

АВТОМАТИЗОВАНЕ КЕРУВАННЯ СИСТЕМОЮ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ЗІ ЗМІННОЮ СТРУКТУРОЮ ПО ЗНАЧЕННЯМ ЦІЛЬОВОЇ ФУНКЦІЇ ОПТИМІЗАЦІЙНОЇ ЗАДАЧІ

О.Б. Максимова¹, В.І. Кривда², К.О. Жанько², О.Т. Тошев², О.В. Сідельников²

¹Національний університет «Одеська морська академія»

²Національний університет «Одеська політехніка»

Анотація. Розроблені об'єктно-орієнтовані моделі об'єкту і система керування на основі вдосконаленого інформаційного та математичного забезпечення елементів комп'ютерно-інтегрованої системи керування теплопостачанням; комплексний критерій оптимального керування структурою системи теплопостачання на основі техніко-економічних показників і керуючі алгоритми, які визначають оптимальну структуру системи з використанням генетичних алгоритмів. Наведено дослідження ефективності керування на імітаційній моделі системи теплопостачання.

Ключові слова: комп'ютерно-інтегрована система керування, керування зміною структури, критерій оптимального керування, об'єктно-орієнтований аналіз, техніко-економічні показники, генетичний алгоритм.

Вступ

У сучасному суспільстві, з підвищенням якості життя зростає рівень вимог до функціональних характеристик різних комп'ютерно-інтегрованих систем керування (КІСК). Від сучасних КІСК потрібна надійна адаптація до зміни середовища їх використання з відсутністю або мінімізацією втручання оператора під час функціонування [1]. Сучасний рівень розвитку теорії оптимального керування (ОК), теорії адаптивних систем і також рівень досконалості КІСК дозволяють розв'язати нове завдання керування, технічними структурами не тільки за параметрами, а й за структурною множиною одиниць взаємозамінного обладнання, що відрізняється за своєю надійністю, ефективністю і вартістю. Метою керування є підтримка оптимального співвідношення в системі максимальної ефективності використовуюваного в даний момент устаткування та мінімуму вартості витрачених ресурсів при заданій якості керування [2].

В даний час недостатньо розроблено алгоритмічне та математичне забезпечення для реалізації ОК структурою технічних засобів (ТЗ) системи в нормальних умовах експлуатації і обмеженнях на ресурси.

1. Аналіз стану використання керування за значенням цільової функції оптимізаційної задачі

Рішення задач теплопостачання може бути отримано шляхом використання взаємозамінного обладнання, яке працює незалежно одне від одного при паралельному підключенні. Це робить доцільним об'єднання його в рамках єдиної

складної технічної системи для отримання оптимального співвідношення якості продукції при мінімізації вартості витрачених ресурсів за рахунок постійної зміни структури як теплогенеруючих так і теплопередаючих ТЗ [3].

Проведений аналіз напрямків розробок показав, що під ОК складної технічної системи сьогодні розуміється керування структурою регулятора і оптимізацією його поточних налаштувань. Аналіз літературних джерел показав, що дослідники в області автоматизації звернули увагу на завдання керування зміною структури ТЗ порівняно давно, на етапі класифікації автоматизованих систем, однак у відкритій літературі на даний момент не виявлено ніяких варіантів алгоритмів керування для підвищення енергетичної ефективності.

2. Мета і завдання статті

Метою роботи є підвищення ефективності керування автоматизованої системи теплопостачання зі змінною структурою об'єкта керування за значенням цільової функції оптимізаційної задачі, що враховує надійність, ефективність, вартість і якість.

Досягнення мети здійснюється рішенням послідовності таких завдань:

- розробка імітаційної моделі технічної системи теплопостачання зі змінною структурою об'єкта керування;
- розробка методів автоматизованого керування системою зі змінною структурою технічних засобів;
- дослідження ефективності КІСК на імітаційній моделі системи.

3. Імітаційна модель технічної системи теплопостачання зі змінною структурою об'єкта керування

Для розробки імітаційної моделі був застосований ООА, робочими продуктами якого є інформаційні моделі, моделі станів і діаграми потоків даних дій з наступною модифікацією [4]. Модифікований третій етап ООА шляхом заміни його на розробку технологічних алгоритмів обладнання. Під цим розуміється комплекс моделей, математичного та алгоритмічного забезпечення, що визначає порядок проведення різних технологічних регламентів, а також описує дії, що виконуються в тому чи іншому стані. На рис. 1-4 приведено інформаційну модель, та моделі станів KICK.

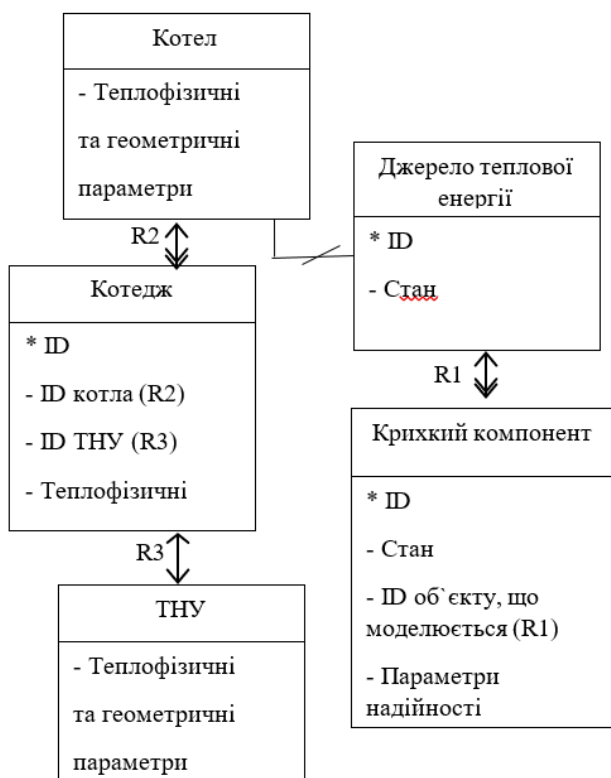


Рис. 1. Інформаційна модель системи теплопостачання зі змінною структурою технічних засобів.

Інформаційна модель верхнього рівня, що демонструє лише основні атрибути та зв'язки. Крім обумовлених в умові завдання об'єктів (будинки, ГК, ТНУ) було прийнято, що в кожній одиниці обладнання присутні три компоненти, що визначають її працездатність: «крихка», «середня» і «надійна». У «крихкій» компоненти малі час напрацювання на відмову і час, необхідний для її заміни у разі виходу з ладу. У «надійній» компоненти - навпаки. У разі її поломки обладнання вважається таким, що вийшло з ладу на час відновлення зламаної

компоненти. Після закінчення даного інтервалу часу надійність зламаної компоненти повністю відновлюється, і обладнання вважається готовим до роботи. Моделі станів для об'єктів «крихка компонента», ТНУ, котел демонструють схему поведінки [5].



Рис. 2. Модель станів «крихкої компоненти».

Декомпозиція об'єкта керування дозволила розробити імітаційну модель, процесів теплопередачі від палива до теплоносія; від теплоносія до підлоги та від поверхні підлоги повітря в приміщеннях; від ТНУ повітря в приміщеннях; від повітря приміщення внутрішнім і зовнішнім стінам, від зовнішніх стін навколишньому середовищу, втрати тепла через віконні отвори і дах. Імітаційна модель об'єкта керування складається з теплових моделей об'єкта, котла, ТНУ, навколишнього середовища. Процеси нестационарної теплопередачі засновані на розбитті поверхні теплообміну на сегменти [6].

В основу теплової моделі об'єкта покладені вирази теплових балансів при теплообміні (Q_{mo}) і теплопередачі (Q_{mn}):

$$Q_{mo} = m \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1) / \tau;$$

$$Q_{mn} = \alpha \cdot F \cdot (T_{cp2} - T_{cp1}) \quad \text{або} \quad Q_{тп} = \sum_i F_i \cdot (T_{cp2} - T_{cp1}) \cdot \lambda_i / \delta_i, \quad \text{де } T_1, T_2 - \text{початкова та кінцева температури середовища поверхні теплообміну, К; } m - \text{маса середовища, кг; } C_p - \text{питома теплоємність середовища, Дж/(кг·К); } \alpha - \text{коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м}^2\text{·К); } F - \text{площа поверхні теплообміну, м}^2; T_{cp1}, T_{cp2} - \text{температури середовищ по обидві сторони від межі теплопередачі, К; } \tau - \text{час моделювання, с; } \delta$$

— товщина, м; λ — теплопровідність середовища, Вт/(м·К); $T_{пов}$ — температура повітря, К; $T_{нс}$ — температура навколишнього середовища, К.



Рис. 3. Модель станів об'єкту «ТНУ»

Для моделі котлів оцінювалося тільки кількість корисного тепла, що генерується $Q_{газ} = G_{газ} \cdot q_{газ} \cdot \eta$, де $G_{газ}$ - витрата газу, кг/с; $q_{газ}$ - теплотворна здатність газу, Дж/кг; η - ККД котла.



Рис. 4. Модель станів об'єкту «котел»

Модель ТНУ представлена термодинамічним циклом для фреону R22.

В результаті апроксимації табличних даних фреону були отримані вирази для обчислення його теплофізичних властивостей:

$$h''(T) = -0.008 \cdot T^3 - 0.786 \cdot T^2 + 441.4 \cdot T + 288329$$

— ентальпія насиченої пари;

$$s''(T) = -0.00004 \cdot T^3 + 0.0046 \cdot T^2 - 0.4688 \cdot T + 2344$$

— ентропія насиченої пари;

$$h_2 = k(T) \cdot s'' + b(T)$$

— ентальпія рідини, де $k(T) = 0.1118 \cdot T^3 + 6.7452 \cdot T^2 + 555.83 \cdot T + 287759$,

$$b(T) = -0.254 \cdot T^3 - 17.8451 \cdot T^2 - 716.28 \cdot T - 386442$$

$$h'(T) = 0.0083 \cdot T^3 + 1.3179 \cdot T^2 + 909.63 \cdot T + 134942$$

— ентальпія насиченої рідини;

$$r(T) = -0.0167 \cdot T^3 - 2.0952 \cdot T^2 - 468.07 \cdot T + 153383$$

— теплота пароутворення.

Вихідними даними для моделі є температура випарника $T_{исп}$, температура конденсатора $T_{конд}$, ККД компресора $\eta_{комп}$ і питома витрата фреону $G_{фр}$. В результаті розрахунків визначаються кількість відданої теплоти/холоду $Q_{ТНУ}$ і необхідна потужність компресора $N_{ТНУ}$.

Для режиму нагріву приміщення модель представляється у вигляді:

$$h_1'' = h''(T_{исп});$$

$$s_1'' = s''(T_{исп});$$

$$h_2 = k(T_{конд}) \cdot s_1'' + b(T_{конд});$$

$$h_3 = h''(T_{конд});$$

$$N_{ТНУ} = (h_2 - h_1'') \cdot G_{фр} / \eta_{комп};$$

$$Q_{ТНУ} = G_{фр} \cdot (h_2 - h_3 + r(T_{конд})) \cdot \tau.$$

Для режиму охолодження приміщення модель представляється у вигляді:

$$h_1'' = h''(T_{исп});$$

$$s_1'' = s''(T_{исп});$$

$$h_2 = k(T_{конд}) \cdot s_1'' + b(T_{конд});$$

$$h_4 = h'(T_{конд});$$

$$N_{ТНУ} = (h_2 - h_1'') \cdot G_{фр} / \eta_{комп};$$

$$Q_{ТНУ} = G_{фр} \cdot (h_1'' - h_4) \cdot \tau.$$

4. Методи автоматизованого керування системою зі змінною структурою технічних засобів

Система теплопостачання складається з трьох теплогенеруючих ТЗ які можуть вмикатися та працювати незалежно один від одного. Розглянемо проміжок часу Δt за який, структура системи не змінюється. В кожному з таких проміжків система може знаходитися в одному з восьми різних станів які визначаються комбінацією включених або вимкнених ТЗ, котрі характеризуються своїми техніко-економічними показниками, а саме $R(t)$ — ймовірність відмови системи; $Q(t)$ — якість підтримки заданої

температури; $S(t)$ — вартість енергоресурсів; $E(t)$ — ефективність перетворення енергії. В двійковій системі числення розглянуті стани відповідають числам від 0 до 7 десяткової системи. Наприклад, стан №3 має відповідати бінарному поданню 011, що означає вимкнений котел № 1, і включені котел № 2 і ТНУ. Якщо ж розглядати N інтервалів Δt , то отримаємо план перемикання обладнання який складається з N станів системи. В двійковій системі числення план перемикання ТЗ відповідає числам від 0 до 8^N десяткової системи. Задачею дослідження є вибір найкращого плану перемикання ТЗ, який забезпечить найменші вартість енергоресурсів і відмову системи та найбільші показники обладнання, ефективності та якості процесу теплопостачання [7]. Так як показники мають різну фізичну природу, то для їх одночасного врахування потрібно їх нормування. Складемо математичні моделі кожного з показників.

Нормоване значення відмови системи $R_n(t)$ теплопостачальних ТЗ визначається як $R_n(t) = \prod_{i=1}^n r_i(t)/r_{max}^n$, де n - кількість одиниць, паралельно з'єданого обладнання, яке складає систему; r_{max} — максимальне значення ймовірності відмови одиниці обладнання; $r_i(t)$ обчислюється за умовами:

$$r_i(t) = \begin{cases} 1, & \text{умова а;} \\ 1 - P_i(t), & \text{умова б;} \end{cases}$$

Де: умова **а** означає, що обладнання не належить до поточної структури; а умова **б** означає, що обладнання належить до поточної структури, $P_i(t)$ - імовірність безвідмовної роботи i -го обладнання структури системи, яка розглядається на заданому інтервалі часу, при умові врахування наявності його попереднього включення в структуру ТЗ. В основу розрахунку величини $P(t)$ покладені співвідношення для сумісної дії раптових і зносних відмов. Так сумісна ймовірність безвідмовної роботи елемента з урахуванням раптових і зносних відмов у період від $t = t_0$ за час t визначається виразом:

$$P(t) = e^{-\lambda t} \cdot P_u(t_0 + t)/P_u(t_0) \quad (1),$$

де, $P_u(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_t^\infty e^{-(t-M)^2/2\sigma^2} dt$; t - час напрацювання елемента, M - середнє значення його довговічності з урахуванням зносу.

Інтенсивність відмов залежить від зміни рівня навантаження на елемент щодо його номінального значення. Коли навантаження елемента перевищує номінальне, спостерігається зростання інтенсивності відмов і навпаки. Крім того на роботу елементів впливає зміна навколишнього середовища. Для моделювання таких властивостей елементів введені в вираз (2) поправочні коефіцієнти на поточну робочу

потужність $K_{пот}(N_{пр})$ і на параметри навколишнього середовища $K_{нс}(x_{пр})$:

$$P(t) = e^{-\lambda t} \cdot P_u(t_0 + t)/P_u(t_0) \cdot K_{ном}(N_{пр}) \cdot K_{ос}(x_{пр}),$$

де: $N_{пр}$ - приведена робоча потужність, $x_{пр}$ - наведений параметр навколишнього середовища (температура, частота, вологість і т.д.).

$$N_{пр} = N/N_{ном}; x_{пр} = x/x_{ном};$$

де N - поточна робоча потужність, Вт; $N_{ном}$ - номінальна робоча потужність; x - поточне значення параметра навколишнього середовища; $x_{ном}$ - номінальне значення параметра навколишнього середовища.

Апроксимація експериментальних даних для електричних та електронних елементів які складають систему, дозволила отримати наступні вирази для поправочних коефіцієнтів:

$$K_{пот}(N_{пр}) = 3,7 \cdot 10^{-7} \cdot e^{3,8027 \cdot N_{пр}};$$

$$K_{нс}(t_{пр}) = e^{0,2572e^{(1,9157t_{пр})} - 11},$$

де $t_{пр}$ - приведена температура навколишнього середовища.

Нормоване значення складової енергетичної ефективності визначалося за виразом: $E_n(t) = 1 - \eta_e(t)$, де $\eta_e(t)$ — ексергетичний ККД структури системи на поточному інтервалі Δt , що обчислюється з урахуванням вхідних $E^{вх}$ та вихідних $E^{вих}$ потоків ексергії в заданій структурі ТЗ: $\eta_e(t) = \sum_{i=1}^n E_i^{вх} / \sum_{i=1}^n E_i^{вх}$.

Нормоване значення оцінки вартості ресурсів визначалося за виразом $S_n(t) = \sum_{i=1}^k G_i S_i / S_{max}$, де k - кількість використовуваних первинних ресурсів; G_i - витрата i -го ресурсу на зазначеному інтервалі часу, S_i - вартість i -го ресурсу; S_{max} - вартість ресурсів, витрачених на функціонування системи за умови, що все обладнання працювало не вимикаючись весь зазначений інтервал часу.

Для визначення нормованого значення складової якості забезпечення заданої температури використовувався вираз: $Q_n(t) = |\varepsilon(t)/\varepsilon_{max}|$, де $\varepsilon(t)$ - відхилення поточної температури повітря в котеджі від заданої,

$$\varepsilon_{max} = \begin{cases} |\varepsilon(t)|, & \text{якщо } |\varepsilon(t)| \leq \varepsilon_{max} \\ \varepsilon_{max}, & \text{якщо } |\varepsilon(t)| > \varepsilon_{max} \end{cases}$$

максимальне відхилення поточної температури повітря в приміщенні від заданої.

Складемо математичну модель задачі вибору оптимальної структури системи.

Розглянемо множину всіх можливих планів перемикання ТЗ $X = \{x, x = 1, \dots, 8^N\} \subset N$ та множину часу початку кожного інтервалу Δt $T = \{t = t_0 + \Delta t(i - 1), i \in 1, \dots, N\}$.

Введемо дискретну функцію, аргументами якої є план перемикання ТЗ та час:

$$J(x; t) = \sum_{j=1}^N \int_{(j-1)\Delta\tau}^{j\Delta\tau} (w_r \cdot R_H(t) + w_q \cdot Q_H(t) + w_s \cdot S_H(t) + w_e \cdot E_H(t)) dt, \quad (2)$$

де w_r , w_q , w_s , w_e , - вагові коефіцієнти, які визначаються експертним методом. Зважування кожного з техніко-економічних показників вводиться для більшої гнучкості процесу керування [8].

Таким чином маємо задачу оптимізації функції двох змінних, яка відноситься до класу задач дискретного програмування:

$$J(x; t) \rightarrow \min_{x \in X, t \in T}$$

Розв'язуючи, запропоновану оптимізаційну задачу на імітаційних моделях, можна оцінити ефективність перемикання обладнання.

Далі необхідно розробити комплекс керуючих алгоритмів. Блок-схема першого варіанту алгоритму представлена на рис. 5.

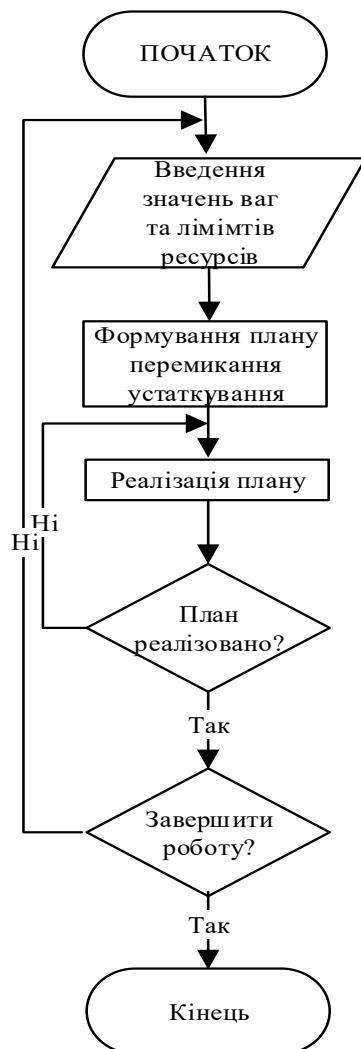


Рис. 5. Керуючий алгоритм перший варіант.

В результаті досліджень були виявлені основні складності розв'язуваної задачі: велика кількість альтернативних рішень, відсутність інформації про залежність плану перемикання

обладнання від поточного стану системи теплопостачання, цільова функція може мати безліч локальних екстремумів [9].

Тому для вирішення поставленого завдання був використаний генетичний алгоритм. Шукане рішення кодувалося у вигляді послідовності генів. У кожен момент часу $\Delta\tau$ система може перебувати в одному з 8-ми різних станів, які визначаються комбінацією включеного устаткування. В двійковій системі числення розглянуті стани відповідають числам від 0 до 7. Якщо прийняти, що кожен ген буде відповідати інтервалу часу $\Delta\tau$, то десяткові еквіваленти цих чисел становитимуть область можливих значень для кожного гена. Послідовність генів утворює хромосому. Довжина хромосоми визначається кількістю N інтервалів $\Delta\tau$. Таким чином, послідовність ген в будь-якій хромосомі є планом перемикання обладнання. Робота генетичного алгоритму починається з формування початкової популяції хромосом.

Цільова функція $J(x; t)$ використовувалася для оцінки пристосованості кожної хромосоми. Для цього моделювалася робота системи теплопостачання в заданий час відповідно до плану перемикання обладнання, яке відповідає даній хромосомі.

Ознакою зупинки алгоритму була умова незмінності найбільш пристосованої хромосоми протягом 50 епох. В ході роботи по створенню керуючого алгоритму були запропоновані два варіанти.

В запропонованому на рис. 5 варіанті керуючого алгоритму введення обмежень на ресурси і значення вагових коефіцієнтів цільової функції здійснює оператор.

Блок-схема другого варіанту алгоритму представлена на рис. 6. Цей алгоритм виключає суб'єктивний фактор втручання оператора і дозволяє автоматично оцінювати значення вагових коефіцієнтів складових цільової функції на підставі поточної наявності первинних енергоресурсів, їхніх майбутніх надходжень, а також всіх непередбачених, але які мали місце, флуктуацій, що впливають на роботу системи теплопостачання.

Слід зазначити, що в запропонованих варіантах основні розрахункові витрати відбуваються в момент формування плану. Після того як план сформований, обчислювальні ресурси ЕОМ не використовуються.

З метою використання цих ресурсів в повному обсязі і для підвищення ефективності, у другому алгоритмі введена гілка паралельних обчислень. У ній паралельно з виконанням попередньо розрахованого плану, що передбачає релейне

регулювання роботи обладнання, ведеться формування нового плану, заснованого на можливості вибору теплової потужності обладнання з ряду дискретних значень 0, 25, 50, 75 і 100%. Задача пошуку оптимального плану істотно ускладнюється, тому що кількість варіантів тепер $(5^3)^N=125^N$. З іншого боку маневрування потужністю дозволить більш оптимально розподіляти ресурси обладнання для системи теплопостачання.



Рис. 6. Керуючий алгоритм другий варіант.

Рішення, які одержані за допомогою генетичних алгоритмів є кращими з допустимих [10]. Крім того вони можуть бути отримані за прийнятні проміжки часу. Так повний перебір всіх рішень для хромосоми довжиною 1000, на ЕОМ з характеристиками: процесор AMD Athlon 64 X2 Dual 3800 + 2,02 ГГц, 2 ГБ ОЗУ, Windows XP, зайняв би близько 10^{996} с. З використанням генетичного алгоритму, рішення в середньому знаходять за 400 с.

В результаті проведених досліджень розроблено інформаційне та математичне забезпечення для керування системою теплопостачання, що дозволяє реалізувати ОК за рахунок зміни структури об'єкта керування.

5. Результати модельного експерименту.

В ході моделювання визначалося вплив на структуру системи теплопостачання введенням різних обмежень на ресурси. Визначалися значення величини цільової функції $J(x; t)$ і її складових R_n , Q_n , S_n , E_n . Додатково визначалася величина S абсолютної вартості витрачених енергетичних ресурсів для кожного обчислювального експерименту. Крок моделювання Δt був прийнятий рівним 15 с. Інтервал моделювання становив 15000 с. Узагальнені результати моделювання наведено в таблиці 1.

Аналіз результатів моделювання довів, що система керування в залежності від обмежень, які моделюються за допомогою вагових коефіцієнтів складових цільової функції $J(x; t)$ адаптує відповідним чином свою стратегію використання наявних ресурсів. У той же час рішення, що генеруються системою керування передбачають занадто часті вмикання/вимикання обладнання. З точки зору обчислень такі перемикавання дозволяють отримати оптимальне рішення, але з точки зору технічної реалізації обладнання неприпустимо вмикати і вимикати кожні 15-30 с.

Далі було запропоновано збільшити крок моделювання Δt . Це привело до позитивного ефекту з точки зору вмикання/вимикання обладнання, але погіршило якість результатів. Теоретичні дослідження показали, що поліпшити рішення системи керування можна шляхом введення обмежень на ресурс надійності, але для цього необхідно вирішити задачу стратегічного планування використання такого ресурсу.

Подальші спроби зменшення кількості переключень обладнання при формуванні поточної структури призвели до розробки принципово нового керуючого алгоритму (варіант 3), в якому керування здійснювалося не тільки шляхом вмикання або вимикання

обладнання, а й шляхом зміни налаштувань регуляторів.

Таблиця 1. Результати імітаційного моделювання роботи системи тепlopостачання.

Характер керування	J	R_n	Q_n	S_n	E_n	S , грн
традиційним способом	0,084	0,027	0,061	0,29	0,16	13,3
без обмежень на ресурси	0,029	0,029	0,02	0,03	0,1	1,6
обмеження ресурсу ТНУ	0,101	0,035	0,244	0,28	0,16	12,9
обмеження ресурсів котлів і ТНУ	0,110	0,254	0,202	0,25	0,15	11,8
наявність ліміту на електрику	0,095	0,030	0,156	0,28	0,16	13,2
обмеження ресурсу ТНУ та наявність ліміту газу	0,376	0,024	1,495	0,12	0,10	5,6
$w_r=w_s=w_e=0,033, w_q=0,9$	0,017	0,079	0,012	0,31	0,21	14,6
$w_q=w_s=w_e=0,033, w_r=0,9$	0,022	0,024	0,18	0,03	0,10	1,6
відношення цін електрики і газу 20:1	0,073	0,035	0,080	0,23	0,16	17,3

Відповідний метод переключення обладнання має такий вигляд.

Крок 1. Якщо середня температура на поверхні підлоги нижче мінімально допустимої T_{min}^k обидва котла вимкнені, то необхідно включити котел з найменшим напрацюванням.

Крок 2. Якщо середня температура на поверхні підлоги на $0,5^\circ\text{C}$ нижче мінімально допустимої T_{min}^k , то необхідно включити обидва котла.

Крок 3. Якщо середня температура на поверхні підлоги вище максимально допустимої T_{max}^k обидва котла включені, то необхідно включити котел з найбільшим напрацюванням.

Крок 4. Якщо середня температура на поверхні підлоги на $0,5^\circ\text{C}$ вище максимально

допустимої T_{max}^k , то необхідно вимкнути обидва котла.

Крок 5. Якщо температура всередині приміщення нижче мінімально допустимої T_{min}^{THU} , то необхідно включити ТНУ.

Крок 6. Якщо температура всередині приміщення вище максимально допустимої T_{max}^{THU} , то необхідно вимкнути ТНУ.

Узагальнені результати імітаційного моделювання роботи системи тепlopостачання з використанням модифікованого варіанту керуючого алгоритму наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Результати імітаційного моделювання роботи системи тепlopостачання з використанням модифікованого варіанту керуючого алгоритму.

Характер керування	J	R_n	Q_n	S_n	E_n	S , грн
традиційним способом	0,279	0,434	0,743	0,467	0,53	268,9
без обмежень на ресурси	0,106	0,213	0,316	0,097	0,15	56,2
обмеження ресурсу ТНУ	0,456	0,325	1,705	0,373	0,43	214,9
обмеження ресурсів котлів і ТНУ	0,715	0,171	2,843	0,165	0,199	94,7
наявність ліміту на електрику	0,246	0,402	0,722	0,346	0,40	198,9
обмеження ресурсу ТНУ та наявність ліміту газу	0,495	0,238	1,95	0,174	0,21	100,4
при $w_r=w_s=w_e=0,033, w_q=0,9$	0,406	0,333	0,450	0,268	0,33	154,33
при $w_q=w_s=w_e=0,033, w_r=0,9$	0,166	0,153	2,85	0,094	0,13	54,133
відношення цін електрики і газу 20:1	0,153	0,252	0,314	0,42	0,19	700,4

Основна ідея такого керування полягає у зміні в часі величин налаштувань регуляторів T_{max} і T_{max} таким чином, щоб в результаті отримати оптимальне рішення за прийнятним критерієм.

Була модифікована процедура пошуку розв'язання з використанням генетичного алгоритму. Тепер один ген був не код структури

системи теплопостачання, а чотири числа, які визначають величини налаштувань T_{min}^k , T_{max}^k , T_{min}^{THU} , T_{max}^{THU} . Було прийнято, що протягом однієї години налаштування регуляторів не змінюються. Таким чином, один ген відповідав одній годині роботи системи керування, а вся хромосома — інтервалу моделювання з кроком $\Delta t = 1$ год. Моделювання роботи системи теплопостачання як і раніше здійснювалося з кроком $\Delta t = 15$ с.

Аналіз отриманих результатів показав, що модифікований алгоритм керування повністю задовольняє вимогам інженерної практики, з точки зору режимів експлуатації обладнання. На відміну від 1-го і 2-го варіантів керуючого алгоритмів, де інтервал моделювання становив 15000 с, 3-й варіант дозволяє прогнозувати роботу системи на більш тривалий інтервал, який склав 24 год. при тих же обчислювальних витратах.

В результаті проведених досліджень доведена можливість досягнення оптимальних параметрів ТП в умовах обмежень на ресурси і зміни їх вартості, що дозволяє реалізувати високу живучість технічної системи навіть за умови нестачі ресурсів, знижуючи вимоги до якості продукту. Це дозволило забезпечити максимальну ефективність КІСК теплопостачання зі змінною структурою об'єкта керування з урахуванням надійності, ефективності, вартості і якості за рахунок вдосконалення інформаційного та математичного забезпечення [11,12].

Висновки

Для проведення ООА спеціалізованих технологічних систем було запропоновано модифікувати процес аналізу заміною моделі потоку дій даних на технологічні алгоритми обладнання, під якими розуміється комплекс моделей, математичного та алгоритмічного забезпечення, що визначають порядок проведення різних технологічних регламентів, а також формалізує дії, що виконуються в тому чи іншому стані. Дослідження теплоенергетичних об'єктів із змінною структурою полягало в розробці комплексу моделей системи теплопостачання, з використанням техніко-економічних показників, що дозволило провести оцінку ефективності поточної структури об'єкта керування при обмеженнях на ресурси.

Введена цільова функція оптимізаційної задачі об'єднує вплив таких чинників, як якість процесу підтримки заданої температури, ефективність використовуваного обладнання, його надійність, вартість ресурсів, що дозволяє комплексно оцінювати процес функціонування

системи на основі техніко-економічних показників. Запропоновано комплекс алгоритмів керування системою теплопостачання зі змінною структурою ТЗ, який реалізує керування за рахунок зміни структури об'єкта. За допомогою генетичного алгоритму, здійснюється пошук рішення, близького до оптимального з нескінченної кількості варіантів за потрібний інтервал часу. Результат такого рішення залежить від обмежень на ресурси, які задаються оператором, або обчислюються системою керування на базі інформації про плановану кількість і час надходження ресурсів.

Показано вплив вагових коефіцієнтів на досягнення оптимальних параметрів при теплопостачанні в умовах обмежень на ресурси та їх вартість, яка змінюється. Це дозволяє реалізувати високу живучість технічної системи, навіть за умови дефіциту ресурсів для номінального режиму роботи за рахунок зниження вимог до якості продукту. Розроблене інформаційне та математичне забезпечення дозволяє КІСК адаптуватися до збурень і змінювати стратегію керування при введенні обмежень на ресурси. Запропонований алгоритм пошуку рішення дозволяє отримати оптимальний аналітичний план перемикання технологічного обладнання, шляхом зміни як структури теплогенеруючих засобів, так і налаштувань регуляторів тепло передаючих ТЗ, що забезпечує вирішення завдання керування.

Список використаної літератури

1. Brunetkin O., Beglov K., Maksymov M., Baskakov V., Vataman V., Kryvda V. Designing an automated control system for changing npu energy release compensating for arising internal disturbing factors based on their approximation model. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. Vol. 3, No.2 (117). P. 63–75.
2. I. Voytetsky, T. Voytetskaya, L. Vyshnevskiy, I. Kozyryev, O. Maksymova, V. Kryvda. Improving the ship's power plant automatic control system by using a model-oriented decision support system in order to reduce accident rate under the transitional and dynamic modes of operation, Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, – 2021. – Vol. 3, N 2 (111). – P. 57–66.
3. Гнеденко, Б.В. Математические методы в теории надежности / Гнеденко, Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. — М.: Наука, 1965. — 524 с.
4. Шлеер С. Объектно-ориентированный анализ: моделирование мира в состояниях: Пер. с англ. / Шлеер С., Меллор С. — К.: Диалектика, 1993. — 240с.

5. Давыдов, В.О. Критерий оценки эффективности управления системами с переменной структурой / В.О. Давыдов, И.Н. Максименко, О.Б. Максимова // Тр. Одес. политехн. ун-та. — Одесса, 2007. — Вып. 2(28). — С. 149 — 154.
6. Давыдов, В.О. Компьютерное моделирование тепловых полей жилых помещений / В.О. Давыдов, О.Б. Максимова // Тр. Одес. политехн. ун-та. — Одесса, 2008. — Вып. 2(30). — С. 67 — 72.
7. Давыдов, В.О. Имитационная модель объекта управления для системы управления надежностью / В.О. Давыдов, О.Б. Максимова // Тр. Одес. политехн. ун-та. — Одесса, 2010. — Вып. 1(33) — 2(34). — С. 75 — 79.
8. Максимова О.Б. Методика расчета критерия управления структурой сложных технических систем [Текст] / О.Б. Максимова, В.О. Давыдов, В.М. Тонконогий // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. — 2011. — №3. — С. 19-23.
9. Максимова О.Б. Исследование адаптивных самоорганизующихся автоматизированных систем обеспечения комфортной температуры / О.Б. Максимова, В.О. Давыдов, В.М. Тонконогий // Тр. Одес. политехн. ун-та. — Одесса, 2011. — Вып. 2(36). — С. 155 — 160.
10. Давыдов В. О. Анализ надежности ПО АСУТП / В. О. Давыдов, О. Б. Максимова, А.А. Шевчук // Холодильна техніка і технологія. — Одесса, 2011. — Вып. 6(134). — С. 86 — 91.
11. Максимова О.Б., Мінчев Д.С. Розробка моделі системи теплопостачання міста в умовах наявності альтернативних енергетичних потоків. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки, 2021, Том 32 (71) Ч. 2 № 1 с. 24 – 31,
12. Максимов М.В., Максимова О.Б., Мінчев Д.С. Методи та моделі управління системою зі змінною структурою об'єктів теплопостачання. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки, 2021, Том 32 (71) Ч. 1 № 2 с. 170 – 179.

AUTOMATED CONTROL OF THE HEAT SUPPLY SYSTEM WITH A VARIABLE STRUCTURE ACCORDING TO THE VALUE OF THE OBJECTIVE FUNCTION OF THE OPTIMIZATION PROBLEM

O.V. Maksymova¹, V.I. Kryvda², K.O. Zhanko², O.T. Toshev², O.V. Sidelnikov²

¹Odesa Maritime Academy National University

²Odesa Polytechnic National University

Abstract. Object-oriented models of the object and the control system, based on data ware and software improvement, for elements of the computer-integrated control system designed for a heat supply system, have been worked out. Also, a complex criterion of optimal control of the heat supply system structure on the basis of engineering-and-economic performance, as well as control algorithms defining the optimal structure of the system and using genetic algorithms, have been proposed. Research of the control efficiency using a simulation model of the heat supply system has been carried out.

Keywords: computer-integrated control system, structure variation control, optimal control criterion, object-oriented analysis, engineering-and-economic performance, genetic algorithm.

Отримано 21.09.2023



Максимова Оксана Борисівна, Національний університет «Одеська морська академія», к.т.н., доцент, провідний науковий співробітник, НДЦ ЗСУ «Державний океанаріум» Інституту Військово-Морських Сил. Вул. Дідріхсона, 8. Одеса, Україна
E-mail: M.oxana.b@gmail.com, тел. +38-067-931-94-06

Oksana Maksymova, National University "Odesa Maritime Academy", PhD technical, associate professor, leading researcher of the research department, scientific research center of the Armed Forces of Ukraine "State Oceanarium" of the Institute of the Naval Forces. St. Didrichson, 8. Odesa, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3986-0991>



Кривда Вікторія Ігорівна, Національний університет «Одеська політехніка» к.т.н., доцент, доцент кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, завідувач відділу аспірантури і докторантури. Просп. Шевченка, 1. Одеса, Україна,
E-mail: kryvda@op.edu.ua, тел. +38-093-282-82-28

Viktoriaa Kryvda, Odesa Polytechnic National University, PhD technical, associate professor, associate professor of Department of Electricity and Energy Management, Head of Department of Postgraduate and Doctoral Studies, Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0930-1163>;



Жанько Крістіна Олегівна, Національний університет «Одеська політехніка», аспірант кафедри Програмних та комп'ютерно-інтегрованих технологій. Просп. Шевченка, 1. Одеса, Україна,
E-mail: christina.zhanko@gmail.com, тел. +38-095-464-67-20

Kristina Zhanko, Odesa Polytechnic National University, PhD Student of the Department of Software and Computer-Integration Technology, 1, Shevchenko Ave. Odesa, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9990-6151>



Тошев Олександр Тимурович, Національний університет «Одеська політехніка», аспірант кафедри Програмних та комп'ютерно-інтегрованих технологій. Просп. Шевченка, 1, Одеса, Україна,
E-mail: toshev.oleksandr@outlook.com, тел. +38-067-283-63-67

Toshev Oleksandr, Odesa Polytechnic National University, PhD Student of the Department of Software and Computer-Integration Technology, 1, Shevchenko Ave., Odesa, Ukraine

ORCID ID: 0009-0000-4093-2556



Сідельников Олександр Володимирович, Національний університет «Одеська політехніка», аспірант кафедри Програмних та комп'ютерно-інтегрованих технологій. Просп. Шевченка, 1, Одеса, Україна,
E-mail: o.sidelnykov@gmail.com, тел. +38-098-320-48-93

Sidelnykov Oleksandr, Odesa Polytechnic National University, PhD Student of the Department of Software and Computer-Integration Technology, Shevchenko Ave., 1, Odesa, Ukraine

ORCID ID: 0009-0003-0657-0215