

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Львівський національний університет імені Івана Франка**  
**Факультет прикладної математики та інформатики**  
**Кафедра програмування**

**Затверджено**

На засіданні кафедри програмування  
факультету прикладної математики та  
інформатики  
Львівського національного університету  
імені Івана Франка  
(протокол № 1 від 29 серпня 2024 р.)



Зав. кафедри к. ф.-м. н., доц. Сергій ЯРОШКО

**Силабус з навчальної дисципліни**

**«Квантові обчислення»,**

**що викладається в межах ОПІ другого (магістерського) рівня вищої  
освіти для здобувачів зі спеціальності  
122 Комп'ютерні науки**

<b>Назва дисципліни</b>	Квантові обчислення
<b>Адреса викладання дисципліни</b>	Львівський національний університет імені Івана Франка, вул. Університетська 1, м. Львів, Україна, 79000
<b>Факультет та кафедра, за якою закріплена дисципліна</b>	Факультет прикладної математики та інформатики, кафедра програмування
<b>Галузь знань, шифр та назва спеціальності</b>	Галузь знань: 12 Інформаційні технології Спеціальність: 122 Комп'ютерні науки
<b>Викладачі дисципліни</b>	Рикалюк Роман Євстахович, к. ф-м. н., доцент кафедри програмування
<b>Контактна інформація викладачів</b>	Електронна пошта: <a href="mailto:roman.rykalyuk@lnu.edu.ua">roman.rykalyuk@lnu.edu.ua</a> , веб-сторінка: <a href="https://ami.lnu.edu.ua/employee/rykaliuk">https://ami.lnu.edu.ua/employee/rykaliuk</a>
<b>Консультації з питань навчання по дисципліні відбуваються</b>	Консультації в день проведення лекцій/лабораторних занять (за попередньою домовленістю та за умови проведення аудиторних занять). В іншому випадку можливі он-лайн консультації через Zoom чи MS Teams. Для погодження часу он-лайн консультацій слід писати на електронну пошту викладача або дзвонити.
<b>Сторінка курсу</b>	<a href="https://teams.microsoft.com/l/channel/19%3a5HBpESx0WvBF8hbzIHf54wjzllqFRfJMzBQdk6JMoMY1%40thread.tacv2/%25D0%2597%25D0%25B0%25D0%25B3%25D0%25B0%25D0%25BB%25D1%258C%25D0%25BD%25D0%25B5?groupId=c9809b69-13e0-42b9-8cf3-104c597a0e4d&amp;tenantId=70a28522-969b-451f-bdb2-abfea3aaa5bf">https://teams.microsoft.com/l/channel/19%3a5HBpESx0WvBF8hbzIHf54wjzllqFRfJMzBQdk6JMoMY1%40thread.tacv2/%25D0%2597%25D0%25B0%25D0%25B3%25D0%25B0%25D0%25BB%25D1%258C%25D0%25BD%25D0%25B5?groupId=c9809b69-13e0-42b9-8cf3-104c597a0e4d&amp;tenantId=70a28522-969b-451f-bdb2-abfea3aaa5bf</a>
<b>Інформація про дисципліну</b>	Дисципліна «Квантові обчислення» є вибірковою дисципліною з спеціальності комп'ютерні науки, яка викладається в другому семестрі в обсязі 3 кредитів (за Європейською Кредитно-Трансферною Системою ECTS).
<b>Коротка анотація дисципліни</b>	Курс розроблено таким чином, щоб надати учасникам необхідні базові уявлення про архітектуру універсального квантового комп'ютера, квантові алгоритми, корекції помилок, а також деяке уявлення про сучасний стан розвитку технології квантових обчислень.
<b>Мета та цілі дисципліни</b>	Метою вивчення вибіркової дисципліни «Квантові обчислення» є ознайомлення із теоретичними основами побудови квантового комп'ютера і квантових обчислень.
<b>Література для вивчення дисципліни</b>	<p><i>Основна література</i></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Крохмальський Т., Вступ до квантових обчислень//Львів: ЛНУ, 2018. - 204 с.</li> <li>2. Остапов С.Е., Добровольський Ю.Г. Квантова інформатика та квантові обчислення - Чернівці: ЧНУ, 2021. - 99 с.</li> <li>3. Ronald de Wolf.. Quantum Computing: Lecture Notes.— QuSoft, CWI and University of Amsterdam, 2022, 184 p</li> </ol> <p><i>Додаткова література</i></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>4. Вакарчук І. О.. Квантова механіка.— Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2012. 872 с.</li> <li>5. S. Aaronson. Quantum Computing since Democritus. – Cambridge University Press, 3 3rd printing 2015. – 398 p.</li> <li>6. John Preskill Lecture Notes for Physics 229:Quantum Information and Computation. --Amason , 2015, 322 p.</li> </ol>

	<p>7. <i>M. A. Nielsen and I. L. Chuang</i>. Quantum Computation and Quantum Information. Cambridge University Press, 2000.</p> <p>8. <i>Grover L.K.</i> A fast quantum mechanical algorithm for database search//Proceedings, 28th Annual ACM Symposium on the Theory of Computing, 1996. - P.212.</p> <p>9. <i>R. Feynman</i>. Quantum mechanical computers. Optics News, 11:11–20, 1985.</p> <p>10. <i>Ткачук В. М.</i> Фундаментальні проблеми квантової механіки. — Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2011. 144 с.</p> <p>11. <i>Wichert, Andreas</i> (2014). Principles of Quantum Artificial Intelligence. World Scientific Publishing Co. ISBN 978-981-4566-74-2.</p> <p>12. <i>Shor P. W.</i> Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring//Foundations of Computer Science : Conference Publications, 1994. - P.124-134.</p> <p><i>Інформаційні ресурси в Інтернеті:</i></p> <p>1. Квантові комп'ютери: що це, як працюють, які перспективи? <a href="https://blog.allo.ua/ua/kvantovi-komp-yuteri-shho-tse-yak-pratsyuyut-yaki-perspektivi_2018-07-39/">https://blog.allo.ua/ua/kvantovi-komp-yuteri-shho-tse-yak-pratsyuyut-yaki-perspektivi_2018-07-39/</a></p> <p>2. Що таке квантові обчислення? <a href="https://tebapit.com/що-таке-квантові-обчислення/">https://tebapit.com/що-таке-квантові-обчислення/</a></p> <p>3. Microsoft Quantum Documentation. <a href="https://docs.microsoft.com/en-us/quantum/?view=qsharp-preview">https://docs.microsoft.com/en-us/quantum/?view=qsharp-preview</a>.</p>
<b>Обсяг курсу</b>	32 години аудиторних занять. З них 16 годин лекцій, 16 годин практичних занять та 58 годин самостійної роботи
<b>Очікувані результати навчання</b>	<p>Після завершення цього курсу студент буде :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Знати</b></li> <li>- основні поняття квантового комп'ютингу та реалізації систем квантових алгоритмів;</li> <li>- сучасні тенденції у розвитку комп'ютерних технологій;</li> <li>- <b>Вміти</b></li> <li>- Аналізувати та практично застосовувати алгоритми квантових обчислень на деяких з існуючих квантових процесорів, наприклад, на доступних процесорах ІВМ;</li> <li>- критично осмислювати основні теорії, принципи, методи і поняття в галузі навчання та професійної діяльності;</li> <li>- вирішувати складні непередбачувані задачі і проблеми у спеціалізованих сферах професійної діяльності та/або навчання, яке передбачає збирання та інтерпретацію інформації (даних), вибір методів та інструментальних засобів, застосування інноваційних підходів;</li> <li>- ефективно формувати комунікаційну стратегію.</li> </ul> <p>Курс забезпечує набуття таких компетентностей: ІК, ЗК 1-3, ЗК 5, СК 1, СК5, СК 6 та програмних результатів навчання: ПРН 1-4, ПРН 6, ПРН 7, ПРН-10, ПРН-19</p>
<b>Ключові слова</b>	Квантовий комп'ютер, квантовий алгоритм, гейтова модель, корекція помилок, алгоритм Шора
<b>Формат курсу</b>	Очний
	Проведення лекцій, практичних робіт та консультації для кращого розуміння тем

<b>Теми</b>	Перелік тем подано нижче у таблиці «Схема курсу».
<b>Підсумковий контроль, форма</b>	Залік в кінці семестру
<b>Пререквізити</b>	Для вивчення курсу студенти потребують базових знань з дисциплін "Лінійна алгебра", "Програмування", "Архітектура комп'ютерних систем".
<b>Навчальні методи та техніки, які будуть використовуватися під час викладання курсу</b>	Лекції, презентація, практичні заняття у вигляді семінарів з мультимедійними презентаціями (в тому числі студентів); виконання практичних завдань, результатом яких є звіт в електронному або друкованому вигляді; самостійна робота з вивченням оприлюднених електронних матеріалів.
<b>Необхідне обладнання</b>	Для проведення лекцій: комп'ютер, проектор. Для проведення практичних завдань та створення програм: комп'ютер, ОС Windows/Linux, доступ до інтернету.
<b>Критерії оцінювання (окремо для кожного виду навчальної діяльності)</b>	<p>Оцінювання проводиться за 100-бальною шкалою. Бали нараховуються за наступним співвідношенням:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• виконання практичних завдань за варіантами: 60% семестрової оцінки;</li> <li>• заліковий модуль – 40% семестрової оцінки.</li> </ul> <p>Підсумкова максимальна кількість балів 100</p> <p>Результати складання семестрового контролю у вигляді семестрових екзаменів і диференційованих заліків оцінюють за шкалою ЄКТС, національною чотирибальною шкалою («відмінно», «добре», «задовільно», «незадовільно») та 100-бальною шкалою Університету, а семестрових заліків - за шкалою ЄКТС, національною двобальною шкалою («зараховано», «не зараховано») та 100-бальною шкалою Університету згідно п.7.11 Положення про організацію освітнього процесу у ЛНУ імені Івана Франка <a href="https://lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2024/06/Polozhennia-pro-orhanizatsiiu-osvitnoho-protsesu_Nova-redaktsiia_2024.pdf">https://lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2024/06/Polozhennia-pro-orhanizatsiiu-osvitnoho-protsesu_Nova-redaktsiia_2024.pdf</a>.</p> <p>Вчасно виконані завдання оцінюють так (у відсотках від максимальної оцінки):</p> <p>100%– умови завдання виконано повністю, автор відповідає на всі запитання щодо використаних підходів, чітко інтерпретує отримані результати, немає ознак недоброчесності;</p> <p>80%– завдання виконано з незначними помилками, бракує виконання окремих пунктів, автор не досить повно пояснює використані підходи, немає ознак недоброчесності;</p> <p>60%– завдання виконано з помилками, які автор уміє виправити після зауваження викладача, бракує виконання окремих пунктів, на запитання щодо використаних підходів автор відповідає з помилками, немає ознак недоброчесності;</p> <p>40%– завдання виконано частково, автор не розуміє недоліків поданої роботи, не вміє їх виправити, але вміє інтерпретувати результати; немає ознак недоброчесності;</p> <p>20%– завдання виконано частково, немає основних пунктів, автор не може самостійно інтерпретувати отримані результати, виправити помилки, немає ознак недоброчесності;</p> <p>0%– завдання не виконано, не відповідає умові, або ж виявлено ознаки недоброчесності; автор не володіє відповідним теоретичним матеріалом.</p> <p>Очікується, що студенти виконають 6 практичних робіт у вигляді звітів. Очікується, що роботи студентів будуть їх оригінальними дослідженнями чи міркуваннями. Відсутність посилань на використані джерела, фабрикування джерел, списування, втручання в роботу інших студентів становлять, але не обмежують, приклади можливої академічної недоброчесності. Виявлення ознак академічної недоброчесності в письмовій роботі студента є підставою для її незарахування, незалежно від масштабів плагіату чи обману.</p>

	<p><b>Відвідання занять</b> є важливою складовою навчання. Очікується, що всі студенти відвідають усі практичні заняття курсу. Студенти мають інформувати викладача про неможливість відвідати заняття. У будь-якому випадку студенти зобов'язані дотримуватися усіх строків визначених для виконання усіх видів робіт, передбачених курсом. При відсутності студента на практичному занятті без поважної причини, на наступному занятті відбувається захист звіту пропущеного заняття. Уся література, яку студенти не зможуть знайти самостійно, буде надана викладачем виключно в освітніх цілях без права її передачі третім особам. Студенти заохочуються до використання також й іншої літератури та джерел, яких немає серед рекомендованих.</p> <p><b>Політика виставлення балів.</b> Враховуються бали набрані на презентаціях власних результатів отриманих при виконанні практичних робіт. При цьому обов'язково враховуються присутність на заняттях та активність студента під час практичного заняття; недопустимість пропусків та запізнь на заняття; користування мобільним телефоном, планшетом чи іншими мобільними пристроями під час заняття в цілях не пов'язаних з навчанням; списування та плагіат; несвоєчасне виконання поставленого завдання і т. ін. Жодні форми порушення академічної доброчесності не толеруються.</p>
<p><b>Питання до заліку чи екзамену.</b></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. У чому суть парадоксу Ейнштейна-Подольскі-Розена?</li> <li>2. Можливість вибору одного з 4 альтернатив передачею одного біта інформації це ...</li> <li>3. Що таке "кубіт"?</li> <li>4. В чому полягає суть квантового паралелізму?</li> <li>5. Алгоритм Шора реалізує ...</li> <li>6. Алгоритм Гровера реалізує ...</li> <li>7. Алгоритм Дойча реалізує ...</li> <li>8. Чи можливо копіювання квантового стану системи?</li> <li>9. В чому полягає суть квантової телепортації?</li> <li>10. Що може бути причиною переходу системи зі стану суперпозиції в класичний стан?</li> <li>11. У чому полягають основні переваги квантових алгоритмів над класичними?</li> <li>12. Для яких завдань може бути призначений алгоритм Шора?</li> <li>13. Для яких завдань може бути призначений алгоритм Гровера?</li> <li>14. Назвіть основні недоліки квантових комп'ютерів:</li> <li>15. Скільки бітів інформації може обробляти 8-кубітний квантовий регістр?</li> <li>16. В якому стані буде знаходитися квантова система після вимірів?</li> <li>17. Дія якого гейту переводить квантовий регістр в стан суперпозиції:</li> <li>18. Назвіть однокубітні операції:</li> <li>19. Як можна реалізувати додавання по модулю два за допомогою квантових гейтів:</li> <li>20. Продовжіть визначення: "Якщо система може перебувати в станах <math> 0\rangle</math> і <math> 1\rangle</math>, то вона ... "</li> </ol>
<p><b>Опитування</b></p>	<p>Анкету-оцінку з метою оцінювання якості курсу буде надано по завершенню курсу.</p>

## Схема курсу

№ тиж.	Тема, план, короткі тези	Форма діяльності (заняття)* *лекція, самостійна, дискусія, групова робота)	Література	Завдання, год	Термін виконання
1	<b>Тема1.</b> Вступ, історична перспектива і сучасний стан галузі. Зародження індустрії квантових обчислень. Особливості квантових обчислень на прикладі найпростішого алгоритму Дейча..	Лекція, самостійна робота	[1-5,9,10]	2, 4	
2	Огляд задач з квантової механіки	Практичне заняття, самостійна робота	[1-5,9,10]	2, 2	Наступне практичне заняття
3	<b>Тема2.</b> Гейтова модель класичних та квантових обчислень. Основні поняття. Елементарні квантові логічні вентиля, однокубітні і двокубітні вентиля. Умовні двокубітні вентиля, представлення умовних багатокубітних вентилів через двокубітні.	Лекція, самостійна робота	[2,7,10]	2, 4	
4	Задачі з моделювання квантових систем.	Практичне заняття, самостійна робота	[2,7,10]	2, 2	Наступне практичне заняття

5	<b>Тема3.</b> Проблеми вимірювань у квантових системах. Опис вимірювань в квантовій теорії, опис вимірювань в квантових схемах. Універсальність однокубітних вентилів і вентиля NOT. Дискретизація однокубітних вентилів, універсальні дискретні набори вентилів. Складність апроксимації довільного унітарного перетворення.	Лекція, самостійна робота	[1-5,7, 9,10]	2, 4	
6	Задачі з представлення квантової інформації, приготування початкового стану	Практичне заняття, самостійна робота	[1-5,7, 9,10]	2, 4	Наступне практичне заняття
7	<b>Тема4.</b> Квантове перетворення Фур'є. Алгоритм оцінки фази, оцінка необхідних ресурсів. Експериментальні реалізації алгоритму оцінки фази і додатки до розрахунку молекулярних термів	Лекція, самостійна робота	[2,6, 7,10]	2,4	
8	Задачі з використанням квантового перетворення Фур'є	Практичне заняття, самостійна робота	[2,6, 7,10]	2,2	Наступне практичне заняття
9	<b>Тема5.</b> Квантові алгоритми пошуку. Алгоритм Гровера, геометрична ілюстрація, оцінка ресурсів. Підрахунок числа рішень задачі пошуку.	Лекція, самостійна робота	[2,6, 7, 8, 10]	2, 4	
10	Задачі з використанням алгоритмів пошуку	Практичне заняття, самостійна робота	[2,6, 7, 8, 10]	2, 2	Наступне практичне заняття
11	<b>Тема6.</b> Прискорення рішення NP-повних задач. Квантовий пошук в неструктурованій базі даних. Оптимальність алгоритму Гровера. Експериментальні реалізації пошукових алгоритмів.	Лекція, самостійна робота	[2,6, 7, 8, 10]	2, 6	
12	Прискорення рішення NP-повних задач. Квантовий пошук в неструктурованій базі даних. Оптимальність алгоритму Гровера. Експериментальні реалізації пошукових алгоритмів.	Практичне заняття, самостійна робота	[2,6, 7, 8, 10]	2, 2	Наступне практичне заняття

13	<b>Тема6.</b> Помилки в квантових обчисленнях. Відмінність від класичного випадку. Трикубітний код, що виправляє X-помилку. Трикубітний код, що виправляє Z-помилку.	Лекція, самостійна робота	[2, 6, 7, 8, 10, 12]	2,6	
14	<b>Тема6.</b> Використання алгоритму Шора для розв'язування задач криптографії	Практичне заняття, самостійна робота	[2, 6, 7, 8, 10, 12]	2,4	Наступне практичне заняття
15	<b>Тема6.</b> Помилки в квантових обчисленнях. Дев'ятикубітний код Шора.	Лекція, самостійна робота	[2, 6, 7, 8, 10, 12]	2,4	
16	Підсумкове заняття. Модульний контроль	Практичне заняття, самостійна робота	[1- 12]	2, 4	