

# АЛГОРИТМИ ТА МОДЕЛІ ОБЧИСЛЕНЬ: ТЕЗИ СТОСОВНО ПРОГРАМИ КУРСУ

*Н.Б. Козак*

Національний університет «Львівська політехніка»,  
кафедра електронних обчислювальних машин  
*E-mail: nazar.b.kozak@lpnu.ua*

© Козак Н.Б., 2025

Подано опис програми курсу «Алгоритми та моделі обчислень» та висвітлено його зв'язок з іншими дисциплінами спеціальності «Комп'ютерна інженерія».

**Ключові слова:** теорія алгоритмів, теорія обчислюваності, теорія складності обчислень, моделі обчислень, методи розробки алгоритмів.

## Вступ

**Відповідність спеціальності «Комп'ютерна інженерія».** Курс «Алгоритми та моделі обчислень» є точнішою назвою дисципліни «Алгоритми та методи обчислень», у якій словосполучення «методи обчислень» часто помилково тлумачиться як «чисельні методи» (наприклад, чисельне диференціювання, інтегрування, обчислення за допомогою рядів), що є частиною прикладної математики.

У прикладній математиці модель обчислень (математична модель) – це система рівнянь або функцій, які описують певне явище або процес (наприклад, зміну параметра в часі  $t$  відносно початкового моменту  $t_0$ ). У комп'ютерній інженерії модель обчислень – це формальна алгоритмічна система, яка реалізує алгоритм, що, у свою чергу, відповідає обчисленням у математичній моделі. Якщо в курсі «Архітектура комп'ютера» розглядається апаратна реалізація обчислень, то курс «Алгоритми та моделі обчислень» присвячений формалізації алгоритмів [1] (що передує апаратній реалізації) або їх програмному представленню.

Курс є розвитком дисципліни професора Черкаського М.В. «Алгоритми та методи обчислень» [2], яка викладалась на кафедрі ЕОМ протягом багатьох років.

Оновлений курс зосереджується на формуванні у студентів навичок програмування різними мовами, уміння проектувати алгоритми з використанням різних алгоритмічних стратегій, а також на глибокому розумінні різних моделей обчислень.

**Загальна структура курсу «Алгоритми та моделі обчислень».** Курс розроблено на основі класичних літературних джерел [3–10]. Його структура охоплює такі основні компоненти:

- Теорія алгоритмів (англ. *Theory of Computation*) [5]:
  - теорія автоматів (англ. *Automata theory*);
  - теорія формальних мов (англ. *Formal language theory*);
  - теорія обчислюваності (англ. *Computability theory*);
  - теорія складності обчислень (англ. *Computational complexity theory*);
- Моделі обчислень (англ. *Models of Computation*) [6, 7].
- Методи проектування алгоритмів (алгоритмічні стратегії) (англ. *Algorithm Design Paradigm, Algorithmic Paradigm, Algorithmic Technique, Algorithmic Strategy*) [8].

Базова частина курсу сформована з урахуванням програм провідних університетів, зокрема курсів MIT: «Automata, Computability, and Complexity» [11] та «Theory of Computation» [12].

Особливу увагу в курсі приділено функційній і реактивній моделям обчислень, які підтримуються відповідними мовами програмування та бібліотеками. Це дає змогу доповнити знання студентів, які раніше знайомились з процедурною та об'єктно-орієнтованою парадигмами.

У розділі про функційні моделі обчислень розглядається лямбда-числення і комбінаторна логіка, які разом з знаннями студентів про комбінаційну логіку (яку студенти вивчають у курсі «Комп'ютерна логіка») формують у студентів цілісне уявлення про даний тип обчислень. Також вводяться базові елементи теорії категорій та теорії моделей обчислень, особливо важливі для інтерпретації формальних мов як моделей обчислень – аспект, який часто ігнорується в підручниках.

### **Детальна структура курсу «Алгоритми та моделі обчислень»**

Розширену детальну структуру системи знань за курсом «Алгоритми та моделі обчислень» наведено в додатку А. Відповідно до цієї структури сформовано такі розділи програми курсу:

**Тема 1. Вступ до теорії алгоритмів.** Розділ починається з неформального тлумачення поняття алгоритму та переходить до його формалізації за допомогою класичних формальних алгоритмічних систем, яким ставляться у відповідність формальні мови та їхні граматики згідно з ієрархією Хомського. Особлива увага приділяється скінченим детермінованим та недетермінованим автоматам, які розпізнають регулярні мови, оскільки на кожному наступному рівні ієрархії пристрій, що розпізнає відповідну формальну мову, є розширенням скінченного автомату. Окремо розглядаються взаємні перетворення регулярних виразів та скінчених автоматів.

**Тема 2. Основи аналізу алгоритмів.** Це класична частина курсу, яка охоплює аналіз обчислювальної складності за часом виконання та обсягом пам'яті. Окремо виділено тему структурної складності алгоритмів (з урахуванням напрацювань проф. Черкаського М.В.) та ієрархії класів складності, що рідко висвітлюються в подібних курсах.

**Тема 3. Методи відображення та синтез алгоритмів.** У багатьох класичних джерелах [3–10] розгляд відображення алгоритмів опускається, оскільки модель алгоритму часто розглядається як його відображення. Однак у цьому курсі прийнято рішення виділити це питання окремо. Окрім класичних блок-схем, розглядаються й інші способи відображення алгоритмів. Також, через відсутність у навчальному плані дисципліни «Програмування, частина 3. Структури даних та алгоритми», у цей розділ включено тему абстрактних типів даних (АТД) та відповідних структур даних. Крім того, вивчаються алгоритмічні стратегії (методи розробки алгоритмів).

**Тема 4. Базові алгоритми обробки інформації.** Розділ присвячено базовим алгоритмам обробки інформації: алгоритмам пошуку, сортування, порівняння зі взірцем, алгоритмам на графах та іншим. Такі алгоритми часто використовуються як компоненти в більш складних прикладних алгоритмах і є обов'язковими у подібних курсах.

**Тема 5. Бібліотеки базових алгоритмів обробки інформації для популярних мов програмування.** Розглянуто засоби узагальненого програмування мовами C++, C# та Java. Такий підхід є базовим у сучасній розробці. Хоча студенти частково ознайомлені зі стандартною бібліотекою шаблонів (STL) у C++, дуже важливо проаналізувати аналогічні інструменти в C# і Java з можливістю покрокового порівняння. У розділ також включено огляд деяких прикладних бібліотек.

**Тема 6. Моделі обчислень.** Спершу розділ доповнює розгляд класичних формальних алгоритмічних систем та відповідних мов теорією моделей, зокрема інтерпретацією формальних мов. Далі викладається теорія обчислюваності – ще один класичний компонент подібних курсів [11]. Новим елементом є включення теорії категорій, яка забезпечує семантичну інтерпретацію лямбда-числення (зокрема через картезіансько-замкнені категорії) при вивченні функційної парадигми. Також розглядається бібліотека ReactiveX як приклад засобу реактивного програмування.

#### **Взаємозв'язок курсу з іншими дисциплінами**

**Курсовий проєкт «Розробка системних програмних модулів та компонент систем програмування».** Теорія автоматів і формальних мов, яка найповніше викладається у курсі «Алгоритми та моделі обчислень», є теоретичною основою для розробки компіляторів та інтерпретаторів у курсовому проєкті.

**Курси «Комп'ютерна логіка» та «Комп'ютерна схемотехніка».** Ці курси розглядають автомати Мура та Мілі з практичного погляду. Курс «Алгоритми та моделі обчислень» продовжує вивчення автоматів, зосереджуючись на формальній стороні. Якщо курс «Комп'ютерна логіка» розглядати як адаптацію першої частини курсу «Математична логіка та теорія алгоритмів», то «Алгоритми та моделі обчислень» є його продовженням у частині теорії алгоритмів.

**Врахування відсутності курсу «Програмування, частина 3. Алгоритми та структури даних».** У зв'язку з тим, що цей курс не викладається для студентів спеціальності «Комп'ютерна інженерія», до програми курсу «Алгоритми та моделі обчислень» включено теми про абстрактні типи даних (АТД) та відповідні структури даних.

### *Література*

1. Параметричні моделі алгоритмів [Електронний ресурс] / М. В. Черкаський, А. О. Саченко // Електротехнические и компьютерные системы. - 2011. - № 4. - С. 162-167. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/etks\\_2011\\_4\\_30](http://nbuv.gov.ua/UJRN/etks_2011_4_30)
2. Мельник А. О. Теорія алгоритмів і методи обчислень: новий курс / А. О. Мельник, М. В. Черкаський // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2001. – № 437 : Комп'ютерні системи та мережі. – С. 99–105.
3. Cormen, Thomas H.; Leiserson, Charles E.; Rivest, Ronald L.; Stein, Clifford. Introduction to Algorithms. — 3rd. — MIT Press, 2009. — ISBN 0-262-03384-4.
4. Donald E. Knuth. The Art of Computer Programming, Volumes 1-4A Boxed Set. Third Edition (Reading, Massachusetts: Addison-Wesley, 2011), 3168pp. ISBN 978-0-321-75104-1, 0-321-75104-3.
5. Michael Sipser (2013). Introduction to the Theory of Computation. 3rd. Cengage Learning. ISBN 978-1-133-18779-0
6. Savage, John E. (1998). Models Of Computation: Exploring the Power of Computing. ISBN 978-0-201-89539-1
7. Fernandez, Maribel (2009). Models of Computation: An Introduction to Computability Theory. Undergraduate Topics in Computer Science. Springer. ISBN 978-1-84882-433-1.
8. Anany Levitin (2012). Introduction to the design & analysis of algorithms. 3rd. ISBN-13: 978-0-13-231681-1
9. Aho, A. V., Hopcroft, J. E., & Ullman, J. D. (1983). Data Structures and Algorithms. Addison-Wesley. ISBN 978-0-201-00023-8.
10. Aho, A. V., Hopcroft, J. E., & Ullman, J. D. (1974). The Design and Analysis of Computer Algorithms. Addison-Wesley. ISBN 978-0-201-00029-0.
11. <https://ocw.mit.edu/courses/6-045j-automata-computability-and-complexity-spring-2011/pages/lecture-notes/>
12. <https://ocw.mit.edu/courses/18-404j-theory-of-computation-fall-2020/pages/lecture-notes/>

## **Частина 1. Тема №1. Вступ до теорії алгоритмів.**

### **1.1 Неформальне тлумачення алгоритму**

- 1.1.1 Історія поняття алгоритму
- 1.1.2 Визначення алгоритму
- 1.1.3 Основні властивості алгоритму
- 1.1.4 Параметри алгоритму
- 1.1.5 Базові структури алгоритмів (*алгоритмічні конструкції*). Теорема Бьома-Якопіні.
- 1.1.6 Рекурсивні алгоритми
- 1.1.7 Паралельні алгоритми
- 1.1.8 Недетерміновані алгоритми
- 1.1.9 Імовірнісні алгоритми (*увипадковлені алгоритми*)

### **1.2 Формалізація поняття алгоритму**

(*продовження в частині курсу, яка присвячена моделям обчислень(тема №6)*)

- 1.2.1 Введення в теорію алгоритмів
- 1.2.2 Абстрактні моделі алгоритму
- 1.2.3 Формальні алгоритмічні системи (*ФАС*)
- 1.2.4 Скінченний автомат
  - 1.2.4.1 Детермінований скінченний автомат (*DFA*)
  - 1.2.4.2 Недетермінований скінченний автомат (*NFA*) та імовірнісний автомат(*PA*).
  - 1.2.4.3  $\omega$ -автомат
  - 1.2.4.4 Автомат з однобуквеними переходами. Формування автомату з однобуквеними переходами за заданим недетермінованим автоматом.
  - 1.2.4.5 Видалення непродуктивних та недосяжних станів скінченного автомату
  - 1.3.4.6 Видалення  $\lambda$ -переходів та  $\varepsilon$ -переходів у недетермінованому скінченному автоматі
  - 1.3.4.7 Детермінізація квазидетермінованого скінченного автомату
  - 1.3.4.8 Мінімізація скінченного детермінованого автомату
- 1.2.5 Перетворювачі (*трансдуктори*) на основі детермінованого скінченного автомату
  - 1.2.5.1 Автомат Мура (*Moore machine*)
  - 1.2.5.2 Автомат Мілі (*Mealy machine*)
- 1.2.6 Автомат з магазинною пам'яттю (*МП-автомат, PDA*)
- 1.2.7 Машина Тюрінга та її варіанти
- 1.2.8 Числення Поста
- 1.2.9 Нормальні алгоритми Маркова
- 1.2.10 Регістрова машина
- 1.2.11 РАМ-машина
- 1.2.12 ПРАМ-машина та варіанти пам'яті із впорядкованим доступом

### **1.3 Формальні граматики та формальні мови**

- 1.3.1 Формальні граматики, мови та ієрархія Хомського
- 1.3.2 Регулярні мови та вирази
  - 1.3.2.1 Властивості граматик регулярних мов. Автоматні граматики. Доповнення автоматної мови.
  - 1.3.2.2 Лема про накачку для регулярних мов
  - 1.3.2.3 Знаходження мови для заданої регулярної граматики
  - 1.3.2.4 Регулярні вирази
  - 1.3.2.5 Формування регулярного виразу для заданого недетермінованого скінченного автомату
  - 1.3.2.6 Формування недетермінованого скінченного автомату для заданої регулярної граматики
  - 1.3.2.7 Формування недетермінованого скінченного автомату для заданого регулярного виразу
- 1.3.3 КВ-мови (*контекстно-вільні мови*) та нотації БНФ
  - 1.3.3.1 Властивості граматик КВ-мов
  - 1.3.3.2 Лема про накачку для КВ-мов
  - 1.3.3.3 Древа розбору КВ-грамматик
  - 1.3.3.4 Створення МП-автомату для заданої КВ-граматики
  - 1.3.3.5 Нотації БНФ та РБНФ
  - 1.3.3.6 Нормальна форма Хомського для КВ-грамматик
  - 1.3.3.7 Алгоритм Кока-Касамі-Янгера для КВ-грамматик у нормальній формі Хомського

### **1.4 Формалізація поняття алгоритму (доповнення до 1.2)**

- 1.4.1 Детермінізація недетермінованого скінченного автомату (*доповнення до 1.2.4*)

## **Частина 1. Тема 2. Основи аналізу алгоритмів**

### **2.1 Обчислювальна складність**

- 2.1.1 Складність по часу виконання алгоритму
  - 2.1.1.1 Оцінка розміру вхідних даних
  - 2.1.1.2 Залежність часу виконання від розміру вхідних даних

- 2.1.1.3 Аналіз нерекурсивних алгоритмів
- 2.1.1.4 Аналіз рекурсивних алгоритмів
- 2.1.1.5 Аналіз алгоритму відповідно до варіантів його виконання: для найкращого випадку, для середнього випадку та для найгіршого випадку
- 2.1.1.6 Асимптотичний аналіз
  - 2.1.1.6.1 Загальні визначення
  - 2.1.1.6.2 Нотація Бахмана-Ландау (*група асимптотичних нотацій*):  $O$ -,  $o$ -,  $\Omega$ -,  $\omega$ -,  $\Theta$ - нотації
- 2.1.1.7 Детермінований (DTIME) та недетермінований (NTIME) ресурси часу виконання
- 2.1.1.8 Здійсненні класи складності
  - 2.1.1.8.1 DLOGTIME-клас складності (*логарифмічний*)
  - 2.1.1.8.2 PolylogTIME-клас складності (*полілогарифмічний*)
  - 2.1.1.8.3 P-клас складності (поліноміальний)
  - 2.1.1.8.4 P-повні задачі
  - 2.1.1.8.5 RP-клас та coRP-клас складності
  - 2.1.1.8.6 ZPP-клас складності
  - 2.1.1.8.7 BPP-клас складності
  - 2.1.1.8.8 BQP-клас складності
- 2.1.1.9 Проблематичні класи складності
  - 2.1.1.9.1 NP- та coNP- класи складності
  - 2.1.1.9.2 Співвідношення між P- та NP- класами складності
  - 2.1.1.9.3 NP- та coNP- повні задачі. Теорема Кука-Левіна. Стандартні NP-повні задачі.
  - 2.1.1.9.4 NP- складні, еквівалентні, проміжні та прості задачі
  - 2.1.1.9.5 PP-клас складності
  - 2.1.1.9.6 UP-клас складності
  - 2.1.1.9.7 #P-клас (*вимовляється як «шарп P»*) складності та #P-повні задачі
  - 2.1.1.9.8  $\oplus$ P-клас (*вимовляється як «паритет P»*) складності
- 2.1.1.10 Нездійсненні класи складності
  - 2.1.1.10.1 EXPTIME-клас складності (*експоненціальний клас складності*)
  - 2.1.1.10.2 NEXPTIME-клас складності
  - 2.1.1.10.3 2-EXPTIME-клас складності
  - 2.1.1.10.4 ELEMENTARY-клас складності
  - 2.1.1.10.5 R-клас складності
  - 2.1.1.10.6 PR-клас складності
  - 2.1.1.10.7 RE-клас складності та coRE-клас складності
  - 2.1.1.10.8 ALL-клас складності
- 2.1.1.11 Аналіз паралельних алгоритмів
  - 2.1.1.11.1 Особливості аналізу паралельних алгоритмів
  - 2.1.1.11.2 Теорема Брента. Закон Густавсона–Барсіса. Закон Амдала.
  - 2.1.1.11.3 NC-клас складності
- 2.1.2 Ємнісна (просторова) складність алгоритму (*складність по об'єму пам'яті*)
  - 2.1.2.1 Визначення просторової складності алгоритму
  - 2.1.2.2 Детермінований(DSPACE) та недетермінований(NSPACE) просторові(ємнісні) ресурси
  - 2.1.2.3 Теорема Севіча
  - 2.1.2.4 Здійсненні класи складності
    - 2.1.2.4.1 L-клас складності
    - 2.1.2.4.2 PolyL-клас складності (*полілогарифмічний*)
    - 2.1.2.4.3 SL-клас складності
    - 2.1.2.4.4 NL-клас складності
    - 2.1.2.4.5 NL-повні задачі
    - 2.1.2.4.6 Еквівалентність класів NL та coNL
    - 2.1.2.4.7 RL-клас складності
  - 2.1.2.5 Проблематичні класи складності
    - 2.1.2.5.1 PSPACE-клас складності
    - 2.1.2.5.2 PSPACE-повні задачі
  - 2.1.2.6 Нездійсненні класи складності
    - 2.1.2.6.1 EXPSPACE-клас складності (*експоненціальний клас складності по пам'яті*)
- 2.2. Структурна складність**
  - 2.2.1 Цикломатична складність
    - 2.2.1.1 Цикломатичне число
    - 2.2.1.2 Цикломатична складність графу потоку керування та графу алгоритму
  - 2.2.2 Структурна складність обчислень поданих структурною матрицею потокового графу алгоритму
  - 2.2.3  $AC^1$ -класи складності
  - 2.2.4  $ACC^0$ -клас складності

2.2.5 ТС<sup>i</sup>-класи складності

2.2.6 СС-клас складності

### **2.3 Ієрархії класів складності**

2.3.1 Теорема про ієрархії класів часової складності

2.3.2 Теорема про ієрархії класів просторової складності

2.3.3 Поліноміальна ієрархія та РН-клас складності

2.3.4 Експоненціальна ієрархія

2.3.5 Ієрархія Гжегорчика

2.3.6 Арифметична ієрархія

2.3.7 Булева ієрархія

## **Частина 1. Тема 3. Методи відображення та синтез алгоритмів**

### **3.1 Методи відображення алгоритмів**

3.1.1 Вербальне та аналітичне подання алгоритму

3.1.2 Подання алгоритму псевдокодом або з використанням формальних мов

3.1.3 Схематичне подання алгоритму

3.1.3.1 Просте графічне подання алгоритму

3.1.3.1.1 Блок-схема алгоритму

3.1.3.1.2 Граф потоку керування

3.1.3.1.3 Граф алгоритму

3.1.3.1.4 Поточковий граф алгоритму

3.1.3.2 Структурограма

3.1.3.2.1 Діаграма Нассі-Шнайдермана

3.1.3.3 Діаграми UML

3.1.3.3.1 Множина структурних та поведінкових діаграм UML

3.1.3.3.2 Подання задачі поведінковими діаграмами

3.1.3.3.2.1 Діаграма прецедентів (*діаграма варіантів використання*)

3.1.3.3.3 Подання обчислень поведінковими діаграмами

3.1.3.3.3.1 Діаграма послідовності

3.1.3.3.3.2 Діаграма комунікації

3.1.3.3.3.3 Узагальнена діаграма взаємодій

3.1.3.3.3.4 Діаграма стану

3.1.3.3.3.5 Діаграма діяльності

3.1.3.3.4 Структурні діаграми

3.1.3.3.4.1 Діаграма класів

3.1.3.3.4.2 Діаграма компонентів

3.1.3.3.4.3 Діаграма розгортання

3.1.4 Подання алгоритму структурною матрицею поточкового графу алгоритму

### **3.2 Типи та структури даних**

3.2.1 Представлення даних в пам'яті комп'ютера

3.2.2 Класифікація типів даних

3.2.3 Базові типи даних

3.2.4 Похідні типи даних

3.2.5 Перетворення типів

3.2.6 Абстрактні типи даних (АТД)

3.2.6.1 Поняття абстрактного типу даних. Контейнери та колекції

3.2.6.2 Стек

3.2.6.3 Черга. Черга з пріоритетом. Двобічна черга та двобічна черга з пріоритетом.

3.2.6.4 Список

3.2.6.5 Граф

3.2.6.6 Дерево

3.2.6.7 Множина. Мультимножина.

3.2.6.8 Асоціативний масив (словник). Мультисловник

3.2.7 Класифікація структур даних

3.2.8 Деякі важливі структури даних для реалізації АТД

3.2.8.1 Геш-таблиця

3.2.8.2 Одно- та двобічно зв'язні списки. Список з пропусками. Розгорнутий зв'язаний список.

3.2.8.3 Бінарне дерево пошуку

3.2.8.3.1 Збалансоване дерево

3.2.8.3.2 АВЛ-дерево

3.2.8.3.3 Червоно-чорне дерево

3.2.8.4 Б-дерево (*англ. B-tree*) та R-дерево

3.2.8.5 Купа

- 3.2.8.5.1. Двійкова купа
- 3.2.8.5.2. Біноміальна купа
- 3.2.8.5.3. Фібоначчєва купа

#### 3.2.8.6 Оцінювання складності операцій при реалізації АТД

### 3.3 Синтез алгоритмів

- 3.3.1 Покрокове проектування алгоритмів
- 3.3.2 Підходи при синтезі алгоритмів (*алгоритмічні стратегії*)
  - 3.3.2.1 Повний перебір
  - 3.3.2.2 Метод зменшення розміру задачі
  - 3.3.2.3 Метод декомпозиції (*«розділяй та володарюй»*)
  - 3.3.2.4 Метод перетворень
  - 3.3.2.5 Динамічне програмування
  - 3.3.2.6 Дерево розв'язків та його застосування при проектуванні алгоритмів
    - 3.3.2.6.1 Дерево розв'язків (*дерево рішень*)
    - 3.3.2.6.2 Бектрекінг (*перебір з поверненням*)
    - 3.3.2.6.3 Метод гілок і границь
    - 3.3.2.6.4 Альфа-бета відсікання
  - 3.3.2.7 Евристичні алгоритми
    - 3.3.2.7.1 Особливості евристичних алгоритмів
    - 3.3.2.7.2 Метод спроб і помилок (*trial and error*)
    - 3.3.2.7.3. Скупі (*жадібні*) алгоритми та локальний пошук
      - 3.3.2.7.3.1 Особливості скупих алгоритмів
      - 3.3.2.7.3.2 Локальний пошук
  - 3.3.2.8 Ітераційне вдосконалення алгоритму
  - 3.3.2.9 Просторово-часовий компроміс (*просторово-часове балансування*) при проектуванні алгоритмів
  - 3.3.2.10 Прогнозування складності алгоритму під час застосування відповідних стратегій

## Частина 1. Тема 4. Базові алгоритми обробки інформації

### 4.1 Алгоритми пошуку

- 4.1.1 Послідовний пошук
- 4.1.2 Послідовний пошук з бар'єром
- 4.1.3 Бінарний пошук
- 4.1.4 Порозрядний пошук
- 4.1.5 Зовнішній пошук
- 4.1.6 Застосування ґеш-таблиць для пошуку. Розв'язання колізій при ґешуванні відкритою адресацією та методом ланцюжків.

### 4.2 Алгоритми сортування даних

- 4.2.1 Сортування вибором
- 4.2.2 Сортування вставками
- 4.2.3 Сортування обміном
- 4.2.4 Сортування злиттям
- 4.2.5 Сортування Шелла
- 4.2.6 Швидке сортування
- 4.2.7 Пірамідальне сортування
- 4.2.8 Порозрядне сортування
- 4.2.9 Мережі сортування
- 4.2.10 Зовнішнє сортування

### 4.3 Алгоритми порівняння зі взірцем

- 4.3.1 Примітивний алгоритм пошуку підрядка
- 4.3.2 Алгоритм Рабіна-Карпа
- 4.3.3 Алгоритм Кнута-Морріса-Пратта
- 4.3.4 Алгоритм Бойєра-Мура
- 4.3.5 Пошук підрядків за допомогою скінчених автоматів
- 4.3.6 Наближене порівняння рядків

### 4.4 Чисельні алгоритми

(більш глибоко тему розкрито в додатковій частині курсу, яка присвячена чисельним методам(тема №10))

- 4.4.1 Матриці та дії з ними. Алгоритм Копперсміта-Вінограда та алгоритм Штрассена.
- 4.4.2 Робота з довгими числами
- 4.4.3 Многочлени та швидке перетворення Фур'є
- 4.4.4 Системи алгебраїчних рівнянь
- 4.4.5 Розв'язання систем лінійних рівнянь
- 4.4.6 Розв'язання нелінійних рівнянь
- 4.4.7 Алгоритми апроксимації і інтерполяція чисельних функцій



#### **4.5 Графи та мережеві алгоритми**

- 4.5.1 Пошук у графі.
- 4.5.2 Породження всіх каркасів графа.
- 4.5.3 Каркас мінімальної ваги. Метод Дж. Крускала. Метод Р. Пріма.
- 4.5.4 Досяжність. Визначення зв'язності. Двозв'язність.
- 4.5.5 Ейлерові цикли.
- 4.5.6 Гамільтонові цикли.
- 4.5.7 Фундаментальна множина циклів.
- 4.5.8 Алгоритм Дейкстри.
- 4.5.9 Алгоритм Флойда.
- 4.5.10 Метод генерації всіх максимальних незалежних множин графа. Задача про найменше покриття.
- 4.5.11 Задача про найменше розбиття
- 4.5.12 Розфарбування графа
- 4.5.13 Пошук мінімального розфарбування вершин графа
- 4.5.14 Потоки в мережах
- 4.5.15 Метод побудови максимального потоку в мережі
- 4.5.16 Методи наближеного рішення задачі комівояжера: алгоритм Ейлера, алгоритм Крістофідеса, застосування локальної оптимізації
- 4.5.17 Аналіз алгоритмів на графах

#### **4.6 Паралельні та розподілені алгоритми**

- 4.6.1 Методи паралельного виконання програми за допомогою спільної пам'яті або за допомогою передачі повідомлень
- 4.6.2 Організація паралельних обчислень відповідно до принципу консенсусу і на основі вибору
- 4.6.3 Методи визначення завершення паралельних обчислень
- 4.6.4 Паралельний пошук, паралельне сортування, паралельні чисельні алгоритми, паралельні алгоритми на графах

### **Частина 1. Тема 5. Бібліотеки базових алгоритмів обробки інформації для популярних мов програмування**

#### **5.1 Застосування базових алгоритмів при узагальненому програмуванні на C++ засобами STL (Standard Template Library)**

- 5.1.1 Огляд бібліотеки
- 5.1.2 Огляд базових типів бібліотеки
- 5.1.3 Засоби бібліотеки для роботи з стрічками та вводом/виводом
- 5.1.4 Контейнерні класи бібліотеки
  - 5.1.4.1 Послідовні контейнери бібліотеки
  - 5.1.4.2 Асоціативні контейнери бібліотеки
- 5.1.5 Ітератори
- 5.1.6 Функціональні об'єкти
  - 5.1.6.1 Арифметичні функціональні об'єкти
  - 5.1.6.2 Предикати
  - 5.1.6.3 Адаптери
    - 5.1.6.3.1 Заперечувачі
    - 5.1.6.3.2 Зв'язувачі
    - 5.1.6.3.3 Адаптери вказівників на функції
    - 5.1.6.3.4 Адаптери методів
- 5.1.7 Алгоритми бібліотеки
  - 5.1.7.1 Алгоритми сортування та пошуку
  - 5.1.7.2 Чисельні алгоритми
  - 5.1.7.3 Інші немодифікуючі алгоритми
  - 5.1.7.4 Інші модифікуючі алгоритми
- 5.1.8 Розподільники пам'яті для контейнерних класів бібліотеки

#### **5.2 Застосування базових алгоритмів при узагальненому програмуванні на C++ засобами Boost**

- 5.2.1 Огляд набору бібліотек Boost
- 5.2.2 Контейнери та алгоритми
- 5.2.3 Стрічкові алгоритми
- 5.2.4 Окремі засоби набору бібліотек Boost
  - 5.2.4.1 Застосування boost::any
  - 5.2.4.2 Застосування boost::assign
  - 5.2.4.3 Застосування boost::function
  - 5.2.4.4 Застосування boost::bind
  - 5.2.4.5 Застосування boost::optional
  - 5.2.4.6 Застосування boost::variant
  - 5.2.4.7 Застосування boost::lexical\_cast
  - 5.2.4.8 Застосування boost::spirit

- 5.2.4.9 Застосування boost::filesystem
- 5.2.4.10 Застосування boost::asio
- 5.2.4.11 Застосування boost::static\_assert

5.2.5. Метапрограмування за допомогою boost::mpl

### **5.3 Застосування базових алгоритмів при узагальненому програмуванні на Java засобами JCL (Java Class Library)**

- 5.3.1 Загальний огляд мови Java. Засоби для узагальненого програмування на Java.
- 5.3.2 Огляд бібліотеки
- 5.3.3 Поняття ітератора в контексті застосування бібліотеки
  - 5.3.3.1 Застарілий інтерфейс Enumeration
  - 5.3.3.2 Інтерфейс Iterator
  - 5.3.3.3 Інтерфейс Iterable
- 5.3.4 Інтерфейс Collection
- 5.3.5 Інтерфейс Set та його реалізації
  - 5.3.5.1 Інтерфейси Set, SortedSet та NavigableSet
  - 5.3.5.2 Класи HashSet, LinkedHashSet та TreeSet
- 5.3.6 Інтерфейс Queue та його реалізації
  - 5.3.6.1 Інтерфейси Queue та Deque
  - 5.3.6.2 Класи LinkedList, ArrayDeque та PriorityQueue
- 5.3.7 Інтерфейс List та його реалізації
  - 5.3.7.1 Інтерфейс List
  - 5.3.7.2 Класи Vector, Stack, ArrayList та LinkedList
  - 5.3.7.3 Інтерфейс ListIterator.
- 5.3.8 Інтерфейс Map та його реалізації
  - 5.3.8.1 Інтерфейси Map, SortedMap та NavigableMap
  - 5.3.8.2 Класи HashMap, TreeMap, LinkedHashMap, ArrayList та WeakHashMap
- 5.3.9 Алгоритми з допоміжного класу Collections
- 5.3.10 Використання бібліотеки для конкурентних обчислень
  - 5.3.10.1 Застосування ключового слова synchronized
  - 5.3.10.2 Огляд засобів пакету java.util.concurrent

### **5.4 Застосування базових алгоритмів при узагальненому програмуванні на C# засобами FCL (Framework Class Library)**

- 5.4.1 Загальний огляд мови C#. Засоби для узагальненого програмування на C#.
- 5.4.2 Огляд узагальнених та неузагальнених засобів бібліотеки
- 5.4.3 Поняття ітератора в контексті застосування бібліотеки
  - 5.4.3.1 Узагальнений та неузагальнений інтерфейси IEnumerator
  - 5.4.3.2 Узагальнений та неузагальнений інтерфейси IEnumerable
- 5.4.4 Узагальнений та неузагальнений інтерфейси ICollection
- 5.4.5 Узагальнений та неузагальнений інтерфейси IList та їх реалізації
  - 5.4.5.1 Узагальнений та неузагальнений інтерфейси IList
  - 5.4.5.2 Узагальнені класи HashSet, List та Collection
  - 5.4.5.3 Неузагальнені класи ArrayList та Array
- 5.4.6 Узагальнений та неузагальнений класи Stack
- 5.4.7 Узагальнений та неузагальнений класи Queue
- 5.4.8 Неузагальнений клас BitArray
- 5.4.9 Узагальнений та неузагальнений інтерфейси IDictionary та їх реалізації
  - 5.4.9.1 Узагальнений та неузагальнений інтерфейси IDictionary
  - 5.4.9.2 Узагальнені класи Dictionary, SortedDictionary та SortedList
  - 5.4.9.3 Неузагальнені класи ListDictionary, Hashtable та SortedList
- 5.4.10 Використання бібліотеки для конкурентних обчислень
  - 5.4.10.1 Властивості ICollection.IsSynchronized та ICollection.SyncRoot
  - 5.4.10.2. Огляд засобів простору імен System.Collections.Concurrent

### **5.5 Застосування алгоритмів лінійної алгебри при програмуванні на C++ за допомогою стандарту BLAS**

- 5.5.1 Огляд стандарту
- 5.5.2 Три рівні функціональності стандарту
- 5.5.3 Огляд бібліотек-реалізації стандарту
- 5.5.4 Бібліотека-реалізація uBLAS з набору бібліотек Boost
- 5.5.5 Застосування uBLAS для мови C++

### **5.6 Застосування алгоритмів обробки сигналів при програмуванні на C++ та Python засобами OpenCV (Open Source Computer Vision Library)**

- 5.6.1 Огляд бібліотеки. Доступність бібліотеки різним мовам програмування.
- 5.6.2 Основні модулі бібліотеки
- 5.6.3 Типове застосування бібліотеки

- 5.6.4 Застосування OpenCV для мови C++
- 5.6.5 Застосування OpenCV для мови Python

## **Частина 2. Тема 6. Моделі обчислень**

*Тут не розглядаються формальні мови та відповідні їм моделі автоматів. Формальні мови та відповідні їм моделі автоматів розглядаються в темі №1. Тут також не розглядаються великі мовні моделі (LLM). LLM (англ. large language model) розглядаються в темі №10 (додаткова частина курсу).*

### **6.1 Елементи теорії моделей**

- 6.1.1 Визначення теорії моделей
- 6.1.2 Моделі в теорії моделей
- 6.1.3 Інтерпретації формальних мов
- 6.1.4 Теорія повноти моделей (для логіки першого порядку)
- 6.1.5 Принцип перенесення моделей (для логіки першого порядку)

### **6.2 Елементи теорії обчислюваності. Алгоритмічно розв'язні та нерозв'язні проблеми.**

- 6.2.1 Визначення теорії обчислюваності
- 6.2.2 Поняття обчислюваної функції
- 6.2.3 Примітивно-рекурсивні функції
- 6.2.4 Частково-рекурсивні функції
- 6.2.5 Теза Черча-Тюрінга
- 6.2.6 Задача про прийняття рішень
- 6.2.7 Необчислюваність
  - 6.2.7.1 Теореми Геделя про неповноту
  - 6.2.7.2 Поняття необчислюваної функції (*uncomputable function*)
  - 6.2.7.3 Задача про зупинку машини Тюрінга
  - 6.2.7.4 Нерозв'язувана задача про прийняття рішень та степінь Тюрінга
- 6.2.8 Нумерації алгоритмів
  - 6.2.8.1 Нумерація Геделя
  - 6.2.8.2 Головні універсальні функції та множини
  - 6.2.8.3 Канторові нумерації кортежів натуральних чисел
  - 6.2.8.4 Нумерації Кліні та Поста
  - 6.2.8.5 Нумерація машин Тюрінга та частково-рекурсивних функцій
  - 6.2.8.6  $S_m^m$ -теорема ( $S_{mn}$ -теорема) та теорема Кліні про нерухому точку
- 6.2.9 Обчислення з оракулом
- 6.2.10 Зведення однієї задачі до іншої за поліноміальний час
  - 6.2.10.1 Зведення Карпа (*Karp reductions, many-one reductions*)
  - 6.2.10.2 Зведення Кука (*Cook reduction*)
  - 6.2.10.3 Зведення Левіна (*Levin reduction*)
  - 6.2.10.4 Зведення через таблицю істинності (*truth-table reduction*)
  - 6.2.10.5 Зведення Тюрінга (*Turing reduction*)

### **6.3 Елементи теорії категорій**

- 6.3.1 Визначення теорії категорій
- 6.3.2 Приклади категорій
- 6.3.3 Дуальна категорія
- 6.3.4 Морфізми в теорії категорій
- 6.3.5 Початковий та термінальний об'єкти в теорії категорій
- 6.3.6 Функтори в теорії категорій
- 6.3.7 Натуральне перетворення в теорії категорій
- 6.3.8 Моноїдальна категорія (*тензорна категорія*)

### **6.4 Імперативний та декларативний підходи до програмування**

### **6.5 Функційні моделі обчислень та парадигма функційного програмування. Комбінаторна логіка.**

- 6.5.1 Функційні моделі обчислень
  - 6.5.1.1 Лямбда числення
    - 6.5.1.1.1 Вступ до лямбда числення
    - 6.5.1.1.2 Підстановки та перетворення при застосуванні лямбда числення
    - 6.5.1.1.3 Розширення чистого лямбда числення
    - 6.5.1.1.4 Теорема про нерухому точку
    - 6.5.1.1.5 Редекси і нормальна форма
    - 6.5.1.1.6 Теорема Черча-Россера
    - 6.5.1.1.7 Редукція термів в лямбда численні
    - 6.5.1.1.8 Типізоване лямбда числення
      - 6.5.1.1.8.1 Поняття типу в типізованому лямбда численні
      - 6.5.1.1.8.2 Просте типізоване лямбда числення
      - 6.5.1.1.8.3 Підстановка типу та уніфікація

- 6.5.1.2 Комбінаторна логіка (як варіант лямбда числення)
- 6.5.1.3 Комбінаційна логіка (як функційна модель обчислень)
- 6.5.1.4 Абстрактна система переписувань (*Abstract rewriting system*)
- 6.5.2 Парадигма функційного програмування
- 6.5.3 Функційне програмування за допомогою сучасних мов програмування
  - 6.5.3.1 Мова функційного програмування Haskell
    - 6.5.3.1.1 Програмування на Haskell
    - 6.5.3.1.2 Базові типи в Haskell
    - 6.5.3.1.3 Системи модулів в Haskell
    - 6.5.3.1.4 Списки в Haskell
    - 6.5.3.1.5 Види поліморфізму. Параметричний та спеціальний поліморфізм в Haskell.
    - 6.5.3.1.6 Класи типів в Haskell
    - 6.5.3.1.7 Стандартні класи типів в Haskell
    - 6.5.3.1.8 Реалізації класів типів в Haskell
    - 6.5.3.1.9 Згортки в Haskell
    - 6.5.3.1.10 Моноїди в Haskell
    - 6.5.3.1.11 Клас типів Foldable
    - 6.5.3.1.12 Функтори в Haskell
    - 6.5.3.1.13 Клас типів Pointed
    - 6.5.3.1.14 Аплікативні функтори
    - 6.5.3.1.15 Клас типів Traversable
    - 6.5.3.1.16 Клас типів монад
    - 6.5.3.1.17 Монада Maybe
    - 6.5.3.1.18 Монада IO
    - 6.5.3.1.19 Монада Reader та монада Writer
    - 6.5.3.1.20 Монада State
  - 6.5.3.2. Загальний огляд засобів функційного програмування на C++
  - 6.5.3.3. Загальний огляд мов функційного програмування Erlang та Elixir
  - 6.5.3.4. Загальний огляд інших засобів функційного програмування

## **6.6 Паралельні моделі обчислень та парадигма реактивного програмування. Паралельне програмування.**

- 6.6.1 Паралельні моделі обчислень
  - 6.6.1.1 Мережа процесів Кана
  - 6.6.1.2 Мережа Петрі
  - 6.6.1.3 Мережа взаємодій
  - 6.6.1.4 Синхронний потік даних
- 6.6.2 Парадигма реактивного програмування
- 6.6.3 Функційне реактивне програмування
- 6.6.4 Реактивне програмування за допомогою бібліотеки ReactiveX
  - 6.6.4.1 Шаблон спостерігача (*Observer pattern*) та його розширення у ReactiveX
  - 6.6.4.2 Сутності для спостереження (*Observable*)
  - 6.6.4.3 Оператори бібліотеки ReactiveX
  - 6.6.4.4 Сутність Single
  - 6.6.4.5 Сутність суб'єкту (*Subject*)
  - 6.6.4.6 Планувальник (*Scheduler*) рушія бібліотеки ReactiveX
  - 6.6.4.7 Реалізації ReactiveX для популярних мов програмування
- 6.6.5 Загальний огляд реактивного програмування за допомогою фреймворку Spring WebFlux з набору фреймворків Spring
- 6.6.6 Паралельне програмування

## **6.7 Шаблони проектування програмного забезпечення**

- 6.7.1 Використання шаблонів при проектуванні програмного забезпечення
- 6.7.2 GoF-шаблони
  - 6.7.2.1 Твірні шаблони (*Creational pattern*)
  - 6.7.2.2 Структурні шаблони (*Structural pattern*)
  - 6.7.2.3 Поведінкові шаблони (*Behavioral pattern*)
- 6.7.3 GRASP-шаблони
- 6.7.4 Шаблони рівночасних обчислень (*Concurrency pattern*)
- 6.7.5 Шаблони архітектури програмного забезпечення (*Architectural pattern*)
- 6.7.6 Використані шаблони в ядрі Linux