

DOI 10.36074/logos-24.11.2023.34

ПОСТАНОВКА ОПТИМІЗАЦІЙНОГО ЗАВДАННЯ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ЗАСОБАМИ АСУ ТП

ORCID ID: 0000-0003-3986-0991

Оксана Борисівна Максимова

канд.техн.наук, доцент

*Інститут Військово-Морських Сил Національного університету
«Одеська морська академія»,*

ORCID ID: 0009-0004-2068-0290

Руслан Миколайович Рябошапка

аспірант

Національний університет «Одеська політехніка»

УКРАЇНА

Анотація: Для оцінки ефективності управління системою теплопостачання із змінюваною структурою було запропоновано критерій. Для розв'язання задачі оптимального управління використовувати комплексний критерій, який враховує надійність системи, якість управління, вартісний показник ресурсів та ефективність обладнання. Надійність визначається двома складовими ймовірностями раптових та зносових відмов. Якість перехідних процесів розраховується з використанням дисперсії відхилення поточної температури повітря в приміщенні від заданої на мінімальному інтервалі для поточного плану перемикавання обладнання. Ефективність обладнання обчислюється за енергетичним ККД.

Математична модель вибору оптимальної структури системи має додатковий аргумент план перемикавання технічних засобів за часом. В остаточній формі ураховуються зважування критеріїв цільова функція за рахунок вагових коефіцієнтів, які визначаються експертним методом.

Вступ. Від сучасних АСУТП потрібна надійна адаптація до зміни середовища їх використання з відсутністю або мінімізацією втручання оператора під час функціонування. Сучасний рівень розвитку теорії оптимального управління, теорії адаптивних систем і рівень досконалості АСУТП дозволяють розв'язати нове завдання управління технічними структурами, яке відрізняється за своєю надійністю, і ефективністю. Метою управління є підтримка оптимального співвідношення в системі максимальної ефективності обладнання, що використовується для мінімуму втрати надійності та ресурсів [1,2,3]. Необхідність удосконалення АСУТП при заданій ефективності та надійності визначає актуальність даної роботи.

Розв'язання завдань АСУТП може бути отримане шляхом використання взаємозамінного обладнання, яке працює незалежно одне від одного. Це робить доцільним об'єднання його в рамках єдиної системи для отримання оптимального співвідношення ефективності та надійності обладнання за рахунок постійної зміни структури технічних засобів.

Проведений аналіз показав, що під оптимальним керуванням АСУТП розуміється керування структурою регулятора та оптимізацією його поточних налаштувань. Аналіз літературно-патентних джерел показав, що дослідники у галузі автоматизації звернули увагу на завдання управління зміною структури ТЗ порівняно давно, на етапі класифікації автоматизованих систем, однак у

відкритій літературі не виявлено жодних моделей та методів управління структурою АСУТП для підвищення ефективності [1,2,3].

Аналіз досліджень. Аналіз доступних літературних джерел показав, що на практиці оцінка ефективності систем тепlopостачання, як правило, здійснюється за допомогою таких показників як: питома денна продуктивність (Дж), питома економія палива (т ум. топл./рік), коефіцієнт заміщення тепла (%), ККД, кількість теплоти, що зберігається (Дж/рік), річне вироблення теплоти (Дж) і т.п. [4,5].

У роботі [6] для оцінки ефективності управління системою тепlopостачання із змінюваною структурою було запропоновано критерій. Критерій є безрозмірною величиною і знаходиться між двома граничними значеннями, що характеризують максимальну та мінімальну ефективність управління процесом постачання енергії споживачеві для забезпечення заданої потреби. Він оцінює ефективність системи в інтегральній формі, яка може бути віднесена до добових, тижневих, сезонних та річних показників.

Очевидно, що подібні критерії для вирішення поставленого нами завдання не підходять. Для оцінки оптимальності управління необхідно використовувати комплексний критерій, який враховував би такі складові як: надійність системи $R(t)$, якість управління $Q(t)$, вартісний показник ресурсів $S(t)$ та ефективність обладнання $E(t)$.

Система енергопостачання складається з декількох технічних засобів, які можуть включатися та працювати незалежно один від одного. Розглянемо проміжок часу Δt , протягом якого структура системи змінюється. Протягом кожного з таких проміжків система може перебувати в одному із різних станів, які визначаються комбінацією включених або вимкнених технічних засобів, що характеризуються своїми техніко-економічними показниками, а саме $R(t)$ - ймовірністю відмови системи; $Q(t)$ - якістю підтримки заданої температури; $S(t)$ - вартістю енергоресурсів; $E(t)$ – ефективністю перетворення енергії. У двійковій системі обчислення розглянуті стани відповідають числам десяткової системи від 0 до 7. Якщо ж розглядати N інтервалів Δt , то отримаємо план перемикання обладнання, що складається з N станів системи. У двійковій системі обчислення план перемикання технічних засобів відповідає числам від 0 до 8^N десяткової системи. Завданням дослідження є вибір найкращого плану перемикання технічних засобів, який забезпечить найменшу вартість енергоресурсів та ймовірність відмови системи, а також найбільші показники ефективності обладнання та якості процесу тепlopостачання.

Мета та завдання дослідження. Метою роботи є удосконалення методів моделювання пошуку найкращого стану обладнання під управлінням АСУТП для підвищення ефективності за рахунок розробки цільової функції розв'язанням оптимізаційної задачі для об'єкта управління.

Основна частина. Розробка математичної моделі. На практиці надійність будь-якого елемента визначається двома складовими: ймовірністю раптових відмов та ймовірністю зносових відмов [6]. Випадкові відмови описуються експоненціальним законом, у якому надійність чи ймовірність безвідмовної роботи визначається як:

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

де λ – інтенсивність раптових відмов.

У загальному випадку:

$$\lambda = - \frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt} \quad (2)$$

Також для будь-якого закону розподілу має місце вираз:

$$\lambda = \frac{f(t)}{P(t)} \quad (3)$$

де $f(t) = -\frac{dP(t)}{dt}$ – щільність ймовірності відмов.

У період нормальної роботи для експоненційного закону інтенсивність відмов є незмінною величиною.

Коли настає, знос інтенсивність відмов починає зростати і до раптових відмов додаються зносові, які можуть бути представлені у вигляді нормальному закону розподілу.

$$P_H(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} e^{-(t-M)^2/2\sigma^2} dt \quad (4)$$

де M – середнє значення довговічності елемента з урахуванням зносу.

Стандартне відхилення від середньої довговічності визначається як:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(t-M)^2}{N}} \quad (5)$$

де N – число відмов за час t .

Спільна ймовірність безвідмовної роботи елемента з урахуванням раптових та зносових відмов у період від $t=0$, до часу t визначається виразом:

$$P(t) = e^{-\lambda t} P_H(t) \quad (6)$$

Формулу (6) можна використовувати лише тоді, коли елемент новий. Якщо елемент має якийсь напрацювання t_0 , то спільна ймовірність безвідмовної роботи визначається як:

$$P(t) = e^{-\lambda t} \frac{P_H(t_0+t)}{P_H(t_0)} \quad (7)$$

Хоча вираз (7) дозволяє визначити надійність елемента в будь-який момент часу, в рамках даного дослідження воно має низку недоліків. Так, наприклад, факт включення/вимкнення різного обладнання призводить до його форсованого зносу. Крім того, згідно з практичними спостереженнями [6], інтенсивність відмов суттєво залежить від зміни рівня навантаження елемента щодо її номінального значення. Коли навантаження елемента перевищує номінальне, спостерігається досить швидке зростання інтенсивності відмов. З іншого боку, інтенсивність відмов зменшується, коли навантаження стає нижчим за номінальний рівень.

Також добре відомо, що на роботу елементів суттєво впливають параметри довкілля. Ступінь опірності елементів впливам із боку довкілля можна умовно назвати «міцністю» [6]. «Міцність» елемента означає не тільки його опір механічним навантаженням, вібраціям, ударам, тиску або прискорення. До категорії міцності належать також: опір тепловим навантаженням, електрична міцність, вологостійкість, корозійностійкість, стійкість до випромінювань і т.д. Тому очевидно, що міцність елемента може бути виражена деякою числової величиною.

На практиці генеральну сукупність елементів піддають впливу робочого навантаження та визначають кількість елементів, що відмовили протягом

заданого періоду роботи. У результаті оцінка інтенсивності відмов елемента для заданого рівня навантаження. Далі можна по одному змінювати деякі параметри навколишнього середовища, наприклад збільшувати або зменшувати електричну напругу або температуру і повторювати весь експеримент в нових умовах. При цьому отримують інформацію про характер зміни інтенсивності відмов елементів, що розглядаються, від величини прикладеної напруги або температури навколишнього середовища. Таким чином, інтенсивність відмов замінює точну міру міцності елемента.

Оскільки описані фактори впливають насамперед на інтенсивність відмов, для моделювання надійності доцільно замість виразу (7) використовувати вираз:

$$P(t) = e^{-\int_T^{T+t} \lambda dt} = e^{-\lambda_B t + \int_T^{T+t} \lambda_i dt} \quad (8)$$

де λ_B – інтенсивність раптових відмов; λ_i – інтенсивність зносних відмов.

Для визначення інтенсивності зносних відмов можна скористатися наступним підходом. З формули (3) у випадку інтенсивність відмов визначається як $\lambda = f(t)/P(t)$. Розглянемо випадок нормального розподілу. Тоді інтенсивність зносних відмов дорівнюватиме:

$$\lambda_i = \frac{f(t)}{P_i(t)} = \frac{\varphi(t)}{\sigma P_i(t)} = \frac{r(t)}{\sigma} \quad (9)$$

Розглянемо тепер таку ситуацію. В ході імітаційного моделювання надійності елемента на черговій ітерації поточний час роботи було збільшено на деякий крок t , а потім за формулою (8) було визначено значення поточної інтенсивності зношування. Припустимо, що на ітерації, що розглядається, елемент був включений або вимкнений, що повинно було призвести до його підвищеного зносу. Тоді для моделювання підвищеного зносу достатньо додати до поточного часу елемента деяку величину t_i відповідну величину зменшення ресурсу елемента при його включенні/вимиканні. Залежність (1) відповідає теоретичній зміні надійності для раптових відмов. Залежність (4) визначає зміну надійності при зносі.

Надалі у вираз (9) були додані поправочний коефіцієнт на поточну робочу потужність $K_{\text{мощ}}(N_{\text{пр}})$ та поправочний коефіцієнт на параметри навколишнього середовища $K_{\text{ос}}(x_{\text{пр}})$:

$$\lambda_i = \frac{r(t)}{\sigma} K_{\text{мощ}}(N_{\text{пр}}) K_{\text{ос}}(x_{\text{пр}}) \quad (10)$$

де $N_{\text{пр}}$ – робоча потужність; $x_{\text{пр}}$ – параметр навколишнього середовища (температура, частота, вологість і т.д.).

$$N_{\text{пр}} = \frac{N}{N_{\text{ном}}}; \quad x_{\text{пр}} = \frac{x}{x_{\text{ном}}}.$$

де N – поточна робоча потужність; $N_{\text{ном}}$ – номінальна робоча потужність; x – поточне значення параметра навколишнього середовища; $x_{\text{ном}}$ – номінальне значення параметра навколишнього середовища.

Для використання електричних та електронних елементів

$$K_{\text{мощ}} = 0.0375e^{3.2842N_{\text{пр}}} \quad (11)$$

$$K_{\text{ос}} = 0.8583e^{0.4706e^{(1.5205t_{\text{пр}})-2}} \quad (12)$$

де $t_{\text{пр}}$ – температура навколишнього середовища.

При визначенні надійності всієї системи в цілому необхідно пам'ятати, що при послідовному з'єднанні компонентів n надійність визначається як:

$$P_{\text{посл}}(t) = P_1(t) * P_2(t) * \dots * P_n(t), \quad (13)$$

а при паралельному:

$$P_{\text{пар}}(t) = 1 - (1 - P_1(t)) * (1 - P_2(t)) * \dots * (1 - P_n(t)). \quad (14)$$

Так як надалі розглядатиметься завдання мінімізації, то складова $R(t)$ описує ймовірність відмови обладнання $R(t) = 1 - P(t)$. Враховуючи, що система складається з трьох теплогенеруючих технічних засобів, з'єднаних паралельно, ймовірність відмови системи теплогенеруючого обладнання для поточного плану x перемикання обладнання має вигляд:

$$R(x; t) = \prod_{i=1}^3 (1 - P(t_i)), \quad (15)$$

де: $P(t_i)$ – ймовірність безвідмовної роботи i -ої одиниці обладнання для поточного плану перемикання обладнаннях наприкінці заданого інтервалу часу $\Delta\tau \cdot N$, а t_i – загальний час роботи цієї одиниці обладнання на інтервалі часу $[t_0; t]$.

$P(t_i)$ обчислюється за такою формулою (8). У цьому враховується, кожен елемент системи має деяку напрацювання t_0 , тому $P(t_i) \neq 0$.

Вартісний показник ресурсів $S(x; t)$ для поточного плану x перемикання обладнання визначається:

$$S(x; t) = \sum_{i=1}^k G_i S_i, \quad (16)$$

де: k – кількість первинних ресурсів, що використовуються; G_i – витрата i -го ресурсу на розглянутому інтервалі часу $\Delta\tau \cdot N$; S_i – вартість i -го ресурсу.

Якість перехідних процесів, тобто характер їхнього протікання чисельно характеризується часом і коливальністю перехідного процесу, і навіть максимальним відхиленням у перехідний період. Такі величини якості АСУТП, що оцінюють параметри завершеного перехідного процесу, тут мало інформативні, оскільки система, що розглядається, весь час знаходиться в незавершеному перехідному режимі. У цьому випадку доцільним є використання дисперсії $D(x; t)$ відхилення поточної температури повітря в приміщенні від заданої на мінімальному інтервалі для поточного плану x перемикання обладнання визначається:

$$Q(x; t) = D(x; t). \quad (17)$$

Ефективність обладнання $E(t)$ була обчислена за енергетичним ККД із наступною модифікацією. Використання в технічній системі різних фізичних принципів отримання теплової енергії не дозволяє застосувати для оцінки $E(t)$ звичайний коефіцієнт корисної дії. Перевагою ККД є його значення, що належить до інтервалу (0;1). Для приведення до рівності якості різних енергоносіїв (газ, електроенергія), що розглядаються, було прийнято використовувати для оцінки ефективності обладнання $E(t)$ енергетичний ККД η_s з урахуванням поправки Карно для приведення енергоносіїв що надходять в систему і виходять із системи до однієї якості енергетичної продукції.

У разі газового котла ККД з поправкою визначається як:

$$\eta_{\text{э}}^{\text{к}} = \eta_{\text{э}} * \left(1 - \frac{T_{\text{oc}}}{T_{\text{т}}}\right), \quad (18)$$

де $\eta_{\text{э}}$ – енергетичний ККД котла; T_{oc} – температура навколишнього середовища, К; $T_{\text{т}}$ – температура теплоносія на виході з котла, К.

Якщо обладнання працює в режимі тепlopостачання, то $\eta_{\text{э}}$ визначається як:

$$\eta_{\text{э}}^{\text{ТНУ}} = \frac{Q_{\text{к}} * \left(1 - \frac{T_{\text{oc}}}{T_{\text{к}}}\right)}{N_{\text{комп}} * \Delta\tau}, \quad (19)$$

де $Q_{\text{к}}$ – кількість теплоти, що виділяється на конденсаторі ТНУ на інтервалі часу, що розглядається $\Delta\tau$, Дж; $T_{\text{к}}$ – температура фреону в конденсаторі, К; $N_{\text{комп}}$ – потужність компресора, Вт.

Якщо обладнання працює в режимі холодopостачання, то $\eta_{\text{э}}$ визначається як:

$$\eta_{\text{э}}^{\text{ТНУ}} = \frac{Q_{\text{и}} * \left(\frac{T_{\text{к}}}{T_{\text{oc}}} - 1\right)}{N_{\text{комп}} * \Delta\tau}, \quad (20)$$

де $Q_{\text{и}}$ – питома кількість енергії, що виділяється у випарнику, Дж;

Ефективність системи тепlopостачання обчислюється з урахуванням вхідних $E^{\text{вх}}$ та вихідних $E^{\text{вих}}$ потоків енергії: $\eta_{\text{э}}(t) = \sum_{i=1}^N E_i^{\text{вих}} / \sum_{i=1}^N E_i^{\text{вх}}$

Так як надалі розглядатиметься завдання мінімізації, то складова ефективності системи енергopостачання для поточного плану хперемикання обладнання є величиною втрат енергії і має вигляд:

$$E(x; t) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^2 (Q_i^{\text{к}}(t) * \eta_{\text{э}}^{\text{к}}) + Q^{\text{ТНУ}}(t) * \eta_{\text{э}}^{\text{ТНУ}}}{\sum_{i=1}^2 (G_i^{\text{газ}}(t_i) * t_i * Q_{\text{п}}^{\text{н}}) + N(t_{\text{ТНУ}}) * t_{\text{ТНУ}} / 0,4}, \quad (21)$$

де $Q_i^{\text{к}}(t)$ – теплова енергія, що надходить від i -го котла для тепlopостачання, Дж; $Q^{\text{ТНУ}}(t)$ – теплова енергія для тепlopостачання, Дж; t_i – час роботи i -го котла на інтервалі $[t_0; t]$, с; $G_i^{\text{газ}}(t_i)$ – витрата газу при роботі i -го котла за час t_i , кг / с; $Q_{\text{п}}^{\text{н}}$ – теплотворна здатність газу, Дж/кг; $t_{\text{ТНУ}}$ – час роботи на інтервалі $[t_0; t]$, с; $N(t_{\text{ТНУ}})$ – потужність, Вт.

Отримані результати. Так як складові цільової функції оптимізаційної задачі можуть відрізнятися за абсолютною величиною на кілька порядків і мають різну фізичну природу, очевидно, необхідно провести їх нормування. Крім того, для більшої гнучкості процесу управління пропонується провести зважування складових.

Для визначення нормованого значення надійності прийнято, що максимальне значення ймовірності відмови одиниці устаткування становить 0,05. Якщо ця можливість стає вищою, обладнання необхідно зупинити і виводити в ремонт. Тому нормована величина визначається як:

$$R_{\text{н}}(x; t) = \frac{\prod_{i=1}^3 (1 - P(t_i))}{r_{\text{max}}^3},$$

де r_{max} – максимальне значення ймовірності відмови одиниці обладнання.

Для вартісної оцінки ресурсів $S(x; t)$ за норму було прийнято вартість ресурсів S_{max} витрачаються функціонування системи за умови, що це устаткування працювало, не вимикаючись, весь аналізований інтервал часу $[t_0; t]$. При цьому нормоване значення $S_{\text{н}}(x; t)$ визначається як:

$$S_H(x; t) = \frac{S(x; t)}{S_{max}}$$

Якість забезпечення заданої температури повітря в приміщенні має розмірність ($^{\circ}\text{C}$). Тому нормоване її значення має вигляд:

$$Q_H(x; t) = Q(x; t)/1^{\circ}.$$

Оскільки складова енергетичної ефективності – безрозмірна величина, то

$$E_H(x; t) = E(x; t).$$

Складемо математичну модель завдання вибору оптимальної структури системи. Введемо дискретну функцію, аргументами якої є плани перемикання технічних засобів x протягом t . В остаточній формі з урахуванням зважування цільова функція набуває вигляду:

$$J(x; t) = \sqrt{w_r R_H^2(x; t) + w_q Q_H^2(x; t) + w_s S_H^2(x; t) + w_e E_H^2(x; t)}$$

де w_r, w_q, w_s, w_e – вагові коефіцієнти, які визначаються експертним методом. Дані коефіцієнти вводяться задля забезпечення гнучкості процесу управління.

Таким чином маємо задачу оптимізації функції двох змінних, які належать до класу задач дискретного програмування:

$$J(x; t) \rightarrow \min_{x \in X, t \in T}. \quad (22)$$

Розв'язуючи запропоновану оптимізаційну задачу за допомогою імітаційних моделей технологічного процесу енергозабезпечення, можна отримати найкращу структуру при перемиканні обладнання.

Висновки. Запропоновано оптимізаційне завдання для оптимального управління системою енергопостачання за допомогою АСУТП із змінюваною структурою технічних засобів, яка поєднує в собі такі фактори як якість процесу підтримки заданої температури, ефективність устаткування, що використовується, його надійність, та вартість ресурсів, що дозволяє комплексно оцінювати процес функціонування системи на основі технологічних та економічних показників.

Список використаних джерел:

- [1] Maksimova OB Control of Heat Supply System with Structural Changeable Hardware [Текст] / OB Maksimova, VO Davydov, SV Babych // International Scientific Technical Journal «Problems of Control and Informatics». - 2014. - v.46, i.6. – P.37–48.
- [2] Maksymov M. Improvement of the control system over drum boilers for burning combustible artificial gases [Текст] / M. Maksymov, V. Lozhechnikov, O. Maksymova, O. Lysiuk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – 4/8 (88) – P.10–16.
- [3] Babich SV Objective function for municipal heat supply system's structural optimization / S.V Babich, V.O. Давидов // Пр. Одеса . нац . політехн . ун-ту. – Одеса, 2015. – Вип . 1 (45). - С. 134 - 140.
- [4] Боличевцев А.Д. Локальні критерії якості систем контролю та управління безперервним виробництвом / Боличевцев А.Д., Бистрицька Л.Б., Любімова Н.А. // Автоматика. Автоматизація. Електричні комплекси та системи. - 1999. - № 2. - С. 85 - 90.
- [5] Шинський Ф. Управління процесами за критеріями економії енергії. М: Світ, 1981. 373с.
- [6] Гнеденко, Б.В. Математичні методи теорії _ надійності / Гнеденко Б.В., Беляєв Ю.К., Соловйов А.Д. - М.: Наука, 1965. - 524 с.