



## МІКРОМЕХАНІКА

### Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

#### Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	<i>Перший (бакалаврський)</i>
Галузь знань	<i>153 Автоматизація та приладобудування<sup>1</sup></i>
Спеціальність	<i>153 Мікро- та наносистемна техніка</i>
Освітня програма	<i>Мікро- та наноелектроніка</i>
Статус дисципліни	<i>Вибіркова</i>
Форма навчання	<i>Очна (денна)</i>
Рік підготовки, семестр	<i>3 курс, осінній семестр</i>
Обсяг дисципліни	<i>4 кредити (120 годин)</i>
Семестровий контроль/ контрольні заходи	<i>Залік / Контрольні роботи, ДКР</i>
Розклад занять	<i>rozklad.kpi.ua</i>
Мова викладання	<i>Українська</i>
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор: к.т.н. ЛУПИНА Борис Іванович, <a href="mailto:b.lupyna@kpi.ua">b.lupyna@kpi.ua</a> , <a href="mailto:b.lupyna-me@ill.kpi.ua">b.lupyna-me@ill.kpi.ua</a> . моб.+38 050 949 82 76 (mobile + Telegram + Viber) <sup>2</sup> Практичні / Семінарські: к.т.н. ЛУПИНА Борис Іванович, <a href="mailto:b.lupyna@kpi.ua">b.lupyna@kpi.ua</a> , <a href="mailto:b.lupyna-me@ill.kpi.ua">b.lupyna-me@ill.kpi.ua</a> . моб.+38 050 949 82 76 (mobile + Telegram + Viber) Лабораторні: не передбачено
Розміщення курсу	Посилання на дистанційний ресурс код класу: <b>fpjeu7q</b> <a href="https://classroom.google.com/u/0/c/MTUyNzYxMzQzMzc3">https://classroom.google.com/u/0/c/MTUyNzYxMzQzMzc3</a> віддалено: за посиланням <a href="https://meet.google.com/fzg-cjyt-yzn">https://meet.google.com/fzg-cjyt-yzn</a>

#### Програма навчальної дисципліни

##### 1. Опис навчальної дисципліни, її мета, предмет вивчення та результати навчання

Навчальна дисципліна «Мікромеханіка» є вибіркоvim освітнім компонентом і належить до циклу професійної підготовки.

В рамках навчальної дисципліни «Мікромеханіка» вивчається сукупність наукових, технічних і технологічних способів, що забезпечують створення в об'ємі і (або) на поверхні твердого тіла впорядкованої композиції мікронних і субмікронних областей матеріалів із заданими складом, структурою і геометрією, спрямованих на реалізацію функцій сприйняття, перетворення, зберігання, обробки, трансляції інформації, енергії, руху і генерації керуючих впливів в необхідних режимах і умовах експлуатації. Мікромеханічна електронна система - це інтегрована інформаційно-керуюча система, технологічно, функціонально і структурно об'єднана для збору і обробки інформації в реальному масштабі часу і подальшого вироблення впливів на виконавчі елементи або об'єкт управління. Як правило, мікромеханічна система виконується на основі базових та модифікованих технологічних процесів

<sup>1</sup> В полях Галузь знань/Спеціальність/Освітня програма:

Для дисциплін професійно-практичної підготовки зазначається інформація відповідно до навчального плану. Для соціально-гуманітарних дисциплін вказується перелік галузей, спеціальностей, або «для всіх».

<sup>2</sup> Електронна пошта викладача або інші контакти для зворотного зв'язку, можливо зазначити прийомні години або години для комунікації у разі зазначення контактних телефонів. Для силабусу дисципліни, яку викладає багато викладачів (наприклад, історія, філософія тощо) можна зазначити сторінку сайту де представлено контактну інформацію викладачів для відповідних груп, факультетів, інститутів.

мікроелектроніки і містить наступні вузли: первинний електронний перетворювальний пристрій – сенсор (прийм, первинне перетворення сигналів); вторинний перетворювач сигналів (обробка, перетворення, нормування, зберігання, розподіл і передача інформації); виконавчий пристрій (актюатор, силовий термінал).

**Функціонально завершений мікроелектронний пристрій - виріб мікросистемної техніки - включає сукупність механічних та (мікро-) електронних чутливих, перетворювальних, керуючих і функціональних виконавчих елементів і компонентів, реалізованих в єдиному конструктивному виконанні, принцип дії яких заснований на електрофізичних, електромеханічних, теплофізичних, електрохімічних, електронно-оптичних, фотохімічних процесах і явищах з урахуванням ефектів масштабування при переході від макро- до мікро- і нано-розмірних рівнів, і призначених для реалізації функцій реєстрації, прийому, перетворення, зберігання, передачі інформації, енергії і руху для виконання функції кінцевого призначення.**

**Метою навчальної дисципліни Мікроелектроніка є формування у студентів:**

- здатностей застосовувати сучасні базові та модифіковані технологічні процеси мікроелектроніки для розробки і проектування мікро-електро-механічних систем через послідовність технологічних операцій групової обробки поверхні та об'єму матеріалу заготовки з метою виготовлення, складання, корпусування і вимірювання елементів, компонентів і вузлів мікросистеми;
- володіння методами розрахунку, моделювання, тестування, градування первинних перетворювачів і виконавчих вузлів мікросистемної техніки;
- здатностей критично аналізувати сучасний стан розвитку механічних і електронних компонентів мікросистемної техніки і вузлів, призначених для контролю або реалізації виконавчих електромеханічних елементів;
- орієнтації в номенклатурі, технічних та економічних характеристиках комерційно доступних на світовому ринку та наявних на ринку України мікроелектронічних виробів та систем.
- уявлень про міждисциплінарний характер розробок в галузі мікросистемної техніки, що забезпечують створення в об'ємі і (або) на поверхні твердого тіла впорядкованої композиції мікронних і субмікронних областей матеріалів із заданими складом, структурою і геометрією, спрямованих на реалізацію функцій сприйняття, перетворення, зберігання, обробки, трансляції інформації, енергії, руху і генерації керуючих впливів;
- стійких уявлень про мікроелектронні системи як про інтегровані інформаційно - керуючі системи, функціонально і структурно об'єднані для збору і обробки інформації в реальному масштабі часу і подальшого вироблення впливів на виконавчі електромеханічні елементи або об'єкт управління;

**Метою навчальної дисципліни Мікроелектроніка є формування у студентів умінь:**

- аналізувати особливості функціонування мікроелектронічних компонентів мікросистемної техніки;
- роботи з окремими компонентами мікросистемної техніки, призначеними для контролю фізичних параметрів середовища або реалізації заданих механічних впливів на нього;
- визначити комплекс статичних та динамічних характеристик компонентів мікросистемної техніки, необхідних для їх прогнозованої експлуатації в складі інтегрованої інформаційно - керуючої системи специфічного призначення;

- застосувати функціональний компонент мікросистемної техніки при створенні технічних систем медичного та загальнотехнічного призначення.

Майбутньому фахівцю зі спеціальності Мікро- та наносистемної техніки варто вивчати дану дисципліну, оскільки вона дає прикладні знання з опису електро-фізичних характеристик сучасних електронних пристроїв, з основ проектування мікромеханічних пристроїв з оптимальним використанням властивостей матеріалів, які використовуються в мікро- та наносистемній техніці.

Вивчення навчальної дисципліни «Мікромеханіка» забезпечить студентів наступні компетентності: здатність розуміти принципи функціонування та будувати математичні моделі сучасних пристроїв мікросистемної техніки, здатність ефективно використовувати електро-фізичні властивості сучасних матеріалів електроніки і технологічні засади виготовлення компонентів та вузлів мікро-електро-механічних систем (МЕМС) сенсорів і виконавчих пристроїв (актюаторів) для їх проектування і виготовлення на виробничих потужностях сучасного електронного виробництва, при їх розробці, проектуванні та експлуатації

Метою навчального модулю «Мікромеханіка» є також ознайомлення студентів з законами мікросвіту та показати їх конструктивну та функціональну відмінність від традиційних аналогів; сприяти у оволодінні навичками по застосуванні теоретичних знань при вирішенні практичних завдань.

## **2. Пререквізити та постреквізити дисципліни (місце в структурно-логічній схемі навчання за відповідною освітньою програмою)**

Для успішного вивчення даної дисципліни студенти мають попередньо успішно засвоїти наступні дисципліни (пререквізити дисципліни): «Фізика», «Твердотільна електроніка», «Технологічні основи електроніки».

Результати навчання даної дисципліни використовуються для вивчення наступних дисциплін (постреквізити дисципліни): «Напівпровідникова електроніка», «Фізико-технологічні основи наноелектроніки», «Матеріали і компоненти мікро- та наносистемної техніки», переддипломна практика та дипломне проектування.

## **3. Зміст навчальної дисципліни**

1. Вступ. Коротка історія мікромеханіки як напрямку мікроелектроніки, передумови її виникнення і розвитку, основні науково-технічні події та здобутки. Області ефективного застосування сучасних мікроелектромеханічних систем (МЕМС), приклади успішного впровадження МЕМС розробок у масове виробництво.

2. Термінологія виробів мікросистемної техніки. Конструкції основних вузлів мікромеханічних пристроїв, їх характерні розміри, функціональне призначення.

3. Формування поняття про міждисциплінарний (мультифізичний) характер функціонування мікромеханічних пристроїв. Основні закони механіки, гідродинаміки, теплофізики, електромагнетизму. Системи фундаментальних рівнянь, які описують процеси у виробках мікросистемної техніки. Взаємозв'язок процесів різної фізичної природи, характерних для мікромеханічних пристроїв. Електро-механічна, електро-теплова, електромагнітна взаємодія, взаємозв'язок гідравлічних і теплових процесів у потокоформуєчих мікроканалах.

4. Мікроелектронні технології виготовлення компонентів поверхневої та об'ємної мікромеханіки. Кремній як механічний конструктивний матеріал. Анізотропне хімічне травлення кремнію як технологія отримання об'ємних мікромеханічних деталей і вузлів.

Основні стандартні технологічні процеси виготовлення електронних і механічних компонентів та вузлів мікросистемної техніки. Специфічні технологічні процеси (глибокого травлення з фронтального боку, наскрізного травлення підкладки із зворотного боку, корпусування, формування окремих мікромеханічних вузлів методами перевернутого кристала), їх технологічні параметри.

5. Фізичні властивості конструктивних матеріалів і розмірні ефекти в них, які ефективно використовуються у виробі мікросистемної техніки. Основи теорії подібності. Безрозмірні комплекси як інструмент аналізу характеру протікання фізичних процесів різної природи. Мікромеханічні елементи мікросистемної техніки у зовнішньому силовому та тепловому полях.

6. Моделювання процесів активного нагрівання елементів теплоізолюваної структури електричним струмом. Кругова та прямокутна діелектричні мембрани, мікромеханічний електропровідний місток (балка) на діелектричній підкладці і опорах сталої температури, консоль з нагрівачем на вільному кінці. Аналіз теплообмінних процесів між елементами ТІС, середовищем в потокоформуючому каналі і корпусом перетворювача.

7. Первинні перетворювачі фізичних параметрів середовища (сенсори) пасивного (термо-, тензо-, п'єзорезисторні) та активного типів. Поняття про характеристику перетворення, чутливість, порогові характеристики, вимірювальний (динамічний) діапазон, впливні величини, шуми, режими експлуатації, довготривалу стабільність.

8. Первинні перетворювачі механічних параметрів середовища: абсолютного тиску (барометри, теплові вакуумметри типу Пірані), диференціального (мембранного, термоанемометричного, калориметричного типів), лінійних та кутових швидкостей і прискорення, висоти, орієнтації в гравітаційному та магнітному полі Землі, теплові акселерометри без гравітаційної маси.

9. Виконавчі пристрої мікромеханічних систем (актюатори), мікромеханізми, мікромашини. Мікронасоси, мікроклапани, сопла, потокоформуючі канали. Керовані мікроприводи, оптоелектромеханічні компоненти.

10. Гідродинаміка рідини і газу в мікромеханічних пристроях, мікро- та нано-витратоміри об'ємних витрат флюїду – рідини або газу. Методика шунтуючого каналу при проектуванні витратомірів та проточних сенсорів диференціального тиску. Потокоформуючі та поточкорезистивні елементи витратомірів (трубки Ліллі, Піто, Флейша).

11. Вторинні перетворювачі. Операційний та вимірювальний підсилювачі, перелік основних параметрів, методи їх вимірювання. Поняття про зворотний зв'язок, частотний діапазон. Аналого-цифрові перетворювачі. Джерела опорного живлення. Пристрої збору та обробки інформації, включаючи бездротові.

12. Резисторні вимірювальні схеми. Різновид мостів Уїтстона, лінійність характеристики перетворення, відхилення від лінійності, чутливість місткової схеми до зміни номіналів резисторів. Мостові резисторні схеми що самобалансуються, побудовані на основі операційного підсилювача, режими їх живлення (сталого струму, сталої напруги, сталої температури, сталої різниці температур). Методи компенсації паразитних впливних величин.

13. Сучасні методи проектування окремих мікромеханічних вузлів та систем. Огляд програмних середовищ мультифізичного моделювання процесів в мікросистемах (COMSOL Multiphysics, ANSYS). Програмні середовища для реєстрації, обробки, аналізу та збереження результатів вимірювання (LabVIEW).

14. Типи аналогових та цифрових дротових та бездротових вихідних інтерфейсів сучасних мікромеханічних виробів. Типи вихідних інтерфейсів сучасних мікромеханічних пристроїв. Аналого-цифрове перетворення, типи цифрових інтерфейсів, безпровідний

зв'язок між первинним і вторинним перетворювачами. Пристрої збору та обробки інформації, платформи для створення віртуальних вимірювальних та виконавчих пристроїв, спеціалізовані програмні середовища (LabVIEW).

15. Номенклатура комерційно доступних мікромеханічних пристроїв від провідних світових виробників (Sensirion, First Sensor, Honeywell, Motorola, Analog Devices, Omron) перелік та порівняльна характеристика їх технічних параметрів. Перелік основних параметрів окремих типів первинних перетворювачів, методи їх вимірювання, режими експлуатації. Структурні схеми сучасних мікромеханічних сенсорів, типові основні функціональні вузли.

16. Перспективні сучасні наукові розробки в провідних наукових закладах. Ініціативні розробки MEMS пристроїв, які доведені до рівня стартапів або комерційно доступні на ринку на поточний момент, їх техніко-економічні показники.

17. Приклад використання мікромеханічної системи в медичних приладах діагностики функції зовнішнього дихання людини. Медико – технічні та метрологічні вимоги, їх виконання. Методи створення та лінеаризації характеристики перетворення (калібрування), перелік вимірюваних та обчислюваних параметрів, основи формування діагностичного висновку.

18. Імплантовані, автономні та дистанційно керовані мікро- та робото-технічні системи. Аналітичні мікросистеми, лабораторії на кристалі. Особливості використання виробів мікросистемної техніки в системах загальнотехнічного, автомобільного, енергозберігаючого, спеціального, медичного призначення.

#### **4. Навчальні матеріали та ресурси**

##### *Базова література:*

1. Основи технології виготовлення елементів мікро- та наносистемної техніки : Текст лекцій [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка» освітньої програми «Мікро- та наноелектроніка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Ю. В. Діденко, Д. Д. Татарчук. – Електронні текстові дані (1 файл: 8,8 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 113 с.

2. Москалюк В.О., Тимофеев В.І. «Моделювання приладів мікро- і наноелектроніки»: [Електронний ресурс]: підручник для аспірантів спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка», та освітньо-наукової програми «Мікро- та наносистемна техніка» / В.О. Москалюк, В.І.Тимофеев; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 22,9 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. –164 с.

3. Лобур М. Основи мікросистемних пристроїв : навч. посіб. / М. Лобур, М. Мельник. – Львівська політехніка, 2016. – 258 с.

4. Яворський Н.Б., Теслюк В.М., Литвинова Є.І. Комп'ютерні методи в інженерії мікро-електро-механічних систем. Навчальний посібник. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2016. - 285 с.

5. Теслюк В. М. Моделі та інформаційні технології синтезу мікроелектромеханічних систем / В. М. Теслюк // Монографія. – Львів : Вежа і Ко, 2008. – 192 с.

##### *Додаткова література:*

1. Petersen K.E. Silicon as a mechanical material / K.E. Petersen // Proc. IEEE Electron Devices, vol. 70, №5, – 1982. P. 420 – 457.

2. The MEMS Handbook. Edited by Mohamed Gad-El-Hak, University of Notre Dame, CRC Press. (Mechanical engineering handbook series), 2002.

3. Kim E. S. Fundamentals of Microelectromechanical Systems (MEMS) / Eun Sok Kim. – McGraw Hill, 2021. – 416 p.

4. Yang Zh. *Advanced MEMS/NEMS Fabrication and Sensors* / Zhuoqing Yang. – Springer Cham, 2022. – 312 p.
5. Gerlach G. *Introduction to Microsystem Technology* / Gerald Gerlach, Wolfram Dotzel. – John Wiley & Sons Inc, 2008. – 377 p.
6. Tilli M. *Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies* / Markku Tilli et al. – Elsevier, 2020. – 1026 p.

Зазначену літературу можна знайти в бібліотеці КПІ ім.І.Сікорського, на сайті кафедри мікроелектроніки (<http://me.kpi.ua/index.php?id=61>) або в інтернеті.

Можна надати рекомендації та роз'яснення:

- де можна знайти зазначені матеріали (бібліотека, методичний кабінет, інтернет тощо);
- що з цього є обов'язковим для прочитання, а що факультативним;
- як саме студент/аспірант має використовувати ці матеріали (читати повністю, ознайомитись тощо);
- зв'язок цих ресурсів з конкретними темами дисципліни.

Бажаємо зазначати не більше п'яти базових джерел, які є вільно доступними, та не більше 20 додаткових.

## Навчальний контент

### 5. Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Методика вивчення дисципліни полягає у викладенні теоретичної частини матеріалу на лекційних заняттях та ознайомлення студентів на практичних заняттях з конкретними прикладами застосування функціонально закінчених та комерційно доступних виробів мікроелектроніки.

В лекційному матеріалі головний акцент зроблено на постановку фізичної задачі, формування у студентів фізичних уявлень, а також на аналізі математичних моделей мікроелектронічних вузлів, основних аналітичних залежностей і формул.

Застосовуються стратегії активного і колективного навчання, які визначаються наступними методами і технологіями:

- 1) метод проблемного викладу (лекції);
- 2) особистісно-орієнтовані (розвиваючі) технології, засновані на методах «мозкового штурму» та «аналізу ситуацій» (практичні заняття);
- 3) доповнення традиційних навчальних занять засобами взаємодії на основі мережевих комунікаційних можливостей (технологія Google Classroom та електронні презентації для лекційних і практичних занять).

#### Тематика практичних занять

1. Мікроелектронічний вимірювальний перетворювач тиску X-ducer; номенклатура та технічні характеристики комерційно доступних сенсорів без температурної компенсації вихідного сигналу, компенсованих з аналоговим та цифровим інтерфейсом. Патенти компаній Motorola та Freescale.
2. Мікроелектронічний вимірювальний перетворювач диференціального тиску, масових та об'ємних витрат серій AWM2000, AWM3000 компанії HONEYWELL, конструкція, вимірювальні параметри.
3. Мікроелектронічні сенсори диференціального тиску фірми Sensirion. Цифровий вимірювач об'ємних витрат моделі Sensirion SFM3000.

4. Багатопараметричні мікромеханічні первинні перетворювачі (за матеріалами оглядових наукових публікацій після 2015 р.)

5. Мікромеханічні сенсори лінійної швидкості та об'ємних витрат – огляди.

Надається інформація (за розділами, темами) про всі навчальні заняття (лекції, практичні, семінарські, лабораторні) та надаються рекомендації щодо їх засвоєння (наприклад, у формі календарного плану чи деталізованого опису кожного заняття та запланованої роботи).

## 6. Самостійна робота студента/аспіранта

### Домашня контрольна робота

Для стимуляції самостійної роботи студентів, заохочення їх до самовдосконалення та підготовки до наукової та інженерної практичної діяльності в кредитному модулі передбачено в якості індивідуального завдання домашні контрольні роботи з наступними технічними документами: науковими публікаціями, патентами на винахід за тематикою кредитного модуля, а також із документацією виробників комерційно доступних мікромеханічних пристроїв (Datasheets). В самостійній роботі студентам пропонується підготувати презентації за літературними джерелами, запропонованими викладачем, а також зробити розширений літературний пошук за ключовими словами публікації. Студенти виступають перед аудиторією групи з презентацією, відповідають на запитання викладача і учасників аудиторії, задають питання одногрупникам.

Зазначаються види самостійної роботи (підготовка до аудиторних занять, проведення розрахунків за первинними даними, отриманими на лабораторних заняттях, розв'язок задач, написання реферату, виконання розрахункової роботи, виконання домашньої контрольної роботи тощо) та терміни часу, які на це відводяться.

## Політика та контроль

### 7. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Система вимог, які ставляться перед студентом:

Академічна доброчесність. Дотримання академічної доброчесності студентами передбачає:

- самостійне виконання навчальних завдань, завдань поточного та підсумкового контролю результатів навчання (для осіб з особливими освітніми потребами ця вимога застосовується з урахуванням їхніх індивідуальних потреб і можливостей);
- посилення на джерела інформації у разі використання ідей, розробок, тверджень, відомостей;
- дотримання норм законодавства про авторське право і суміжні права;
- надання достовірної інформації про результати власної навчальної (наукової, творчої) діяльності, використанні методики досліджень і джерела інформації.

Порушенням академічної доброчесності вважається:

- академічний плагіат - оприлюднення (частково або повністю) наукових (творчих) результатів, отриманих іншими особами, як результатів власного дослідження (творчості) та/або відтворення опублікованих текстів (оприлюднених творів мистецтва) інших авторів без зазначення авторства;
- самоплагіат - оприлюднення (частково або повністю) власних раніше опублікованих наукових результатів як нових наукових результатів.

За порушення академічної доброчесності здобувачі освіти можуть бути притягнені до такої академічної відповідальності:

- - повторне проходження оцінювання (контрольна робота, іспит, залік тощо);
- - повторне проходження відповідного освітнього компонента освітньої програми.

*Політика запізнення. За несвоєчасно виконані завдання буде накладено штраф 10 відсотків від загальної кількості балів за це завдання. Примітка. Виключення можуть бути зроблені до невчасно зданих завдань з поважних причин.*

*Політика щодо відвідування. Відвідування занять є обов'язковим. За об'єктивних причин (наприклад, пандемія, хвороба, міжнародне стажування) навчання може відбуватися в он-лайн-формі за погодженням із керівником курсу.*

*Лекційні та практичні заняття проводяться згідно до діючого положення КПІ ім. Ігоря Сікорського. Відвідування занять є обов'язковим.*

*Зазначається система вимог, які викладач ставить перед студентом/аспірантом:*

- правила відвідування занять (як лекцій, так і практичних/лабораторних);*
- правила поведінки на заняттях (активність, підготовка коротких доповідей чи текстів, відключення телефонів, використання засобів зв'язку для пошуку інформації на гугл-диску викладача чи в інтернеті тощо);*
- правила захисту лабораторних робіт;*
- правила захисту індивідуальних завдань;*
- правила призначення заохочувальних та штрафних балів;*
- політика дедлайнів та перескладань;*
- політика щодо академічної доброчесності;*
- інші вимоги, що не суперечать законодавству України та нормативним документам Університету.*

## **8. Види контролю та рейтингова система оцінювання результатів навчання (PCO)**

*Для одержання заліку "автоматом" потрібно набрати більше 60 балів, які можна одержати за виконання обов'язкових завдань (виконання ДКР, практичних робіт та написання модульної контрольної роботи) та систематично відвідавши лекційні заняття (пройшовши експрес-тест за матеріалами лекцій).*

*Поточний контроль: експрес-опитування (тест).*

*З метою контролю процесу засвоєння учбового матеріалу у курсі передбачена модульна контрольна робота. Оцінювання контрольної роботи здійснюється згідно рейтингової системи. За неправильні відповіді бали не зараховуються, за неточні або не повні відповіді бали знижуються.*

*Оцінювання практичних робіт та домашньої контрольної роботи проводиться шляхом опитування в процесі захисту роботи.*

*Календарний контроль: провадиться двічі на семестр як моніторинг поточного стану виконання вимог силабусу. Для успішного проходження першого календарного контролю: студент має набрати не менше 20% балів від максимального сумарного рейтингу протягом семестру. Для успішного проходження другого календарного контролю студент має набрати не менше 40% балів від максимального рейтингу.*

*Семестровий контроль здійснюється у вигляді заліку.*

*Студенти, які набрали протягом семестру необхідну для позитивної оцінки кількість балів мають можливості:*

*- не складати залік, а отримати оцінку „автоматом” відповідно до набраного рейтингу з дисципліни;*

*- складати залік з метою підвищення оцінки.*

*У разі отримання на заліку оцінки нижчої, ніж за рейтингом, за студентом не зберігається оцінка отримана „автоматом”.*

*Студенти, семестровий рейтинг яких відповідає оцінці „незадовільно”, зобов'язані складати залік.*

*Студенти, які за семестровим рейтингом не допущені до заліку з цієї дисципліни, зобов'язані підвищити його до рівня не менше 40%.*

*Оцінка визначається за сумою набраних рейтингових балів відповідно до системи розрахунку шкали рейтингу.*



Рейтинговий бал студента нараховується за наступними правилами:

1. Виконання та захист практичних робіт

Ваговий бал 5. Максимальна кількість балів  $5 \times 9 = 45$ . Бали нараховуються в разі правильного виконання завдань передбачених практичними роботами та за результатами захисту робіт. Захист полягає у відповіді на запитання викладача.

3. Модульна контрольна робота – максимальний бал 30.

4. ДКР – максимальний бал 25.

Система рейтингових (вагових) балів № п/п	Заняття, що підлягають рейтинговій оцінці	Загальна кількість	Макс. бал	Число балів на відмінно
1.	Оцінювані практичні роботи: виконання та захист	9	5	45
2.	Модульна контрольна робота	1	30	30
3.	ДКР	1	25	25
4.		Рейтинг за курс, R	100	

Вказуються всі види контролю та бали за кожен елемент контролю, наприклад:

Поточний контроль: експрес-опитування, опитування за темою заняття, МКР, тест тощо  
Календарний контроль: провадиться двічі на семестр як моніторинг поточного стану виконання вимог силабусу.

Семестровий контроль: залік.

Умови допуску до семестрового контролю: мінімально позитивна оцінка за індивідуальне завдання / семестровий рейтинг більше 60 балів.

Таблиця відповідності рейтингових балів оцінкам за університетською шкалою:

Кількість балів	Оцінка
100-95	Відмінно
94-85	Дуже добре
84-75	Добре
74-65	Задовільно
64-60	Достатньо
Менше 60	Незадовільно
Не виконані умови допуску	Не допущено

## 9. Додаткова інформація з дисципліни (освітнього компонента)

**Перелік питань, які виносяться на семестровий контроль (залік):**

1. Дайте означення мікро-електро-механічної системи, мікросистемної техніки, МЕМС – технології. Назвіть основні стандартні технологічні процеси виготовлення електронних і механічних компонентів та вузлів мікросистемної техніки.

2. Опишіть міждисциплінарний (мультифізичний) характер функціонування мікромеханічних пристроїв. Запишіть відповідні фізичні величини в рамках уявлень про електричні, гідравлічні та теплові аналогії.

3. Опишіть тип кристалічної ґратки кремнію та його анізотропні властивості, що надають можливості створювати об'ємні структури компонентів мікромеханіки, вкажіть площини найшвидшого та найповільнішого травлення в рідинних травниках.
4. Опишіть коротко анізотропне хімічне травлення кремнію як технологію отримання об'ємних мікромеханічних деталей і вузлів. Назвіть основні специфічні технологічні процеси виготовлення мікромеханічних елементів за технологією рідинного травлення.
5. Опишіть особливості мікроелектронної технології виготовлення компонентів поверхневої та об'ємної мікромеханіки. В чому переваги використання кремнію як механічного конструктивного матеріалу?
6. Назвіть основні стандартні технологічні процеси виготовлення електронних і механічних компонентів та вузлів мікросистемної техніки. Назвіть основні специфічні технологічні процеси.
7. Назвіть типи матеріалів та наведіть приклади металевих провідникових матеріалів, діелектриків, напівпровідників, що використовуються при конструюванні мікромеханічних об'єктів.
8. Літографія як метод створення рисунків об'єктів мікронних та субмікронних розмірів в технології мікроелектроніки та мікромеханіки. Використання літографії для створення мікромеханічних об'єктів методом травлення монокристалічного кремнію з фронтального боку пластини.
9. Особливості використання двосторонньої фотолітографії при створенні мікромеханічних об'єктів методом рідинного травлення монокристалічного кремнію зі зворотного боку пластини. Роздільна здатність літографії (мінімальний розмір елемента) та фізичні процеси, що її визначають.
10. Наведіть ескізи порожнин травлення кремнію при анізотропному рідинному травленні пластини орієнтації (100). Вкажіть матеріали маскуючих покриттів та технологію їх отримання.
11. Наведіть ескізи конструкцій основних вузлів мікромеханічних пристроїв, їх характерні розміри при травленні зі зворотного та фронтального боку, функціональне призначення. Назвіть основні функції корпусу виробу мікросистемної техніки.
12. Опишіть принципи терморезисторного, тензорезисторного і п'єзорезисторного перетворення.
13. Наведіть функцію перетворення платиногового, мідного, нікелевого термоперетворювачів опору (рівняння Календара-ван-Дьюзена).
14. Терморезисторні первинні перетворювачі активного нагрівання. Електропровідний місток на опорах сталої температури. Поняття про саморозігрів первинного перетворювача електричним струмом.
15. Назвіть основні типи первинних перетворювачів механічних параметрів середовища. Наведіть класифікацію основних типів навантажень на елемент первинного перетворювача. Назвіть основні типи деформацій.
16. Термопарні первинні перетворювачі температури. Вкажіть перелік основних матеріалів, які використовуються для їх виготовлення у об'ємному та мікромеханічному виконанні, наведіть чисельні значення термо-ЕРС для різних типів термопар.
17. Дайте означення первинного перетворювача. Опишіть відмінності між пасивним та активним перетворювачем. Терморезисторні первинні перетворювачі активного нагрівання. Поняття про саморозігрів первинного перетворювача електричним струмом.

18. Наведіть ескіз типової теплоізолюваної структури та виділіть характерні зони виділення тепла і теплообміну мембранного терморезисторного перетворювача. Вкажіть основні механізми теплообміну в кожній із зон.
19. Сформулюйте фізичні підстави для введення ефективних параметрів для окремих характерних зон тепловиділення і теплообміну мікромеханічної теплоізолюваної структури. Запишіть вирази для ефективної теплопровідності, теплоємності, густини багатошарової мембранної структури.
20. Закон теплопровідності Фур'є. Поняття градієнта температур і коефіцієнта теплопровідності. Вираз для коефіцієнта теплопровідності ідеального газу.
21. Закон теплообміну Ньютона. Поняття коефіцієнта теплообміну як інструменту вимірювального перетворення. Назвіть складові конструкції мікромеханічного перетворювача та вкажіть фізичні параметри оточуючого середовища, що суттєво впливають на коефіцієнт теплообміну теплоізолюваної структури.
22. Сформулюйте поняття про тепловий опір, теплоємність, теплову сталу часу теплоізолюваної мікромеханічної структури активного нагрівання.
23. Запишіть диференціальне рівняння теплового балансу для мікромеханічного місткового електропровідного первинного перетворювача, закріпленого над порожниною травлення на опорах сталого температури.
24. Запишіть вирази для елементарної кількості тепла  $dQ$ , що акумулюється в елементі довжини  $dx$  місткового терморезисторного перетворювача, генерується в ньому в результаті проходження електричного струму, передається шляхом теплопровідності сусіднім елементам, передається шляхом теплообміну в навколишнє середовище.
25. Вкажіть граничні умови на поверхнях теплообміну характерних зон місткового електропровідного первинного перетворювача, закріпленого на опорах сталого температури.
26. Назвіть області, на Ваш погляд, найбільш ефективного застосування сучасних мікроелектромеханічних систем (МЕМС) або приклади, на Ваш погляд, найбільш вдалих і перспективних комерційно доступних МЕМС у масовому виробництві.
27. Первинні перетворювачі температури на основі р-п переходу. Запишіть вольт-амперну характеристика р-п переходу та отримайте з неї залежність напруги від температури при заданому струмі.
28. Запишіть рівняння Гагена-Пуазейля для розподілу лінійної швидкості по радіусу циліндричного каналу, об'ємних та масових витрат рідини або газу. Сформулюйте поняття про приповерхневі температурні прошарки. Зробіть ескіз накладання поля швидкостей на поле приповерхневих температур для мікромеханічного перетворювача в потокоформуєчому каналі.
29. Зробіть ескіз трубок Піто і Вентурі як перетворювачів об'ємних витрат рідини чи газу в диференціальний тиск. Наведіть залежність диференціального тиску від об'ємних витрат флюїду (рідини чи газу), що протікає через трубки Піто і Вентурі.
30. Схеми основних режимів живлення мікромеханічного резисторного первинного перетворювача на основі операційного підсилювача (сталого струму, сталого напруги).
31. Мостові терморезисторні схеми мікромеханічних первинних перетворювачів, що самобалансуються, побудовані на основі операційного підсилювача. Режим сталого температури.

32. *Поняття про фізичну природу теплового шуму резистора, дробового шуму струму. Наведіть вирази для спектральної густини названих шумів. Наведіть чисельні значення спектральної густини шуму напруги та струму для кращих сучасних операційних підсилювачів з біполярними та польовими транзисторами на вході.*

33. *Сформулюйте поняття про тепловий опір, теплоємність, теплову сталу часу теплоізолюваної мікромеханічної структури активного нагрівання.*

34. *Запишіть диференціальне рівняння теплового балансу для мікромеханічного місткового електропровідного первинного перетворювача, закріпленого над порожниною травлення на опорах сталої температури.*

35. *Кантилевери (Cantilever). Конструкції. Технології виготовлення. Области застосування.*

- *перелік питань, які виносяться на семестровий контроль (наприклад, як додаток до силабусу);*
- *можливість зарахування сертифікатів проходження дистанційних чи онлайн курсів за відповідною тематикою;*
- *інша інформація для студентів/аспірантів щодо особливостей опанування навчальної дисципліни.*

#### **Робочу програму навчальної дисципліни (силабус):**

**Складено:** *к.т.н. ЛУПИНА Борис Іванович*

**Ухвалено** *кафедрою мікроелектроніки ФЕЛ (протокол № 19 від 15.06.2022 р.)*

**Погоджено** *Методичною комісією факультету електроніки<sup>3</sup> (протокол № 06/22-1 від 28.06.2022 р.)*

---

<sup>3</sup> Методичною радою університету – для загальноуніверситетських дисциплін.