

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Львівський національний університет імені Івана Франка**  
**Факультет електроніки та комп'ютерних технологій**  
**Кафедра радіофізики та комп'ютерних технологій**

**Затверджено**

На засіданні  
кафедри радіофізики та комп'ютерних  
технологій  
факультету електроніки та комп'ютерних  
технологій  
Львівського національного університету  
імені Івана Франка  
(протокол №15/23 від 29 серпня 2023 р.)

Завідувач кафедри:



Іван КАРБОВНИК

**Силабус з навчальної дисципліни**  
**“Основи квантових комп'ютерів та обчислень”,**  
**що викладається в межах ОПП**  
**“ Високопродуктивний комп'ютинг ”**  
**першого (бакалаврського) рівня вищої освіти для здобувачів з**  
**спеціальності 121 – Інженерія програмного забезпечення**

Львів 2023 р.

<b>Назва дисципліни</b>	Основи квантових комп'ютерів та обчислень
<b>Адреса викладання дисципліни</b>	Корпус факультету електроніки та комп'ютерних технологій, Львівський національний університет імені Івана Франка, вул. Драгоманова 50, м. Львів, 79005, вул. Ген. Тарнавського 107, м. Львів, 79011
<b>Факультет та кафедра, за якою закріплена дисципліна</b>	Факультет електроніки та комп'ютерних технологій Кафедра радіофізики та комп'ютерних технологій
<b>Галузь знань, шифр та назва спеціальності</b>	12 – інформаційні технології 121 – Інженерія програмного забезпечення
<b>Викладачі дисципліни</b>	Болеста І.М., доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри радіофізики та комп'ютерних технологій;
<b>Контактна інформація викладачів</b>	<a href="mailto:ivan.bolesta@lnu.edu.ua">ivan.bolesta@lnu.edu.ua</a> , <a href="https://electronics.lnu.edu.ua/employee/bolesta">https://electronics.lnu.edu.ua/employee/bolesta</a>
<b>Консультації з питань навчання по дисципліні відбуваються</b>	Консультації в день проведення лекцій/лабораторних занять (за попередньою домовленістю): ауд. 130, корпус факультету електроніки та комп'ютерних технологій, вул. Ген. Тарнавського 107, м. Львів
<b>Сторінка курсу</b>	<a href="https://teams.microsoft.com/_#/school/conversations/%D0%97%D0%B0%D0%B3%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B5?threadId=19:d2dbecfe290c4e838a8d030ddf46c68@thread.tacv2&amp;ctx=channel">https://teams.microsoft.com/_#/school/conversations/%D0%97%D0%B0%D0%B3%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B5?threadId=19:d2dbecfe290c4e838a8d030ddf46c68@thread.tacv2&amp;ctx=channel</a>
<b>Інформація про дисципліну</b>	Дисципліна “ Основи квантових комп'ютерів та обчислень” є вибірковою дисципліною зі спеціальності 121 – Інженерія програмного забезпечення для освітньої програми “Високопродуктивний комп'ютинг”, яка викладається в 7 –му семестрі обсягом 6,5-ох кредитів (за Європейською Кредитно-Трансферною Системою ECTS).
<b>Коротка анотація дисципліни</b>	Курс розроблено для ознайомлення студентів з основними поняттями і методами квантових обчислень, які використовуються для розв'язання практичних задач.
<b>Мета та цілі дисципліни</b>	<i>Мета:</i> Метою вивчення курсу є одержання бакалаврами знань з новітнього напрямку розвитку - квантової інформатики, яка сформувалася в останні 20 років на основі класичної теорії інформації, інформатики та квантової механіки. <i>Цілі:</i> Вивчення курсу сприятиме формуванню сучасного наукового світогляду студентів.
<b>Література для вивчення дисципліни</b>	1. Nielsen M., Chuang I. Quantum Computation and Quantum Information. Cambridge University Press, 2010/ 2. Ткачук В. М. Фундаментальні проблеми квантової механіки. Львів: ЛНУ ім. І.Франка, 2011. 3. Кулик С. П. Конспект лекцій. Доступно за адресою

	<p><a href="mailto:skulik@qopt.phys.msu.ru">skulik@qopt.phys.msu.ru/</a></p> <p>4. Nakahara M. Ohmi T. Quantum computing: from linear Algebra to physical realization. Boca Raton London, New York. 2008. 416 p.</p> <p>5. Крохмальський Т.Є. Вступ до квантових обчислень. Навчальний посібник. Львів. ЛНУ ім. І.Франка. 2018 р. -204 с.</p> <p>6. Крохмальський Т. Квантові комп'ютери: основи й алгоритми (короткий огляд). Журнал Фізичних Досліджень. 2004 Т.8, №1. С. 1-15.</p> <p>7. I. Bolesta, O. Kushnir, Yu. Furgala. Quantum Computing. I. Quantum bits, gates and circuits. Proceedings of the Xth International Scientific and Practical Conference "Electronics and Information Technologies" (ELIT-2018). - August 30 – September 2 2018, Lviv– Karpaty village, Ukraine. – P. A-45-A-48.</p> <p>8. I. Bolesta, O. Kushnir, Yu. Furgala. Quantum Computing. II. Quantum Computer Languages. Proceedings of the Xth International Scientific and Practical Conference "Electronics and Information Technologies" (ELIT-2018). - August 30 – September 2 2018, Lviv– Karpaty village, Ukraine. – P. A-49-A-51.</p> <p>9. І.М. Болеста, О.О. Кушнір, І.М. Ровецький, Ю.М. Фургала. Квантові обчислення. Матеріали III Міжнародної наукової конференції „Актуальні проблеми фундаментальних наук”. – 01-05 червня, 2019. - Луцьк – Світазь, Луцьк : Вежа-Друк, Україна, 2019. – С. 197–200</p> <p>10. Кайку М. Візії: як наука змінить XXI сторіччя. Львів: Літопис, 2004.- 544 с.</p> <p>11. Кайку М. Майбутнє розуму. Львів: Літопис, 2017.- 408 с.</p> <p>12. Ллойд С. Програмуючи всесвіт. Квантовий комп'ютер та майбутнє науки. Харків. Вид.-во «Клуб сімейного дозвілля». 2019.</p>
<b>Обсяг курсу</b>	Загальний обсяг:195 годин. Аудиторних занять: 64 год., з них 32 год. лекційних та 32 годин лабораторних робіт. Самостійної роботи: 131 год.
<b>Очікувані результати навчання</b>	<p>Після завершення цього курсу студент буде</p> <p><b>Знати:</b>  кубіти – як основне поняття квантової інформатики;  опис стану та динаміки системи у квантовій механіці;  квантово-механічні вимірювання;  формування простору багатьох кубітів (тензорний добуток);  основні однокубітові та двокубітові квантові логічні елементи;  квантові мережі;  використання заплутаних та суперпозиційних станів для розв'язання задач інформатики (надщільне кодування, телепортація);  основні квантові алгоритми;  особливості мов програмування для квантових обчислень.</p> <p><b>Вміти:</b>  описати стан та динаміку квантово-механічних систем;  визначити стан системи після вимірювання;</p>

	<p>формувані простір багатьох кубітів; застосувати дію одно- та двокубітових квантових елементів; пояснити принципи надщільного кодування та квантової телепортації.</p> <p>Після вивчення курсу «Основи квантових комп'ютерів та обчислень» здобувачі набувають таких Загальних та Фахових компетентностей та Програмних результатів навчання:</p> <p>ЗК01. Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу. ЗК05. Здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями. ФК13. Здатність ідентифікувати, класифікувати та формулювати вимоги до програмного забезпечення. ФК15. Здатність розробляти архітектури, модулі та компоненти програмних систем. ФК20. Здатність застосовувати фундаментальні і міждисциплінарні знання для успішного розв'язання завдань інженерії програмного забезпечення. ФК21. Здатність оцінювати і враховувати економічні, соціальні, технологічні та екологічні чинники, що впливають на сферу професійної діяльності. ФК25. Здатність обґрунтовано обирати та освоювати інструментарій з розробки та супроводження програмного забезпечення. ФК27. Здатність розробляти високопродуктивні програмні комплекси для вирішення завдань наук про дані, систем штучного інтелекту, вбудованих та інших інноваційних систем.</p> <p>ПРН01. Аналізувати, цілеспрямовано шукати і вибирати необхідні для вирішення професійних завдань інформаційно-довідникові ресурси і знання з урахуванням сучасних досягнень науки і техніки. ПРН04. Знати і застосовувати професійні стандарти і інші нормативно-правові документи в галузі інженерії програмного забезпечення. ПРН06. Вміти вибирати та використовувати відповідну задачі методологію створення програмного забезпечення. ПРН13. Знати і застосовувати методи розробки алгоритмів, конструювання програмного забезпечення та структур даних і знань. ПРН15. Мотивовано обирати мови програмування та технології розробки для розв'язання завдань створення і супроводження програмного забезпечення. ПРН17. Вміти застосовувати методи компонентної розробки програмного забезпечення. ПРН18. Знати та вміти застосовувати інформаційні технології обробки, зберігання та передачі даних. ПРН23. Вміти документувати та презентувати результати розробки програмного забезпечення. ПРН27. Знати основи інженерії даних і конструювання конвеєрів даних та вміти обирати оптимальні алгоритми і технології розробки інноваційних рішень, зокрема для вирішення задач наук про дані та вбудованих систем.</p>
<b>Ключові слова</b>	Кубіти, логічні операції, лямбда-обчислення, машина Тюрінга простір Гільберта, чисті, суперпозиційні та заплутані стани, квантові логічні елементи, квантові мережі, телепортація, надщільне кодування, квантовий паралелізм.
<b>Формат курсу</b>	Очний

<b>Теми</b>	<p>Тема 1 Квантова інформатика – закономірний етап розвитку науки Фізичні і технологічні обмеження розвитку традиційної електроніки. Роль квантових ефектів у становленні обчислень. Основні постулати квантової механіки . Вимірювання в квантовій механіці.</p> <p>Тема 2. Кубіт у Гільбертовому просторі. Кубіт – основне поняття квантової інформації та квантових обчислень. Кубіт у гільбертовому просторі. Декілька кубітів у гільбертовому просторі. Реалізація кубітів як фізичних систем</p> <p>Тема 3. Принципи квантових обчислень. Паралелізм квантових обчислень. Однокубітові квантові логічні елементи, Багато кубітові квантові логічні елементи. Мінімальні набори елементів.</p> <p>Тема 4. Квантові мережі. Квантові схеми з однакових та різних елементів Стани Белла. Квантова телепортація Надщільне кодування. Принципи реалізації квантових комп'ютерів.</p>
<b>Підсумковий контроль, форма</b>	Залік у кінці семестру
<b>Пререквізити</b>	<p>Для вивчення даного курсу студентам потрібні базові знання з курсів:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- вища математика;</li> <li>- фізика;</li> <li>- електроніка;</li> <li>- теорія алгоритмів;</li> <li>- алгоритмізація і програмування;</li> <li>- об'єктно-орієнтоване програмування.</li> </ul>
<b>Навчальні методи та техніки, які будуть використовуватися під час викладання курсу</b>	Інформаційні методи (лекція, бесіда, ілюстрація, демонстрація); дедуктивні методи на основі узагальнень; евристичні методи (проблемна лекція); інтерактивні методи
<b>Необхідне обладнання</b>	Комп'ютер із необхідним програмним забезпеченням, доступ до Internet мережі.
<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>• Теми 1, 2: 25% семестрової оцінки за виконані лабораторні роботи.</li> <li>• Теми 3, 4: 25% семестрової оцінки за виконані лабораторні роботи.</li> <li>• екзамен: 50% семестрової оцінки, максимальна кількість балів 50.</li> </ul> <p>Підсумкова максимальна кількість балів 100.</p>

Поточне тестування та самостійна робота														Підсумковий тест (екзамен)		Сума
Змістовий модуль 1							Змістовий модуль 1									
Т 1	Т 2	Т 3	Т 4	Т 5	Т 6	Т 7	Т 8	Т 9	Т 10	Т 11	Т 12	Т 13	Т 14	Т 15	Т 16	50
2	2	3	3	3	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	100

Академічна доброчесність: Очікується, що роботи студентів будуть оригінальними дослідженнями чи міркуваннями. Списування та втручання в роботу інших студентів становлять, але не обмежують, приклади можливої академічної недоброчесності. Виявлення ознак академічної недоброчесності в написанні завдань є підставою для її незарахування викладачем, незалежно від масштабів плагіату чи обману.

Відвідування занять є важливою складовою навчання. Очікується, що всі студенти відвідають усі лекції та лабораторні заняття курсу. Студенти повинні інформувати викладача про неможливість відвідати заняття. У будь-якому випадку студенти зобов'язані дотримуватися термінів, визначених для виконання всіх видів робіт, передбачених курсом.

Література. Уся література, яку студенти не зможуть знайти самостійно, буде надана викладачем виключно з освітньою метою без права її передавання третім особам. Студенти заохочуються до використання також й іншої літератури та джерел, яких немає серед рекомендованих.

Політика виставлення балів. Ураховуються бали, набрані при поточному контролі та бали підсумкового тестування. 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 з метою, не пов'язаною із навчанням; списування та плагіат; несвоєчасне виконання поставленого завдання і т. ін.

Жодні форми порушення академічної доброчесності не толеруються.

<b>Питання до заліку чи екзамену</b>	Фізичні і технологічні обмеження розвитку традиційної електроніки.
	Роль квантових ефектів у становленні обчислень.
	Основні постулати квантової механіки .
	Вимірювання в квантовій механіці.
	Кубіт – основне поняття квантової інформації та квантових обчислень.
	Кубіт у гільбертовому просторі. Декілька кубітів у гільбертовому просторі.
	Реалізація кубітів як фізичних систем
Принципи квантових обчислень.	
Паралелізм квантових обчислень.	

	<p>Однокубітові квантові логічні елементи,  Багато кубітові квантові логічні елементи.  Мінімальні набори елементів.  Квантові мережі.  Квантові схеми з однакових та різних елементів  Стани Белла.  Квантова телепортація  Надщільне кодування.  Принципи реалізації квантових комп'ютерів</p>
<b>Опитування</b>	Анкету-оцінку з метою оцінювання якості курсу буде надано після завершення курсу.

**Схема курсу “ Основи квантових комп’ютерів та обчислень ”  
для студентів спеціальності 121 – Інженерія програмного забезпечення**

Тиж.	Тема, план, короткі тези	Форма діяльності (заняття)	Література. Ресурси в Інтернеті	Завдання (практична робота), год	Термін виконання
1,2	<b>Основні етапи розвитку обчислень.</b> Фізичні і технологічні обмеження розвитку традиційної електроніки. Закон Мура. Машина Тюрінга. Лямбда-обчислення Черча. Роль квантових ефектів. Основні проблеми на шляху створення квантових комп’ютерів.	Лекція	1, 2, 3, 8,14	Закон Мура. Алгебра Буля та виконання логічних операцій.	3 тиж. семестру
3,4	<b>Кубіти – основне поняття квантової інформатики.</b> Опис стану квантової системи у Гільбертовому просторі станів. Стани багатокубітної системи. Тензорний добуток. Основні постулати квантової механіки.. Вимірювання у квантовій механіці.	Лекція	1, 2, 3, 4, 5, 6,	Практична робота . Кубіт - як вектор у Гільбертовому просторі. Стани багатокубітної системи.	5 тиж. семестру
5,6	<b>Реалізація кубітів як фізичних систем.</b> Основні принципи фізичної реалізації квантових комп’ютерів .Спін електрона, поляризація фотона, іонні кристали, кубіти на	Лекція	2, 8, 9, 10, 11, 12	Практична робота. Оператори фізичних величин та їхнє матричне зображення. Матриці Паулі	7 тиж. семестру

	надпровідних елементах.				
7,8,9	<b>Принципи квантових обчислень.</b> Одно- і багато кубітові квантові логічні елементи та їхнє матричне зображення.. Мінімальний набір елементів. Порівняння з класичним випадком: оборотність квантових елементів. Принципова схема квантового обчислення. Квантовий паралелізм.	Лекція	1, 2, 7, 8, 9 10	Моделювання роботи одно- та двокубітових квантових логічних елементів.	9 тиж. семестру
10, 11, 12	<b>Квантові мережі..</b> Стани Белла. Квантова телепортація та надщільне кодування.	Лекція	3, 4, 9, 10	Моделювання процесу квантової телепортації та надщільного кодування.	11 тиж. семестру
13,14,	<b>Квантові алгоритми.</b> Алгоритми з оракулами. Квантові алгоритми пошуку. Алгоритми Гровера, Дойча – Йожі, Саймона, Шора. Квантова криптографія.	Лекція	3, 4, 9, 10, 12	Квантове перетворення Фур'є.	13. тиж. семестру
15, 16	<b>Мови програмування .</b> Особливості квантового програмування. Мова програмування Qirreg, її можливості. Елементи квантової теорії інформації. Міри інформації. Матриця станів. Інформація та ентропія.	Лекція	1, 2, 6, 7, 10	Підсумкове заняття	16 тиж. семестру