

О. В. ЄФІМОВ, Л. І. ТЮТЮНИК, В. Л. КАВЕРЦЕВ, Т. А. ГАРКУША, А. В. МОТОВІЛЬНИК, П. В. ЛІФШИЦЬ

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ І ПІДХОДІВ ДО МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕНЕРГЕТИЧНОМУ УСТАТКУВАННІ ЕНЕРГОБЛОКІВ ТЕС І АЕС

У матеріалах статті розглянуті класифікація сучасних методів системного аналізу, основні положення теорії і засобів математичного моделювання технологічних процесів в енергетичному устаткуванні, що призначені для автоматизованого управління складними теплоенергетичними системами. Розглянуті методи і підходи до математичного моделювання та оптимізації параметрів технологічних процесів в енергоблоках теплових (ТЕС) та атомних електростанцій (АЕС).

Ключові слова: енергоблоки ТЕС та АЕС, математичне моделювання, оптимізація параметрів.

A. V. EFIMOV, L. I. TIUTIUNYK, V. L. KAVERTSEV, T. A. GARKUSHA, A. V. MOTOVILNIK, P. V. LIFSHITS

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ И ПОДХОДОВ К МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ И ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ ЭНЕРГОБЛОКОВ ТЭС И АЭС

В материалах статьи рассмотрены классификация современных методов системного анализа, основные положения теории и способы математического моделирования технологических процессов в энергетическом оборудовании, предназначенные для автоматизированного управления сложными теплоэнергетическими системами. Рассмотрены методы и подходы к математическому моделированию и оптимизации параметров технологических процессов в энергоблоках тепловых (ТЭС) и атомных электростанций (АЭС).

Ключевые слова: энергоблоки ТЭС и АЭС, математическое моделирование, оптимизация параметров.

O.V. EFIMOV, L.I. TIUTIUNYK, V. L. KAVERTSEV, T. A. HARKUSHA, A. V. MOTOVILNIK, P. V. LIFSHITS

ANALYSIS MODERN METHODS AND APPROACHES TO SIMULATION MODELING OPTIMIZATION OF PROCESS PARAMETERS IN POWER EQUIPMENT THERMAL POWER PLANTS AND NUCLEAR POWER PLANTS

The materials of the article consider the classification of modern methods of system analysis, the main provisions of the theory and means of mathematical modeling of technological processes in power equipment, designed for automated control of complex thermal power systems. To consider methods and approaches to mathematical modeling and optimization of process parameters in TPP (thermal power plants) and NPP (nuclear power plants) power units. Modern steam turbine power units of thermal and nuclear power plants are complex technical, thermal power systems. Complex thermal power system is a set of interconnected and interacting elements and subsystems of different technological purposes, which form an inseparable whole, providing the system of some complex function in the form of electricity and heat production and which are described by a rather complex mathematical model. The theory of system analysis and mathematical modeling is widely used to select the structures and parameters of the technological processes of power units. Analysis of literature sources on the existing methods of mathematical modeling and selection criteria, schemes of technological processes and approaches to creating mathematical models of the functional state of steam turbine power units, showed the need to improve them to take into account operational reliability.

Keywords: TPP and NPP power units, mathematical modeling, and parameter optimization.

Вступ.

Сучасні паротурбінні енергоблоки теплових і атомних електростанцій є складними технічними (теплоенергетичними) системами. До характерних особливостей таких систем можна віднести:

- велику кількість взаємозв'язаних між собою елементів і підсистем;
- складність функцій, що виконуються системою і які направлені на досягнення мети її функціонування;
- багатомірність системи, що обумовлена наявністю великого числа зв'язків між підсистемами;
- взаємодію системи із зовнішнім середовищем і функціонування в умовах дії випадкових чинників;
- наявність багатьох критеріїв оцінки якості функціонування системи і її окремих підсистем;
- різноманіття структури системи,

обумовлене як різноманітністю структур її підсистем, так і різноманітністю структур об'єднання підсистем в єдину систему;

- наявність управління, що часто має ієрархічну структуру, а також розгалуженність інформаційної мережі і інтенсивних інформаційних потоків;
- різноманіття різних фізико-хімічних процесів, що протікають в окремих підсистемах;
- велику розмірність і складність математичної моделі системи, що обумовлює необхідність застосування для її дослідження сучасних методів декомпозиції, макромодельовання, імітаційного моделювання і інших;

© Єфімов О.В., Тютюник Л.І., Каверцев В.Л., Гаркуша Т.А., Мотовільник А.В., Ліфшиць П.В., 2020

- існування інтеграційних ознак, які властиві системі в цілому, але не властиві кожному її елементу окремо (наприклад, резервована система надійна, а її елементи можуть бути ненадійними);

- відсутність у цілому ряді випадків можливості отримання достовірної інформації про властивості системи в цілому в результаті вивчення властивостей її окремих елементів.

Таким чином, складна теплоенергетична система представляє собою безліч взаємозв'язаних і взаємодіючих між собою елементів і підсистем різного технологічного призначення, які складають нероздільне ціле, що забезпечують виконання системою деякої складної функції у вигляді виробництва електричної і теплової енергії і які описуються достатньо складною математичною моделлю.

Огляд і класифікація сучасних методів системного аналізу, основних положень теорії і засобів математичного моделювання технологічних процесів в енергетичному устаткуванні, що призначені для автоматизованого управління складними теплоенергетичними системами.

Теплоенергетична система, як правило, має просторову або функціональну замкнутість. Це означає, що можна провести межу або в просторі компонент цієї системи, або в просторі її функцій, по одну сторону від якої опиниться система, а по іншу – зовнішнє середовище. Ці дві властивості системи не є взаємовиключними.

У більшості тих випадків, коли система задається по просторових ознаках, одночасно проводиться структуризація системи. Під структуризацією зазвичай розуміється виділення в системі двох типів об'єктів – багатьох елементів і багатьох зв'язків і встановлення співвідношень між ними. Найчастіше структура теплоенергетичної системи, тобто фіксована сукупність елементів і зв'язків між ними, відображається у формі технологічного графа, а зв'язки – дугами графа [1–2].

Розчленування системи на елементи є одним з перших кроків при побудові її формального опису, тобто математичної моделі. При цьому елемент виступає як об'єкт, який при даному розгляді складної системи не підлягає подальшому розбиттю на частини. Підсистема представляє собою сукупність елементів. Формально, будь-яку сукупність елементів теплоенергетичної системи з їх зв'язками можна розглядати як підсистему. Проте використання цього поняття найбільш поширене в тому випадку, якщо підсистема є достатньо самостійною частиною складної теплоенергетичної системи, а мета її функціонування підпорядкована загальній меті функціонування всієї системи.

Процес декомпозиції складних теплоенергетичних систем, тобто розбиття їх на окремі технологічні системи, зазвичай не є формалізованими і носить, як правило, евристичний характер. Тому, правильна

декомпозиція складної теплоенергетичної системи дозволяє спростити і полегшити її аналіз.

Теплоенергетичні системи, як і інші складні технічні системи, описуються шляхом визначення їх функцій і структур. Функції системи можуть описуватися з різним ступенем деталізації. Для їх опису, зазвичай, використовуються теорія множин, алгоритмів, випадкових процесів, інформації і інші методи.

Як вже наголошувалося, складні теплоенергетичні системи функціонують в умовах дії великої кількості випадкових чинників, які можуть бути як зовнішніми, так і внутрішніми, і які необхідно враховувати при математичному моделюванні в різних задачах досліджень.

Відомо, що найважливішими задачами дослідження складних технічних систем за допомогою математичного моделювання є задачі синтезу, які полягають в знаходженні структури і визначальних параметрів системи по заданих її властивостях, і задачі аналізу, при вирішенні яких по відомій структурі і відомим параметрам системи визначається її поведінка, тобто досліджуються властивості системи і її характеристики [3]. Задачі синтезу найчастіше вирішуються з використанням результатів вирішення задач аналізу.

Залежно від специфіки зв'язків характеристик стану теплоенергетичної системи з її параметрами розрізняють такі математичні моделі:

- детерміновані моделі, в яких в заданий момент часу характеристики стану однозначно визначаються через параметри, що задаються;

- імовірнісні (стохастичні) моделі, в яких за допомогою математичних співвідношень можна визначити розподіли характеристик стану системи по заданих імовірнісних характеристиках (розподілам) її параметрів.

За ознакою використання для різних цілей дослідження математичні моделі теплоенергетичних систем підрозділяються на аналітичні і імітаційні моделі [3].

Повна математична модель функціонування теплоенергетичної системи зазвичай є дуже складною, нелінійною і вимогливою до ресурсів обчислювальної техніки. Тому часто для вирішення конкретних задач досліджень застосовують такі методи спрощення або самої системи, або моделі:

- розчленування складної системи на ряд простіших підсистем (метод декомпозиції);

- виділення в системі найбільш істотних властивостей і дій на них в параметричній формі (метод макромоделювання);

- лінеаризацію нелінійних моделей в деякій області зміни змінних методом малих відхилень (метод лінеаризації);

- приведення систем з розподіленими параметрами до систем із зосередженими параметрами;

- зневажа динамічними властивостями технологічних процесів в системі.

Удосконалення теорії імітаційного моделювання та оптимізації складних теплоенергетичних систем, розробка нових методів і підходів до імітаційного моделювання та оптимізації параметрів технологічних процесів в енергетичному устаткуванні різного призначення.

Теорія системного аналізу і математичного моделювання широко використовується для вибору структур і параметрів схем технологічних процесів енергоблоків електростанцій [3-4]. У цих роботах при оптимізації структур і параметрів схем як цільові функції, що оптимізуються, використовуються електрична потужність і теплова економічність енергоблоків. Проте показники надійності схем технологічних процесів не враховуються.

В роботі [5] описані основи методики оптимізації параметрів базових і маневрених теплових енергоблоків, включаючи методику розрахунку техніко-економічної ефективності. Встановлюється необхідність введення поняття потужності, що заміщається, по відпустці енергії при порівнянні варіантів схем технологічних процесів енергоблоків під час експлуатації. При оптимізації параметрів енергоблоків одноцільового призначення застосовують різні способи зіставлення варіантів і приведення їх до рівного енергетичного ефекту: при постійній електричній потужності енергоблоку, при незмінній витраті свіжої пари, при заданому пропуску пара в конденсатор та інші. У всіх цих випадках сумарна відпустка електроенергії споживачам розглядається незмінною.

Для варіантів, що відрізняються відпусткою електроенергії, критерієм термодинамічної ефективності служить витрата палива B_c^* у умовній системі, що складається з даного і того, що заміщується, енергоблоків (покриваючої небаланс відпустки електроенергії в енергосистемі):

$$B_c^* = B + (E_c^* - E) \cdot b_{зам} = B - E \cdot b_{зам} + const,$$

де B – річна витрата палива на енергоблок;

E_c^* , E – річне споживання електроенергії відповідно в даній енергосистемі і що генерується енергоблоком, який оптимізується;

$b_{зам}$ – питома витрата палива на енергоблоці, що заміщається.

Оптимальні значення параметрів технологічних процесів за кожних умов експлуатації (при постійній потужності, при постійній витраті свіжої пари і тому подібне) виходять різними; вони часто істотно відрізняються один від одного і не враховують показників надійності.

Робота [2] присвячена застосуванню теорії систем і методів математичного моделювання до оцінки функціонального стану турбоустановок ТЕС і АЕС під час експлуатації. Структура турбоустановки представляється технологічним графом G_T , а її

математична модель в загальному випадку задається у вигляді:

$$\{\Omega(\chi) | \varphi_i(\chi) = 0, \chi \in M_s, i = \overline{1, s}\},$$

де Ω , φ_i – математичні співвідношення, що описують якість установки як системи і технологічні процеси, що відбуваються в ній, і що складаються з рівнянь, нерівнянь, логічних умов, таблиць;

i – номер відношення;

s – кількості відношень математичної моделі;

$\chi = X, Y, G, \lambda, W$ – інформаційна структура моделі, у якій: X – вектор незалежних змінних; Y – вектор залежних змінних; λ – вектор зовнішніх умов функціонування установки; W – вектор глибини (деталізації) моделювання;

M_s – область можливих станів елементів установок.

Технологічне устаткування турбоустановки відображається у вигляді вузлів графа. Орієнтація дуг графа збігається з напрямками руху робочих тіл теплоносіїв і передачі механічної, теплової і електричної енергії в технологічних зв'язках турбоустановки.

Розроблена та удосконалена в [3,4] імітаційна модель теплоенергетичної установки включає розвинену систему логіко-числових операторів: збереження кількості речовини; тиску; термодинамічних параметрів; збереження енергії; ККД турбоустановки; теплової ефективності. Ця модель, яка реалізована у вигляді програмно-математичного комплексу, дозволяє проводити чисельний експеримент для визначення функціонального стану турбоустановок різних типорозмірів в широких діапазонах зміни потужності, початкових і кінцевих параметрів пари, структури і технологічних умов роботи. З її допомогою вирішуються основні типи задач дослідження структури і параметрів теплоенергетичних установок: X_{var} , G_{const}^T , A_{const} , W_{const} – числова (параметрична) варіація; X_{const} , G_{var}^T , A_{const} , W_{const} – структурна варіація; X_{var} , G_{var}^T , A_{const} , W_{const} – структурно-параметрична варіація; X_{const} , G_{const}^T , A_{var} , W_{const} – варіація зовнішніх параметрів і зв'язків; X_{const} , G_{const}^T , A_{const} , W_{const} – зміна глибини (деталізації) моделювання.

На підставі вищеперелічених типів можуть бути вирішені наступні задачі досліджень по оптимізації структур і параметрів паротурбінних теплоенергетичних установок: аналізу, синтезу, ідентифікації, управління, розподілу, навантажень. Проте питання впливу показників надійності на оптимальні структури і параметри паротурбінних установок авторами не розглядаються.

У роботі [6] на основі методу системного аналізу розроблені схеми технологічних процесів енергоблоків, що забезпечують під час експлуатації раціональний розподіл електричних навантажень між декількома турбоагрегатами електростанцій з

урахуванням дроселювання пари в клапанах. При цьому, як указують автори, можливе отримання економії палива близько 0,2-0,3 % від сумарної витрати палива. Проте при цьому не враховуються властивості надійності турбоагрегатів і відповідно вірогідності аварій, які можуть привести до порушення нормативних вимог по забезпеченню безпеки.

У роботі [7] вирішується задача вибору експлуатаційних схем технологічних процесів енергоблоків, що дозволяють оптимально розподіляти теплові і електричні навантаження між турбінами могутніх опалювальних ТЕЦ, - по оптимальному плану навантаження з метою економії первинних джерел тепла. При цьому оптимум досягається за рахунок зміни технологічних параметрів, значення яких не пов'язано з обмеженнями, обумовленими показниками надійності.

Автори роботи [5, 7] указують, що оптимізація розподілу теплових і електричних навантажень між паралельно працюючими агрегатами електростанції є складною задачею структурно-параметричного аналізу, що важко вирішується. Ці труднощі обумовлені необхідністю визначення структур технологічних схем установок і їх показників заміщення відпустки теплової і електричної енергії при варіюванні тепловим і електричним навантаженням. При постійній відпустці енергії для оптимізації цільової функції автори пропонують використовувати функцію Лагранжа, в якій невизначені множники Лагранжа наділяються властивістю забезпечувати приведення порівнюваних варіантів до рівного енергетичного ефекту.

Окрім перерахованих, питанням вибору схем технологічних процесів, що забезпечують оптимальний розподіл навантажень між енергоблоками теплових і атомних електростанцій під час експлуатації, присвячені також роботи [8, 9, 10], в яких задачі підвищення теплової ефективності енергоблоків і станцій в цілому вирішуються без урахування надійності.

В той же час, у цілому ряді робіт, зокрема, в [11, 12, 13] і інших, розглянута необхідність обліку показників надійності при виборі схем технологічних процесів теплоенергетичних об'єктів, оскільки сучасні системи автоматизованого управління енергоблоками ТЕС і АЕС передбачають, що системи автоматизованого управління енергоблоками повинні забезпечувати їх високу теплову економічність на тривалому інтервалі експлуатації в нерозривному зв'язку з показниками надійності.

Висновки та перспективи подальшого розвитку даного напрямку.

Таким чином, аналіз літературних джерел, присвячених існуючим методам математичного моделювання і критеріям вибору схем технологічних процесів і підходів до створення математичних моделей функціонального стану паротурбінних

енергоблоків, показав необхідність їх удосконалення у напрямі врахування показників надійності експлуатації.

Список літератури

1. Кристофидес Н. Теория графов / Н.Кристофидес. – М.: Мир, 1978. – 432 с.
2. Палагин А.А. Моделирование функционального состояния и диагностика турбоустановок / А.А. Палагин, А.В. Ефимов, Е.Д. Меньшикова. – Киев: Наук. думка, 1991. – 192 с.
3. Єфімов О.В. Конструкції, матеріали, процеси і розрахунки реакторів і парогенераторів АЕС: навч. посібник / О.В. Єфімов, М.М. Пилипенко. – Харків: Видавництво «Підручник НТУ «ХПІ», 2010. – 268 с.
4. Реактори і парогенератори енергоблоків АЕС: схеми, процеси, матеріали, конструкції, моделі / О.В. Єфімов, М.М. Пилипенко, Т.В. Потаніна та ін.: за ред. О.В. Єфімова. – Харків: ТОВ «В справі», 2017. – 420 с.
5. Аминов Р.З. Градиентный метод распределения нагрузок на ТЭЦ с использованием множителей Лагранжа / Р.З. Аминов, В.З. Аминов // Известия вузов СССР. Энергетика. 1979. – №2. – С. 106–109.
6. Бунин В.С. Исследование и оптимизация режимов работы теплофикационной установки АЭС / В.С. Бунин, М.К. Васильев, А.А. Кудрявцев // Теплоэнергетика. 1980. – №2. – С.10–14.
7. Гельтман А.Э. Эффективность теплоснабжения из нерегулируемых отборов конденсационных турбин насыщенного пара / А.Э. Гельтман, Н.И. Шапиро // Энергетика. 1982. – №1. – С. 38–44.
8. Совершенствование и оптимизация моделей, процессов, конструкций и режимов работы энергетического оборудования АЭС, ТЭС и отопительных котельных / под ред. А.В. Ефимова. – Х.: Изв-во «Підручник НТУ «ХПІ», 2013. – 376 с.
9. Gluch J. The analysis of performance of the turbine condenser with the prognosis of repair / J.Gluch, A. Gardzilewicz // The 1998 international joint power generation conference. – Baltimore, Maryland (USA). 1998. – Aug. 23-26. – V. 2, – pp. 46–51.
10. Горелик А.Х. Развитие и модернизация автоматизированных систем управления энергоблоками ТЭС и АЭС / А.Х. Горелик, М.А. Дуэль, В.А. Орловский // Новини енергетики. 2000. – №11. – С. 30–36.
11. Артюх С.Ф. Автоматизированные системы управления энергогенерирующими установками электростанций / С.Ф. Артюх, М.О. Дуэль, И.Г. Шелепов. – Харьков: Знание, 2000. – 429 с.
12. Артюх С.Ф. Автоматизированные системы управления технологическими процессами в энергетике / С.Ф. Артюх, М.О. Дуэль, И.Г. Шелепов. – Харьков: Знание, 2001. – 483 с.
13. Артюх С.Ф. Электрические станции, сети и системы / С.Ф. Артюх, Т.А. Пантелеева. – Харьков: Знание, 2001. – 366 с.

References (transliterated)

1. Christofides N. Theory of graphs / N. Christofides. – M. : Mir, 1978. – 432 p.
2. Palagin A.A. Modeling the functional state and diagnostics of turbine installations / A.A. Palagin, A.V. Yefimov, E. D. Menshikova. – Kiev: Nauk. Dumka, 1991. – 192 p.
3. Yefimov O.V. Constructions, materials, processes and calculations of reactors and steam generators of NPPs: textbook. manual / O.V. Yefimov, M.M. Pilipenko. – Kharkiv: Publishing House "Textbook of NTU "KhPI", 2010. – 268 p.
4. Reactors and steam generators of NPP power units: schemes, processes, materials, structures, models / O.B. Yefimov, M.M. Pilipenko, T.V. Potanina et al. : ed. O.V. Yefimova. – Kharkiv: LLC "In the case", 2017. – 420 p.
5. Aminov R.Z. Gradient method of load distribution at CHP plants using Lagrange multipliers / R.Z. Aminov, V.Z. Aminov // Izvestiya vuzov USSR. Energy. - 1979. - No. 2, –pp. 106–109.
6. Bunin V.S. Investigation and optimization of operating modes of a cogeneration plant of a nuclear power plant / V.S. Bunin, M.K. Vasiliev, A.A. Kudryavtsev // Thermal Engineering. 1980. – No. 2, – pp.10–14.
7. Geltman A.E. Efficiency of heat supply from unregulated extraction of condensing turbines of saturated steam / A.E. Geltman, N.I. Shapiro // Energy. 1982. – No. 1, – pp. 38-44.
8. Improvement and optimization of the model, processes, designs and operating modes of the power equipment of nuclear power plants, thermal power plants and heating boilers / ed. O.V. Yefimov. – Kharkov: Publishing house «Textbook of NTU «KhPI», 2013. – 376 p.
9. Gluch J. The analysis of performance of the turbine condenser with the prognosis of repair / J.Gluch, A. Gardzilewich // The 1998 international joint power generation conference. – Baltimore, Maryland (USA). 1998. – Aug. 23-26. – V. 2, – pp. 46–51.
10. Gorelik A.Kh. Development and modernization of automated control systems for power units of TPP and NPP / A.Kh. Gorelik, M.A. Duel, V.A. Orlovsky // News of Energy. 2000. – No. 11, pp. 30–36.
11. Artyukh S.F. Automated control systems for power generating plants of power plants / S.F. Artyukh, M.O. Duel, I.G. Shelepov. – Kh.: Knowledge, 2000. – 429 p.
12. Artyukh S.F. Automated control systems for technological processes in power engineering / S.F. Artyukh, M.O. Duel, I.G. Shelepov. – Kharkov: Knowledge, 2001. – 483 p.
13. Artyukh S.F. Electric stations, networks and systems / S.F. Artyukh, T.A. Panteleeva. – Kharkov: Knowledge, 2001. – 366 p.

Надійшла (received) 19.10.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Єфімов Олександр Вячеславович (Efimov Aleksandr Vyacheslavovich) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри парогенераторобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна;

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3300-7447>;

e-mail: AVEfimov22@gmail.com

Тютюник Лариса Іванівна (Tyutyunik Larisa Ivanivna) – кандидат технічних наук, доцент кафедри парогенераторобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна;

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3128-497X>;

e-mail: lara.tyutyunik@gmail.com

Каверцев Валерій Леонідович (Kavertsev Valery Leonidovich) – кандидат технічних наук, доцент кафедри парогенераторобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна;

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9472-1658>;

e-mail: kavertseff@gmail.com

Гаркуша Тетяна Анатоліївна (Harkusha Tetyana Anatoliivna) – науковий співробітник кафедри парогенераторобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна;

e-mail: lara.tyutyunik@gmail.com

Мотовільник Анастасія Вадимівна (Motovilnik Anastasiia Vadimovna) – аспірантка, кафедра парогенераторобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна;

e-mail: Nastya.motov@gmail.com

Ліфшиць Петро Володимирович (Lifshits Petro Volodimirovich) – студент, кафедра парогенераторобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна;

e-mail: lara.tyutyunik@gmail.com