



# КВАНТОВА МЕХАНІКА

## Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

### Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	<i>Перший (бакалаврський)</i>
Галузь знань	<i>153 Автоматизація та приладобудування</i>
Спеціальність	<i>153 Мікро- та наносистемна техніка</i>
Освітня програма	<i>Електронні мікро- і наносистеми та технології</i>
Статус дисципліни	<i>Нормативна</i>
Форма навчання	<i>Очна (денна)</i>
Рік підготовки, семестр	<i>2 курс, осінній семестр</i>
Обсяг дисципліни	<i>5 кредитів ЕКТС</i>
Семестровий контроль/ контрольні заходи	<i>Іспит / Модульні контрольні роботи, ДКР</i>
Розклад занять	<i><a href="http://rozklad.kpi.ua">rozklad.kpi.ua</a></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> , моб.+38 050 949 82 76 (mobile + Telegram + Viber) Практичні / Семінарські: PhD, ШЕВЛЯКОВА Ганна Вікторівна, <a href="mailto:g.shevliakova-me@ill.kpi.ua">g.shevliakova-me@ill.kpi.ua</a> , +38-095-856-39-96 (mobile + Telegram + Viber)
Розміщення курсу	Посилання на дистанційний ресурс код класу: qmylb6m <a href="https://meet.google.com/lookup/a725ngsb66">https://meet.google.com/lookup/a725ngsb66</a>

### Програма навчальної дисципліни

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

В рамках навчальної дисципліни «Квантова механіка» студенти знайомляться з основними експериментальними фактами, які обумовлюють необхідність переходу від класичної фізики до квантової, та головними науковими принципами квантової механіки, її фундаментальними положеннями, як то корпускулярно-хвильовий дуалізм, принцип невизначеності Гейзенберга тощо. Будуть вивчатися принципи квантової механіки та її математичний апарат для розрахунку квантових систем (потенціальна яма, бар'єр, квантовий гармонічний осцилятор тощо). Курс знайомить із науковими та інженерними принципами розробки пристроїв квантової електроніки та технічними прийомами, пов'язаними із її застосуванням. Майбутньому фахівцю зі спеціальності «Мікро- та наносистемна техніка» варто вивчати дану дисципліну, оскільки вона дає фундаментальні знання з квантово-механічного опису електрофізичних характеристик сучасних пристроїв та властивостей матеріалів, які можуть перспективно використовуватися в електронній інженерії, мікро- та наносистемній техніці.

Вивчення навчальної дисципліни «Квантова механіка» забезпечить студентів наступні компетентності: здатність розуміти принципи функціонування та будувати теоретичні моделі сучасних пристроїв мікро- та наносистемної техніки, описувати електрофізичні властивості сучасних електронних вузлів та матеріалів.

Метою навчального модулю «Квантова механіка» є ознайомити студентів з законами мікросвіту та показати їх відмінність від законів класичної механіки; сприяти у оволодінні навичками по застосуванні 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:** оволодіння фундаментальними поняттями, законами і теоріями класичної та квантової фізики, що забезпечує ефективне опанування і подальшу можливість використання принципів квантової фізики у галузі електронної інженерії, інформаційних технологій; 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): “Загальна фізика”, “Імовірнісні основи обробки даних”, “Математичний аналіз”.

Результати навчання даної дисципліни використовуються для вивчення наступних дисциплін (постреквізити дисципліни): “Фізика твердого тіла”, “Фізика напівпровідників”, “Фізика діелектриків”, “Твердотільна електроніка”, “Фізико-технологічні основи наноелектроніки”; переддипломна практика та дипломне проектування.

## **3. Зміст навчальної дисципліни**

1. Основи квантової механіки. Постулати квантової механіки.
2. Основи квантової теорії.
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 електрона.
9. Квантові частинки у потенціальних ямах, поблизу потенціальних бар'єрів і границь. Граничні умови для хвильової функції; потенціал у вигляді дельта-функції. Частинка в потенціальній ямі, зв'язані і незв'язані стани, одно-, дво-, і тривимірний випадок.
10. Квантові система однакових мікрочастинок. Фермі- та Бозе-статистика. Квантові гази. Густина станів.
11. Багатоелектронні атоми та утворення молекул.
12. Теорія квантових переходів.

13. Властивості електрона в зовнішніх полях. Квантові частинки у періодичному потенціалі. Обернена ґратка. Енергетична зонна структура.

14. Загальні властивості енергетичної зонної структури. Ефективна маса. Метали, напівпровідники і діелектрики. Локалізація електронних станів. Квазіперіодичні структури та особливості їх спектрів.

15. Основи теорії розсіювання. Взаємодія атома з рухомою зарядженою частинкою. Взаємодія речовини з електромагнітними полями.

16. Основи теорії випромінювання. Квантова система в збудженому стані. Спонтанне та вимушене випромінювання. Процеси поглинання і емісії, золоте правило Фермі. Правила відбору. Розсіяння випромінювання на квазічастинках, спектроскопія.

17. Основи квантової електроніки. Лазери.

#### 4. Навчальні матеріали та ресурси

Базова література:

1. Молчанов В. І. Квантова механіка: навч. посіб. Київ: НТУУ «КПІ», 2013. 156 с.

2. Вакарчук І. О. Квантова механіка: Підручник. 3-тє вид., доп. Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2007. 848 с:

3. Юхновський І. Р. Основи квантової механіки: Навчальний посібник. 2-ге вид., перероб. і доп. Київ: Либідь, 2002. 392 с.

4. Висоцький В.І. Квантова механіка та її використання у прикладній фізиці: підручник. Київ: Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2008. 367 с. ISBN 978-966-439-127-3.

5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика. Нерелятивистская теория. Москва: Наука, 1989. 767 с.

6. Блохинцев Д.И. Основы квантовой механики. 6 издание. Москва: Наука, 1983. 664с.

7. Давыдов А. С. Квантовая механика. Москва: Наука, 1973. 704 с.

8. Венгер Є.Ф., Грибань В.М., Мельничук О.В. Збірник задач з квантової механіки: Навч. посіб. Київ.: Вища школа, 2003. 230 с.

Додаткова література:

1. «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.Тимофєєв; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 22,9 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. –164 с.

2. Елементи та пристрої квантової електроніки. Навчальний посібник/ Ю.І. Колесник, А.В. Кіпенський. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – 318.

3. Венгер Є.Ф., Грибань В.М., Мельничук О.В. Основи статистичної фізики і термодинаміки: Навчальний посібник. – К: Вища школа, 2004. – 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, формуванні у студентів фізичних уявлень, а також на виведенні 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).*

### **Лекції:**

*Лекція 1. Історична довідка. Основні експерименти на початок 20-го століття, які не знаходили пояснення в рамках класичної механіки. Зв'язок зі спеціальністю «153 Мікро- та наносистемна техніка».*

*Лекція 2. Дифракція мікрочастинок. Гіпотеза де Бройля. Корпускулярно-хвильовий дуалізм. Групова та фазова швидкості. Досліди Д.Франка і Г. Герца, Е. Резерфорда, К. Девіссона – Л. Джермера.*

*Лекція 3. Теорія і постулати Бора. Стаціонарні орбіти електрона в атомі, стала Рідберга, формула Бальмера, комбінаційний принцип Рітца, правило квантування Бора-Зоммерфельда. Квантова механіка атома та періодична система хімічних елементів Д.І. Менделєєва.*

*Лекція 4. Статистичний характер явищ мікросвіту та статистичне тлумачення хвиль де Бройля. Хвильова функція. Ймовірність місцезнаходження мікрочастинки. Інтерпретація хвильової функції М. Борна.*

*Лекція 5. Середні значення фізичних величин. Співвідношення невизначеності Гейзенберга.*

*Лекція 6. Квантові статистичні ансамблі. Фермі- та Бозе-статистика. Квантові гази. Густина станів. Вимірjuвальний процес в квантовій механіці та вплив вимірjuвального пристрою.*

*Лекція 7. Лінійні оператори. Математичні дії над операторами. Самоспряжені оператори. Оператор комутатор.*

*Лекція 8. Оператори фізичних величин. Обчислення середніх значень фізичних величин (координати, енергії та імпульсу).*

*Лекція 9. Оператор енергії. Гамільтоніан. Хвильове рівняння Шредінгера. Стаціонарне рівняння Шредінгера. Рівняння неперервності.*

*Лекція 10. Поняття про потенціальний бар'єр. Прямокутний потенціальний бар'єр. Постановка задачі подолання бар'єру. Рівняння Шредінгера для трьох областей. Тунельний ефект.*

*Лекція 11. Одновимірні прямокутні потенціальні ями. Загальний розв'язок. Використання умов на межах та умови нормування. Багатовимірні потенціальні ями. Частинка в потенціальній ямі, зв'язані і незв'язані стани, одно-, дво-, і тривимірний випадок.*

*Лекція 13. Потенціальний бар'єр довільної форми. Потенціал у вигляді дельта-функції. Квантові частинки у потенціальних ямах, поблизу потенціальних бар'єрів і границь. Граничні умови для хвильової функції.*

*Лекції 14 та 15. Гармонічний осцилятор у квантовій механіці. Порівняння з класичним осцилятором. Розв'язок рівняння Шредінгера для гармонічного осцилятора. Аналіз розв'язку задачі про гармонічний осцилятор. Діаграма розподілу щільності ймовірності координати мікрочастинки.*

*Лекція 16. Та 17. Атом водню. Рівняння Шредінгера для воднеподібного атому. Квантові числа та хвильові функції електрона в атомі водню. Енергетичний спектр і хвильові функції атома водню.*

*Лекція 18. Струми в атомі. Магнітний момент атома водню. Магнетрон Бора.*

*Лекція 19. Спін електрона. Експериментальний доказ існування спіна електрона. Спінові функції. Спінові оператори. Матриці Паулі.*

*Лекція 20. та 21. Рівняння Шредінгера для системи однакових мікрочастинок. Принцип тожності мікрочастинок. Симетричні та антисиметричні хвильові функції. Оператор перестановок.*

*Лекція 22. Функції розподілу Фермі-Дірака та Бозе-Ейнштейна*

*Лекція 23. Хвильові функції для систем бозонів та ферміонів. Принцип Паулі.*

*Лекція 24. Атом гелію. Парагелій та ортогелій. Обмінна енергія.*

*Лекція 25. Квантова система в основному та збудженому станах. Принцип суперпозиції станів. Оптичні квантові генератори.*

*Лекція 26. Молекула водню. Природа хімічних зв'язків. Сили Ван дер Ваальса.*

*Лекція 27. Рівняння Шредінгера для твердого тіла.*

### **Тематика практичних занять:**

- 1. Спектральні характеристики випромінювання абсолютно чорного тіла (АЧТ). Формула М. Планка, її аналіз у короткохвильовій та довгохвильовій областях, отримання «класичних» законів теплового випромінювання із формули М. Планка.*
- 2. Хвильові властивості мікрочастинок. Співвідношення невизначеностей. 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.*

### **Самостійна робота студента/аспіранта**

*Зазначаються види самостійної роботи:*

- 1. Флуктуації термодинамічних величин. Броунівський рух – 2 години.*
- 2. Енергія та поверхні Фермі – 6 години.*
- 3. Шуми в металах та напівпровідниках – 4 години.*
- 4. Власні функції та власні значення операторів - 2 години.*
- 5. Повний момент кількості руху електрона. Спін-орбітальна взаємодія.- 2 години.*
- 6. Матрична форма квантової механіки – 2 години.*
- 7. Особливості квантових систем ферміонів та бозонів та їх відмінність – 4 години.*
- 8. Рівняння Шредінгера для електрона в електромагнітному полі. – 2 години.*
- 9. Ефект Штарка. Ефект Зеємана. – 2 години.*
- 10. Виконання ДКР – 30 годин.*
- 11. Підготовка до МКР – 7 годин.*
- 12. Підготовка до іспиту – 15 годин.*

### **Політика та контроль**

#### **6. 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. Для одержання іспиту "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).

Бали за роботу під час лекції нараховуються на основі експрес-опитування. Кожний тест містить 2 запитання до матеріалу лекційного заняття, правильна відповідь на які дасть змогу отримати 2 бали за кожне запитання.

Модульна контрольна робота проводиться письмово. Кожне завдання на контрольній роботі містить 2 теоретичних питання та 1 задачу, правильні відповіді на які дають змогу одержати 5 балів за кожне теоретичне та 4 бали за практичне.

Індивідуальне завдання (ДКР) – це розв'язання 5 домашніх контрольних задач протягом семестру (по одній задачі на кожне наступне заняття), правильне розв'язання яких дасть змогу одержати по 2 бали за кожну задачу. Виконується у години самостійної роботи письмово.

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

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

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

**Календарний контроль:** проводиться один раз на семестр для кожного модуля як моніторинг поточного стану виконання вимог силябусу (модульна контрольна робота).

**Семестровий контроль:** екзамен

**Умови допуску до семестрового контролю:** мінімальний рейтинговий бал 40, написання МКР, виконання ДКР та практичних робіт.

**1. Система отримання рейтингової оцінки за видами занять за кожний модуль:**

№ п/п	Заняття, що підлягають рейтинговій оцінці	Загальна кількість завдань	Максимальний бал за 1 завдання	Кількість балів на "відмінно"
1.	Лекції: -експрес-опитування (тест)	5	4	20
2.	Модульна контрольна робота (МКР)	3	14	42
3.	Домашня контрольна робота (ДКР)	2	7	14
4.	Практичні роботи	6	4	24
Семестрові рейтингові бали:				100

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.

**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

**8. Додаткова інформація з дисципліни (освітнього компонента)**

Перелік питань, які виносяться на семестровий контроль (екзамен):

1. Основні експерименти початку 20-го століття, які не знаходять пояснення в рамках класичної механіки.

2. Хвилі де Бройля, їх фазова та групова швидкість. Дифракція мікрочастинок.

3. Статистичне тлумачення хвиль де Бройля.

3. Хвильова функція. Імовірність місцезнаходження мікрочастинки.

4. Принцип суперпозиції станів. Квантові статистичні ансамблі.

5. Співвідношення невизначеності Гейзенберга.

6. Оператори (визначення; дії над операторами: сума, добуток, квадрат; властивості: лінійність), оператор - комутатор.

7. Власні значення та власні функції операторів, 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 квантового гармонічного осцилятора (КГО).

14. Рівняння Шредінгера для КГО. Значення енергії та хвильової функції.

15. Енергетичний спектр КГО (порівняти з класичним осцилятором). Тривимірний КГО.

16. *Власні значення і власні функції оператора проєкції 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. *Спінові 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 Зеємана.*
30. *Випромінювання електромагнітної енергії. Основний та збуджені стани квантової системи.*
31. *Квантова електроніка. Спонтанне та вимушене випромінювання.*

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

**Складено:** ст.. викладач, к.т.н. ЛУПИНА Б.І.; ст. викладач, PhD student ШЕВЛЯКОВА Г.В.

**Ухвалено** кафедрою \_\_\_\_\_ (протокол № \_\_ від \_\_\_\_\_)

**Погоджено** Методичною комісією факультету (протокол № \_\_ від \_\_\_\_\_)