

УДК 62.50:658.21

І. С. Колесник;

С. Л. Хміль

## ОПТИМАЛЬНЕ УПРАВЛІННЯ СИСТЕМОЮ КОТЛОАГРЕГАТІВ

*Розглянута задача оптимального розподілу навантаження між котлоагрегатами за критерієм сумарних експлуатаційних витрат, в першу чергу – палива. Враховується неопуклість і нестационарність узагальнених виробничих функцій котлів. Застосовано метод оптимального агрегування виробничих функцій, що дає можливість оперативно розраховувати оптимальні розподіли навантаження для систем високої розмірності з довільними виробничими функціями. Подано приклади.*

### Постановка проблеми

Економія навіть 1 % палива по усіх котельнях України дає збільшення національного доходу. Очевидні шляхи цієї економії — зменшення споживання тепла, води і пари для побутових і виробничих потреб, підвищення термодинамічної ефективності котелень вимагають суттєвих капіталовкладень і часу. Введення оптимального управління розподілом навантаження між елементами системи теплопостачання може дати 2—7 % економії порівняно з кваліфікованим ручним управлінням суттєвих капіталовкладень.

### Невирішені частини проблеми

Чи є оптимальне управління розподілом навантаження реалізовним і доцільним? — Таке управління сьогодні використовується в автомобільних двигунах із змінним числом працюючих циліндрів (Мерседес 600), комбінованих системах «дизель-електродвигун» (Мерседес 600Ф). Такі двигуни поки дуже складні і дорогі, але 5—10 % економії палива та екологічність на режимах «малого газу» виправдовують витрати. Відомі числові методи непридатні для оптимізації розподілених систем з довільними характеристиками «витрати-ефект» — узагальненими виробничими функціями (ВФ). З певних причин найактуальнішим задачам оптимального управління присвячено дуже мало робіт. Для продуктивних робіт цього напрямку характерним є комплексний підхід, застосування альтернативних методів [1, 2].

**Мета розробки** – вдосконалення методів оптимізації для забезпечення їх роботи в реальному часі та дослідження особливостей оптимального управління розподілом навантаження між паралельно працюючими котлоагрегатами з урахуванням реальних особливостей їх ВФ.

### Постановка оптимізаційної задачі

Розглядається система теплопостачання, елементи якої (котли) використовують паливо у кількостях  $x_i$  і виробляють тепло у кількостях  $y_i(x_i)$  згідно з узагальненими виробничими функціями (ВФ):  $y_i = f_i(x_i)$ ;  $i = 1 \dots N$ . Треба розподілити ресурс  $R$  так, щоб максимізувати сумарне виробництво тепла з обмеженням по ресурсу  $R$  (пряма задача), або мінімізувати витрати ресурсу з обмеженням на сумарне виробництво (спряжена задача).

Розширимо цю класичну задачу нелінійного програмування – шукаємо не одну точку розв'язання, а **оптимальну виробничу функцію**  $Fop$  ® та відповідну **вектор-функцію оптимального розподілу ресурсу**  $Dop$  ® [3]. ВФ двигунів, котлів машин не тільки нелінійні і нестационарні, але і суттєво неопуклі (термінологія природна) за рахунок режимів «малого газу», «малого горіння», тому повністю відмовляємося від методів нелінійного програмування. Для даної задачі справедливим є принцип оптимальності — це дає нам можливість застосувати **оптимальне агрегування ВФ**. Таким чином ми замінили задачу знаходження екстремуму функції  $N$  змінних послідовністю з  $(N - 1)$  задач знаходження екстремуму функцій **однієї змінної**.

### Концептуальні основи побудови системи оптимального управління

1. Використання методу оптимального агрегування, суть якого — заміна системи паралельно працюючих елементів еквівалентним елементом (рис. 1), який має оптимальну ВФ. Вектор-функція оптимального розподілу ресурсу задає умови отримання оптимальної ВФ. Метод оптимального агрегування не тільки дозволяє розрахувати оптимальну ВФ, але й суттєво зменшує обчислювальні витрати для задач високої розмірності.

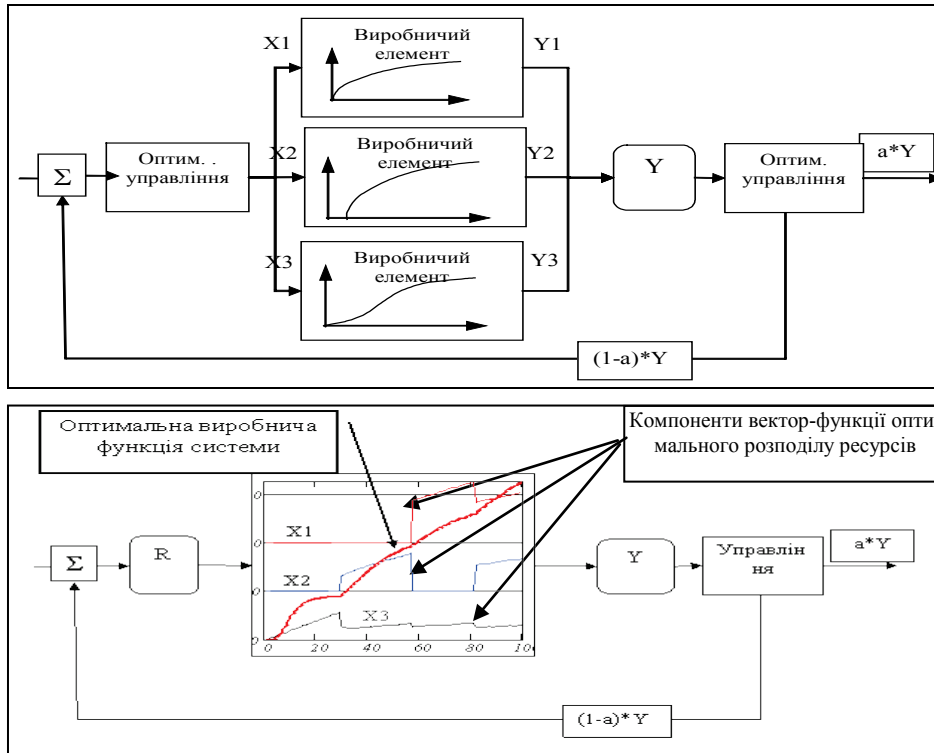


Рис. 1. Перехід до еквівалентної оптимальної системи

2. Декомпозиція задачі оптимального управління на задачі управління при високих навантаженнях і при малих навантаженнях. Розподіл задачі управління при високих навантаженнях між регулятором стабілізації заданого навантаження і регулятором оптимального розподілу навантаження.

3. Вбудовування контуру ідентифікації: регулятор стабілізації заданого сумарного навантаження формує однакові управління для усіх елементів розподіленої системи. Реакції на ці управління дають інформацію для ідентифікації ВФ елементів. Регулятор оптимізації розподілу оцінює поточні реакції елементів і перерозподіляє навантаження.

4. Використання нечіткої логіки для «пом'якшення» режимів з раптовими переключеннями котлоагрегатів. Оптимальні управління для випадку неопуклих ВФ елементів є розривними [4]. В певних умовах мала зміна навантаження може викликати раптову зміну оптимального управління типу «зупинити певний котлоагрегат, запустити інший». Введення нечітких обмежень по навантаженню та пропорції розподілу навантаження дозволяє отримати компромісне управління — згладжене і без монопольних розподілів [5].

### Базова модель узагальненої виробничої функції (ВФ) котлоагрегату

Характерна особливість залежності «подача палива — теплова потужність» — наявність режиму малого горіння і конструктивні обмеження максимальної подачі палива. В першому наближенні вважаємо, що існує мінімальна подача палива, нижче якої котлоагрегат непрацездатний та максимальна припустима подача палива (рис. 2). В діапазоні між цими значеннями вважаємо ВФ випуклою (вгору). В цілому, за рахунок «зони нечутливості» в області малих потрібних навантажень уза-

гальнена виробнича функція котлоагрегату буде неопуклою. Тому функція оптимального розподілу ресурсу для системи котлоагрегатів буде розривною. Саме тому ми розбиваємо задачу оптимального управління на дві задачі.

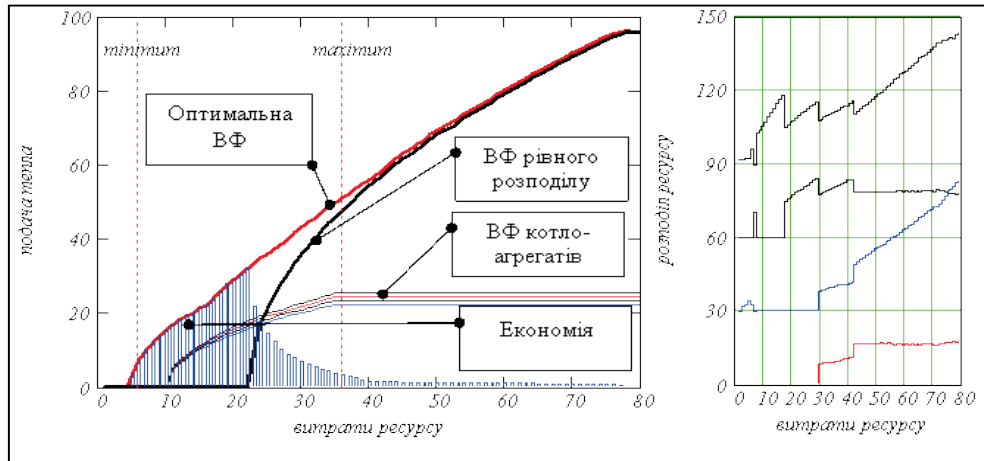


Рис. 2 Порівняння характеристик системи при рівномірному та оптимальному розподілах ресурсу

Задача управління при високих (номінальних) навантаженнях виконується в повністю автоматичному режимі, ВФ котлоагрегатів в цьому діапазоні є опуклими – функція оптимального розподілу неперервна. В цьому режимі, можлива точна ідентифікація параметрів ВФ, прецизійне розподілення навантаження між котлоагрегатами і отримання економії палива порядку 1—2 % але протягом тривалих періодів.

Задача управління при малих навантаженнях пов’язана з відключеннями та включеннями окремих котлоагрегатів, що потребують досить великих експлуатаційних витрат та витрат часу. Наприклад, при короткочасному падінні навантаження нераціонально повністю відключати певний котлоагрегат. Тому розумно, щоб в цих режимах система працювала в режимі порадника оператора, який на базі свого досвіду, інтуїції та нормативних документів приймає рішення про включення/виключення. В цьому режимі можна отримати теж помітну економію, що залежить від характеру коливання навантаження на систему теплопостачання.

Для поданої вище постановки задачі розроблено програмне забезпечення для оптимізації та моделювання системи оптимального управління. На рис. 2 подано приклад розрахунку оптимальної виробничої функції та компонентів вектор-функції оптимального розподілу ресурсу для системи з чотирьох котлоагрегатів. Для прикладу взято котлоагрегати одного класу, ВФ яких відрізняються на 5 %. Можливі інтерпретації розкиду ВФ – старіння, погіршення характеристик теплопередачі з часом та ін.

Можемо бачити, що неопуклість ВФ елементів системи породжує складний характер функцій оптимального розподілу ресурсу (рис. 2): а) для обчислювальних методів, б) психології на базі умов Куна-Такера, в) для практичної реалізації.

На рис. 3, 4 подано приклад оптимального розподілу змінного навантаження для системи з двох елементів.

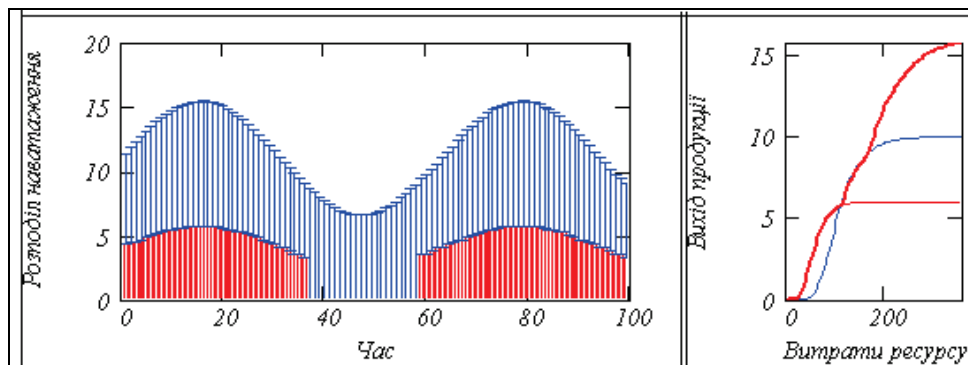


Рис. 3. Процес оптимального розподілу детермінованого навантаження з трендом

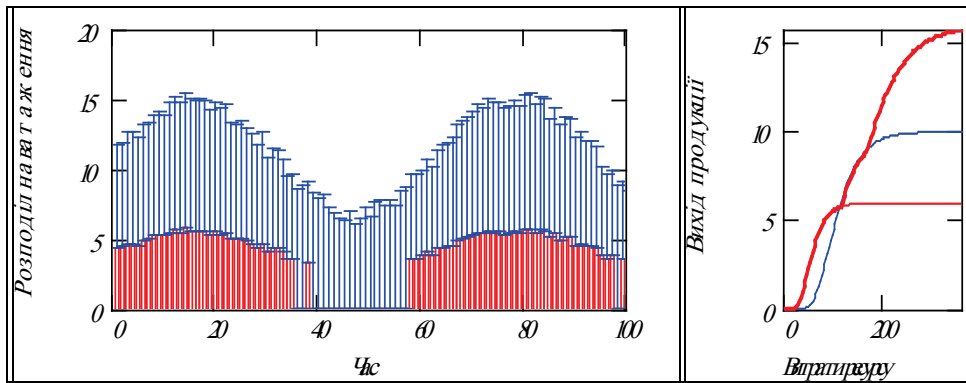


Рис. 4. Процес оптимального розподілу навантаження з трендом і випадковою складовою

В прикладі імітується робота системи котлоагрегатів при наявності добового тренду. В правій частині рисунків подано оптимальну ВФ системи та її складові — ВФ окремих котлоагрегатів. Можемо бачити, що для заданих даних при мінімумі навантаження, один з котлоагрегатів повинен виключатись. Розмірність системи не є обмеженням для запропонованого підходу – обчислювальна складність методу оптимального агрегування зростає **тільки лінійно** із зростанням розмірності, а функції оптимального розподілу ресурсу переобчислюються тільки у разі суттєвої зміни ВФ елементів.

### Розширення задачі оптимального розподілу навантаження

Проведено дослідження на моделі оптимальної системи управління розподілом навантаження для різних розмірностей системи, режимів динаміки навантаження, невизначеностей ВФ елементів та рівня навантаження. Розроблені програми оптимізації та проведені дослідження дозволяють поставити і розв’язати розширену задачу: з урахуванням динаміки та невизначеності навантаження потрібно враховувати накопичені результати функціонування системи, — використати інтегральний критерій ефективності для оптимізації системи. Це вже варіаційна задача з інтегральним функціоналом, що належить до класу задач згладжування [1].

### Формулювання задачі згладжування

Задається потрібний рівень виробництва тепла (навантаження системи)  $r(t)$ . Додаткові витрати на забезпечення потрібного навантаження складаються зі «штрафів»: а) за відхилення рівня виробництва від потрібного  $x(t) \neq r(t)$ , б) за зміну темпу виробництва, коли  $\frac{d}{dt} x(t) > 0$ . Задаються функції штрафу: а)  $F(x(t)) - r(t)$  — штраф в одиницю часу за відхилення від заданого навантаження, б)  $G\left(\frac{d}{dt} x(t)\right)$  — штраф в одиницю часу за зміну темпу виробництва. Маємо варіаційну задачу мінімізації функціоналу

$$J(x) = \int_0^T \left( F(x(t)) - r(t) + G\left(\frac{d}{dt} x(t)\right) \right) dt$$

з обмеженням  $x(t) \geq r(t)$ . В практичних задачах можливе ускладнення — функція  $G(y)$  не має неперервних похідних. Ця задача може бути розв’язана методом динамічного програмування [1], або методом принципу максимуму. Метод оптимального агрегування дозволяє замінити багатовимірну систему еквівалентною одновимірною. Оптимізація розподілу навантаження є фактично субоптимізацією, що виконується на базі принципу оптимальності [1, 2].

## Результати і висновки

Проведено дослідження на моделі оптимальної системи управління розподілом навантаження для різних режимів динаміки навантаження, невизначеностей ВФ елементів. Оптимальне управління майже не вносить додаткових ускладнень в існуючі системи регулювання котлів і потенційно можуть бути узгоджені з вимогами безпеки котельних агрегатів і систем. Запропонована нечітка логіка для обмежень по рівню і розподілу навантаження, що дозволяє «пом'якшити» негативні ефекти розривних управлінь. Використання методу оптимального агрегування дозволяє розширити задачу оптимального розподілу навантаження до варіаційної задачі класу згладжування.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Беллман Р. Процессы регулирования с адаптацией. — М.: Наука, 1964. — 317 с.
2. Берзин Е. А. Оптимальное распределение ресурсов и элементы синтеза систем. — М.: Сов. радио, 1974. — 304 с.
3. 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
4. Колесник, І. С., Северілов В. А. Оптимальне управління розподіленням ресурсів в децентралізованих системах // Доповіді МНК «Контроль і управління в технічних системах». Вінниця: Універсум-Вінниця, 2001. — С 73—78.
5. Боровська Т. М., Колесник І. С., Северілов В. А. Нечітка оптимізація розподілу обмеженого ресурсу у виробничій системі при неопуклих виробничих функціях елементів // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2003. — № 5. — С. 36—41.

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

Колесник Ірина Сергіївна — *здобувач кафедри комп'ютерних систем управління.*

Вінницький національний технічний університет;

Хміль Сергій Леонтійович — *провідний інженер ВАТ «Вінницька кондитерська фабрика»*