



# ОСНОВИ КВАНТОВОЇ ТЕОРІЇ

## Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

### Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	Перший (бакалаврський)
Галузь знань	15 Автоматизація та приладобудування <sup>1</sup>
Спеціальність	153 Мікро- та наносистемна техніка
Освітня програма	Мікро- та наноелектроніка
Статус дисципліни	Нормативна
Форма навчання	Очна (денна)
Рік підготовки, семестр	2 курс, осінній семестр
Обсяг дисципліни	6 кредитів ЕКТС
Семестровий контроль/ контрольні заходи	Іспит / Модульні контрольні роботи, ДКР
Розклад занять	
Мова викладання	Українська
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лекції: к.т.н., доц. Коваль Вікторія Михайлівна, v.m.koval@kpi.ua, 095 188 23 54, Практичні: к.т.н., доц. Коваль Вікторія Михайлівна, v.m.koval@kpi.ua, 095 188 23 54
Розміщення курсу	код класу: ikwhz43 <a href="https://meet.google.com/swg-gmyu-bqu">https://meet.google.com/swg-gmyu-bqu</a>

### Програма навчальної дисципліни

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

Навчальна дисципліна «Основи квантової теорії» складеться з двох модулів: «Статистична фізика» та «Квантова механіка». У навчальному модулі «Статистична фізика» будуть вивчатися різні способи статистичного опису систем багатьох частинок – газів, рідин та твердих тіл, а у навчальному модулі «Квантова механіка» - принципи квантової механіки та її математичний апарат для розрахунку квантових систем (потенціальна яма, бар'єр, квантовий гармонічний осцилятор тощо).

Майбутньому фахівцю зі спеціальності Мікро- та наносистемної техніки варто вивчати дану дисципліну, оскільки вона дає фундаментальні фізичні знання зі статистичного та квантово-механічного опису електро-фізичних властивостей сучасних матеріалів, які використовуються в мікро- та наносистемній техніці.

*Метою навчального модулю «Статистична фізика» є формування у студентів здатностей:*

- розраховувати макростан різних видів систем багатьох частинок (замкнених, напівзамкнених та відкритих), що рухаються за законами класичної чи квантової механіки, на основі статистичного розгляду сукупності їх мікростанів, використовуючи мікроканонічний, канонічний та великий канонічний ансамбль Гіббса;

<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».

- здійснювати статистичний аналіз фізичних властивостей газів, рідин та твердих тіл як систем багатьох частинок (класичних чи квантових) і на основі цього розраховувати їх основні термодинамічні параметри (тиск, температура, об'єм, теплоємність, відносна діелектрична проникність, відносна магнітна проникність, питома електропровідність тощо).

Вивчення даного модуля забезпечить студентів наступні **компетентності**: будувати теоретичні моделі, що описують електро-фізичні властивості сучасних матеріалів електроніки.

Після засвоєння навчального модуля «Статистична фізика» студенти мають продемонструвати такі результати навчання:

**знання:** різних способів статистичного опису систем багатьох частинок (замкнених, напівзамкнених та відкритих), що рухаються за законами класичної чи квантової механіки; функції розподілу мікроканонічного, канонічного та великого канонічного ансамбля Гіббса; сукупності термодинамічних параметрів та основних співвідношень між ними для газів, рідин та твердих тіл.

**уміння:** розраховувати основні термодинамічні параметри газів, рідин та твердих тіл (тиск, температура, об'єм, теплоємність, відносна діелектрична проникність, відносна магнітна проникність, питома електропровідність тощо) та використовувати теоретичні знання для розробки нових матеріалів електроніки.

**досвід:** практичного використання вивчених функцій розподілу мікроканонічного, канонічного та великого канонічного ансамбля Гіббса для розрахунку основних термодинамічних параметрів газів, рідин та твердих тіл (тиску, температури, об'єму, теплоємності, відносної діелектричної проникності, відносної магнітної проникності, питомої електропровідності тощо).

**Метою навчального модулю «Квантова механіка»** є ознайомлення студентів з законами мікросвіту та показати їх відмінність від законів класичної механіки; сприяти у оволодінні навичками по застосуванню теоретичних знань при вирішенні практичних завдань.

Після засвоєння навчального модуля «Квантова механіка» студенти мають продемонструвати такі результати навчання:

**знання:** предмет та головні задачі квантової механіки; головні принципи (суперпозиції, причинності, невизначеностей Гейзенберга, відповідності, тотожності частинок, принцип заборони Паулі); основи математичного апарату квантової механіки; квантово-механічний опис та особливості руху мікрочастинок в силових полях; властивості квантових систем, що складені з тотожних частинок; квантово-механічний опис та головні властивості методологічно важливих квантових систем (атом водню, багатоелектронні атоми у періодичній таблиці Менделєєва).

**уміння:** статистично інтерпретувати вектори стану (хвильові функції); аналізувати розв'язок простих модельних задач квантової механіки (наприклад, долання потенціальних бар'єрів); пояснювати явища мікросвіту із застосуванням ідей квантової механіки (наприклад, тунельний ефект, існування періодичної системи хімічних елементів); формулювати та аналізувати головні принципи квантової механіки; знаходити комутатори простих операторів, власні значення та власні функції простих квантових операторів.

**досвід:** розуміння предмету, головних задач, принципів, основних положень і меж застосування квантової механіки, фізичний зміст квадрата модулю хвильової функції; співвідношення невизначеностей; квантово-механічний опис та особливості руху мікрочастинок у силових полях; аксіоматику квантової механіки; властивості квантових систем, що складаються з тотожних частинок.

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

Для успішного вивчення даної дисципліни студенти мають засвоїти наступні дисципліни (**пререквізити дисципліни**):

- бакалаврські курси: “Імовірнісні основи обробки даних”, “Математичний аналіз”, “Загальна фізика”.

Результати навчання даної дисципліни використовуються для вивчення наступних дисциплін (**постреквізити дисципліни**):

- бакалаврські курси: «Фізика твердого тіла», «Фізика напівпровідників», «Фізика діелектриків», «Твердотільна електроніка», «Фізико-технологічні основи наноелектроніки».

- переддипломна практика та дипломне проектування.

### 3. Зміст навчальної дисципліни

#### Модуль «Статистична фізика»

Розділ 1. Методи статистичної фізики.

Тема 1.1. Основні закони та принципи статистичної фізики.

Тема 1.3. Статистичні ансамблі.

Тема 1.3. Квантова статистика.

Розділ 2. Застосування методів статистичної фізики до аналізу властивостей газів, рідин та твердих тіл.

Тема 2.1. Статистика газів та рідин.

Тема 2.1. Статистика твердих тіл.

#### Модуль «Квантова механіка»

1. Основи квантової теорії.
2. Основи квантової механіки.
3. Операторна форма квантової механіки.
4. Рівняння Шредінгера.
5. Найпростіші задачі квантової механіки.
6. Рух частинки в центральній-симетричному полі.
7. Властивості атомних структур.
8. Власні механічні та магнітні моменти електрону.
9. Наближені методи квантової механіки.
10. Квантова система однакових мікрочастинок.
11. Багатоелектронні атоми та утворення молекул.
12. Теорія квантових переходів.
13. Властивості електрона в зовнішніх полях.

### 4. Навчальні матеріали та ресурси

Базова література, яку потрібно прочитати або використовувати для опанування дисципліни:

1. Молчанов В.І. Статистична фізика: Підручник. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 192 с.
2. Молчанов В. І. Квантова механіка: навч. посіб. /В. І. Молчанов. – К.:НТУУ «КПІ», 2013.-156 с.
3. Статистична фізика: Практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: В. М. Коваль. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,88 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 82 с.
4. Висоцький, Володимир Іванович. Збірник задач із квантової механіки: навчальний посібник / В.І. Висоцький, М.В. Максютя, І.О. Ястремська; Міністерство освіти і науки України, Київський національний університет імені Тараса Шевченка. - Київ: ВПЦ "Київський університет", 2019. - 287 с.

Допоміжна література, яку потрібно прочитати або використовувати для опанування дисципліни:

1. Висоцький, Михайло Володимирович. Атомна, ядерна фізика та елементи квантової механіки: текст лекцій / М.В. Висоцький; Міністерство освіти і науки України, Київський національний університет імені Тараса Шевченка. - Київ: ВПЦ "Київський університет", 2020. - 189 с.
2. Адамян, Вадим Мовсесович. Основи квантової статистичної фізики: конспект лекцій / В.М. Адамян, М. Я. Сушко; Міністерство освіти і науки України, Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, Факультет математики, фізики та інформаційних технологій. - Одеса: ОНУ, 2020. - 73 с.

3. Практичний курс термодинаміки і статистичної фізики: навчальний посібник / укладач Дудик М. В. - Бровари: АНФ груп, 2018. - 108 с.
4. Трохимчук, Петро Павлович. Теоретична фізика: підручник / Петро Трохимчук; Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки. - Луцьк: Вежа-Друк, 2017. - 255 с.

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.

## 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 основних законів та постулатів статистичної фізики та квантової механіки.

В лекційному матеріалі головний акцент зроблено на постановку фізичної задачі, формування у студентів фізичних уявлень, а також на доведення теорем та виведення основних 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 GoogleClassroom та електронні презентації для лекційних і практичних занять).

### Лекційні заняття

#### Модуль «Статистична фізика»

#### *Розділ 1. Методи статистичної фізики.*

Тема 1.1. Основні закони та принципи статистичної фізики.

**Лекція 1.** Поняття фазового простору та статистичне описання рівноважних систем.

- Предмет та метод статистичної фізики.
- Макроскопічний та мікроскопічний опис рівноважних систем.
- Система канонічних рівнянь Гамільтона.
- Фазовий простір. Ймовірність знаходження системи у фазовому просторі.

**Лекція 2.** Теорема Ліувілля.

- Теорема Ліувілля та її наслідки.
- Середні значення фізичних величин в статистичній фізиці.
- Ергодична гіпотеза.

Тема 1.2. Статистичні ансамблі.

**Лекція 3.** Мікроканонічний ансамбль та його термодинамічні функції.

- Мікроканонічний розподіл.
- Термодинамічні функції мікроканонічного ансамблю.
- Статистична ентропія.
- Статистичне обґрунтування термодинаміки.

**Лекція 4.** Канонічний ансамбль та його термодинамічні функції.

- Канонічний розподіл.
- Термодинамічні функції канонічного ансамблю.
- Статистичний інтеграл.
- Розподіл Максвелла-Больцмана.

**Лекція 5.** Великий канонічний ансамбль та його термодинамічні функції.

- Великий канонічний розподіл.

- Термодинамічні функції великого канонічного ансамблю.
- Великий статистичний інтеграл.

### Тема 1.3. Квантова статистика.

**Лекція 6.** Особливості статистичного описання систем квантових частинок.

- Перехід від класичних до квантових систем.
- Квазікласичний підхід.
- Метод клітинок Больцмана.

**Лекція 7.** Квантові розподіли.

- Розподіл Бозе-Ейнштейна.
- Розподіл Фермі-Дірака.
- Порівняння класичної та квантової статистик. Критерій виродження.

## **Розділ 2. Застосування методів статистичної фізики до аналізу властивостей газів, рідин та твердих тіл.**

### Тема 2.1. Статистика газів та рідин.

**Лекція 8.** Розрахунок термодинамічних функцій ідеальних класичних газів.

- Рівняння ідеального газу.
- Термодинамічні функції розрідженого газу.
- Перехід від газу до рідини. Рівняння Ван-дер-Ваальса.

**Лекція 9.** Розрахунок термодинамічних функцій реальних класичних газів.

- Інтеграл взаємодії.
- Потенціальна енергія взаємодії молекул реального газу.
- Рівняння реального газу.

### Тема 2.2. Статистика твердих тіл.

**Лекція 10-11.** Статистика фононного газу твердого тіла.

- Класифікація твердих тіл з точки зору статистичної фізики.
- Теорія теплоємності Ейнштейна.
- Теорія теплоємності Дебая.

**Лекція 12-13.** Статистика електронного газу твердого тіла.

- Статистика електронного газу в металах
- Статистика електронного газу у власних напівпровідниках.
- Статистика електронного газу в домішкових напівпровідниках.

## **Модуль «Квантова механіка»**

**Лекція 1.** Теорія Бора. Гіпотеза де Бройля. Корпускулярно-хвильовий дуалізм. Групова швидкість. Дифракція мікрочастинок.

**Лекція 2.** Статистичне тлумачення хвиль де Бройля. Хвильова функція. Ймовірність місцезнаходження мікрочастинок. Принцип суперпозиції станів.

**Лекція 3.** Квантові статистичні ансамблі. Співвідношення невизначеності Гейзенберга. Вплив вимірювального пристрою.

**Лекція 4.** Лінійні оператори. Математичні дії над операторами. Самоспряжені оператори. Оператор комутатор. Обчислення середніх значень фізичних величин (координати, енергії та імпульсу).

**Лекція 5.** Оператор енергії. Гамільтоніан. Хвильове рівняння Шредінгера. Стаціонарне рівняння Шредінгера. Рівняння неперервності.

**Лекція 6.** Одновимірна прямокутна потенціальна яма. Загальний розв'язок. Використання умов на межах та умови нормування. Багатовимірна потенціальна яма.

**Лекція 7.** Прямокутний потенціальний бар'єр. Поняття про потенціальний бар'єр. Постановка задачі про долання бар'єру. Рівняння Шредінгера для трьох областей. Тунельний ефект. Потенціальний бар'єр довільної форми.

**Лекція 8.** Гармонічний осцилятор у квантовій механіці. Розв'язок рівняння Шредінгера для гармонічного осцилятора. Аналіз розв'язку задачі про гармонічний осцилятор. Діаграма розподілу щільності ймовірності координати мікрочастинок.

**Лекція 9.** Атом водню. Рівняння Шредінгера для воднеподібного атому. Квантові числа та хвильові функції електрона в атомі водню. Енергетичний спектр і хвильові функції атома водню. Струми в атомі. Магнітний момент атома водню. Магнітон Бора.

**Лекція 10.** Спін електрона. Експериментальний доказ існування спина електрона. Спінкові функції. Спінкові оператори. Матриці Паулі.

**Лекція 11.** Рівняння Шредінгера для системи однакових мікрочастинок. Принцип тотожності мікрочастинок. Симетричні та антисиметричні хвильові функції. Оператор перестановок. Хвильові функції для систем бозонів та ферміонів. Принцип Паулі.

**Лекція 12.** Атом гелію. Парагелій та ортогелій. Обмінна енергія. Квантова механіка атома та періодична система хімічних елементів Д.І. Менделєєва.

**Лекція 13.** Молекула водню. Природа хімічних зав'язків. Сили Ван дер Ваальса. Рівняння Шредінгера для твердого тіла.

### **Тематика практичних занять**

#### *Модуль «Статистична фізика»*

1. Випадкові величини та закони їх розподілу.
2. Фазовий простір. Розрахунок та побудова фазової траєкторії частинок.
3. Фазовий об'єм. Гамма-функція Ейлера. Розрахунок об'єму гіпер-сфери.
4. Мікροканонічний та канонічний ансамбль Гіббса. Розрахунок параметрів ансамблю через функцію розподілу та через статистичний інтеграл.
5. Розподіл Максвелла-Больцмана. Розрахунок розподілу координати, імпульсів та енергій частинок в прямокутній та сферичній системах координат.
6. Розрахунок реальних газів. Розрахунок термодинамічних функцій ідеальних та реальних газів.
7. Розрахунок твердих тіл. Розрахунок теплоємності твердого тіла.
8. Розрахунок твердих тіл. Розрахунок відносної діелектричної проникності твердого тіла.

#### *Модуль «Квантова механіка»*

1. Хвильові властивості мікрочастинок. Співвідношення невизначеностей.
2. Хвильова функція.
3. Оператори у квантовій механіці.
4. Рівняння Шредінгера.
5. Одновимірний рух. Частинка у потенціальній ямі.
6. Одновимірний рух. Потенціальний бар'єр.
7. Квантовий гармонічний осцилятор.
8. Спін електрона.
9. Наближені методи квантової механіки.

### **6. Самостійна робота студента/аспіранта**

#### *Модуль «Статистична фізика»*

1. Статистика рідин - 2 години.
2. Функція розподілу Фермі-Дірака - 2 години.
3. Флуктуації термодинамічних величин. Броунівський рух – 2 години
4. Шуми в металах та напівпровідниках – 2 години
5. Підготовка індивідуального завдання (ДКР1) - 15 годин
6. Підготовка до контрольної роботи 1 – 7 годин
7. Підготовка до іспиту – 15 годин

#### *Модуль «Квантова механіка»*

1. Власні функції та власні значення операторів - 2 години.
2. Повний момент кількості руху електрона. Спін-орбітальна взаємодія.- 2 години.
3. Матрична форма квантової механіки – 2 години
4. Рівняння Шредінгера для електрона в електромагнітному полі. Ефект Штарка. Ефект Зеемана. – 2 години
5. Підготовка індивідуального завдання (ДКР2) - 15 годин



6. Підготовка до контрольної роботи 2 – 7 годин

7. Підготовка до іспиту – 15 годин

## Політика та контроль

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

Лекційні та практичні заняття проводяться в системі GoogleClassroom. Відвідування занять не є обов'язковим, однак для одержання іспиту “автоматом” потрібно набрати більше 60 балів, які можна одержати за виконання обов'язкових завдань (виконання ДКР та написання модульної контрольної роботи) та відвідавши лекційні заняття (пройшовши експрес-тест по матеріалу лекції).

Під час всіх видів занять студенти зобов'язані відімкнути звук та відео, окрім доповідача.

Бали за **роботу під час лекції** нараховуються на основі експрес-опитування у вигляді тесту в системі GoogleClassroom. Кожний тест містить 2 або 3 запитання до матеріалу лекційного заняття, правильна відповідь на які дасть змогу отримати 2 або 3 бали відповідно.

**Модульна контрольна робота** проводиться на лекційному занятті письмово, після чого робиться скан (або фото) роботи і надсилається в систему GoogleClassroom. Кожне завдання на контрольній роботі містить 1 теоретичне питання та 1 задачу, правильні відповіді на які дають змогу одержати по 2 бали за кожне завдання. Передбачено проведення двох МКР.

**Індивідуальне завдання (ДКР)** – це розв'язання 8 домашніх контрольних задач протягом семестру (по одній задачі на кожне наступне заняття), правильне розв'язання яких дасть змогу одержати по 4 бали за кожну задачу. Виконується у години самостійної роботи письмово, після чого робиться скан (або фото) роботи і надсилається в систему GoogleClassroom.

Студенти, які набрали протягом семестру кількість балів  $\geq 60$  мають можливість не складати іспит, а отримати оцінку “автоматом” відповідно до набраного рейтингу з дисципліни. Студенти, які не набрали 60 балів, або набрали  $\geq 60$ , однак одержана оцінка не влаштовує, складають іспит без урахування семестрових рейтингових балів.

Умова допуску до іспиту – написання 2 модульних контрольних робіт та здача 8 ДКР.

**Іспит** є письмовим. Білет на іспиті складається з 3-х завдань (2 теоретичних питання та 1 задача) по тематиці змістовних модулів, що виносяться на аудиторні заняття, та окремих питань, які виносяться на самостійне опрацювання.

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

**Поточний контроль:** експрес-опитування (тест) наприкінці кожної лекції.

**Календарний контроль:** проводиться один раз на семестр для кожного модуля як моніторинг поточного стану виконання вимог силабусу (модульні контрольні роботи).

**Семестровий контроль:** іспит.

**Умови допуску до семестрового контролю:** написання модульних контрольних робіт та підготовка ДКР.

#### 1. Система рейтингової оцінки по видам занять:

№ п/п	Заняття, що підлягають рейтинговій оцінці	Загальна кількість завдань	Максимальний бал за 1 завдання	Кількість балів на "відмінно"
1.	Лекції: -експрес-опитування (тест)	3 18	2 3	60
2.	Модульні контрольні роботи	2	4	8
3.	Індивідуальне завдання (ДКР): - розв'язання домашніх контрольних задач	8	4	32

Семестрові бали			100
-----------------	--	--	-----

2. 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

3. Якщо з об'єктивних обставин кількість занять змінюється, семестрові бали, наведені у п. 1, відповідним чином корегуються.

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

Перелік теоретичних питань для модульної контрольної роботи та іспиту, на основі яких формуються білети:

#### Модуль «Статистична фізика»

1. Макроскопічне та мікроскопічне описання рівноважних систем. Статистичні ансамблі.
2. Зображення реальних систем у фазовому просторі.
3. Ймовірність знаходження системи у фазовому просторі.
4. Теорема Ліувілля та її наслідки.
5. Середні значення фізичних величин в статистичній фізиці.
6. Мікроканонічний ансамбль Гіббса.
7. Статистична ентропія.
8. Обґрунтування термодинаміки за допомогою мікроканонічного ансамбля Гіббса.
9. Канонічний ансамбль Гіббса.
10. Термодинамічні функції канонічного ансамблю Гіббса.
11. Великий канонічний ансамбль Гіббса та його термодинамічні функції.
12. Перехід від класичних до квантових систем. Квазікласичне наближення.
13. Метод комірок Больцмана.
14. Розподіл Бозе-Ейнштейна.
15. Розподіл Фермі-Дірака.
16. Співставлення статистик Максвелла-Больцмана, Бозе-Ейнштейна та Фермі-Дірака. Критерій виродження.
17. Розрахунок термодинамічних функцій ідеального газу.
18. Розрахунок термодинамічних функцій реального газу.
19. Перехід від газу до рідини. Рівняння Ван-дер-Ваальса. Зрідження газів.
20. Особливості статистичної теорії рідин.
21. Тверде тіло. Типи кристалів.
22. Теорія теплоємності твердого тіла Ейнштейна.
23. Теорія теплоємності твердого тіла Дебая.
24. Статистика електронного газу в металах.
25. Статистика електронного газу в напівпровідниках.

#### Модуль «Квантова механіка»

1. Хвилі де Бройля, їх фазова та групова швидкість. Дифракція мікрочастинок.
2. Статистичне тлумачення хвиль де Бройля.
3. Хвильова функція. Ймовірність місцезнаходження мікрочастинки.
4. Принцип суперпозиції станів. Квантові статистичні ансамблі.
5. Співвідношення невизначеності Гейзенберга.
6. Оператори (визначення, властивості (сума, добуток, квадрат), оператор комутатор).



7. Власні значення та власні функції операторів та їх фізичний зміст. Умови імовірності вимірювання одночасно різних механічних величин.
8. Оператори координати і імпульсу. Оператор моменту імпульсу (проекції, квадрат, оператор Лапласа).
9. Оператор енергії (кінетичної, повної, Гамільтоніан). Рівняння Шредінгера.
10. Рівняння неперервності (щільність потоку). Стаціонарне рівняння Шредінгера.
11. Падіння частинки на потенціальний бар'єр.
12. Падіння частинки на потенціальний бар'єр кінцевої ширини. Тунельний ефект.
13. Гамільтаніан КГО (Квантовий гармонічний осцилятор).
14. Рівняння Шредінгера для КГО. Значення енергії та хвильової функції.
15. Енергетичний спектр КГО (порівняти з класичним осцилятором). Трьохвимірний КГО.
16. Власні значення і власні функції оператора проекції моменту імпульсу та оператора квадрата моменту імпульсу.
17. Рівняння Шредінгера для воднеподібного атома.
18. Пошук хвильової функції для воднеподібного атома (основні моменти). Поліном Лагера
19. Енергія електрона для воднеподібного атома. Квантові числа та хвильові функції електрона для воднеподібного атома.
20. Енергетичний спектр для воднеподібного атома (стала Рідберга-Рітца)
21. Спін електрона, експериментальні докази його існування. Оператор спіну електрона.
22. Спінкові функції. Повний момент кількості руху електрона.
23. Рівняння Шредінгера для системи багатьох мікрочастинок. Принцип тотожності мікрочастинок.
24. Симетричні та антисиметричні стани. Принцип Паулі. Хвильові функції для систем бозонів і ферміонів.
25. Атом гелію. Обмінна енергія.
26. Квантова механіка та періодична таблиця Менделєєва
27. Молекула водню. Природа хімічних сил. Міжмолекулярні дисперсійні сили.
28. Рівняння Шредінгера для твердого тіла. Рух електрона в періодичному полі.
29. Ефект Штарка. Ефект Зеемана.

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

Складено доц., к.т.н., доц. Коваль В.М.

Ухвалено кафедрою мікроелектроніки ФЕЛ (протокол №22 від 23.06.2023 р.)

Погоджено Методичною комісією факультету електроніки (протокол № 06/23 від 29.06.2023 р.)