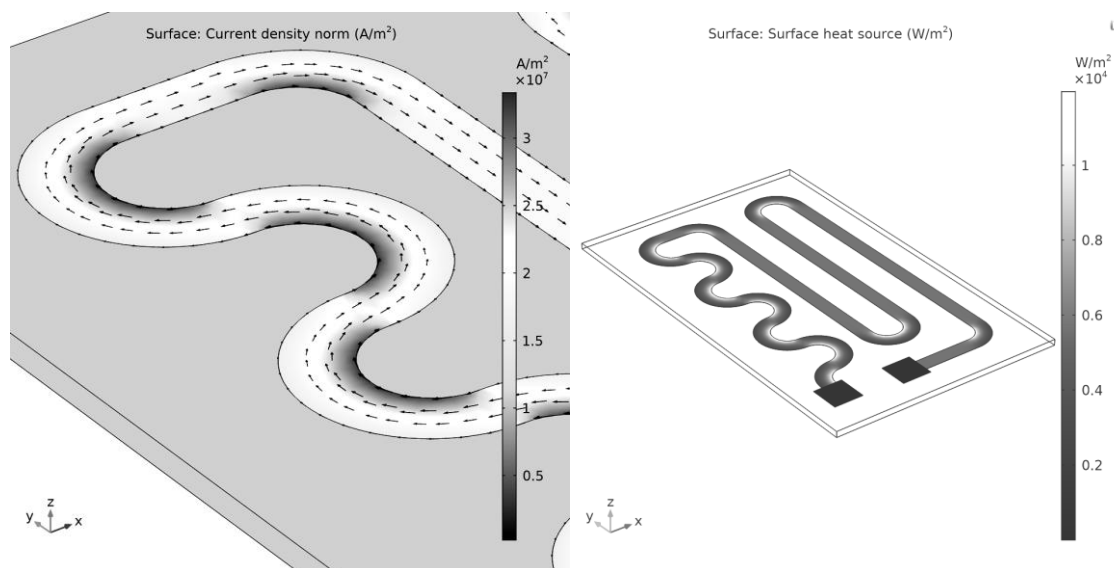


Рисунок 5.15 – Розподілення щільності струму (зліва) і розсіювана контуром питома потужність (праворуч).

Для визначення ККД пристрою можна провести оцінку споживаної електроенергії, а також генерованої і розсіяної теплової потужності. Тут вхідна потужність (виражена як добуток $V \times I$, які в даному випадку становлять 12 В і 1.15 мА) дорівнює повній тепловій потужності: 13,8 мВт. Як показано нижче, найвища температура спостерігається в центральній частині провідного шару і становить 154.1°C (рис.5.16). В результаті інтегрування, можна отримати кількість тепла, що передається у підкладку становить 8,5 мВт, і те що розсівається в навколишньому повітрі дорівнює 5,3 мВт.

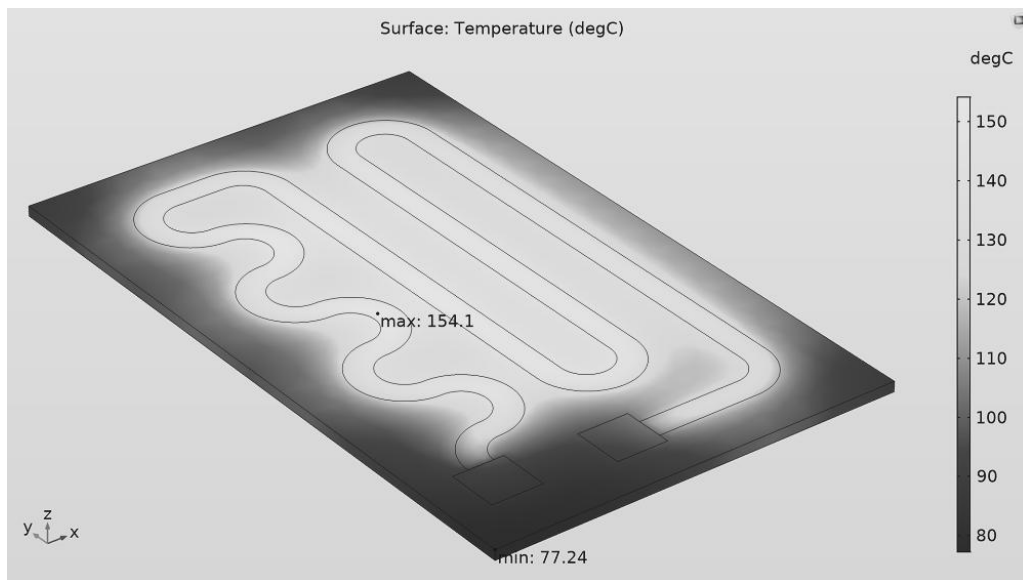


Рисунок 5.16 – Розподіл температури в провідному шарі і в пластині з відмітками максимальної (154.1°C) і мінімальної (77.2°C) температури

Вплив напруження, деформації та розшарування. В рамках дослідження механічних напружень можна визначити, чи відбудеться відмова конструкції нагрівального контуру. У моделі провідний шар і пластина деформуються приблизно на 50 мкм, при цьому вигин відбувається в сторону, звернену до навколишнього повітря. Вигин призводить до навантаження на конструкцію, особливо на внутрішні кути контуру, де ефективне напруження досягає найвищого значення порядку 13 МПа (рис. 5.17). Проте, це істотно нижче максимальної межі плинності як скла, так і ніхрому (250 і 360 МПа, відповідно), що означає, що обидва елементи не будуть пошкоджені в процесі роботи.

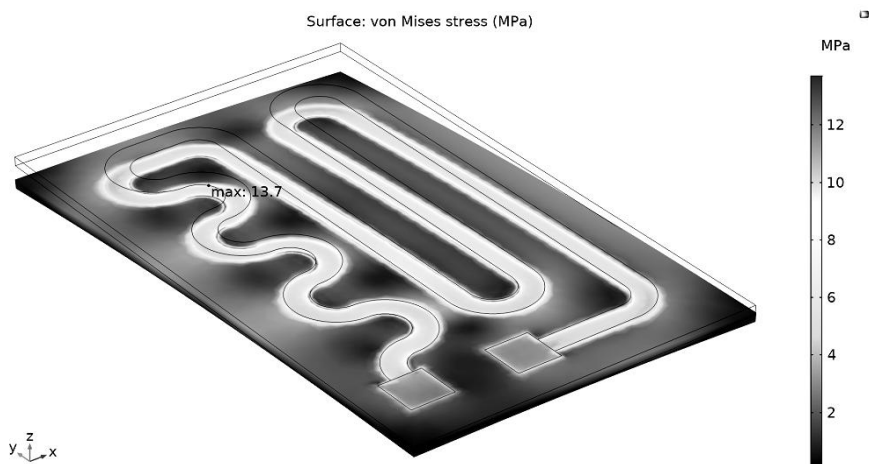


Рисунок 5.17 – Розподіл механічного напруження за фон Мізесом в нагрівальному контурі (перевірка порушення міцності за плинністю).

Таким чином залишилося з'ясувати: чи залишаться шари пов'язані між собою. Щоб визначити наявність розшарування, слід перевірити напруження між шаром ніхрому і скляною пластиною. В даному випадку напруження також набагато менше межі плинності поверхневої адгезії (50 МПа), що вказує на те, що конструкція елемента в процесі роботи не буде порушена (рис.5.18).

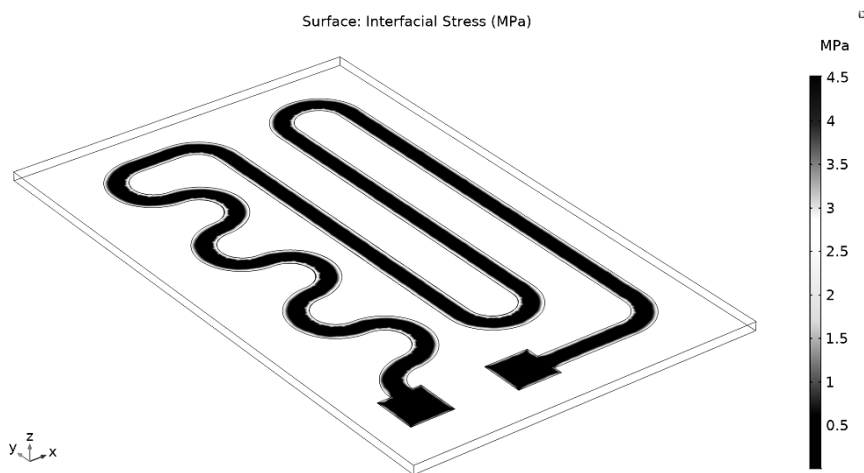


Рисунок 5.18 – Механічне напруження між провідним шаром і пластиною в процесі нагріву.

Як показано в цьому прикладі, розробники можуть використовувати пакет COMSOL® для аналізу термоприводів з урахуванням різних фізичних явищ, залучених до процесу їх роботи. Отримані результати можна використовувати для оптимізації конструкції пристроїв. Наприклад, при проектуванні нагрівального контуру для високоточного застосування (наприклад, для розміщення у корпусі напівпровідникової електроніки) можна зменшити ступінь деформації конструкції.

5.4 Контрольні запитання і завдання

1. Які принципи закладено у програмний пакет COMSOL Multiphysics?
2. Які інструменти містить базовий пакет COMSOL Multiphysics?
3. Що таке інтерфейси для фізики?
4. У якому модулі та у якій послідовності відбувається моделювання пристроїв MEMS?
5. Охарактеризуйте розробку та моделювання електростатичних та електромеханічних приводів у пакеті COMSOL Multiphysics.
6. Наведіть приклади та охарактеризуйте засоби моделювання п'єзоелектричних пристроїв MEMS.
7. Наведіть приклади та охарактеризуйте засоби моделювання термічних приводів MEMS.
8. Наведіть приклади та охарактеризуйте засоби моделювання п'єзореzystивних перетворювачів мікросистем.
9. Охарактеризуйте інтерфейс для моделювання лінійних термопружних матеріалів.
10. Яке призначення та можливості радіочастотного модуля (RF Module) у пакеті COMSOL Multiphysics?
11. Які фізичні інтерфейси входять до складу RF Module?
12. Які граничні умови можливо встановити у RF Module?
13. Охарактеризуйте методи моделювання у RF Module.
14. Наведіть узагальнену структуру теплового мікрореактора для контролю складу рідини та поясніть його функціонування.
15. Яка топологія і структура моделі нагрівального елемента?
16. Які інтерфейси залучаються для моделювання нагрівального елемента?
17. Вплив яких фізичних явищ, що супроводжують функціонування нагрівального елемента, моделюється?

6 СЕРЕДОВИЩЕ РОЗРОБКИ SoftMEMS

Середовище розробки SoftMEMS – це набір інструментів CAD від Mentor Graphics, Siemens Company для розробки та тестування продуктів на базі MEMS. Інструменти CAD 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 дизайнерам розробляти нові конструкції MEMS, інтегрувати нові та існуючі конструкції в системи та поєднувати їх з електронікою (рис. 6.1).

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.

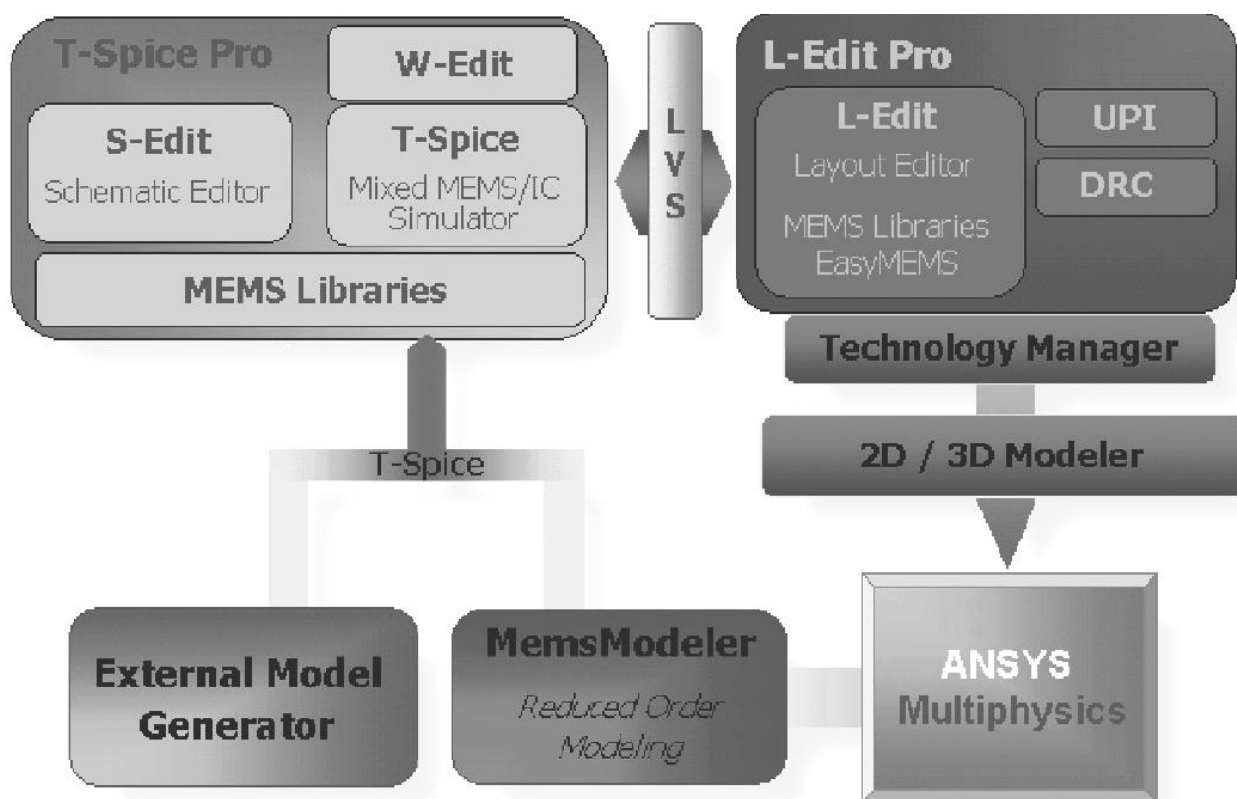


Рисунок 6.1 – Склад компонентів CAD Soft + MEMS Pro

6.1 Пакет MEMS Pro v6.0.

Пакет MEMS Pro v6.0 пропонує комплексне рішення для процесу проектування, що скорочує час розробки, надаючи дизайнерам надійний аналіз для виготовлення. Функціональні можливості САПР включають змішане проектування та моделювання системи MEMS/IC, можливість налаштування користувальницького макету та перевірку, генерацію та візуалізацію 3D-моделей, створення поведінкової моделі та генерацію експортних даних для сторонніх програмних продуктів для проведення 3D-аналізу отриманих структур.

Інструменти *MEMS Pro v6.0* забезпечують можливість проектування на системному рівні завдяки ієрархічній структурі схематичного рівня та рівня моделювання поведінки пристроїв MEMS включно з схемами контролю та керування та пакуванням в корпус. Пристрої MEMS представлені в вигляді механічних, теплових, магнітних, рідинних, оптичних та електростатичних моделей (рис. 6.2). В свою чергу, моделі MEMS представлені мовами поведінки високого рівня: SPICE – моделями, C-кодом або таблицями даних.

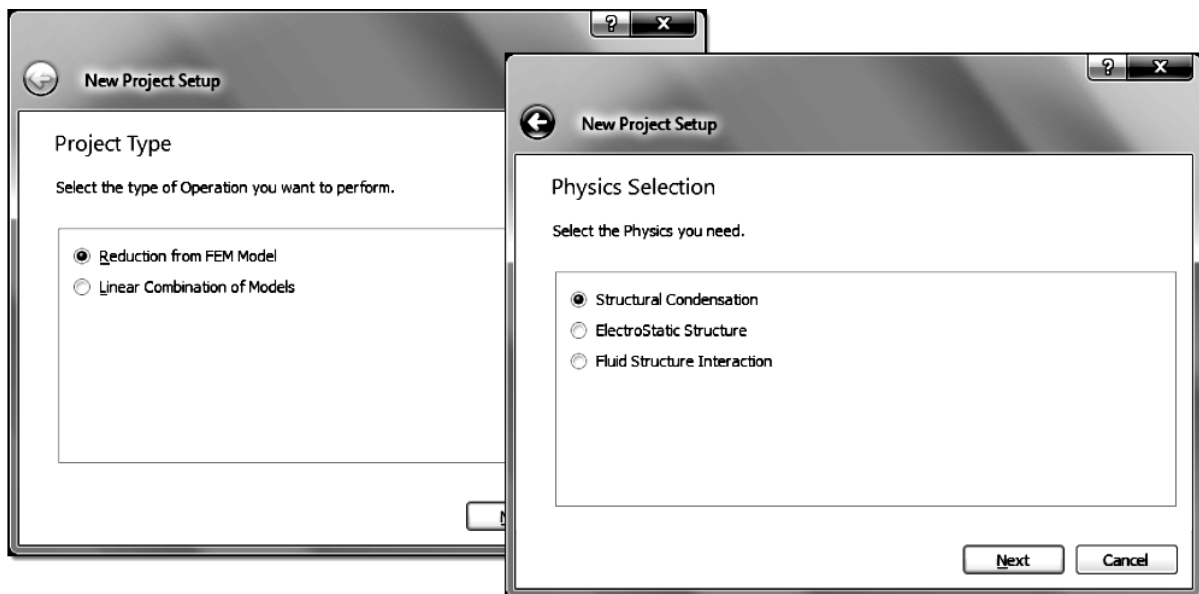


Рисунок 6.2 – Вибір відображення пристроїв MEMS в вигляді моделей з бібліотеки пакету MEMS Pro v6.0

Режими моделювання включають зміну потужності струму та напруги робочої точки, режими передачі постійного струму, Фур'є – аналіз, шумові характеристики, перехідну функцію, функцію передачі та параметричні функції. Крім того пакет містить потужні алгоритми оптимізації, що визначають параметри пристрою чи процесу, які підвищують ефективність проектування MEMS. Статистичний аналіз дозволяє дизайнерам моделювати хід технологічних процесів, проводити моделювання за методом Монте-Карло на базі статистичних розподілів параметрів процесу та геометричних

параметрів, створювати моделі поверхневих структур та проводити аналіз чутливості, щоб зрозуміти, які геометричні чи технологічні параметри найбільше впливають на характеристики пристрою та оцінюють придатність для виробництва.

Пакет MEMS Pro v6.0 дозволяє легко створювати та вносити зміни в схеми, і також створює спільно поєднані мережі (кола) для моделювання, оптимізації, статистичного аналізу та перевірки проміжних результатів розробки, поєднуючи конструкції MEMS та IC. Бібліотека компонентів включає символи та параметризовані моделі поведінки для різних компонентів MEMS. Інтегроване середовище моделювання дозволяє користувачам перевіряти та аналізувати проходження електричних сигналів, відображених на схемах, у вигляді епюр та графіків, одержаних в результаті симуляції. Розробнику також доступні дослідження частоти, форми та спотворення сигналів, амплітудна та фазова характеристика (рис. 6.3).

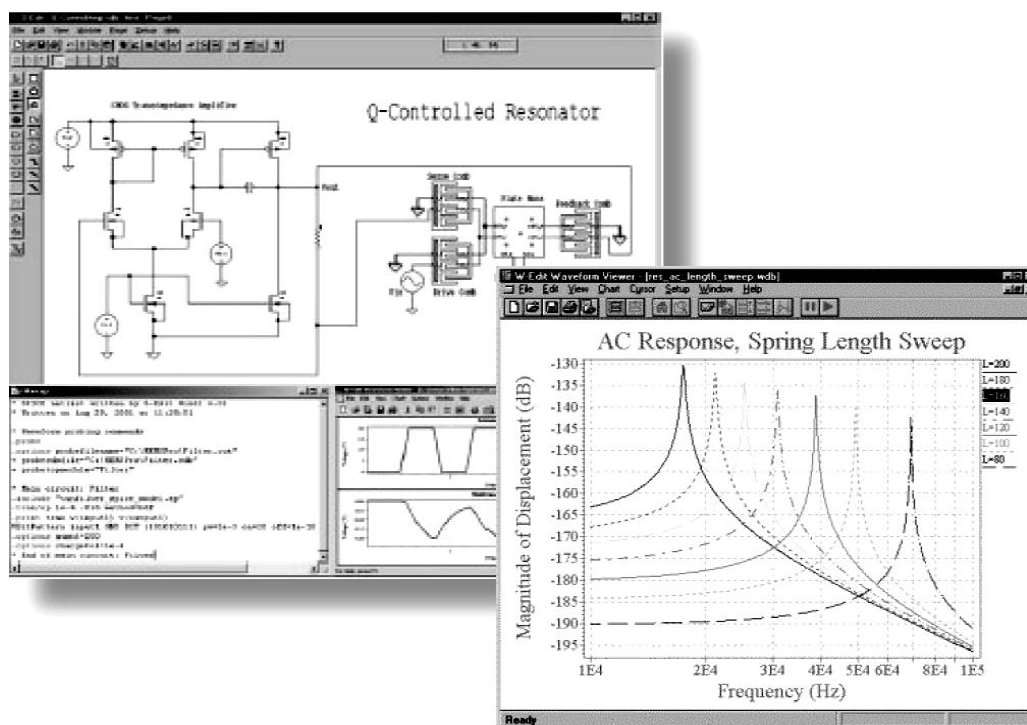


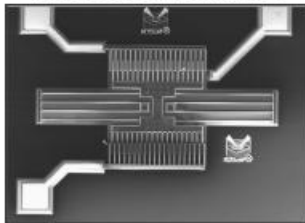
Рисунок 6.3 – Приклад дослідження електричних характеристик розробляемого пристрою за допомогою інструментів моделювання

6.2 Засоби моделювання та редагування

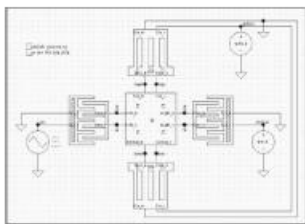
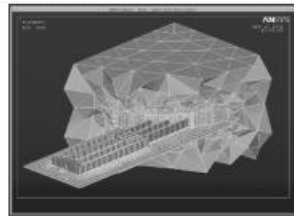
Інструменти моделювання *MEMS Modeler* автоматично генерують поведінкові моделі, готові до симуляції системи в цілому за допомогою даних пакетів аналізу. Складні кінцеві елементи пристроїв, що передбачають велику кількість ступенів свободи, зводяться до кількох основних. Користувачі також можуть створювати власні моделі на основі аналітичних рівнянь, і відповідний

інструмент генерує готові описи для моделювання в різних найбільш поширених форматах. Основні складові інструментів моделювання *MEMS Modeler* наведено на рис. 6.4.

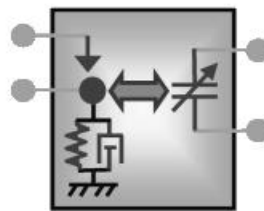
MEMS компоненти



Модель кінцевих елементів



Моделювання IC



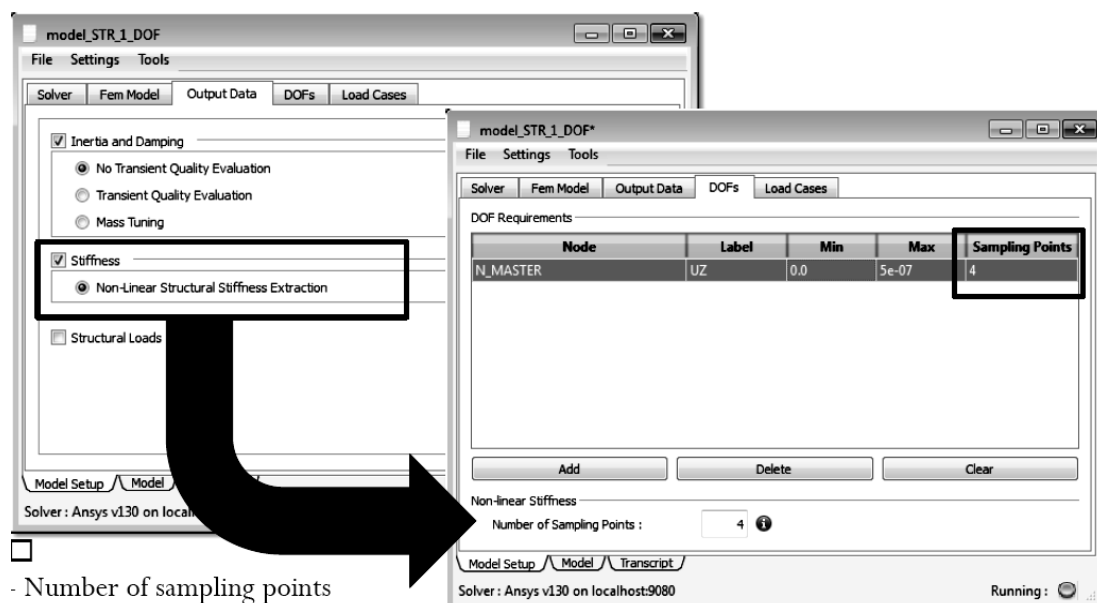
Поведінкова модель

Рисунок 6.4 – Основні складові інструментів моделювання *MEMS Modeler*

Редагування макета: фізичне середовище розробки конструкції пристроїв *MEMS Pro v6.0* включає головний редактор та спеціалізовані додатки, призначені для поєданого проектування MEMS та IC. Програма використовує інтуїтивно зрозумілий інтерфейс та надає конструктору всі функціональні можливості, пов'язані з конструюванням структур MEMS, що значно скорочує час компонування проекту. Генератор кривих дозволяє дизайнерам створювати примітиви MEMS, такі як тороїди, балки, сфери та загальні криві на основі аналітичних рівнянь. Інструмент *EasyMEMS* допомагає автоматизувати проектні процедури, що займають багато часу, для створення макету MEMS, наприклад створення масивів одиничних комірок. Корисні макроси включають генерування отворів і шарів для правильного формування структур MEMS. До пакету включений потужний інтерфейс для автоматизації налаштування та розширення набору команд і функцій редактора макета за допомогою мови C. Підтримка популярних вихідних форматів забезпечує сумісність конструкцій технологічних масок із сторонніми САПР і скорочує час до виробництва.

Програма *MEMS Verification* забезпечує конфігуровану за вимогами дизайнера перевірку правил розробки конструкції пристроїв, яка верифікує загальний макет MEMS відповідно до вимог виробництва. Перевірка запобігає дорогим помилкам проектування, що спричиняють додаткові цикли перезапуску виробництва, та забезпечує підвищення рівня технологічності.

Крім того, до програми верифікації включена перевірка правил проектування, що залежать від застосованого додатку та конкретного типу пристрою. Екстрактор *MEMS Verification* генерує пакет SPICE моделей з макета MEMC, включаючи механічні компоненти, їх параметри та можливість багатодоменного підключення комплекту комірок MEMS структур (рис. 6.5). Інструмент *LVS (Layout vs. Schematic)* приймає генеровані дані моделей та порівнює їх із списком SPICE, отриманим від схематичного редактора, що дає можливість переконатися, що маска відповідає завданню на проект.



- Number of sampling points

Рисунок 6.5 – Генерація даних моделей та порівняння їх із списком SPICE

Твердотільне моделювання в форматі 3D створює з опису конструювання пристрою і процесу виготовлення тривимірний макет пристрою MEMC. Простий у користуванні графічний інтерфейс дозволяє дизайнерам вводити та корегувати послідовності етапів технологічного процесу виготовлення інтегральної схеми. Підтримуються поверхневі та об'ємні технології процесів інтегрального виробництва, такі як осадження матеріалів, травлення, механічне шліфування, дифузія, епітаксія, маніпулювання гальванічним покриттям та обробка пластин. 3D-модель може бути масштабована і для перегляду може бути обрана підмножина шарів масок. Моделі можна переглядати в тривимірному форматі з обертанням, збільшенням або за попередньо встановленими вимогами. Додаток **поперечного перерізу** відображає переріз в Z-вимірі на основі визначеної користувачем лінії перерізу. Оскільки пристроям MEMS притаманна тривимірність, для використання цих інструментів дизайнеру важливо мати представлення отриманої структури пристрою в 3D - вигляді. Додаток **3D-To-Layout** перетворює суцільні тривимірні моделі в комплект 2D-масок, використовуючи надані виробником описи процесу виготовлення відповідно до фабричних нормалей, дозволяючи виправляти модифікації масок пристрою, зроблені в програмах 3D-аналізу.

Модуль підготовки виробництва, *CASTING Module*, дозволяє орієнтуватися на конкретні технологічні особливості та забезпечує згідно з законами України, право на інтелектуальну власність. Різноманітні модулі, що стосуються підготовки виробництва, повністю інтегровані з набором інструментів **SoftMEMS** для забезпечення сумісності виробничих процесів та технологій з провідними світовими виробниками MEMS. Модулі підготовки виробництва включають правила проектування, пошаровий опис масок, описи жертвних та конструкційних шарів, параметри процесу та властивості матеріалів та загальний опис процесу виготовлення. Таким чином, пакет SoftMEMS надає повний арсенал засобів для конструювання MEMC пристроїв (рис. 6.6) та забезпечує верифікацію та супроводження проекту від технічного завдання до реалізації в кремнії.

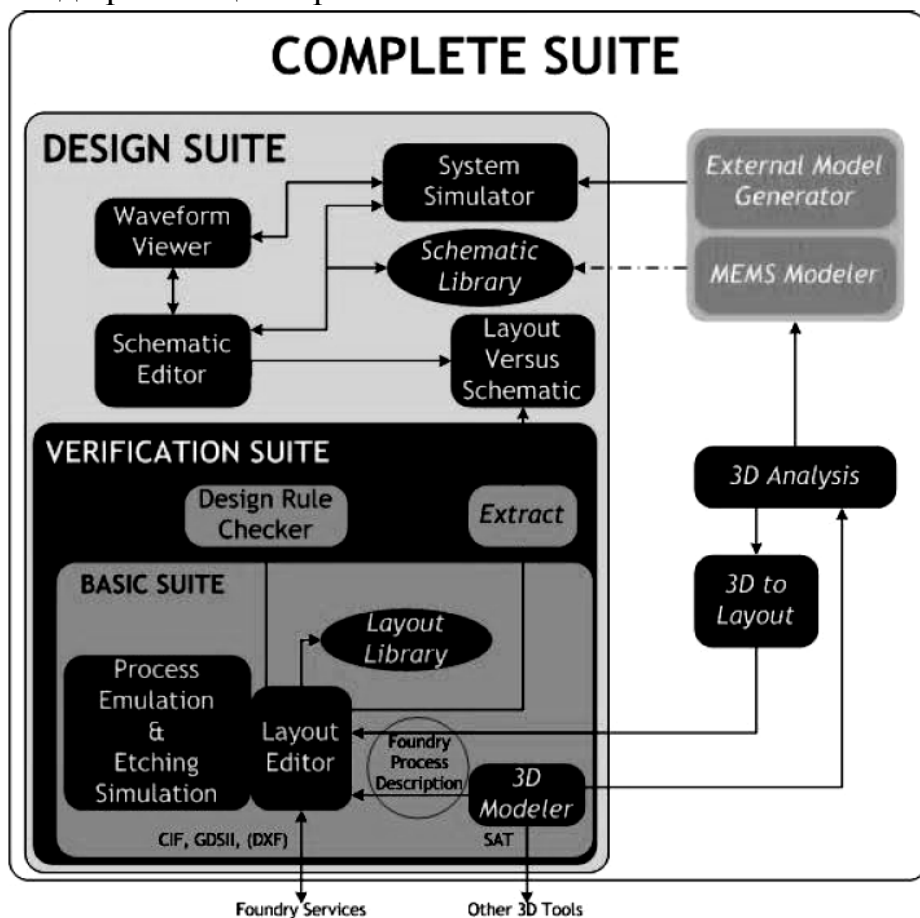


Рисунок 6.6 – Узагальнена структура пакету SoftMEMS

6.3 Контрольні запитання і завдання

1. Охарактеризуйте можливості пакету MEMS Pro v6.0.
2. Які засоби моделювання та редагування містить пакет MEMS Pro v6.0?
3. Що забезпечує програма MEMS Verification?
4. Які можливості твердотільного моделювання в форматі 3D?
5. Що входить до модуля підготовки виробництва, *CASTING Module*?

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Лысенко И. Е. Проектирование сенсорных и актюаторных элементов микросистемной техники / И. Е. Лысенко. – Таганрог: ТРТУ, 2005. – 103 с.
2. Теслюк В. М. Моделі та інформаційні технології синтезу мікроелектромеханічних систем: монографія / В. М. Теслюк. – Львів: Вежа і Ко, 2008 – 192 с.
3. Бондаренко І.М., Бородин О.В., Карнаушенко В.П. Проектування напівпровідникових приладів та інтегральних схем: Навч. посібник для студентів ЗВО. – Харків: ХНУРЕ. – 2018. – 177 с.
4. Petersen K. A new age for MEMS. The 13th International Conferences on Solid–State Sensors, Actuators and Microsystems, 2005. Digest of Technical Papers. TRANSDUCER'05. On pages: 1–4 Vol.1.
5. Васильев А. Производство МЭМС. Перспективы и решения / А. Васильев, Е. Борисов // ЭЛЕКТРОНИКА. Наука. Технология. Бизнес. – 2012. – № 3 (00117). – С. 60–64.
6. Теслюк В. М. Автоматизація проектування мікроелектромеханічних систем на компонентному рівні: монографія / В. М. Теслюк, П. Ю. Денисюк. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011 – 192 с.
7. Невлюдов И.Ш., Евсеев В. В., Бортников В.О., Замирец Я.О. Анализ современных средств автоматизированного проектирования микроэлектромеханических систем. Технология приборостроения №1, 2014. – с. 3–8.
8. Golovatyj A. VHDL–Ams Model of Integrated Membrane–Type Micro–Accelerometer with Delta–Sigma ($\Delta\sigma$) Analog–To–Digital Converter for Schematic Design Level / A. Golovatyj, V. Teslyuk, R. Kryvyj // ECONTechMOD. – 2015, vol. 4, no. 2. – P. 65–70.
9. Holovatyj A. Verilog–AMS model of comb–drive sensitive element of integrated capacitive microaccelerometer for behavioral level of computer–aided design / A. Holovatyj, V. Teslyuk, M. Lobur // ECONTechMOD. – 2014, vol. 3, no. 4. – P. 49–53.
10. Потапов Ю. В. Программное обеспечение Coventor [Электронный ресурс] . – Режим доступа: <http://www.chip-news.ru/archive/chipnews>
11. Area-Efficient Three Axis MEMS Lorentz Force Magnetometer, V. Rouf et al, IEEE Sensors Journal, Vol 13, 2013
12. Stable zipping RF MEMS varactors, Suan Hui Pu, Andrew S Holmes, Eric M Yeatman, Christos Papavassiliou and Stepan Lucyszyn, Imperial College London, UK – Journal of Micromechanics and Microengineering. 3/2010
13. Repulsive-force out-of-plane large stroke translation micro electrostatic actuator – S He1, R Ben Mrad and J Chong – Journal of Micromechanics and Microengineering.6/2011
14. A fully wafer-level packaged RF MEMS switch with low actuation voltage using a piezoelectric actuator – Jae-Hyoung Part et. al – Journal of Micromechanics and Microengineering. 9/2006

15. Simulink ver. 3.0, The Mathworks, Inc., Natick, MA. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mathworks.com>.
16. Getting Started with Simulink, The MathWorks, Inc., Natick, MA. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mathworks.com>.
17. Model-Based Design for Embedded Control Systems. White paper. – © 2019 The MathWorks, Inc.
18. Golovatyj A. VHDL–Ams Model of Integrated Membrane–Type Micro–Accelerometer with Delta–Sigma ($\Delta\sigma$) Analog–To–Digital Converter for Schematic Design Level / A. Golovatyj, V. Teslyuk, R. Kryvyy // ECONTECHMOD. – 2015, vol. 4, no. 2. – P. 65–70.
19. Holovatyuy A. Verilog–AMS model of comb–drive sensitive element of integrated capacitive microaccelerometer for behavioral level of computer–aided design / A. Holovatyuy, V. Teslyuk, M. Lobur // ECONTECHMOD. – 2014, vol. 3, no. 4. – P. 49–53.
20. Introduction to Designing Microwave Circuits Using EM Simulation. Jiyoun Munn. / COMSOL Blog.: July 19, 2017. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://https://www.comsol.com/blogs/>
21. Your Guide to Lumped Ports in the RF Module. Jiyoun Munn. / COMSOL Blog.: April 12, 2019. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://https://www.comsol.com/blogs/>
22. How to Simplify a Two-Port Device Model Using a Touchstone File Jiyoun Munn / COMSOL Blog.: April 3, 2019. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://https://www.comsol.com/blogs/>
23. MEMS Pro v6.0 , Tanner Research Inc. 180 North Vinedo Avenue Pasadena, California 91107 USA. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mems.louisville.edu/lutz/resources/>

Навчальне видання

БОНДАРЕНКО Ігор Миколайович,
БОРОДІН Олександр Васильович,
ГРИЦУНОВ Олександр Валентинович,
КАРНАУШЕНКО Володимир Петрович

СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ
МІКРОСИСТЕМ

Навчальний посібник

Відповідальний випусковий

І.М. Бондаренко

Редактор

О.Г. Троценко

Комп'ютерна верстка

Н.Є. Сіпатова

План 2021 (друге півріччя), поз. 2

Підп. до друку 6.05.2021. Формат 60x 84 ¹/₁₆. Спосіб друку – ризографія.

Умов. друк. арк. 8,4. Облік.вид.арк. 7,6. Тираж 50 прим.

Зам. № 1 – 2 Ціна договірна.

ХНУРЕ, 61166, Харків, пр. Науки, 14

Віддруковано у редакційно–видавничому відділі ХНУРЕ
Харків, пр. Науки 14