

ВСТУП

Протягом останніх років індустрія мікроелектроніки активно розвивається як у напрямі мініатюризації мікроелектронних пристроїв, так і у напрямі інтеграції в єдине ціле різних за фізичними принципами дії функціональних пристроїв. Називають такі інтегральні пристрої мікроелектромеханічними системами (МЕМС). У процесі розроблення таких мікросистем використовують досвід, знання, технічні прийоми і методи з різних галузей науки і техніки, що зумовлює необхідність функціональної інтеграції неоднорідних комп'ютерних систем або розроблення принципово нових інформаційних технологій (ІТ) проектування МЕМС. Центральне місце у таких інформаційних технологіях займає математичне забезпечення.

У галузі МЕМС за останні 30 років відбулися суттєві зміни, зокрема: значно вдосконалено технології їх виготовлення, стрімко розвинулася інфраструктура МЕМС, розпочато виробництво великої кількості різних конструкцій елементів МЕМС (давачі тиску, акселерометри, струменеві друкувальні головки, цифрові дзеркальні дисплеї) та загалом МЕМС. Розвиненість та домінуюча роль промисловості ІС разом з новими технологіями МЕМС відкривають нові можливості для мікроелектромеханічних систем.

У роботі розглянуто комп'ютерні методи в моделюванні та проектуванні мікроелектромеханічних систем. Основну увагу приділено компонентному рівню проектування, що передбачає аналіз фізичних процесів у МЕМС. Для цього детально описано особливості використання числового методу розв'язання задач математичної фізики – методу скінченних елементів. Крім того, для повноти висвітлення матеріалу, у роботі розглянуто питання валідації та забезпечення якості під час проектування МЕМС. Кожен розділ роботи супроводжується детальними ілюстративними прикладами, що спрямовані на краще розуміння та засвоєння матеріалу.

У першому розділі роботи висвітлено основи курсу комп'ютерних методів у інженерії мікросистем та, зокрема, методи ієрархічного проектування мікроелектромеханічних систем, описано види електромеханічних систем та параметри зростання їх світового виробництва. Порівнюються технології виготовлення МЕМС, що зазвичай визначають економічну та військову незалежність держави, забезпечують розвиток космічної сфери та конкурентоздатність продукції на світовому ринку. Наведено структуру та схему роботи мікродавачів та мікроактюаторів. Розділ описує застосування блочно-ієрархічного підходу до проектування МЕМС, що охоплює системний, схемотехнічний та компонентний рівні, відповідно до яких застосовуються методи проектування “зверху–вниз”, “знизу–вгору” та їх комбінації. Наведено динаміку тенденцій проектування на різних рівнях в останні роки. У розділі розглянуто методи автоматизованого проектування МЕМС та системи проектування МЕМС на компонентному рівні, подано їх порівняльні характеристики.

Другий розділ роботи має за мету ознайомити читача з основами формалізації задач компонентного рівня проектування МЕМС. Зокрема, розглядаються питання опису систем диференціальними рівняннями з частинними похідними еліптичного, гіперболічного та параболічного типів, що охоплюють: класифікацію рівнянь; використання операторних форм запису; визначення початкових і крайових умов, а також коректність постановки відповідних задач.

У третьому розділі викладено основи методу скінченних елементів – найрозвиненішого числового методу наближеного розв'язання задач моделювання фізичних

процесів у неперервних середовищах, що активно використовується на компонентному рівні проектування мікроелектромеханічних систем. Для кращого розуміння подано коротку історичну довідку щодо основних етапів розвитку задач моделювання та методу скінченних елементів у контексті загальніших методів зважених нев'язок, за допомогою яких можна розв'язати практично будь-яку задачу, визначену диференціальними рівняннями з частинними похідними. Розглядаються питання виведення слабких форм визначальних рівнянь за допомогою визначення головних та природних крайових умов задач, найпростіші симплекс-елементи та їх геометричний зміст. Наводяться теоретичні властивості числових методів наближеного розв'язання задач, з апріорними та апостеріорними оцінками точності, стійкості та збіжності. Описуються вимоги кускової визначеності інтерполяційних функцій скінченних елементів, їхня лінійна незалежність, повнота та допустимість використання.

У четвертому розділі розглянуто особливості застосування методу скінченних елементів на компонентному рівні проектування МЕМС. У такому контексті, на основі теорії подібності описано фізичні аналогії скінченноелементних моделей та дискретних систем загалом. Наведено способи розв'язання мультифізичних задач та систем диференціальних рівнянь. Розглянуто питання моделювання нелінійних та нестационарних задач.

У п'ятому розділі викладено особливості апроксимації методом скінченних елементів, детально описано формулювання інтерполяцій високих порядків точності. Наведено відмінності між симплекс-, комплекс-, мультиплекс-елементами та криволінійними скінченними елементами. Детально описано методи числового інтегрування під час побудови скінченноелементних моделей. Наведено методи побудови криволінійних елементів, зокрема з використанням змішувальних процесів, а також методи побудови так званих нескінченних елементів. Розглянуто питання узгодженості інтерполяційного базису.

Шостий розділ описує методи декомпозиції обчислень на компонентному рівні проектування МЕМС. Наведено основи доменної декомпозиції та розпаралелювання обчислень. У розділі розглянуто яскравий приклад таких методів – порівняно новий метод скінченних елементів розривів та з'єднань. Основний акцент зроблено на висвітленні геометричної інтерпретації методу, зокрема взаємозв'язків просторів лінійних операторів та векторів, що в них лежать. Для цього проаналізовано питання знаходження псевдообернених матриць та їх геометричного змісту.

У сьомому розділі окреслено основні напрями технологій проектування, валідації та забезпечення якості мікроелектромеханічних систем. Запропоновано технологію діагностування моделей систем на кристалах, яка ґрунтується на використанні транзакційних графів. Описується метод діагностування, спрямований на зменшення часу виявлення несправностей і пам'яті для зберігання діагностичної матриці за рахунок формування тернарних відносин між тестом, монітором і функціональним компонентом. Вирішуються завдання розроблення моделей цифрової системи у вигляді транзакційного графу і мультидерева таблиць несправностей, а також тернарні матриці активації функціональних компонентів вибраного набору моніторів за допомогою тестових послідовностей; завдання розроблення методів аналізу матриці активації з метою виявлення несправних блоків із заданою глибиною і синтезу логічних функцій для подальшого вбудованого апаратного діагностування несправностей.