

221 р. 4. Колмогоров А.Н. *Элементы теории функций и функционального анализа* / А.Н. Колмогоров, С.В. Фомин. – М.: Физматлит, 2004. – 572 с. 5. Heinz-Otto Peitgen et al, *Chaos and Fractals: New Frontiers of Science*, Springer, 2nd edition, 2004. – 483 с. 6. *Courbe De Hilbert 3D* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.mathcurve.com/fractals/hilbert3d/hilbert3d.shtml>. 7. *Tutorial: Hilbert Curve Coloring* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.fractalus.com/kerry/tutorials/hilbert/hilbert-tutorial.html>.

УДК 606.628/ 543.087.9/ 54.08

**А. Осядач, В. Червцова, О. Файтас, М. Лобур, В. Новіков**  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра систем автоматизованого проектування

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ВОДИ ЗА ДОПОМОГОЮ ПРИСТРОЮ LAB-ON-CHIP**

© Осядач А., Червцова В., Файтас О., Лобур М., Новіков В., 2013

**Розглянуто результати досліджень води за допомогою пристрою lab-on-chip. Встановлено закономірності між концентраціями іонів у розчинах та оптичними показниками спектрометра.**

**Ключові слова: lab-on-chip, оптичні MEMS, моніторинг води.**

**The article deals with the results of studies of water through the device lab-on-chip. It is established the relationships between the concentrations of ions in solutions and optical parameters of the spectrometer.**

**Key words: lab-on-chip, optical MEMS, water monitoring**

### **Вступ**

У житті людини вода відіграє особливу роль, задовольняючи її фізіологічні, санітарно-гігієнічні та побутові потреби. Вода, яку ми споживаємо, повинна бути чистою. В останні десятиріччя якість питної води суттєво погіршилась. Значна концентрація міського населення, різке збільшення промислових, транспортних, сільськогосподарських, енергетичних та інших антропогенних чинників призвели до порушення якості води, появи в джерелах водопостачання невластивих природному середовищу хімічних та радіоактивних агентів. У зв'язку з цим проблема забезпечення населення доброякісною питною водою є актуальною та її вирішенням стає необхідність моніторингу її якості [1].

З розвитком новітніх технологій, зокрема МЕМС (мікроелектромеханічних систем) вирішення цього питання стає доступнішим, швидшим та точнішим порівняно із традиційними методами аналізу води.

Лабораторія на чипі (lab-on-chip) – це мікроелектромеханічний пристрій, який об'єднує одну або кілька функцій лабораторного аналізу на одному чипі розміром до декількох квадратних сантиметрів. Лаб-чипи мають справу з обробкою дуже малих об'ємів рідини. За допомогою пристрою lab-on-chip можна досягти поставленої нами мети, а саме моніторингу якості питної води [2, 3].

Традиційні методи якісного та кількісного хімічного аналізу дорогі та потребують великих затрат часу та ручної роботи. Лаб-чипи, своєю чергою, дають змогу значно скоротити час вимірювань, при цьому затрати ручної роботи мінімальні.

До основних переваг лаб-чипів належать:

– швидкість аналізу (до декількох секунд);

- невеликий об'єм рідини, взятої для аналізу (достатньо 10–20 мікролітрів);
- точність та відтворюваність досліду (в зв'язку з тим, що робота лаб-чипів скоординована з електронними пристроями, наприклад, з комп'ютером, це дає змогу точно відтворити одержані результати);
- компактність системи вимірювань (система вимірювань складається з лаб-чипа, джерела світла, спектрометра та комп'ютера, тому займає небагато місця і може бути портативною);
- високий рівень безпеки (під час роботи зі шкідливими чи навіть токсичними речовинами внаслідок використання мікродоз ризик контакту з ними стає мінімальним).

### Будова лаб-чипа

У роботі використовувались лаб-чипи, які люб'язно надав професор Ян Дзюбан з Лабораторії мікроінженерії та фотовольтаїки (Вроцлавська політехніка, Польща). Ці лаб-чипи створені за допомогою анодного бондингу, тобто тривалого хімічного з'єднання двох плиток (кремнієвої та скляної) внаслідок дії електричного поля з високою напругою та підвищеною температури.

Всередині, між плитками, міститься мікроканал завдовжки 2, 5 або 10 мм, залежно від чипа (рис. 1). Між плитками, з двох боків, прикріплені світловоди. У один із світловодів надходить світло, проходить через освітлену ділянку мікроканалу та потрапляє другим світловодом у спектрометр.

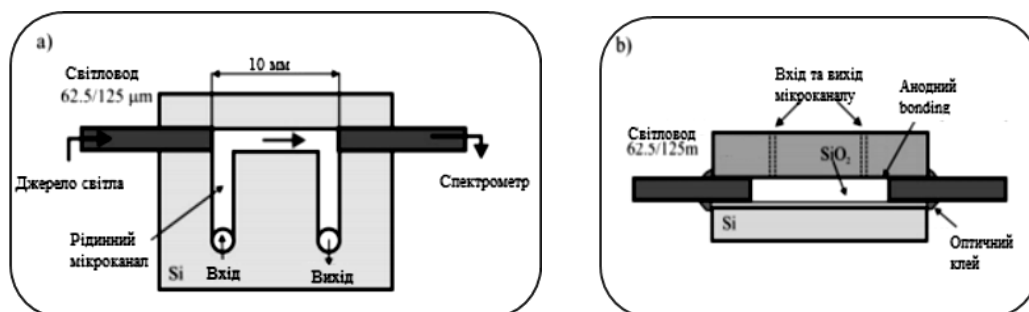


Рис. 1. Будова lab-on-a-chip: a – вид зверху; b – розріз

### Прилади та реактиви

Основними елементами системи вимірювань були лаб-чипи, галогенова лампа як джерело світла, спектрометр (AvaSpec-2048 (UV/VIS/NIR) та комп'ютер з програмним забезпеченням, що надав проф. Ян Дзюбан з Вроцлавської політехніки та допрацювали на кафедрі систем автоматизованого проектування Національного університету “Львівської політехніки”.

Для дослідження вмісту різних йонів, які впливають на органолептичні властивості питної води, використано такі солі:  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{KMnO}_4$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{ZnSO}_4$ . Основні розчини солей готували за стандартними методиками та за ГОСТом 2874-82 [4]. Робочі розчини готувались розведенням основних розчинів до відповідних концентрацій йонів досліджуваних елементів. Використовували реактиви кваліфікації „х. ч.” або „ч. д. а.” та бідистильовану воду, яка слугувала також і контролем.

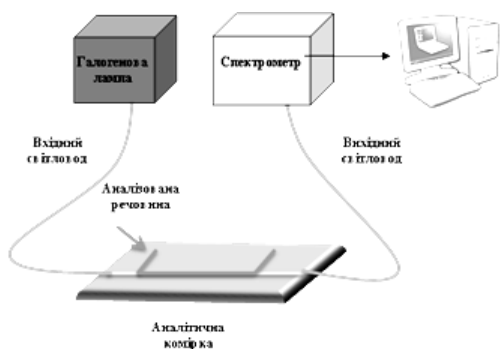


Рис. 2. Установа для вимірювань

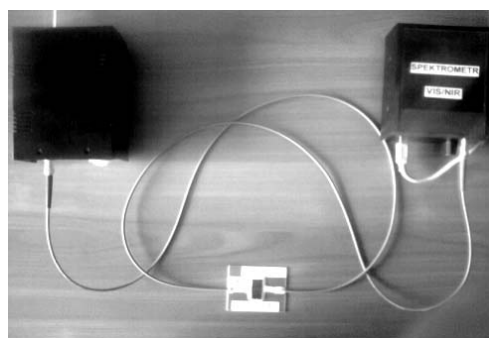


Рис. 3. Система вимірювань

## Результати

Для вимірювань використовували чипи з різною довжиною каналів: 2 (№ 1), 5 (№ 2) та 10 мм (№ 3). З'ясовано, що найточніші для інтерпретації показники отримано на чипі № 1, а найменш точні – на чипі № 3. Досліди виконувались при часі інтеграції 100 мс та 500 мс.

В результаті проведених досліджень ми встановили певну закономірність між концентраціями елементів у розчині та оптичними показниками спектрометра для йонів  $Mn^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Cl^-$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$  та  $SO_4^{2-}$ .

З'ясовано, що у разі застосування чипа № 2 спостерігається зворотно пропорційна залежність між концентраціями досліджуваних йонів ( $Mn^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Cl^-$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$  та  $SO_4^{2-}$ ). Зі зниженням їх концентрації висота та інтенсивність піка збільшуються (рис. 6, 8, 9, 10, 11).

У випадку застосування чипа № 1 спостерігається зворотний результат, зі зниженням концентрації йонів знижується висота та інтенсивність піка на спектрі (рис. 4, 5, 7). Отже, існує пряма пропорційність.

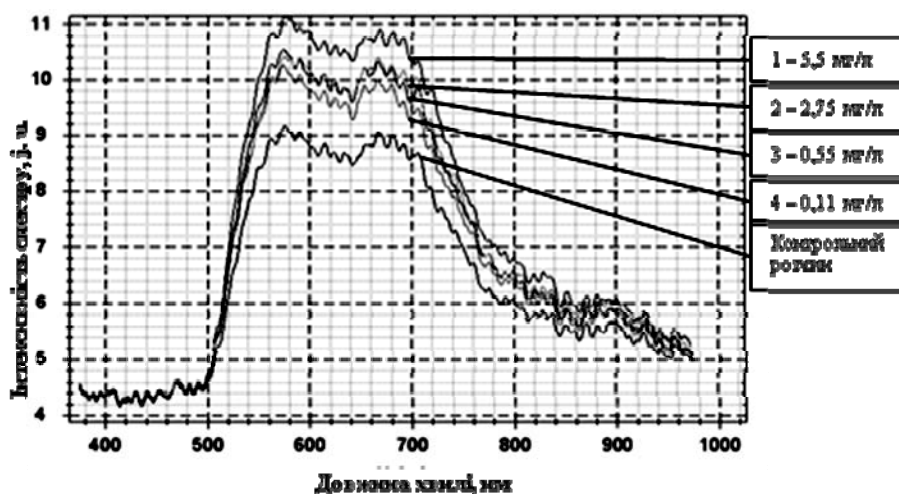


Рис. 4. Графік залежності інтенсивності спектра від його довжини для йонів  $Mn^{2+}$  на чипі № 1 (при 500 мс)

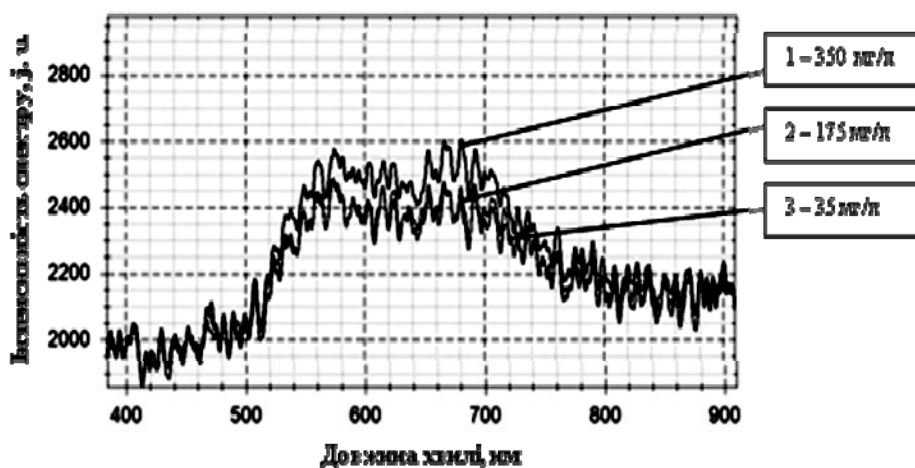


Рис. 5. Графік залежності інтенсивності спектра від його довжини для йонів  $Cl^-$  на чипі № 2 (при 500 мс)

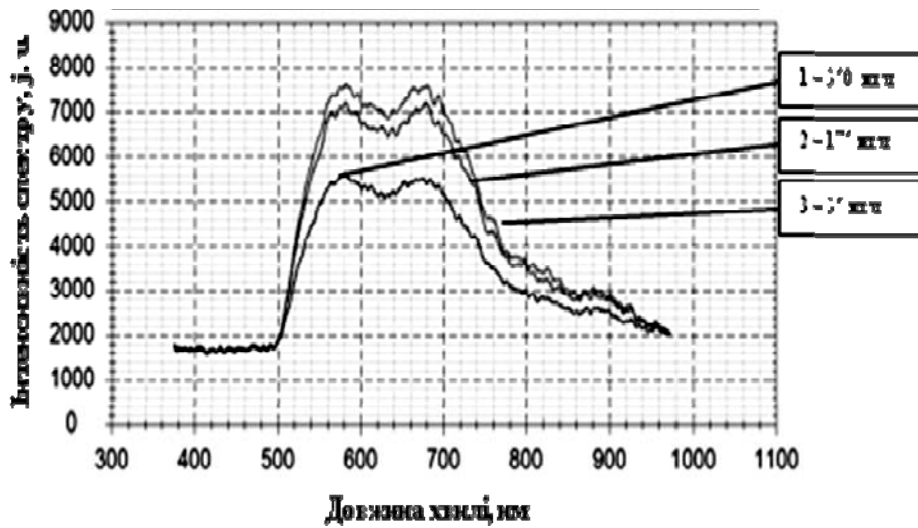


Рис. 6. Графік залежності інтенсивності спектра від його довжини для йонів  $Si$  на чипі № 2 (при 500 мс)

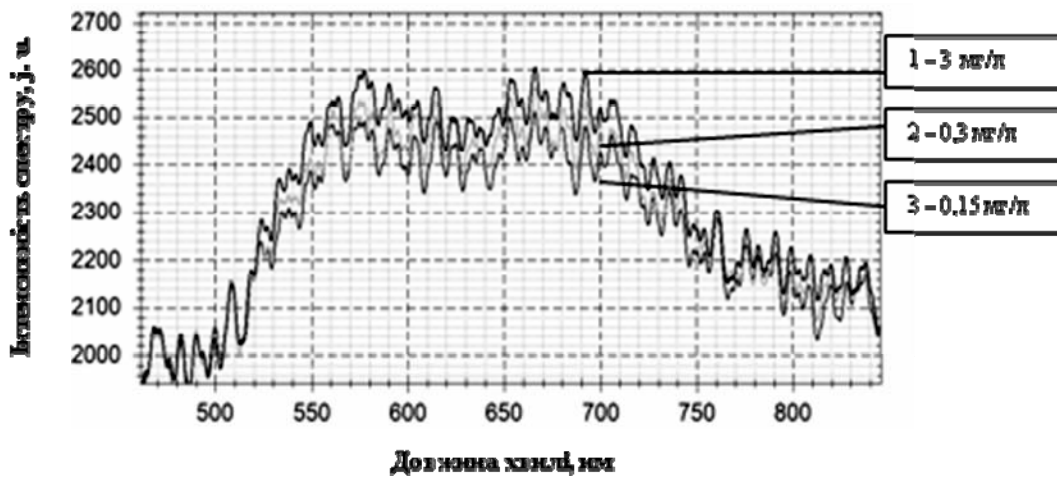


Рис. 7. Графік залежності інтенсивності спектра від його довжини для йонів  $Fe^{2+}$  на чипі № 1 (при 500 мс)

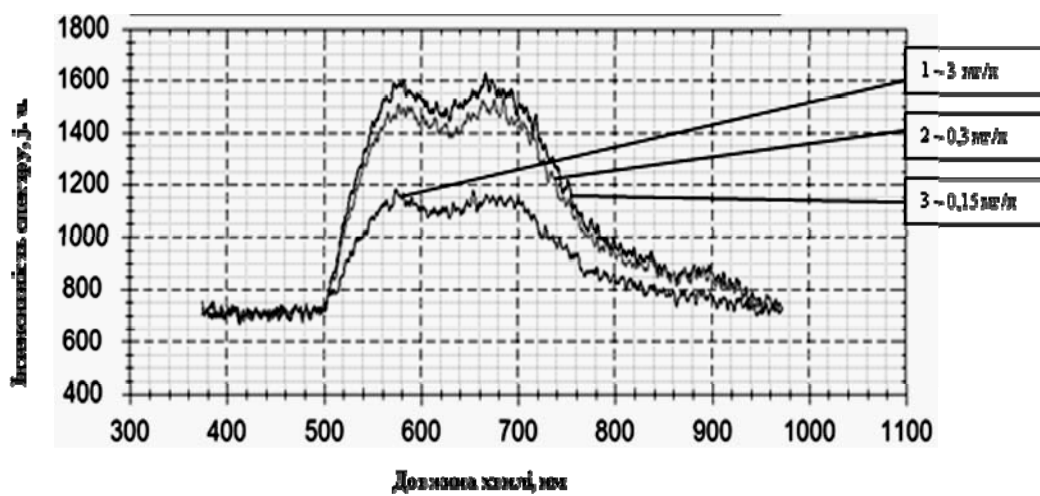


Рис. 8. Графік залежності інтенсивності спектра від його довжини для йонів  $Fe^{2+}$  на чипі № 2 (при 100 мс)

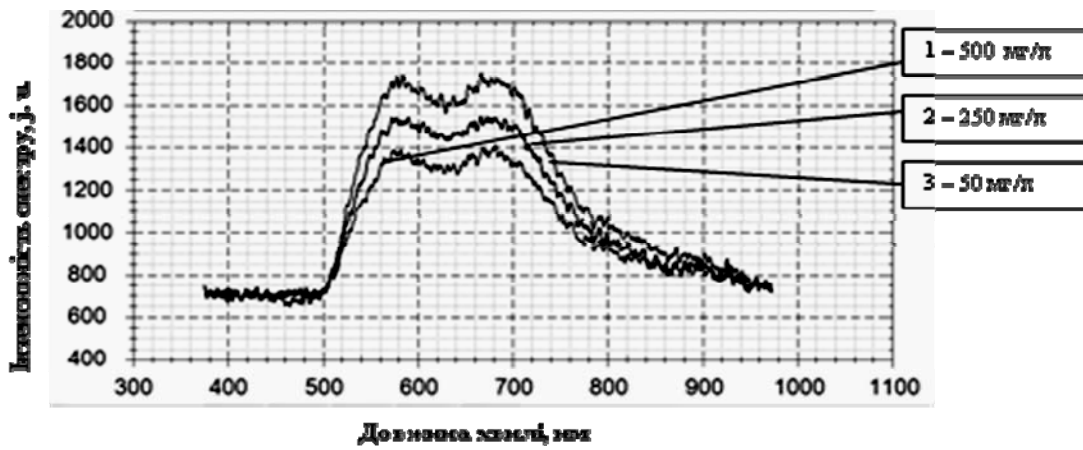


Рис. 9. Графік залежності інтенсивності спектра від його довжини для іонів  $\text{SO}_4^{2-}$  на чипі № 2 (при 100 мс)

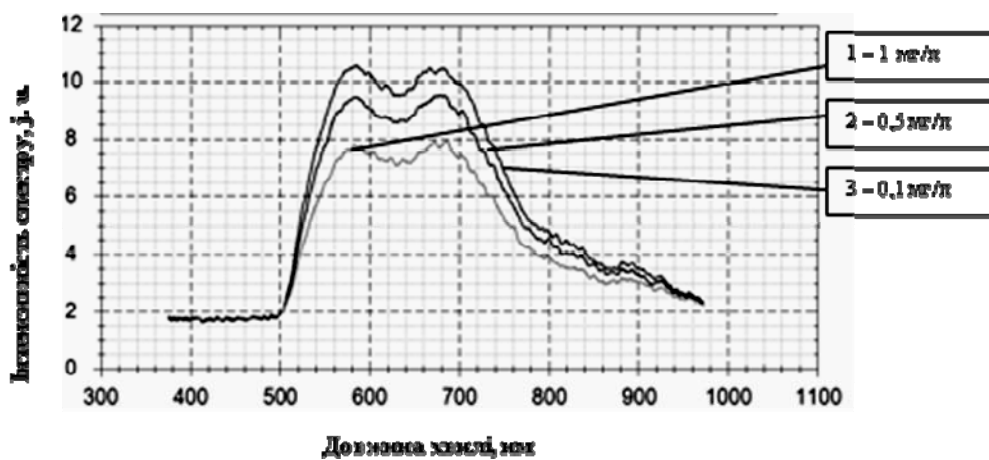


Рис. 10. Графік залежності інтенсивності спектра від його довжини для іонів  $\text{Cu}^{2+}$  на чипі № 2 (при 500 мс)

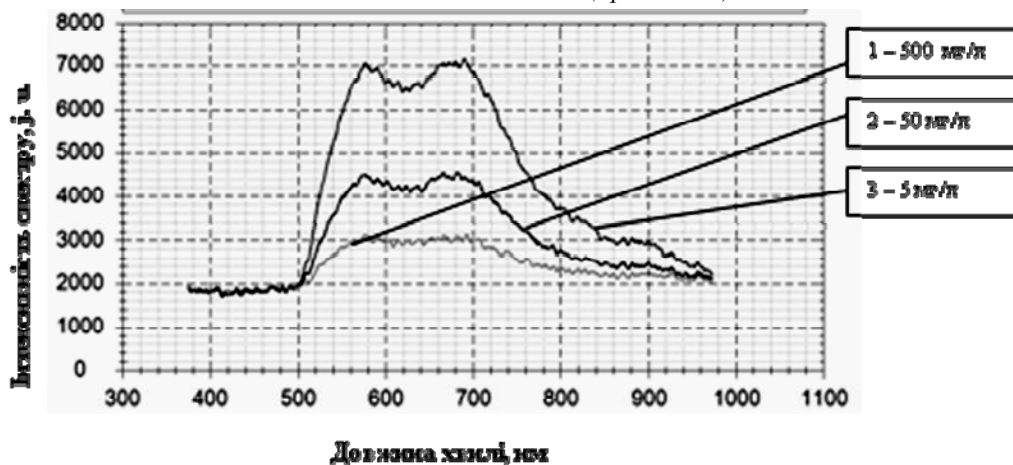


Рис. 11. Графік залежності інтенсивності спектра від його довжини для іонів  $\text{Zn}^{2+}$  на чипі № 2 (при 500 мс)

### Висновки

Після проведеного експерименту можна стверджувати, що такі лаб-чипи дають можливість контролювати якість води за вмістом іонів  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  та  $\text{SO}_4^{2-}$ . Використання лаб-чипів для рідинного аналізу є швидшим та зручнішим порівняно з традиційними методами. На цьому етапі досліджень ми з'ясували, що використання лаб-чипів перспективне для моніторингу стану якості питної води.

1. Am Jang, Zhiwei Zou, Lang Kug Lee, Chong H. Ahn, Paul L. Bishop State-of-the-art lab chip sensors for environmental water monitoring // *Meas. Sci. Technol.* – 2011. – № 22. – С. 1–16. 2. Лобур М., Матвійків О., Файмас О., *Методи спектроскопії та обробка даних спектрального аналізу* // *Вісник Національного університету “Львівська політехніка” “Комп’ютерні системи проектування. Теорія і практика”*. – 2011. – № 711. – С. 3–9. 3. S. Bargiel, A. Górecka-Drzazga, J. A. Dziuban, P. Prokaryn, M. Chudy, A. Dybko, Z. Brzózka, *Nanoliter detectors for flow systems* // *Sens. Actuators.* – 2004. – № 115. – С. 245–251 4. ГОСТ 2874-82 “Вода питъевая – Гигиенические требования и контроль за качеством”.

УДК 519.16

Р. Базилевич, Б. Кузь

Національний університет “Львівська політехніка”  
кафедра програмного забезпечення

## ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗВ’ЯЗКУ ЗАДАЧІ КОМІВОЯЖЕРА МЕТОДОМ ПАРНИХ ЗАМІЩЕНЬ

© Базилевич Р., Кузь Б., 2013

**Досліджено алгоритм для оптимізації розв’язання задачі комівояжера. Зменшення довжини шляху забезпечується обміном ребер, які відповідають умові оптимізації.**

**Ключові слова:** задача комівояжера, комбінаторна оптимізація, NP-важкі задачі.

**The algorithm for TSP solution optimization is investigated. Tour minimization is performed by swapping of edges, which satisfy optimization criteria.**

**Key words:** traveling salesman problem, combinatorial optimization, NP-hard problems.

### Вступ

Пошук розв’язку задачі комівояжера вимагає значних обчислювальних затрат. Час, необхідний для якісного розв’язування задачі, стрімко зростає зі збільшенням її розмірності. Обчислювальна складність симетричної задачі становить  $O((n - 1)! / 2)$ . За допомогою жадібних та простих евристичних алгоритмів можна швидко знайти розв’язок невисокої якості навіть для задач великої розмірності. Для покращення розв’язку в таких випадках доцільно застосувати оптимізаційні алгоритми, які дають змогу зменшити довжину шляху з невеликими обчислювальними затратами. Покращення здійснюється заміною частин наявного шляху на коротші. До відомих алгоритмів розв’язування задачі комівояжера належать 2-opt та 3-opt. Оптимізація відбувається вилученням двох або більше ребер шляху та додаванням нових ребер так, щоб його довжина зменшилась. Доцільне послідовне застосування декількох оптимізаційних алгоритмів. Деякі з таких алгоритмів описано в [1].

### Опис алгоритму

Для проведення оптимізації необхідна наявність деякого початкового розв’язку задачі. Такий розв’язок можна отримати одним з відомих алгоритмів, який не потребує великих затрат часу, зокрема жадібними. Початковим етапом дослідженого алгоритму є пошук потенційних для обміну множин з двох пар ребер шляху, які можна замінити коротшими. В запропонованому підході для ідентифікації таких пар використовується триангуляція Делоне [3]. Це дає змогу зменшити пошук пар ребер, доцільних для заміни. Для побудови триангуляції Делоне на заданій множині точок використовується одна з ефективних реалізацій алгоритму.