

УДК 62.50:658.21

Т. М. Боровська, к. т. н., доц.; А. С. Васюра, к. т. н., проф.; І. С. Колесник

АДАПТИВНА СИСТЕМА ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО РОЗПОДІЛУ НАВАНТАЖЕННЯ МІЖ ХІМІЧНИМИ РЕАКТОРАМИ

Варіаційна задача оптимального розвитку технічної системи з адитивними критерієм і обмеженнями за рахунок використання принципу оптимальності і методу оптимального агрегування зведена до послідовності одновимірних задач оптимізації, що дозволило використати «безвідмовний» метод оптимізації на базі прямого перебору. Розроблено програмну систему, що є працездатною для довільних функцій розвитку – неопуклих, негладких. Розглянуті приклади.

Постановка проблеми

Одним із резервів підвищення ефективності різноманітних виробничих систем з паралельно працюючими елементами є не тільки високі технології, але й «висока» математика і теорія управління. Можливості сучасних мікроконтролерів звичайно використовуються на 5–10 %: як правило реалізуються ПІД-регулятори, іноді замасковані нейронечіткими мережами. Розв'язання оптимізаційних задач оптимального управління розподілом навантаження незручні для практичної реалізації. Однак, використання оптимального управління розподілом навантаження дає 1–5 % приросту ефективності, що в хімічній промисловості, енергетиці, металургії є вирішальним фактором виживання в глобалізованій економіці

Мета розробки – створити програмний комплекс для дослідження і випробування адаптивних систем управління для типових класів виробничих систем з паралельно працюючими елементами.

Постановка задачі

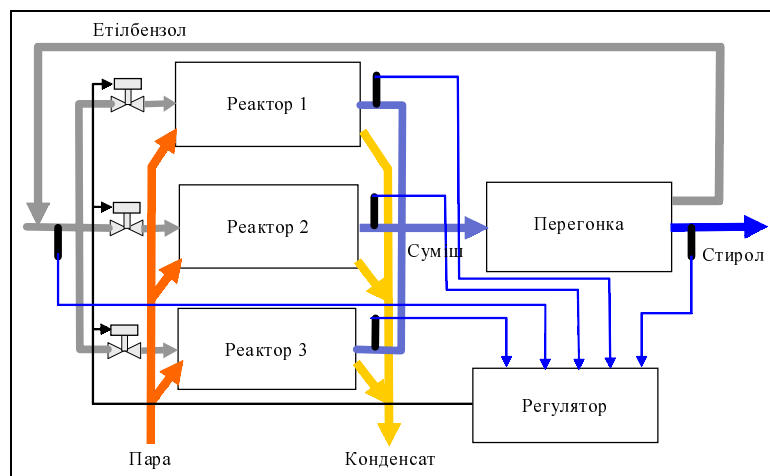


Рис. 1. Схема системи виробництва стиролу

Як робочий приклад розглядаємо систему виробництва стиролу (рис. 1), яке є неперервним, багатотоннажним при досить вичерпаних резервах зменшення витрат. В такій системі неперервно працюють разом декілька реакторів, характеристики яких – узагальнені виробничі функції (ВФ) є різними і нестационарними. Можливі відключення окремих реакторів від системи, і підключення. Сумарне виробництво стиролу повинно дорівнювати заданому. Ціль оптимізації – розподіл потрібного обсягу виробництва між реакторами, що дає мінімум сумарних витрат.

Шляхи вирішення проблеми

Розділяємо задачу управління на управління при малих навантаженнях і управління при номінальних навантаженнях.

ВФ реакторів є невицуклими, тому оптимальне управління при малих навантаженнях є розривним (включення і відключення окремих елементів) Регулятор для малих навантажень будуємо на базі обчислення **оптимальної виробничої функції системи** і відповідної

вектор-функції оптимального розподілу навантаження. Метод оптимального агрегування дозволяє оперативно обчислювати оптимальний розподіл навантаження для систем досить високої розмірності [5].

Управління при номінальних навантаженнях, в свою чергу, розділяємо між **регулятором рівня** і **регулятором оптимального розподілу**. Дія регулятора базується на властивості точки екстремуму задачі нелінійного програмування: похідні від ВФ окремих реакторів дорівнюють множнику Лагранжа. Пряме використання методу множників Лагранжа для реальної задачі не ефективно через невизначеність ВФ реакторів. Тому, регулятор рівня розподіляє потрібні прирощення навантаження між реакторами порівно, а оптимальний регулятор перерозподіляє навантаження на основі спостереження виходів реакторів. Повний цикл роботи системи регулювання складає два такти квантування.

Розглянемо задачу оптимального управління на прикладі системи з трьох реакторів (рис. 2). Отримані результати неважко застосувати для виробничої системи більшої розмірності.

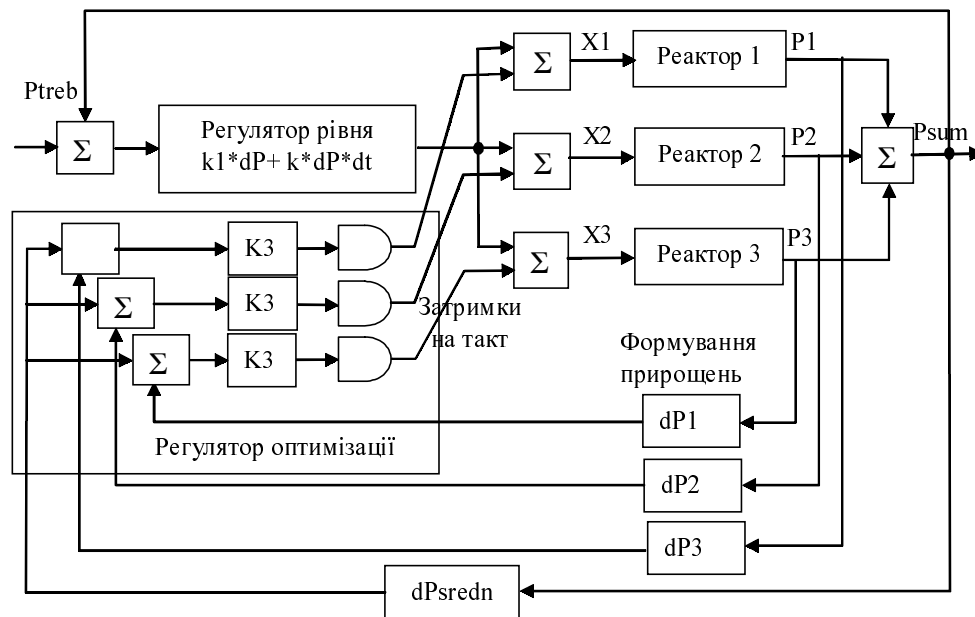


Рис. 2. Схема системи управління реакторами

Результати цього прикладу розробки оптимальної системи управління можуть мати декілька застосувань: а) алгоритм оптимального управління розподіленою системою, б) програмна система для моделювання і дослідження розподіленої системи, в) інтерактивний алгоритм знаходження оптимального розподілу ресурсів у розподіленій системі.

Мета першого етапу досліджень – пошук та випробування працездатних алгоритмів оптимізації розподілу ресурсів у виробничих системах. Відбираємо алгоритми, що є працездатними в умовах невизначеностей і збурень, що мають місце в реальних системах. Серед підмножини цих алгоритмів ми відбираємо такі, що мають властивість «плавної деградації». Останній термін означає, що зі збільшенням рівня зовнішніх і внутрішніх збурень ефективність системи зменшується пропорційно, а не повністю. До внутрішніх збурень відносимо відключення реакторів – аварійні або планові, для ремонту і профілактики.

Мета другого етапу – побудова мережі з паралельно діючих за певними правилами регуляторів, кожний з яких є спеціалізованим на певну підмножину станів зовнішнього середовища і системи. За бажанням можна назвати таку систему регуляторів «штучною нейронною мережею», «мурашиним алгоритмом», «штучною соціальною мережею», однак це не позбавляє від необхідності ретельних досліджень і пошуку чисто винахідницьких рішень. Розглядаємо реалізацію на рівні моделювання системи з двох регуляторів, очевидною перевагою якої є використання для обчислення поточного управління тільки результати поточних вимірювань. Виробничі функції реакторів змінюються через старіння і поступове «отруєння» каталізатора.

Постановка та альтернативи розв'язання оптимізаційної задачі

Необхідно розробити оптимальну за витратами систему розподілу завантаження по окремих реакторах з урахуванням обмеження на сумарну продуктивність. Розділимо загальну задачу оптимізації на субоптимізацію роботи окремого реактора і оптимізацію системи в цілому. Будемо вважати, що локальна система оптимального управління реактором для кожного заданого темпу виробництва встановлює оптимальні параметри температури, концентрації та ін. На основі такого припущення ми можемо побудувати оптимальні виробничі функції (ВФ) реактора. Фактично існують дві концепції виробничої функції — технологічна і системна. В технологічному аспекті ВФ — це залежність виходу стиролу (продукту) від подачі етилбензолу (ресурсу). Системний підхід вимагає розширити межі системи, враховувати всі витрати і результати роботи системи. Повні експлуатаційні витрати включають не тільки витрати етилбензолу, але й витрати на подачу етилбензолу і пари, на підігрів пари, витрати обумовлені «отруєнням» каталізатора та ін.

Субоптимізована математична модель реактора для аспекту «залежність виходу стиролу від рівня подачі етилбензолу» в першому наближенні має вигляд [2]

$$P_i(bl, x) := bl \cdot x^{0,5}. \quad (1)$$

Записуємо оптимізаційну задачу: цільова функція — сумарні виробничі витрати

$$C_{sum} = F(P_1, P_2, P_3) = C_1(P_1) + C_2(P_2) + C_3(P_3); \quad (2)$$

обмеження — сумарне виробництво $P_1 + P_2 + P_3 = P_{potr}$;

мета оптимізації — мінімум C_{sum} . Змінні управління — P_1, P_2, P_3 .

Можна розв'язувати цю задачу методом невизначених множників Лагранжа. Записуємо функцію Лагранжа: $L(P_1, P_2, P_3, \lambda) = F(P_1, P_2, P_3) + G(P_1, P_2, P_3)\lambda$;

записуємо необхідні умови екстремуму цієї функції

$$\frac{d}{dP_1} L(P_1, P_2, P_3, \lambda) = 0; \quad \frac{d}{dP_2} L(P_1, P_2, P_3, \lambda) = 0; \quad \frac{d}{dP_3} L(P_1, P_2, P_3, \lambda) = 0. \quad (3)$$

Розв'язання системи нелінійних алгебраїчних рівнянь (3) числовими методами дає оптимальний розподіл навантаження. Однак, необхідна висока точність ідентифікації параметрів виробничих функцій, що потребує великих інтервалів спостереження. Але реактори є нестационарними і нелінійними об'єктами.

Для побудови оптимальної системи розподілу навантаження використовуємо властивість екстремальної точки (3): при однакових управліннях прирощення виходу стиролу для кожного реактора будуть однаковими.

Регулятор рівня на базі помилки рівня формує однаковий для всіх реакторів сигнал управління — так забезпечується підтримка заданого рівня P_{potr} . Для виконання цієї задачі достатньо ПІД регулятора.

Виконання другої задачі — оптимального розподілу навантаження, ускладнено проблемами оперативного вимірювання системних виробничих функцій елементів. Замість цього використовуємо **індикатор** — величину, що пов'язана з потрібною величиною монотонною залежністю. Такою величиною може бути залежність dP_i/dX_i — прирощення виходу стиролу на одиницю прирощення подачі етилбензолу. Словесна модель регулятора оптимізації розподілу навантаження така (див. рис. 2): регулятор рівня подає однакові управління в усі реактори, вимірюються «відгуки» dP_i кожного з реакторів на це управління, формуються відхилення від середнього і з затримкою на такт на реактори подаються «вирівнюючі» управління — збільшується навантаження реакторів, у яких dP_i вище середнього, зменшується для реакторів з меншою ефективністю.

Нові програмно-технічні засоби змінюють не тільки технологію і зміст науково-дослідницької роботи, але й канони оформлення наукових робіт. На рис. 3 подано текст програми моделювання, яка одночасно є блок-схемою (текст структурований), алгоритмом (все записано за допомогою загально зрозумілих операторів програмування) та інтерфейсом (в електронній версії цього документа текст програми можна безпосередньо змінювати і бачити наслідки цих змін).

```

for k ∈ 1 .. N
    q ← 2 · k - 1
    Psum ← Pi(b1, X1, q) + Pi(b2, X2, q) + Pi(b3, X3, q)
    dPp ← dPsum
    dPsum ← Ppo - Psum - "помилка рівня"
    Dp ← dPsum - dPp - "зміна помилки"
    Ip ← Ip + dPsum - "накопичена помилка"
    dXogr ← kq1 · dPsum + kq2 · Ip + kq4 · Dp - "управління рівнем"
    X⟨q+1⟩ ← (X⟨q⟩ + dXogr) - "подача етилбензолу"
    P⟨q+1⟩ ← P⟨q⟩ + (Pi(b, X⟨q+1⟩) - P⟨q⟩) · (T ÷ Tr) - "динаміка"
    dP ← P⟨q+1⟩ - P⟨q⟩ - "прирощення виходів реакторів"
    dPm ← mean(dP) - "середнє прирощення"
    dXopt ← kq3 ÷ dPm - "управління уптимізації"
    X⟨q+2⟩ ← X⟨q+1⟩ + dXopt · (dP2 - dPm) - "подача етилбензолу"
    P⟨q+2⟩ ← P⟨q+1⟩ + (Pi(b, X⟨q+2⟩) - P⟨q+1⟩) · (T ÷ Tr) - "динаміка"
    
```

Рис. 3. Програма моделювання процесу оптимального розподілу навантаження (фрагмент)

В програмі використовується векторизація обчислень — стрілки над виразами означають «виконати дану операцію над усіма елементами масиву (вектора чи матриці)». Це не є просто економною формою запису циклів «по всіх рядках, по усіх стовпцях», це інструкція для мікропроцесора. В нашому випадку три компоненти відповідного вектора можуть бути оброблені паралельно в трьох конвеєрах мікропроцесора.

На рис. 3. показано головну частину однієї з версій програми моделювання та оптимізації. Послідовність операцій в програмі відповідає послідовності роботи реальної системи.

На кожному циклі управління визначається помилка рівня видачі стиролу та аналоги (оцінки) похідної та інтегралу від помилки. На основі цих даних визначається поточне управління рівнем.

Визначається вектор прирощень виходів реакторів і формується вектор управлінь оптимізації розподілу за логікою «у гірших зняти навантаження і додати кращим»

Результати моделювання

Розроблено декілька версій програм моделювання та оптимізації. В комплект до цих програм розроблено сервісні модулі та інтерфейси, орієнтовані на задачі досліджень. На рис. 4, показано «стенд» — екранну сторінку, де зібрані в числовому і графічному вигляді входи і виходи задачі. Розглядається перехідний процес, в якому одночасно встановлюється заданий рівень видачі стиролу та оптимальний розподіл навантаження між реакторами. Поряд подано виробничі функції окремих реакторів. Специфічний характер процесів — дискретні коливання, обумовлений логікою взаємодії двох регуляторів.

Кількість кроків моделювання $N = 25$, ранжована змінна $q := 1.. N/2$
 продуктивність реакторів, параметри закону управління, початковий і усталений розподіл

$$b = \begin{pmatrix} 9 \\ 6 \\ 5 \end{pmatrix}; \quad kk = \begin{pmatrix} 0.3 \\ 0.01 \\ 1 \end{pmatrix}; \quad PP(kk)^{\langle 1 \rangle} = \begin{pmatrix} 20 \\ 19 \\ 25 \end{pmatrix}; \quad PP(kk)^{\langle 2..N \rangle} = \begin{pmatrix} 26 \\ 13 \\ 13 \end{pmatrix}$$

Темп сумарного виробництва:
 стартовий $3 \cdot \text{mean}(PP(kk)^{\langle 1 \rangle}) = 64$ заданий $P_{\text{potribne}} = 52$; ; усталений $3 \cdot \text{mean}(PP(kk)^{\langle 2..N \rangle}) = 52$
 Дані для графіків $BY := PP(kk)$; $Sumv_q := BY_{3,q} + BY_{2,q} + BY_{1,q}$

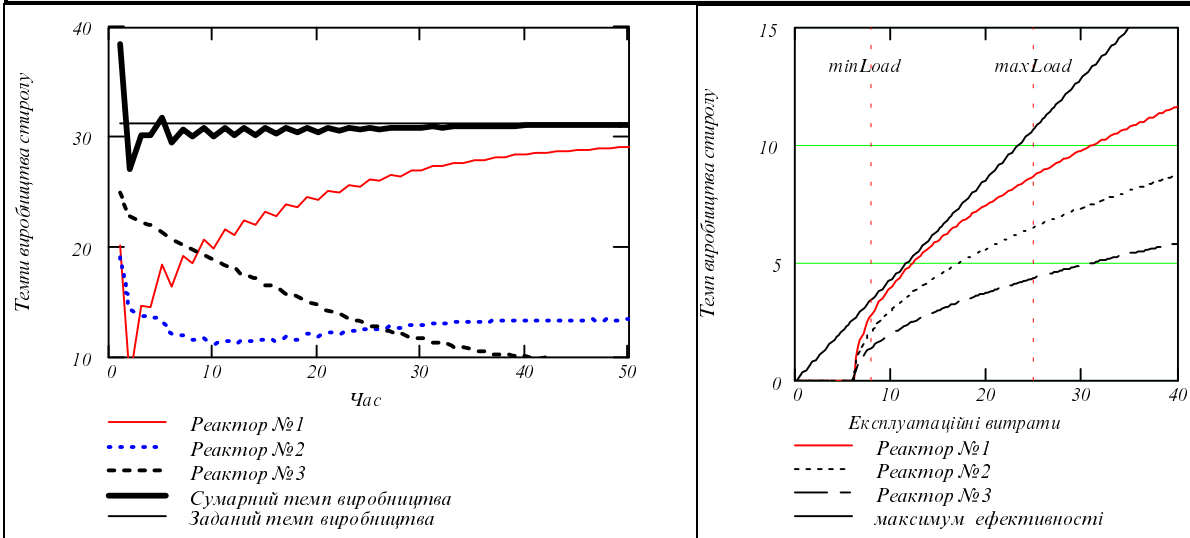


Рис. 4. Результати моделювання оптимальної системи управління (Стенд)

За рахунок вибору параметрів регулятора можна усунути ці коливання і отримати задовільні перехідні процеси. Можливо ввести надбудову — систему самонастроювання регуляторів. Однак на даному етапі така задача не ставилась.

Єдиний недолік системи (і алгоритму оптимізації) — в усталених станах навантаження системи і реакторів не змінюється і тому немає інформації для перерозподілу навантажень. Цей звичайний для адаптивних систем недолік усувається введенням тестових імпульсів — зміни подачі етилбензолу в реактори.

Проведено дослідження стійкості оптимальної системи управління в просторі параметрів регуляторів. На рис. 5 показано приклади перехідних процесів для різних наборів параметрів регуляторів.

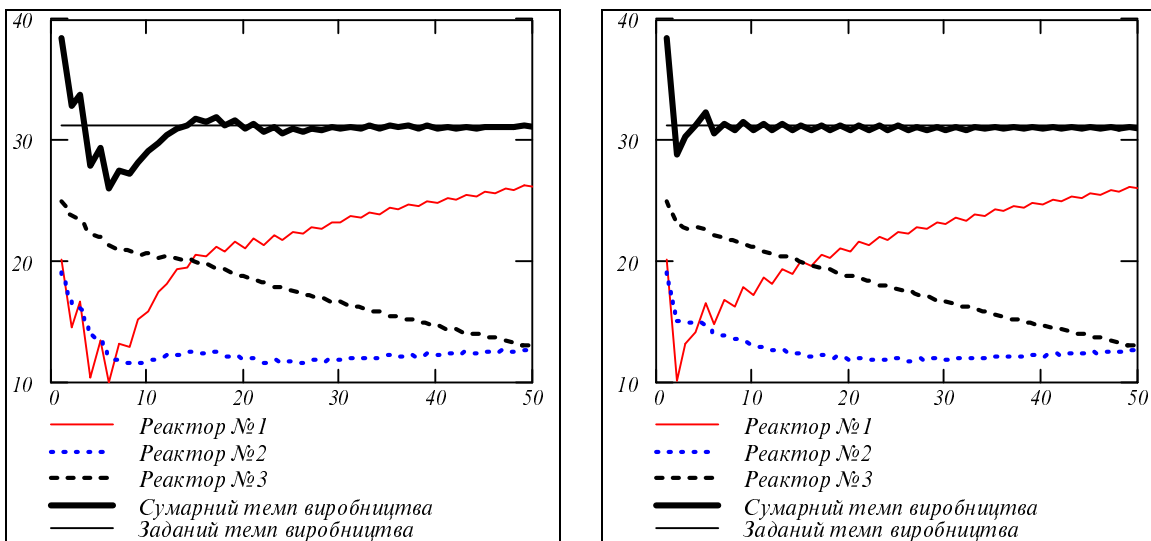


Рис. 5. Перехідні процеси. Вплив зміни параметрів регуляторів

На останньому графіку (рис. 6) показано динаміку перерозподілу навантаження в прирощеннях. Тут ми можемо бачити наочно результати роботи двох регуляторів – сумарної видачі стиролу і оптимального розподілу навантаження. Поряд подаються графіки характеристик реакторів – узагальнені виробничі функції.

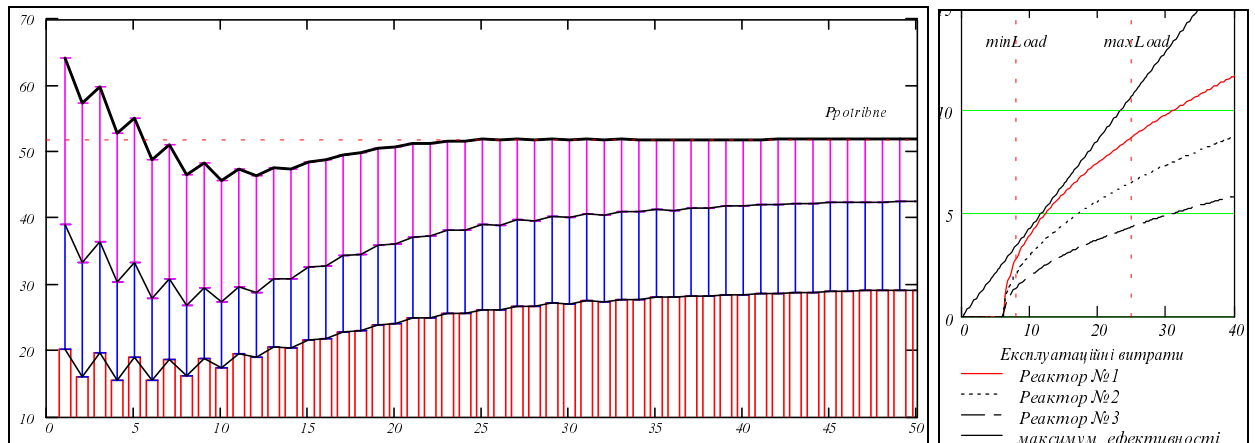


Рис. 6. Перехідні процеси. Вплив зміни параметрів регуляторів

Висновки

Розроблено базову програму моделювання та оптимізації, що дозволяє вести широке коло досліджень і легко створювати нові модифікації моделей об'єктів управління і регуляторів. Показано продуктивність підходу створення систем управління на базі спеціалізованих для певних задач регуляторів, що працюють паралельно. Програма моделювання дозволяє вести ефективні випробування моделей адаптивних систем управління для виявлення і усунення потенційних дефектів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Беллман Р. Процессы регулирования с адаптацией. — М.: Наука, 1964. — 317 с.
2. Ли Т. Г., Адамс Г. Э., Гейнз У. М. Управление процессами с помощью вычислительных машин. Моделирование и оптимизация: Пер. с англ. — М.: Советское радио, 1972. — 312 с.
3. Берзин Е. А. Оптимальное распределение ресурсов и элементы синтеза систем. — М.: Сов. радио, 1974. — 304 с.
4. Цыпкин Я. З. Адаптация и обучение в автоматических системах. — М.: Наука, 1968 — 400 с.
5. Боровська Т. М., Колесник І. С., Северілов В. А. Оптимізація розподілу обмеженого ресурсу у виробничій системі на базі агрегування виробничих функцій // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. — 2005. — № 1. — С. 12—18.

Матеріали статті рекомендовані до опублікування оргкомітетом VIII Міжнародної конференції «Контроль і управління в складних системах» (КУСС-2005, 24—27.10.2005 р)

Надійшла до редакції 10.11.05
Рекомендована до друку 22.11.05

Боровська Таїса Миколаївна — доцент кафедри комп'ютерних систем управління; **Васюра Анатолій Степанович** — професор кафедри автоматичної та інформаційно-вимірювальної техніки; **Колесник Ірина Сергіївна** — здобувач кафедри комп'ютерних систем управління.

Вінницький національний технічний університет