Методичні вказівки

до виконання курсової роботи
з дисципліни
«Мікро- та нанотехнології»

для студентів
спеціальності 153 – Мікро- та наносистемна техніка

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

Методичні вказівки

до виконання курсової роботи з дисципліни «Мікро- та нанотехнології»

для студентів спеціальності 153 – Мікро- та наносистемна техніка

Вінниця
ВНТУ
2019

Рекомендовано до друку Методичною радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 6 від 21.02. 2019 р.)

Рецензенти:
О. В. Осадчук, доктор технічних наук, професор
Ю. В. Булига, кандидат технічних наук, доцент

Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни «Мікро- та нанотехнології» для студентів спеціальності 153 – Мікро та наносистемна техніка / Уклад. В. В. Мартинюк, О. І. Нікольський. – Вінниця : ВНТУ, 2019. – 19 с.

Вказівки підготовлено згідно з навчальним планом підготовки магістрів з автоматизації та приладобудування за спеціальністю 153 – Мікро- та наносистемна техніка. Наведено основні вимоги щодо організаційних питань підготовки курсової роботи, її оформлення та захисту, а також структуру курсової роботи з дисципліни «Мікро- та нанотехнології», необхідні довідкові дані.

ВСТУП

Методичні вказівки розроблено відповідно до навчального плану підготовки магістрів за спеціальністю 153 – Мікро- та наносистемна техніка.

Мета цієї розробки – допомогти студентові методично правильно організувати свою роботу при виконанні курсової роботи та надати практичну допомогу стосовно організаційних питань, забезпечення виконання вимог щодо її оформлення та захисту.

1 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ ЩОДО ОРГАНІЗАЦІЇ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТІВ. СТРУКТУРА КУРСОВОЇ РОБОТИ

Самостійна робота студентів в межах дисципліни «Мікро- та нанотехнології» є обов’язковою складовою навчального плану підготовки магістрів за спеціальністю 153 – Мікро та наносистемна техніка, яка проводиться з метою безпосереднього практичного засвоєння студентами теоретичних знань із визначення параметрів та характеристик приладів мікроелектроніки та наносистемної техніки, набуття ними навичок роботи з комп’ютерного моделювання структур таких приладів.

Основу самостійної роботи студентів з дисципліни «Мікро- та нанотехнології» становить курсова робота, яка виконується студентами у першому навчальному семестрі першого курсу магістерської підготовки одночасно з вивченням ними теоретичного матеріалу.

Тематика курсових робіт з цієї дисципліни розробляється кафедрою ЕНС і пропонується студентам за принципом вільного вибору, носить різноманітний характер і охоплює мікроелектромеханічні системи.

Мікроелектромеханічні системи (MEMS), п'єзоелектричні пристрої та перетворювачі набувають популярності і удосконалюються. Через їх розміри і складності моделювання САПР Comsol стає незамінним інструментом аналізу, проектування і оптимізації. Модуль MEMS активно застосовується в багатьох галузях техніки. Теми курсових робіт можуть бути таких напрямків:

1. MEMS датчики, акселерометри і приводи зробили величезний вплив на технології та технічні пристрої. Вони широко використовуються в найрізноманітніших пристроях: від мобільних телефонів і планшетів до датчиків вуглекислого газу і приладів вимірювання в'язкості крові, управляють подушками безпеки в системах безпеки автомобілів та ін. Їх робота базується на ряді пов'язаних фізичних явищ електромеханіки, джоулевому нагріванні, взаємодії конструкції з текучим середовищем і п'єзоелектрикою. Таким чином, датчики і приводи за своєю суттю є мультифізичними пристроями.

2. Резонансні мікроелектромеханічні системи застосовуються в безлічі сфер – від гіроскопів до кремнієвих годинників, які набувають популярності. Досить часто доводиться детально аналізувати їх резонансні властивості, зокрема й добротність кріплення резонатора, термопружне загасання в тонких плівках, послаблення пружності і наростання тиску.
3. П'єзоелектричні перетворювачі. Якщо через п'єзоелектричний кристал пустити змінний струм, то кристал почне генерувати високочастотні коливання, які в рідкому середовищі призводять до виникнення звуку. Ультразвукові п'єзоелектричні перетворювачі – це пристрої, що конвертують електричну енергію в ультразвукові хвилі в гідролокаторах, медичних приладах і мікрофонах. Для таких перетворювачів важливо вивчати не тільки п'єзоелектричні або магнітострикційні характеристики, але і взаємодію пристрою з текучим середовищем на межі між структурою і акустичним середовищем.
4. Радіочастотні MEMS. Радіочастотні пристрої, які зараз набувають популярності на ринку мікроелектромеханічних систем, дозволяють управляти радіочастотними характеристиками за рахунок своїх мікроелектромеханічних властивостей. У мобільних технологіях активно застосовуються BAW- і FBAR-резонатори, все більшого поширення набувають мікроелектромеханічні перемикачі. Для котушок індуктивності і конденсаторів, що мають функцію налаштування реактивності, які також відносяться до радіочастотних мікроелектромеханічних компонентів, важливо аналізувати електромеханічні характеристики спільно з їх радіочастотними функціями.
5. BioMEMS. Мікроелектромеханічні біокомпоненти застосовуються для біомедичних і біотехнологічних завдань. До них відносять електромеханічні датчики і резонатори, проте в першу чергу для BioMEMS важливі мікрогідродинамічні і електрокінематичні течії. Крім того, пристрої BioMEMS застосовуються і в суміжних галузях, зокрема й «лабораторії на чипі», де спостерігаються ефекти взаємодії конструкції з текучим середовищем і поверхневі акустичні хвилі (ПАР).

Якщо ж тематика курсової роботи збігається з тематикою наукової роботи студента або є складовою частиною його майбутньої магістерської дипломної роботи, то тема курсової роботи може бути запропонована самим виконавцем, але структура, обсяг і графік виконання роботи її обов’язково узгоджується з викладачем.

Курсова робота виконується відповідно до вимог ДСТУ 3008:2015 та відповідного Положення про курсове проектування у ВНТУ.

Щодо обсягу курсової роботи, то він може бути рекомендований у межах 30 сторінок з використанням стандартних аркушів білого паперу формату А4 (210×297 мм). Мова – українська. Для друкування застосовувати текстовий редактор MS WORD for WINDOWS, використавши шрифт Times New Roman (Cyr), 14 pt, через один інтервал

між рядками. Нумерація сторінок (починаючи з четвертої) – у правому верхньому куті.

Курсова робота має містити такі обов'язкові елементи: титульний аркуш, форма якого визначається, а приклад конкретного виконання подається у додатку А до цих методичних вказівок; індивідуальне завдання на курсову роботу (додаток Б); анотацію, де у стислій, лаконічній формі подається зміст та основні результати, які отримано під час виконання цієї курсової роботи (обсяг анотації, яка друкується на окремому аркуші і розміщується одразу ж після індивідуального завдання, не має перевищувати 10–12 рядків тексту), основну частину роботи.

У **вступі** необхідно, насамперед, сформулювати **актуальність** розробки чи дослідження (актуальність теми). Потім, виходячи з актуальності, визначають **мету** роботи, яка може полягати у покращенні деяких параметрів чи характеристик приладу, що досліджується (наприклад, «підвищення коефіцієнта передачі струму», «розширення частотного діапазону», «зменшення габаритних розмірів структури МЕМС» тощо). Задекларована мета передбачає формулювання конкретних практичних **завдань (**або **задач) дослідження**, виконання яких дозволить досягти необхідних результатів, визначених метою дослідження або розробки. Задачі дослідження формулюються відповідно до змісту курсової роботи. Окрім зазначених (актуальності, мети, задач дослідження) у вступі необхідно показати, що є **предметом дослідження** (зазвичай, це насамперед характеристики і параметри досліджуваного пристрою) і **об'єктом дослідження** (наприклад, процес перетворення оптичного випромінювання в електричний інформаційний сигнал), які **методи дослідження** були використані під час підготовки цієї роботи, у чому полягає **практична цінність** проведеного дослідження чи розробки.

Перший розділ рекомендується побудувати як аналіз стану питання, тобто на основі залучення якомога ширшого наявного літературного матеріалу (підручники, навчальні посібники, наукові монографії та статті з наукових журналів, описи патентів на винаходи тощо) критично висвітлити, в якому стані знаходиться об'єкт вашого дослідження, наскільки він поширений, де використовується, чи достатня теоретична база для аналізу та проектування цих приладів, які є шляхи покращення конструктивних чи експлуатаційних параметрів таких приладів (виключно відповідно до заявленої мети).

При аналізі стану питання обов'язковим є не тільки критичне висвітлення певної інформації про об'єкт дослідження, але й коректне ставлення до самих джерел інформації, про що свідчить наявність чи відсутність у тексті вашої роботи відповідних цифр у квадратних дужках, кожна з яких відповідає номеру того чи іншого видання зі списку використаної літератури, що обов'язково подається в кінці курсової роботи. Оформляти цей список необхідно з додержанням сучасних правил бібліографічного опису документів. При цьому не потрібно забувати, що

бібліографічний опис того чи іншого документа подається тільки **мовою оригіналу**.

Другий розділ, як правило, присвячується розрахункам конкретної МЕМС структури та аналізу її фізичної моделі з наперед заданими параметрами. При виконанні цього розділу курсової роботи потрібно використати всю наявну теоретичну базу, враховуючи як лекційний матеріал, так і рекомендовану вам спеціальну літературу. Якщо тема курсової роботи була запропонована самим її виконавцем, то структура і обсяг відповідних розрахунків мають бути обов'язково погоджені з керівником вашої курсової роботи і відповідним чином зафіксовані в індивідуальному завданні на КР.

Індивідуальне завдання може передбачати і елементи конструкторської роботи, а саме: відтворення у вигляді креслень розрахованих вами структур або зовнішнього вигляду (складального креслення) відповідних приладів. Такі креслення подаються як додаток до курсової роботи і оформляються відповідно до вимог ЄСКД («Єдиної системи конструкторської документації»).

В третьому розділі подаються результати досліджень заданої МЕМС структури за допомогою САПР COMSOL щодо можливості покращення її експлуатаційних чи конструктивно-технологічних параметрів. Цей розділ є елементом наукової роботи, основна мета якої – дослідження можливості суттєвого покращення конструктивних, технологічних або експлуатаційних параметрів чи характеристик МЕМС структури, що покладена в основу цієї курсової роботи.

Методи такого дослідження – це методи із залученням математичного і комп'ютерного моделювання. Результати таких досліджень, як правило, мають елементи наукової новизни або нового технічного рішення, які необхідно формально захистити або у вигляді наукової публікації (доповідь на науковій конференції, наукова стаття у фаховому журналі), або у вигляді заявки на відповідний патент.

Висновки, якими завершується будь-яка робота цього кваліфікаційного рівня, мають чітко (по пунктах) відповісти, що конкретно зроблено в цій роботі і які конкретні результати отримано. Прикладом такого запису може бути:

«1. Показано, що в інтегральному транзисторі з діодом Шотткі в режимі насичення при тих самих значеннях струмів бази і колектора пряма напруга на колекторному переході зменшується на 60 мВ, що призводить до зменшення струму інжекції і пропорційно цьому струму надлишкового заряду приблизно в 10 разів.

2. Показано, що за заданих умов формування структури МеН-транзистора внаслідок зменшення відстаней виток–затвор і стік–затвор крутизна характеристики транзистора може мути підвищена до значень порядку S/b = 250 мСм/мм».

Список використаної літератури оформлюється з урахуванням сучасних вимог до бібліографічного опису інформаційних джерел (ДСТУ ГОСТ 7.1:2006) у кінці курсової роботи (після висновків). Список складається за чергою посилань у тексті (а не за абеткою).

У тексті курсової роботи посилання ставляться в квадратні дужки (наприклад, [1, 2]).

Приклади бібліографічного опису інформаційних джерел наведено нижче.

Для книжок (підручники, навчальні посібники, монографії).

1. Осадчук О. В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі структур з від'ємним опором / Осадчук О. В. – Вінниця : УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2001. – 303 с.

2. Васильєва Л. Д. Напівпровідникові прилади : підручник / Васильєва Л. Д., Медведенко Б. І., Якименко Ю. І. – К. : ІВЦ «Видавництво «Політехніка», 2003. – 388 с.

Для наукових статей.

3. Орликовский А. А. Диагностика in situ плазменных технологических процессов микроэлектроники: Современное состояние и ближайшие перспективы. Часть IV / А. А. Орликовский, К. В. Руденко, Я. Н. Суханов // Микроэлектроника. – 2001. – Т. 30. – № 6. – С. 403 – 433.

4. Curtis B. J. Optical End-Point Detection for the Plasma Etching of Aluminium / B. J. Curtis / Solid State Technology. – 1980. – V. 23. – № 4. – P. 129 – 132.

Для патентів.

5. Патент України № 26976, H01L 21/302. Спосіб визначення моменту закінчення процесу плазмохімічного травлення / С. Ю. Кравченко, Ю. С. Кравченко, В. С. Осадчук , О. В. Осадчук – 2007. – Бюл. 16.

Для електронних джерел інформації.

6. Аверкин С. Н. Зондовая диагностика плазмы ВЧ и СВЧ источников в иммерсионном ионном имплантере [Электронный ресурс] / С. Н. Аверкин, А. П. Ершов, А. А. Орликовский, К. В. Руденко, Я. Н. Суханов / XXX Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС: междунар. науч.-техн. конференция, 24 – 28 февр. 2003 г.: тезисы докл., 2003.

Додатки до курсової роботи з фізичних основ електроніки подаються як продовження роботи на подальших її аркушах.

Кожен додаток має починатися з нової сторінки, мати заголовок, надрукований вгорі малими літерами з першої великої симетрично відносно тексту сторінки. Посередині рядка над заголовком малими літерами з першої великої має бути надруковано слово «Додаток _» і велика літера, що позначає додаток.

Додатки потрібно позначати послідовно літерами української абетки, за винятком літер Ґ, Є, З, І, Ї, Й, О, Ч, Ь, наприклад, «Додаток А», «Додаток Б».

Ілюстрації (рисунки) і таблиці в тексті курсової роботи оформлюються відповідно до затверджених норм і вимог.

Ілюстрації можуть бути розміщені як по тексту курсової роботи, так і в її додатках.

Всі ілюстрації нумерують в межах розділу: наприклад,: Рисунок 1.1, Рисунок 1.2. Посилання на ілюстрації подають так: «… на рис. 1.1 …». Посилання на раніше згадувані рисунки подають із скороченням слова «дивись», наприклад: «див. рис. 3.2».

Всі рисунки повинні мати назву і пояснювальні дані (підрисунковий текст), якщо це не зрозуміло з тексту, наприклад, «Рисунок 3.1 – Вихідні характеристики біполярного транзистора» (крапка в кінці назви рисунка не ставиться).

Цифровий матеріал, як правило, оформлюють у вигляді таблиць. Кожна таблиця повинна мати назву, якщо її зміст не зрозумілий з тексту, яку треба виконувати малими літерами (перша велика) над таблицею (над лівим верхнім кутом), наприклад, «Таблиця 2.4 – Параметри МДН-структури з полісиліцієвим заслоном» (без крапки у кінці).

Якщо розміри таблиці виходять за формат листа, то таблицю ділять на частини, які залежно від особливості таблиці переносять на інші листи або розташовують на одному листі, наприклад, одна під одною.

Слово «Таблиця _», назва і порядковий номер таблиці вказують один раз на першою частиною таблиці, над наступними частинами пишуть слова «Продовження таблиці _» із зазначенням її номера.

Всі таблиці, якщо їх в роботі більше, ніж одна, нумерують в межах розділу.

2 КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ЩОДО ДЕЯКИХ КОМПОНЕНТІВ МЕМС

Структура мікроелектромеханічних систем. МЕМС складається з низки елементів, які призначені для виконання більше ніж однієї функції. Рішення про це приймається конструктором, якщо необхідно зменшити кількість елементів конструкції чи задля спрощення технологічних процесів. Але ще й досі використовуються такі елементи, про які можна сказати, що вони виконують ту чи іншу певну функцію. Загалом МЕМС можна розглядати як пристрій, що містить функціональні модулі: виконавчий механізм – мікрорушій для приведення у рух необхідних механізмів – інколи його називають мікроактюатором чи просто актюатором (з англ. actuator – виконавчий механізм); чутливий елемент, чи сенсор (з англ. sensor – давач, первинний вимірювальний перетворювач), що реагує на зміну певної фізичної величини і перетворює її до

відповідного виду; керований механізм – завершальна ланка ланцюга керування (таких ланцюгів керування може бути кілька, і вони можуть бути різними) – такими механізмами можуть бути мікродзеркала, керовані мікроклапани, мембранні мікропомпи тощо; пристрої передавання енергії – для передавання енергії (руху, електричного струму, тиску рідин тощо) від однієї ланки до іншої; пристрої керування (електричні чи механічні) – для приведення у дію відповідних актюаторів, часто з урахуванням інформації від сенсорів та відповідно до закладених принципів побудови МЕМС. Для виготовлення сучасних МЕМС використовується широка гама матеріалів: різноманітні метали у чистому вигляді та у сплавах, неметали, мінеральні сполуки та органічні матеріали. Звичайно, намагаються використовувати якомога меншу кількість різнорідних матеріалів, щоб покращити технологічність МЕМС та знизити собівартість продукції. Тому розширення спектра матеріалів прийнятне лише за наявності специфічних вимог до елементів пристрою [5]. Частка приладів МЕМС у промисловій продукції невпинно зростає з року у рік. Така популяризація МЕМС зумовлена широким спектром їхнього застосування чи не у кожній сфері діяльності людини. Такі прилади зручно та вигідно використовувати практично усюди завдяки їхнім перевагам порівняно з традиційними пристроями. Малі розміри, низьке споживання енергії, велика щільність розміщення елементів системи усередині, можливість створювати пристрої з набором функцій та параметрами, необхідними конкретному замовнику – ось основні привабливі характеристики, що впливають на прийняття рішення інженерами багатьох світових підприємств різних розмірів на користь збільшення частки використання МЕМС у своїй продукції.

Основні принципи функціонування мікроелектромеханічних систем. Розглядаючи увесь спектр МЕМС, необхідно ознайомитись з основними принципами та методами їхнього функціонування.

Актюатори. Як було зазначено вище, одним з основних елементів МЕМС є актюатори – вузли, що виконують функцію перетворення одного виду енергії на інший вид (здебільшого, на механічну роботу). Для створення цих вузлів можуть використовуватися різні фізичні явища, і їхня кількість безперервно зростає. Часто застосовуються електростатичні, термоелектричні, п’єзоелектричні, осмотичні, гідравлічні, пневматичні, електромагнітні та інші типи актюаторів. Звичайно, кожен з цих видів має переваги для якогось конкретного випадку, що зумовлено технологічними умовами та конструкторським рішенням. Також не варто забувати про недоліки певних типів пристроїв за конкретних умов їхнього використання. Чи не найпоширенішим є використання електростатичного актюатора. Його дія ґрунтується на використанні сили притягання між електродами з різними зарядами. Для збільшення сили притягання застосовують електроди у вигляді гребенів, пальці яких розміщені у міжпальцевих проміжках іншого електрода. Ця конструкція дає змогу на малій площі виготовити електроди зі значною поверхнею. У таких

конструкціях використовується втягування пальців одного гребеня у міжпальцеві проміжки іншого під дією електростатичної сили. Сила, яку розвиває такий актюатор, є незначною і залежить від напруги між електродами та від площі взаємодії електродів – залежно від використаних технологій сила, яку розвивають такі мікроактюатори, може сягати в межах 1–10 мкН/мм^2 при напрузі 15 В [1]. Тому для збільшення тягової сили часто користуються нарощуванням кількості електродів (так званий каскадний актюатор) чи збільшенням робочої напруги між електродами. Сам актюатор є простим у виготовленні і не потребує використання великої кількості типів матеріалів – здебільшого для формування структури актюатора використовується кремній, що проводить електричний струм сам, а для покращання провідності використовується насичення різними домішками (n-, p- кремній), для формування діелектрика застосовують оксид кремнію, що досить просто отримують окисненням кремнію, чи використовують властивості p-n-каналу. Взагалі кремнієва технологія для виготовлення МЕМС є найпривабливішою сьогодні, оскільки не потребує значних змін технології виготовлення кремнієвих інтегральних мікросхем. Термоелектричні актюатори за дією нагадують реакцію біметалевої пластини на її нагрівання. Сама конструкція залежно від напряму дії (горизонтальна – переміщення лежить у площині основи, вертикальна – у напрямку від основи вгору) має різний вигляд. На відміну від біметалевої пластини, де використовуються два типи металів з різними коефіцієнтами теплового розширення, в МЕМС актюаторах часто застосовують конструкції у вигляді петлі, що утворюється двома чи більшою кількістю пластин з різною площею поверхні. Одні кінці пластин жорстко закріплені на основі, а інші мають спільну точку кріплення. Через таку петлю пропускають електричний струм і пластини нагріваються. Завдяки різній площі їхніх поверхонь вони видовжуються по-різному. За певного з'єднання кінців такої петлі виникає результуюча сила, що переміщує кінець у бік холоднішої пластини. Звичайно, конструкція таких актюаторів може і бути іншою, але принцип функціонування залишається тим самим. Серед наявних конструкцій заслуговують на увагу також каскадні термоелектричні актюатори, в яких незначне переміщення одного елемента можна збільшити завдяки використанню кількох актюаторів, де кожен новий елемент прикріплений до «рухомого» кінця попереднього. Електромагнітні актюатори також поширені у МЕМС. Але потреба у виготовленні котушок достатньо великих розмірів, застосуванні феромагнітних матеріалів чи постійних магнітів дещо гальмує застосування таких механізмів. Незважаючи на перелічені незручності, ці актюатори успішно використовуються багатьма виробниками МЕМС. Найпоширенішими конструкціями електромагнітних актюаторів є дві: одна – з нерухомими котушками керування та з рухомими елементами (якорями) з феромагнітних матеріалів; інша – з котушкою, поміщеною на рухомий елемент, і вся конструкція приладу

перебуває у сильному магнітному полі постійного магніту, розміщеного над системою. Це саме магнітне поле може використовуватися іншими актюаторами у радіусі дії магнітного поля. Звичайно, конструкцію пристроїв вибирають залежно від багатьох чинників, зокрема враховується собівартість приладу, що зростає через ускладнення технологічного процесу. Доволі поширене використання п'єзоелектричного ефекту для побудови актюаторів МЕМС. Хоча такі актюатори і ускладнюють технологічний процес та збільшують розміри конструкції, але велика навантажувальна здатність цього актюатора компенсує зазначені недоліки. На практиці використовується ряд різноманітних конструкцій такого актюатора. Широкий спектр сучасної п'єзокераміки дає змогу максимально пристосувати актюатор до всіх вимог як конструкції, так і електронної системи приладу. Багато вчених та конструкторів МЕМС вважають, що у найближчому майбутньому найперспективнішими будуть гідравлічні та пневматичні актюатори. На сучасному етапі існують гідравлічні турбінні актюатори, що перетворюють потік рідини на обертовий рух турбіни, та актюатори осмотичного типу [6] – тиск рідини приводить у рух еластичну мембрану. Цілком зрозуміло, що для функціонування актюаторів таких типів недостатньо мати лише мембрани та турбіни. У цих випадках необхідно створювати мініатюрні компресорні системи на цій самій основі. Такі компресори часто мають вигляд мембранної помпи з приводом від п'єзоелектричного актюатора. Окрім компресорної системи, необхідно мати регулювальну та керувальну системи, що додатково ускладнює систему. Але все ж переваги таких актюаторів доволі відчутні – проста конструкція осмотичних актюаторів, підведення та відведення робочої рідини здійснюється по малих каналах і може використовуватись багатьма системами, переносити теплоту тощо. Звичайно, розглянуті методи та способи приведення в рух не вичерпуються вищеописаними. Використання якогось конкретного типу актюатора зумовлюється, передусім, конструкторською доцільністю, доступними на певний період технологічними можливостями, та, звичайно, вартістю.

Сенсори. Те саме можна сказати і про використання різних типів сенсорів у приладах МЕМС. Спектр наявних типів сенсорів в арсеналі конструктора значно ширший та різноманітніший, що зумовлено багатоплановим застосуванням МЕМС. Переважно використовуються ємнісні, п'єзоелектричні, тензорезистивні, терморезистивні, фотоелектричні сенсори, сенсори на ефекті Холла тощо. Так, ємнісні сенсори часто використовуються для вимірювання переміщень різноманітних механічних елементів. Часто сам сенсор має вигляд гребенів-електродів, що своїми пальцями входять у міжпальцеві проміжки іншого гребеневого електрода. Іншою конструкцією ємнісного сенсора можуть бути і дві пластини, одна з яких нерухома, а інша – рухома, наприклад, мембрана чи пружна балка тощо. Конструкція ємнісного

сенсора забезпечує зміну відстані між пластинами чи площі цих поверхонь пластин, що розміщені у безпосередній близькості. Всі елементи та вузли багатьох МЕМС можна розділити на дві групи: група основних елементів та вузлів, призначених для безпосереднього виконання основної функції, заради якої було створено цей прилад, та інша група – група допоміжних елементів та вузлів, призначених для забезпечення роботоздатності основної групи. Як приклад можна навести більшість вищеперелічених сенсорів, які слугують для перетворення переміщень пружних первинних вимірювальних перетворювачів: пружних балок, мембран, пружин, стержнів, струн тощо. Також яскравим таким прикладом є використання гідравлічної системи (помпи, провідних каналів, клапанів та спеціальних електронних схем) для приведення в рух основних вузлів, які могли б використовувати й іншу енергію.

Пристрої керування. Електронні пристрої керування МЕМС виконують різні функції. Ураховуючи те, що сучасні електронні системи здебільшого ґрунтуються на цифрових технологіях, знайти пристрій без мікрокомп'ютера стає дедалі важче. Функції обміну інформацією між сенсорами та виконавчими механізмами саме й виконують мікроконтролери. Звичайно, поширене й використання аналогових систем, але найбільшою гнучкістю, функціональністю та зручністю для користувача все ж характеризуються цифрові системи на спеціалізованих мікрокомп'ютерах – спеціальних мікроконтролерах. Подання результатів вимірювання у цифровому вигляді є найприйнятнішим з погляду простоти побудови систем та якості опрацювання таких результатів на електронно-обчислювальних машинах. Інколи навіть використовується попереднє оброблення цих результатів всередині приладу МЕМС. Система керування попри функції інтерфейсу з системою користувача може виконувати й допоміжні функції щодо забезпечення роботи усієї системи. Це можуть бути функції формування певних електричних сигналів, функції самоперевірки, калібрування тощо.

Галузі застосування. Як було зазначено вище, виготовляють прилади МЕМС для вирішення надзвичайно великої кількості завдань у різних галузях науки та техніки, і сфера їхніх практичних застосувань щоденно розширюється. Для цілісності картини можна навести кілька прикладів використань технологій МЕМС. Наприклад мікроакселерометри та мікрогіроскопи на основі МЕМС широко застосовують у багатьох видах сучасної техніки, завдяки чому ці пристрої «відчувають» зміну свого розміщення у просторі і реагують на нього. Найпоширенішими є вмонтовані у систему пасивної безпеки автомобіля мікроакселерометри для визначення моменту викиду повітряної подушки. Ця група приладів МЕМС має найбільшу частку на ринку МЕМС технологій. Друкувальні головки струменевих принтерів також виготовляють за допомогою технологій МЕМС, і частка цих пристроїв також поступово зростає. У медицині, фармакології та хімічній промисловості також широко

використовуються прилади МЕМС, зокрема, як мікродозатори, мікрофільтри, часто також застосовуються лише окремі технології та матеріали, що використовуються для виготовлення приладів МЕМС, наприклад, кремнієві мікроголки, спеціальні електроди для електронних стимуляторів тощо. З розвитком високошвидкісних оптико-волоконних ліній передавання інформації вирішенням проблеми їхнього перемикання з найменшими втратами достатньо ефективними стали спеціалізовані оптичні комутатори МЕМС з багатьма каналами комутації. У таких приладах можуть використовуватися різноманітні методи перенапрямлення світлового потоку, зокрема, це може бути масив керованих мікродзеркал, що відхиляються на певний кут за командою від електронної системи керування. Такий самий принцип часто використовують для побудови цифрових проекторів та проекційних телевізорів. Якість зображення таких пристроїв є не гіршою від традиційних відеопроекційних систем, а інколи навіть і кращою.

Проблеми проектування мікоелектромеханічних систем. Перераховувати конкретні застосування приладів МЕМС можна надзвичайно довго, але всі ці прилади створені конструкторами МЕМС як результат чіткого уявлення про можливості використовуваних технологічних процесів під час розв’язання поставленої задачі. Основними проблемами залишається розробка нових ефективних технологій формування об'ємних структур з різних матеріалів. Необхідно запропонувати технологію з достатньою роздільною здатністю для створення ще менших деталей та елементів з високими механічними характеристиками. Ще однією проблемою для мікросистемних технологій (МСТ) також є обмежений спектр матеріалів, що використовуються для виготовлення МЕМС. Створення нових та залучення вже випробуваних матеріалів до мікросистемних технологій – основні задачі, що стоять перед технологами МЕМС. Нові матеріали з унікальними властивостями та характеристиками можуть значно спростити конструкцію мікросистем чи розширити їхню функціональність. Істотними постають і питання проектування окремих елементів конструкції МЕМС та усієї системи загалом. Щоб оцінити поведінку майбутньої конструкції у різних умовах експлуатації та вплив різноманітних навантажень, потрібно створювати складні математичні моделі для урахування багатьох чинників, що впливають на роботу МЕМС. Щоб створити таку модель, необхідно залучати значні інформаційні ресурси: довідкові та експериментальні дані щодо характеристик конструктивних матеріалів, різноманітні складні фізико-математичні теорії та відповідне програмне забезпечення ЕОМ для забезпечення роботи таких моделей. Якісні та ефективні моделі значно пришвидшують вихід нової продукції, зменшують витрати на розроблення та модифікацію проміжних примірників. Тому для конструювання відповідного приладу МЕМС фактично неможливо обійтися без спеціальних комп’ютерних конструкторських програм. Сучасні програми

конструювання, моделювання та аналізування дають конструктору змогу досить швидко створити модель такого приладу, використовуючи електронні бібліотеки конструктивних елементів, матеріалів тощо. Також робота з віртуальною моделлю майбутнього приладу дає змогу здійснити серію випробовувань та проаналізувати поведінку цього приладу в умовах нормальної роботи, перевантажень та нестандартних умов. Така перевірка дає змогу виявити помилки при конструюванні, виборі матеріалів конструкції, а також оптимізувати параметри окремих елементів для відповідного застосування ще на етапах проміжного проектування. Отже, використання програм моделювання та аналізу дає змогу пришвидшити розроблення робочого варіанта приладу, підібрати необхідні технологічні процеси та матеріали і зменшити обсяг випробовувань великої кількості дослідних зразків. Значна кількість рухомих елементів конструкції сучасного приладу МЕМС є показником складності конструкції та довершеності технологій, що використовуються. Але це є одночасно і випробовуванням конструкторського рішення щодо зручності та продуманості послідовного відтворення усіх необхідних зв'язків – це так звана проблема складання. Здебільшого намагаються створювати всі елементи об'єднаними в одну складну конструкцію, замінюючи елементи рухомого з'єднання на гнучкі пружні елементи. Але якщо така заміна є неприйнятною, то існують два виходи – або робити конструкцію такою, щоб рухомі елементи відділялися від решти на етапі однієї з останніх технологічних операцій так, щоб цей елемент вже перебував на своєму місці або для його встановлення в необхідну позицію використовувати спеціальні пристрої – мікроманіпулятори з високою точністю позиціонування. Звичайно, у таких випадках перевагу надають проектуванню спеціального технологічного рішення без втручання у послідовність розташування та виготовлення елементів конструкції. Попри проблему складання, у таких випадках виникає проблема боротьби з тертям у місцях дотику, що зменшує ефективність їхньої взаємодії. Для приладів МЕМС через спосіб виготовлення, а це, здебільшого, пошарове нарощування матеріалів; через недосконалість технологічних процесів та через надзвичайно малі розміри та сили, що характерні для такого типу приладів, навіть невелика для звичайного приладобудування шорсткість дотичних поверхонь надзвичайно сильно впливає на значення сили тертя та на ступінь зношення. Використання звичайних приладних олив є неприйнятним через їхню велику в'язкість та порівняно великі сили поверхневого натягу, що пов'язано з розміром їхніх молекул. Для рідкого змащення у таких випадках використовується етиловий спирт як рідина з оптимальним розміром молекул та з низькими показниками поверхневого натягу.

Висновки. Попри достатню кількість проблем, що вирішуються під час створення приладів МЕМС, вони є надзвичайно привабливими для замовників через велику кількість переваг над традиційними приладами

мехатроніки. Значну роль тут відіграють низька маса конструкції, її малі розміри та енергоспоживання, що робить їх привабливими у тих напрямках, де значення сил, що формуються приладами, не відіграє ніякого значення, а лише необхідне для функціонування внутрішніх систем. Інколи прилади МЕМС використовуються лише через можливість виготовлення об'ємних мікроструктур – наприклад, для високочастотних гребеневих фільтрів, мікроіндуктивностей та мікроємностей (через малі розміри) тощо. Враховуючи вищенаведене та надзвичайно швидкий рівень росту технологій, можна з впевненістю сказати, що сама галузь МЕМС має значні перспективи розвитку та розширення на тривалий період [7].

1. Status of the MEMS industry 2007 Edition. Sample of the analysis – © 2007, Yole Dévelopment SARL.

2. Шурыгина В. Долгожданные МЭМС. Технология малых форм. // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 4/2002. – С.8–13.

3. Going beyond silicon MEMS with EFAB technology // White paper – ©2004. Microfabrica. Inc.

4. Microelectromechanical Systems: Advanced Materials and Fabrication Methods Committee on Advanced Materials and Fabrication Methods for Microelectromechanical Systems, Commission on Engineering and Technical Systems, National Research Council ISBN: 0-309-59151-1, 76 pages, 8.5x11, (1997).

5. Implications of Emerging Micro and Nanotechnology Committee on Implications of Emerging Micro- and Nanotechnologies, National Research Council ISBN: 0- 309-50521-6, 266 pages, 6x9, (2002).

6. Yu-Chuan Su, Liwei Lin, Albert P. Pisano A. Water-Powered Osmotic Microactuator // JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS, VOL. 11, NO. 6, DECEMBER 2002.

7. Гірняк Ю. Мікроелектромеханічні системи у сучасному приладобудуванні. / Юрій Гірняк Вимірювальна техніка та метрологія, № 69, 2008 р., С. 97–102.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Специальные методы постобработки и визуализации в COMSOL [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.comsol.ru/sc/resources/pdf-offers/COMSOL_HANDBOOK_SERIES_Essentials_of_Postprocessing_and_Visualization.ru.HR.pdf
2. Основы постобработки и визуализации в COMSOL Multiphysics®. РУКОВОДСТВА COMSOL. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.comsol.ru/sc/resources/pdf-offers/COMSOL_HANDBOOK_SERIES_Essentials_of_Postprocessing_and_Visualization-50_RUS_high.pdf
3. Введение в COMSOL Multiphysics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.comsol.ru/shared/downloads/IntroductionToCOMSOLMultiphysicsRU.pdf
4. COMSOL [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.comsol.ru/
5. Material Properties./ Over 120+ Material properties such as density, thermal conductivity, specific heat, melting and boiling points, and thermal expansion coefficient./ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.customthermoelectric.com/MaterialProperties.htm
6. Thermophysical Properties of Fluid Systems. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/
7. Thermophysical properties database of materials for light water reactors and heavy water reactors. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1496_web.pdf
8. Яворський Н. Б.. Комп’ютерні методи в інженерії мікроелектромеханічних систем : навчальний посібник / Яворський Н. Б., Теслюк В. М., Литвинова Є. І. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2016. – 285 с.
9. Гуртов В. А. Микроэлектромеханические системы : учеб. пособие / Гуртов В. А., Беляев М. А., Бакшеева А. Г. – Петрозаводск : Из-во ПетрГУ, 2016. – 172 с.
10. Мальцева П. П. Нано- и микросистемная техника. От исследований к разработкам / Под ред. П. П. Мальцева. – М. : Техносфера, 2005. – 592 с.

Додаток А
Зразок титульної сторінки курсової роботи

ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Кафедра електроніки та наносистем

КУРСОВА РОБОТА

з дисципліни: «Мікро- та нанотехнології»
на тему: «ВОЛОГОЧУТЛИВИЙ СЕНСОР»

студента 1 курсу групи МП-16м
галузь знань __15 – Автоматизація та приладобудування
спеціальність 153 – Мікро- та наносистемна техніка
ІВАНЕНКО І. І.

Керівник: к.т.н., доцент МАРТИНЮК В. В.

Національна шкала _____
Кількість балів: _____ Оцінка: ECTS_____

Члени комісії _____ _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

_____ _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

_____ _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

м. Вінниця 2019 рік

Додаток Б

Зразок індивідуального завдання на курсову роботу

ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав. кафедри електроніки та наносистем
_____Й. Й. Білинський
«___»_____2019 р.

ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ
на курсову роботу
з дисципліни «Мікро- та нанотехнології»
студенту 1 курсу гр. МП-16м Іваненку І. І.

на тему: «ВОЛОГОЧУТЛИВИЙ СЕНСОР»

1. Пропонується: провести аналіз стану питання щодо дослідження розробки. Надати короткий опис проблем, що виникають на даному етапі проектування, перспективи розвитку відповідних напрямків науки та техніки; вибір та обґрунтування аналогів. Показати існуючі способи вирішення технічних проблем, їх аналіз і недоліки. Всі порівняння необхідно провести з кращими зразками техніки, які є не тільки в країні, але і в світі, провести патентний пошук та встановити патентну чистоту майбутніх конструкцій.

2. Навести та проаналізувати математичну модель та принципи роботи МЕМС.

3. Зробити комп'ютерне моделювання МЕМС структури за допомогою САПР COMSOL. Проаналізувати представлені результати досліджень заданої МЕМС, щодо можливості покращення її експлуатаційних чи конструктивно-технологічних параметрів.

Основні вихідні дані:

Дата попереднього захисту роботи „ ___ ” _____ 20__ р.

Завдання видав:
Керівник КР_____ Мартинюк В. В., к.т.н., доцент

„__” _____20__ р.

Завдання отримав:
студент_____ Іваненко І. І.
„__” _____20__ р.

Навчальне видання

Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни «Мікро- та нанотехнології»

для студентів спеціальності 153 – Мікро- та наносистемна техніка

Укладачі: *Володимир Валерійович Мартинюк*
Олександр Іванович Нікольський

Рукопис оформив *В. Мартинюк*

Редактор *Т. Старічек*

Оригінал-макет підготував *О. Ткачук*

Підписано до друку 07.06.2019.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різографічний. Ум. друк. арк. 1,14.
Наклад 40 (1-й запуск 1–21) пр. Зам. № 2019-084.

Видавець та виготовлювач
Вінницький національний технічний університет,
інформаційний редакційно-видавничий центр.
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Хмельницьке шосе, 95,
м. Вінниця, 21021.
Тел. (0432) 65-18-06.
press.vntu.edu.ua;
E-mail: kivc.vntu@gmail.com.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.