

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
„ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Адель Мохаммед Р. Аль-Тувайні

УДК 681.518.54:621.1

**АВТОМАТИЗОВАНА ДІАГНОСТИКА
ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТЕПЛОМАСООБМІННИХ СИСТЕМ
І УСТАТКУВАННЯ ЕНЕРГОУСТАНОВОК НА ОСНОВІ
МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ**

Спеціальність 05.13.07 – автоматизація технологічних процесів

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків-2004

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі парогенераторобудування Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор

Єфімов Олександр Вячеславович,
Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут",
завідувач кафедри парогенераторобудування

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор

Артюх Станіслав Федорович,
Українська інженерно-педагогічна академія, м. Харків,
завідувач кафедри електроенергетики;

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Льченко Борис Самуїлович,
НДПІАСУ Трансгаз Міністерства палива і енергетики
України, м. Харків, завідувач науково-дослідного
центру діагностики і оптимального керування
експлуатацією газоперекачувального устаткування
магістральних газопроводів

Провідна установа: Одеський національний політехнічний університет

кафедра автоматизації теплоенергетичних процесів,
Міністерство освіти і науки України, м. Харків

Захист дисертації відбудеться "12" лютого 2004 р. о 14-30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.07 у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" за адресою 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".

Автореферат розісланий "12" січня 2004 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради Д 64.050.07

Голоскоков О.Є.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Теплоенергетичні установки електростанцій як об'єкти великої енергетики є найважливішими технічними системами, які визначають економічний потенціал будь-якої держави, у тому числі й України. У зв'язку з цим розроблені і продовжують розроблятися нові способи підвищення якості їхнього функціонування: теплової ефективності, надійності, довговічності й інших. Одним з таких способів є застосування автоматизованих систем управління технологічними процесами в енергоустановках, що базуються значною мірою на діагностиці технічного стану їхнього устаткування.

Існуючі на даний момент системи технічної діагностики теплоенергетичних об'єктів виконують, в основному, функції контролю, часто залишаючи осторонь таке важливе питання, як автоматизація процедури ідентифікації причин зміни параметрів технологічних процесів в оперативному режимі. У той же час рішення, які приймаються експлуатаційним персоналом енергоустановок в умовах відсутності чи значної невизначеності такої інформації, не завжди бувають правильними, що довела ціла серія аварій, яка відбулася в останні роки на енергетичних об'єктах у різних країнах світу. Тому проблема удосконалювання автоматизованих систем діагностики устаткування енергоустановок електростанцій є дуже важливою.

Техніко-економічна ефективність енергоустановок багато в чому визначається якістю функціонування тепломасообмінних систем і устаткування, тому що вони забезпечують початкові, проміжні і кінцеві параметри робочого тіла і теплоносіїв, а їхня вартість порівнянна з вартістю основного електрогенеруючого устаткування – турбогенераторів. Вимірювально-обчислювальні комплекси електростанцій, створені на базі сучасних комп'ютерів, операційних систем і технічних засобів контролю й автоматизації, дозволяють ефективно використовувати математичні моделі тепломасообмінних процесів для діагностики їхніх параметрів. Таким чином, задача розробки й удосконалювання автоматизованої діагностики технічного стану тепломасообмінних систем і устаткування енергоустановок на основі математичного моделювання є актуальною і своєчасною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в період навчання в аспірантурі з 1999 по 2002 р. у Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” відповідно до плану підготовки закордонних фахівців вищої кваліфікації.

Розроблені в дисертації математичні методи і підходи, алгоритми і програмні модулі використовувалися для виконання кафедрою парогенераторобудування НТУ “ХПІ” бюджетних наукових тем: М 3014 “Розробка нових концептуальних методів і підходів до створення вискоєфективного теплоенергетичного устаткування на основі системного аналізу й інтенсифікації теплотехнологій” у період з 1999 по 2002 р. (№ ДР 0100U001672) і М 3015 “Розробка, розвиток і удосконалення теорії і способів

імітаційного моделювання і натурно-імітаційних експериментів для створення перспективних енергогенеруючих комплексів” у період 2003-2006 р.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності і безпеки функціонування енергоустановок електростанцій шляхом застосування в управлінні технологічними процесами уніфікованого методу автоматизованої діагностики тепломасообмінних систем і устаткування на основі апарату математичного моделювання. Для досягнення цієї мети були поставлені і вирішені наступні задачі наукового дослідження:

- здійснити аналіз сучасних математичних моделей технологічних процесів у тепломасообмінному устаткуванні енергетичних установок різних типорозмірів з погляду можливості їхнього застосування для розробки уніфікованої системи діагностики;

- удосконалити математичні моделі технологічних процесів в основних тепломасообмінних системах й устаткуванні теплоенергетичних установок з метою імітації їхнього функціонального стану в процесі експлуатації;

- розробити метод автоматизованої діагностики параметрів технічного стану в конструкціях тепломасообмінних систем і устаткування енергоустановок з урахуванням особливостей їхнього функціонування;

- розробити метод ідентифікації математичних моделей технологічних процесів у тепломасообмінному енергетичному устаткуванні з метою підвищення їхньої адекватності;

- на основі розроблених методів створити версію комплексу програм параметричної діагностики тепломасообмінного устаткування енергетичних установок.

Об’єктом дослідження дисертаційної роботи є процеси функціонування тепломасообмінних систем і устаткування теплоенергетичних установок електростанцій.

Предметом дослідження є система автоматизованої параметричної діагностики технічного стану тепломасообмінних систем і устаткування теплоенергетичних установок багатоцільового призначення.

Методи дослідження. Для розробки й удосконалення математичних моделей технологічних процесів у тепломасообмінних системах і устаткуванні теплоенергетичних установок використані інтегральні методики розрахунків теплогідравлічних процесів і метод імітаційного моделювання; для розробки методу автоматизованої діагностики параметрів технічного стану тепломасообмінних систем і устаткування енергоустановок і методу ідентифікації математичних моделей технологічних процесів у них використані методи регресивного аналізу, обчислювальні методи лінійної алгебри, методи диференціального числення; для розробки програмного комплексу уніфікованих процедур діагностики

тепломасообмінних систем і устаткування використано об'єктно-орієнтований підхід до системного програмування.

Наукова новизна одержаних результатів. У процесі досягнення мети і розв'язання задач у дисертаційній роботі були отримані наступні наукові результати:

– вперше розроблено метод параметричної діагностики технічного стану тепломасообмінних систем і устаткування енергоустановок електростанцій на основі лінійних діагностичних моделей;

– вперше розроблено ітераційний метод ідентифікації математичних моделей технологічних процесів у тепломасообмінному енергетичному устаткуванні за умови невідповідності розрахункових і експлуатаційних даних;

– удосконалені й одержали подальший розвиток математичні моделі тепломасообмінних систем і устаткування різного призначення – котельної установки, конденсаційної установки, системи регенеративного підігріву основного конденсату і живильної води, випарної установки для знесолення морської води – у складі теплових схем енергоустановок електростанцій, що імітують їхній функціональний стан з деталізацією, необхідною для створення лінійних моделей параметричної діагностики;

– вперше розроблені уніфіковані процедури автоматизованої параметричної діагностики технічного стану тепломасообмінних систем і устаткування енергетичних установок різних типорозмірів на основі лінійних діагностичних моделей.

Практичне значення одержаних результатів. На основі розроблених і удосконалених математичних методів, моделей і алгоритмів створений програмний комплекс діагностики параметрів технічного стану і визначення несправностей тепломасообмінного устаткування енергоустановок теплових електричних станцій, взаємодіючий з вимірювальними системами, що застосовуються в теплоенергетиці, що дозволяє за допомогою вчасно одержуваних діагностичних висновків вирішувати широке коло конкретних задач по підвищенню ефективності, надійності і безпеці експлуатації енергетичних об'єктів. Результати досліджень використовуються на електростанції “Doha West” (Кувейт), що підтверджується прикладним актом про впровадження, а також у навчальному процесі кафедри парогенераторобудування НТУ “ХП” (довідка від 29.08.2003 р.).

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати дисертації, що виносяться на захист, отримані автором самостійно. У роботах, написаних і опублікованих у співавторстві, автору належать наступні результати: проведено аналіз існуючих теплових схем енергетичних котельних установок, виділені елементи цих схем і розроблені логіко-числові оператори математичної моделі котельної установки; здійснено ієрархічну структурування основного і допоміжного устаткування теплоенергетичних установок і запропонований об'єктно-орієнтований підхід для розробки

математичних моделей технологічних процесів у цілому ряді тепломасообмінних систем – котельній установці, конденсаційній установці, системі регенеративного підігріву основного конденсату і живильної води, опріснювальній установці морської води; розроблено метод побудови діагностичних моделей функціонального стану тепломасообмінного енергетичного устаткування у вигляді систем лінійних алгебраїчних рівнянь; розроблено метод ідентифікації математичних моделей технологічних процесів в енергетичному устаткуванні електростанцій при проведенні параметричної діагностики на основі ітераційного розв’язання систем нелінійних алгебраїчних рівнянь.

Апробація результатів дисертаційної роботи. Результати дисертаційної роботи доповідалися на: I-ій Міжнародній науково-практичній конференції “Інтегровані технології й енергозбереження”, Крим, сел. М. Маяк, 2001 р.; IX-ій Міжнародній науково-технічній конференції “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я”, м. Харків, 2001 р.; II-ій Міжнародній науково-практичній конференції “Інтегровані технології й енергозбереження”, Крим, сел. М. Маяк, 2002 р.; X-ій Міжнародній науково-технічній конференції “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я”, м. Харків, 2002 р.

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 4-х наукових фахових виданнях.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків і одного додатка. Повний обсяг дисертації складає 174 сторінок машинописного тексту. Дисертаційна робота містить: 8 ілюстрацій по тексту; 6 ілюстрацій на 6 сторінках; 7 таблиць по тексту; 1 таблицю на 12 сторінках; один додаток на 4 сторінках; 136 найменувань використаних літературних джерел на 13 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета і задачі дослідження, наукова новизна і практичне значення отриманих результатів, дана загальна характеристика дисертації.

У першому розділі проведено огляд існуючих методів математичного моделювання технологічних процесів у тепломасообмінних системах і устаткуванні енергетичних установок електростанцій і автоматизованих методів діагностики їхнього технічного стану.

Характерною рисою тепломасообмінних систем і устаткування енергоустановок є наявність у них широкої номенклатури конструктивних елементів, що виконують функції тепломасообміну при протіканні технологічних процесів, які мають різні фізико-хімічні особливості. Стандартні вимірювальні засоби контролю, що звичайно застосовуються в практиці експлуатації енергоустановок електростанцій

для параметричного моніторингу цих систем, часто не можуть забезпечити процедуру ідентифікації причин зміни параметрів процесів в оперативному режимі. Розширення можливостей параметричного моніторингу може бути здійснене шляхом створення і застосування систем автоматизованої діагностики, що базуються на математичних моделях, які імітують функціональний стан тепломасообмінного устаткування.

У розділі проаналізовані існуючі методи і підходи до математичного моделювання технологічних процесів в основному і допоміжному тепломасообмінному устаткуванні енергоустановок електростанцій. Розглянуто розроблені ведучими вітчизняними і закордонними організаціями різні математичні моделі тепломасообмінних процесів, що протікають у котельних установках, системах конденсації пари, системах регенеративного підігріву живильної води, як окремо, так і в складі теплових схем енергоустановок. У їхнє число входять розробки ІПМаш НАН України, ВОАТ “ХТЗ”, НТУ “ХПІ”, ІК НАН України, ЦКБ “Енергопрогрес”, ІТТФ НАН України; СЕІ РАН, НВО “ЦКТИ”, ЦНДІКА, ВО “Червоний котельник”, ВО “Сібенергомаш” (Росія); E-plant™ (США) та інші. Аналіз цих моделей і створених на їхній базі програмних комплексів показав, що вони розроблені для розв’язання визначеного кола задач проектування тепломасообмінного устаткування енергоустановок і не можуть бути безпосередньо використані для автоматизованого аналізу їхнього функціонального стану і діагностики в процесі експлуатації, тому що або не мають необхідного рівню деталізації, або не дозволяють оперативно відслідковувати зміни параметрів і структури технологічних процесів, або надзвичайно вимогливі до обчислювальних ресурсів (об’ємам пам’яті, швидкодії ЕОМ і т.п.).

У розділі також проаналізовані існуючі методи моніторингу параметрів і систем автоматизованої діагностики технічного стану різного енергетичного устаткування. У ряді розробок діагностика здійснюється по теплотехнічним і надійностним показникам (ВТІ, ІПМаш НАН України, ВОАТ “ХТЗ”, ХНДІКА та ін.). Причому, першочерговою задачею є забезпечення безвідмовної роботи устаткування. При цьому виділяються три етапи аналізу роботи устаткування з різною глибиною оцінки його стану: контроль стану; оцінка стану (діагностика); прогноз. Контроль стану містить у собі визначення фактичних значень параметрів, пряме зіставлення їх з нормативними значеннями, побудова ретроспективи і тенденцій їхніх змін. Оцінка стану базується на результатах контролю: виявлені відхилення параметрів аналізуються експертами, що ставлять діагноз про технічний стан устаткування і подальшу тривалість безвідмовної роботи. В умовах зниження навантажень електростанцій і збільшення резерву устаткування стають актуальними оптимізаційні задачі в області експлуатації устаткування. Тому ряд систем автоматизованої діагностики орієнтовано на контроль тих параметрів, що дозволяють оптимізувати розподіл технологічних навантажень між паралельно працюючими агрегатами в залежності від їхнього фактичного стану (НВО

“ЦКТГ”, СДТУ, УДТУ та ін.). Діагностика та прогнозування стану устаткування вкрай важливі і при плануванні термінів ремонтів. Тому деякі діагностичні системи контролюють параметри тільки тих конструктивних елементів тепломасообмінного устаткування, які підлягають заміні або ремонту, дозволяючи тим самим оптимізувати терміни ремонтів (УДТУ та ін.). Ряд розроблених систем діагностики спрямований на оцінку залишкового ресурсу найбільш напружених вузлів енергоустановок, зокрема газотурбінних двигунів (НАУ “ХАГ”), інші – на оцінку різних технічних характеристик устаткування за допомогою штатних систем контролю (НВО “ЦКТГ”, НДПАСУтрансгаз, УДТУ та ін.). Для постановки діагнозу в них використовуються експертні методи. Деякі автоматизовані системи функціональної діагностики, переважно призначені для діагностики параметрів всього енергетичного устаткування, яке входить до складу теплової схеми енергоблоків електростанцій, використовують методи теорії імовірності і нечіткої логіки в рамках ідеології експертних систем (ІПМаш НАН України, НТУ “ХПІ”, УДТУ та ін.). Аналіз цих та інших існуючих методів моніторингу параметрів і систем діагностики енергетичного устаткування показав їхню різноманітність за способами одержання діагностичних висновків і актуальність наукових досліджень у напрямку створення уніфікованих процедур автоматизованої параметричної діагностики.

Розділ завершується обґрунтуванням і формулюванням мети і задач дисертаційної роботи.

Другий розділ присвячений математичній постановці задачі діагностики і розробці методів побудови діагностичних моделей тепломасообмінного енергетичного устаткування та ідентифікації математичних моделей технологічних процесів у ньому.

Математичні моделі, що адекватно описують технологічні процеси в тепломасообмінному енергетичному устаткуванні, яке діагностується, на основі інтегральних методик розрахунків, являють собою систему нелінійних алгебраїчних рівнянь:

$$F(X, Y, G) = 0, \quad (1)$$

де $X = x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$, $Y = y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_m$ – відповідно вектори вхідних і вихідних даних моделей; G – вектор заданих конструктивних характеристик устаткування; F – символічний запис функціональних відносин між X, Y, G .

Аналіз цих моделей показав, що в області припустимих значень (X, Y) вони не містять умов втрати безперервності і диференціювання величин, що обчислюються, що допускає можливість їхнього розв’язання в околу будь-якої точки цієї області відносно змінних $y_j \in Y, j = \overline{1, m}$ і існування всіх частинних похідних функції

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n, G) \quad (2)$$

по змінним $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$.

Формалізований запис обчислення невідомих змінних моделі (1) за допомогою реалізуючого її комплексу програм представляється у вигляді:

$$Y = \text{PROG } X, G . \quad (3)$$

Задача діагностики формулюється в такий спосіб: потрібно побудувати у відносних відхиленнях діагностичну модель

$$A\delta X = \delta Y \quad (4)$$

у вигляді системи лінійних алгебраїчних рівнянь у припущенні, що в околу діагностуємої точки X_0, Y_0 , що належить області значень змінних X, Y , нелінійна система (1) припускає лінеаризацію.

Тут $\delta X = (X - X_0) / X_0$, $\delta Y = (Y - Y_0) / Y_0$ – відповідно вектори-стовпці значень параметрів, що діагностуються і вимірюються; A – матриця коефіцієнтів. Причому, якщо модель $F(X, Y, G) = 0$ адекватна технологічному процесу в області всіх допустимих значень X, Y , то модель $A\delta X = \delta Y$ адекватно відбиває процес тільки в околу точки діагностування X_0, Y_0 . У такій постановці діагностична модель (4) призначена для одержання діагностичного висновку про можливі причини відхилень вимірюваних параметрів технологічного процесу в тепломасообмінному устаткуванні δY по абсолютних величинах відносних відхилень параметрів δX , що діагностуються та ідентифікують його технічний стан при даному режимі роботи. Зміна технічного стану устаткування обумовлюється причиною, ідентифікованою з параметром δx_κ , яке задовольняє співвідношенню:

$$\delta x_\kappa = \max_i |\delta x_i|, \quad \kappa = \overline{1, n}; \quad i = \overline{1, n}.$$

Для одержання діагностичної моделі (4) будується лінійний аналог моделі (2) у вигляді системи рівнянь.

Для побудови лінійної діагностичної моделі (4) у вигляді системи рівнянь використовується метод лінійного регресійного аналізу, за допомогою якого проводиться статистична обробка результатів чисельного факторного експерименту на програмному комплексі (3) за спостереженням відгуку перемінних Δy_j на збільшення змінних Δx_i в околу точки X_0, Y_0 .

Для випадків, коли матриця A така, що $m \neq n$, система рівнянь (6) не має єдиного розв'язання, тобто діагностична модель некоректна. У цих випадках відшукується нормальне псевдорозв'язання:

$$\delta X = A^* A^{-1} A^* \delta Y, \quad (7)$$

де A^* – сполучена до A матриця.

Вірогідність результатів діагностування багато в чому визначається рівнем адекватності математичних моделей діагностованого устаткування технологічним процесам, які протікають в ньому. При експлуатації енергетичного устаткування його технічні характеристики, а значить і параметри технологічних процесів, змінюються під впливом зовнішніх факторів. Зміна характеристик устаткування приводить, як правило, до зниження рівня адекватності математичних формул, що складають зміст моделей процесів. Наприклад, багато з яких формул у математичних моделях (1), заснованих на інтегральних методиках теплогідрравлічних розрахунків тепломасообмінного устаткування, отримані експериментальним шляхом і містять числові параметри Λ , що ідентифікують модель і процес за результатами експериментів. З часом значення параметрів технологічних процесів можуть відрізнятись від умов експериментів, у яких були отримані відповідні розрахункові формули. Іншими словами, вектор вихідних даних Y моделей (1) може бути записаний у вигляді $Y = \tilde{f}(X, \Lambda, G)$, де $\Lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_k, \dots, \lambda_r)$ – вектор параметрів, що ідентифікуються. Для підвищення вірогідності результатів параметричної діагностики необхідно проводити ідентифікацію математичних моделей процесів до початку діагностування шляхом коректування даних Y на підставі аналізу вимірюваних параметрів процесів у дискретні моменти часу, що передують моменту проведення діагностики.

Якщо $m = r$, тобто у випадку, коли число рівнянь дорівнює числу параметрів $\lambda_k, k = \overline{1, r}$, що ідентифікуються, розв'язання системи нелінійних рівнянь знаходиться стандартними методами обчислювальної математики, наприклад, модифікованим методом Ньютона:

$$\Lambda_{l+1} = \Lambda_l - W^{-1}(\Lambda_0) \cdot \tilde{f}(X, \Lambda_l, G), \quad (9)$$

де $\Lambda_l = (\lambda_1^{(l)}, \lambda_2^{(l)}, \dots, \lambda_r^{(l)})$, $\Lambda_0 = (\lambda_1^{(0)}, \lambda_2^{(0)}, \dots, \lambda_r^{(0)})$, l – номер ітерації, $W^{-1} \Lambda_0$ – матриця, зворотна до матриці Якобі.

Для випадку $m < r$, коли число рівнянь менше числа параметрів $\lambda_k, k = \overline{1, r}$, ідентифікація моделі технологічних процесів здійснюється з використанням усіченої квадратної матриці Якобі $W_1(\tilde{\Lambda}_0)$ розмірності $m_1 \times m_1$, стовпці якої містять елементи з максимальними значеннями модулів похідних $\max_{i,j} |\partial f_i / \partial \lambda_k|$ $i = \overline{1, m}; k = \overline{1, r}$, а визначник не дорівнює нулю. При цьому $m_1 \leq m$ і $\tilde{\Lambda}_0 = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_s)$, $s = m_1$.

При $m > r$, тобто коли число рівнянь більше числа параметрів $\lambda_k, k = \overline{1, r}$, застосовується аналогічний підхід, як і для випадку $m < r$, з тією лише різницею, що матриця $W_1(\tilde{\Lambda}_0)$ формується з рядків матриці $W \Lambda_0 = \tilde{f}' \Lambda_0$.

У третьому розділі приведені алгоритми і математичні моделі тепломасообмінних систем і устаткування різного призначення – котельної установки, системи конденсації пари, системи

регенеративного підігріву основного конденсату і живильної води, випарної установки для знесолення морської води – у складі теплових схем енергоустановок електростанцій, що імітують їхній функціональний стан з деталізацією, необхідною для створення лінійних моделей параметричної діагностики. Приведені також описи і блок-схеми програм, які їх реалізують, для комп'ютерів, що входять до складу АСУ ТП енергоблоків.

Технологічні процеси, що протікають у тепломасообмінному устаткуванні енергоустановок, описуються в математичних моделях системами відносин (рівностей, нерівностей, таблиць, логічних умов).

Ці системи відносин складаються з рівнянь термодинаміки, газодинаміки, тепло- і масообміну, конструктивних і техніко-економічних залежностей. До них же входять рівняння стану води і водяної пари, а також кінематичних і теплофізичних властивостей робітничих середовищ. Системи відносин у моделях характеризуються наступними загальними особливостями: їх розміри обчислюються десятками; вони істотно нелінійні; містять неявні функції. Кількісний і якісний склад системи відносин залежать від технологічної структури тепломасообмінного устаткування, тобто від логічної інформації, і необхідної глибини діагностування. Вони можуть бути розв'язані тільки за умови дотримання визначеного порядку в застосуванні відносин, обумовленого специфікою процесів, які моделюються у конкретному устаткуванні. Ці особливості характеризують математичні моделі тепломасообмінного устаткування як багатопараметричні з перемінною структурою. Тому в розроблених моделях відносини представляються у формі логіко-числових операторів у функції від інформаційної структури технологічного процесу в устаткуванні $Z = \langle X, Y, G \rangle$. Це дозволило зробити моделі адаптивними з погляду можливості перепризначення в конкретних умовах експлуатації параметрів, що вимірюються, ідентифікуються і діагностуються. Усі математичні моделі процесів у тепломасообмінному устаткуванні містять у собі оператор збереження кількості речовини, оператор тиску, оператор ентальпії, оператор збереження енергії.

Математична модель котельної установки дозволяє зробити розрахунок параметрів середовищ, які гріють та нагріваються, у пароводяному тракті котла, топці і газоході і поверхнях теплообміну, у тому числі: витрату палива в котел; температуру газів за топкою; кількість тепла, сприйнятого екранними поверхнями, їхню площу; температурні напори, коефіцієнти тепловіддачі і теплопередачі в конвективних поверхнях нагрівання (випарних, перегрівальних) різної конфігурації; величини теплосприйняття поверхонь нагрівання, їхню площу, параметри повітропідігрівників та економайзерів та інші.

Математичні моделі тепломасообмінного устаткування системи регенеративного підігріву основного конденсату і живильної води визначають параметри технологічних процесів у підігрівниках високого і низького тиску з вбудованими і виносними охолоджувачами пари й охолоджувачами конденсату і у деаераторах. Моделі містять у собі наступні основні залежності і рівняння: теплового балансу для зон охолодження і конденсації пари, охолодження конденсату і всього теплообмінника в цілому; визначення коефіцієнтів тепловіддачі і теплопередачі в процесі теплообміну за умови різного агрегатного стану та однофазності середовищ; визначення температурних напорів і площ теплообміну в теплообміннику в цілому і в різних його зонах, а також інші залежності для визначення температур пари і води на вході і виході з підігрівника або деаератора.

У конденсаторах пар конденсується при низькому тиску в присутності газів, які не конденсуються, проникаючих з повітрям через нещільності у вакуумну систему турбоагрегату. У порівнянні з регенеративними підігрівниками тепломасообмінні процеси в них протікають в умовах більш інтенсивної зміни всіх основних параметрів пароповітряної суміші по напрямку її руху в міжтрубному просторі, у результаті чого змінюються місцеві значення питомого парового і теплового навантаження поверхонь охолодження трубного пучка. Розподіл місцевих навантажень залежить від конструкції конденсатора, режиму його роботи і характеристики ежектора, використовуваного для видалення газів, які не конденсуються. Зазначені особливості необхідно враховувати при розробці математичної моделі технологічних процесів, що протікають у конденсаторі. Аналіз різних методик розрахунків параметрів у конденсаторах, у тому числі заснованих на використанні критеріальних рівнянь теплообміну для окремих зон конденсатора і диференціальних рівнянь теплообміну в частинних похідних Нав'є-Стокса, показав, що для побудови лінійних діагностичних моделей необхідну деталізацію забезпечує метод розрахунку по середньому для всього конденсатора коефіцієнту теплопередачі: $Q = k \cdot \Delta t_{cp} \cdot F$, де Q - теплове навантаження конденсатора; k - середній коефіцієнт теплопередачі; Δt_{cp} - середня різниця температур охолоджувальної води на вході і виході; F - величина поверхні охолодження. У розробленій на основі цього методу моделі конденсатора розраховуються наступні параметри: тиск пари в конденсаторі і його зміна при відхиленні присосів повітря від нормативних значень; значення теплового навантаження; температури і ентальпії конденсату і пароводяної суміші; середній коефіцієнт теплопередачі з урахуванням впливу на нього швидкості і температури охолоджувальної води, чистоти трубок, умов водопостачання, числа ходів води і питомого парового навантаження; значення кратності охолодження; витрата і нагрів охолоджувальної води; температурний напір; поверхня теплообміну і число її трубок; середня різниця температур охолоджувальної води; гідравлічний і паровий опір та інші.

В основі математичної моделі випарної установки для знесолення морської води лежить метод розрахунку багатоступінчастої термічної установки миттєвого скипання. При розробці алгоритму моделі виходили з того, що розв'язання системи рівнянь для одного ступеня опріснювальної установки (випарного апарата) є вихідними даними для систем рівнянь наступних ступіней. У цьому випадку характеристики установки в цілому залежать від характеристик усіх ступіней, тому що в кожному з них здійснюється паротворення, конденсація і рух енергопотоків. У моделі розраховуються наступні параметри: кількість дистилляту на вході і виході зі ступеня; концентрація солей у вихідній воді в підігрівнику ступеня і розсолу на вході і виході; кількість циркулюючого і відвідного розсолу; кількість переданої теплоти у випарному апараті і температурний напір; кількість пари, необхідної для підігріву вихідної води в головному підігрівнику та інші.

У четвертому розділі проведені аналіз і систематизація факторів і відповідних їм параметрів, що діагностуються, і технологічних причин несправностей для основних тепломасообмінних систем і устаткування багатоцільових паротурбінних енергоустановок, розроблені уніфіковані процедури їх автоматизованої параметричної діагностики, виділений характерний об'єкт – конденсатор, розроблені його лінійні діагностичні моделі для різного співвідношення параметрів, які вимірюються і діагностуються, і на прикладі конденсаторів турбоустановки “Toshiba” TEC “Doha West” (Кувейт) показана практична реалізація розробленого методу автоматизованої діагностики. Вибір конденсатора як об'єкта діагностики обумовлений тим, що погіршення його експлуатаційних показників приводить до втрат, що можуть складати 10-20 % від встановленої електричної потужності енергоустановки. Ця величина можливих втрат перевершує втрати, що виникають при погіршенні експлуатаційних характеристик інших структурних елементів теплової схеми енергоустановки. Крім того, поряд зі своїми особливостями, конденсатору притаманні несправності, характерні для більшості інших типів тепломасообмінного устаткування.

У розділі на основі досвіду експлуатації систем конденсації пари детально проаналізовані основні фактори і відповідні їм параметри і технологічні причини, що викликають зміну тиску пари, яка конденсується. Обрано 16 основних факторів, що вимагають оперативної діагностики в процесі експлуатації. До них відносяться: зниження витрати охолоджувальної води; забруднення і корозія внутрішньої і зовнішньої поверхонь трубок; недостатня продуктивність основного ежектора; зміна рівня конденсату в конденсаторозбірнику; збільшення присоса газів, які не конденсуються, у вакуумну систему; температура навколишнього повітря; зміна витрати пари, яка надходить у конденсатор та інші. Кожному з факторів поставлені у відповідність параметри, можливі причини їхньої зміни і способи визначення штатними контрольно-вимірними приладами.

За допомогою методу побудови діагностичних моделей на основі ідентифікованої математичної моделі тепломасообмінних процесів у конденсаторі отримані лінійні моделі діагностики для різного співвідношення вимірюваних параметрів і які діагностуються. Ці співвідношення залежать від складу і можливостей установленної на електростанції штатної контрольно-вимірювальної апаратури. Якщо в системі конденсації пари вимірюються температура охолоджувальної води на вході в конденсатор t_{1e} , температура охолоджувальної води на виході з конденсатора t_{2e} і тиск пари P_k , а тими, що діагностуються, є витрата охолоджувальної води G_0 , площа поверхні теплообміну F , витрата пари D_k і температурний напір δt , то в системі рівнянь (6) $m=3, n=4$. Статистична обробка методом регресійного аналізу результатів чисельного факторного експерименту на ідентифікованій математичній моделі конденсатора за спостереженням відхилень вимірюваних параметрів і тих, які діагностуються, дозволила одержати модель діагностики конденсатора турбоустановки потужністю 150 МВт ТЕС “Doha West” за умови $n > m$.

Для здійснення діагностики технічного стану конденсатора, тобто визначення причин відхилення вимірюваних параметрів, необхідно установити співвідношення нерівності між знайденими в результаті нормального псевдорозв’язання системи або розв’язання системи абсолютними значеннями величин $|\delta G_0|, |\delta F|, |\delta D_k|, |\delta \delta t|$. Максимальне з отриманих значень визначає найбільш ймовірну причину зміни технічного стану конденсатора.

Відповідно до загальної методики побудови і застосування лінійних діагностичних моделей були розроблені уніфіковані процедури автоматизованої параметричної діагностики тепломасообмінного устаткування енергоустановок і створений комплекс програм для персональних комп’ютерів. Цей комплекс дозволяє здійснювати параметричну діагностику тепломасообмінного устаткування енергоустановок різних типорозмірів на підставі ідентифікованих моделей технологічних процесів, узагальнених лінійних моделей діагностики і параметрів режиму експлуатації.

За допомогою програмного комплексу в складі АСУ ТП ТЕС “Doha West” проведена оперативна діагностика декількох конденсаторів енергоблоків “Toshiba” при сезонних коливаннях температур навколишнього середовища, змінах режимів роботи енергоблоків, несправностях ежекційних пристроїв, конденсатних і циркуляційних насосів. Результати параметричної діагностики були підтверджені даними аналізу технічного стану конденсаторів після їхнього розкриття під час планово-попереджувальних ремонтів.

У додатку приводяться документи, що підтверджують практичне значення і впровадження результатів дисертаційної роботи, а також їхнє використання в навчальному процесі.

ВИСНОВКИ

За результатами проведених досліджень зроблені наступні висновки:

1. У роботі проаналізовано загальний стан проблеми по математичному моделюванню теплогідравлічних процесів в основному і допоміжному тепломасообмінному устаткуванні енергоблоків електростанцій та існуючі основні методи параметричної діагностики. За результатами виконаного аналізу здійснена постановка задачі необхідності оперативного одержання в автоматизованому режимі діагностичних висновків про технічний стан тепломасообмінного устаткування на основі обліку основних функціональних зв'язків між теплогідравлічними параметрами технологічних процесів, визначених за допомогою математичних моделей. Показано, що для розв'язання цієї задачі доцільно застосовувати лінійні діагностичні моделі, одержані на основі нелінійних математичних моделей технологічних процесів у тепломасообмінних системах і устаткуванні.

2. Запропоновано метод побудови лінійних діагностичних моделей для стаціонарних режимів роботи тепломасообмінних систем і устаткування енергоустановок електростанцій. При побудові діагностичних моделей використані методи регресійного аналізу для обробки результатів чисельних експериментів на нелінійних математичних моделях, що адекватно описують технологічні процеси в тепломасообмінному устаткуванні. У загальному випадку діагностичні моделі для тепломасообмінного устаткування енергоустановок, що представлені у виді систем лінійних алгебраїчних рівнянь відносно параметрів, які діагностуються, є некоректними. Тому для одержання діагностичних висновків на основі даних вимірів параметрів технологічних процесів застосовано метод псевдорозв'язань, що приводить діагностичну модель до коректної системи лінійних алгебраїчних рівнянь. У випадках, коли система рівнянь, що визначає псевдорозв'язання, недобре обумовлена, використано метод регуляризації, що дозволяє знайти наближене псевдорозв'язання.

3. Для підвищення адекватності математичних моделей технологічних процесів у тепломасообмінному енергетичному устаткуванні і вірогідності діагностичних висновків у випадках невідповідності розрахункових і експлуатаційних даних розроблений метод ідентифікації моделей, заснований на ітераційному визначенні числових значень параметрів, які ідентифікуються.

4. Удосконалені й одержали подальший розвиток математичні моделі основних тепломасообмінних систем і устаткування паротурбінних енергоустановок: котельної установки, конденсатора, регенеративних підігрівників, опріснювальної установки морської води, що імітують їхній функціональний стан з деталізацією, необхідною для створення лінійних моделей параметричної діагностики. На підставі математичних моделей теплогідравлічних процесів розроблені програми для комп'ютерів, що входять до складу АСУ ТП енергоблоків.

5. Проаналізовані та систематизовані для основних тепломасообмінних систем і устаткування паротурбінних енергоустановок фактори, які діагностуються, зміни їхнього технічного стану в процесі експлуатації, відповідні їм параметри технологічних процесів і причини несправностей.

6. З метою розробки уніфікованих процедур автоматизованої параметричної діагностики створені алгоритм і програмний комплекс, що реалізують метод побудови лінійних діагностичних моделей і одержання діагностичних висновків в автоматизованому режимі. Цей комплекс дозволяє здійснювати параметричну діагностику тепломасообмінного устаткування енергоустановок різних типорозмірів на підставі ідентифікованих моделей технологічних процесів, узагальнених лінійних моделей діагностики і параметрів режиму експлуатації.

7. Проведено аналіз роботи конденсаторів енергоблоків №2 і №3 ТЕС “Doha West” (Кувейт) у період 2001-2003 р.р. Виявлені їхні основні несправності, визначені фактори, які діагностуються, вимірювані параметри і режими експлуатації. Проведено ідентифікацію математичної моделі теплогидравлічних процесів у конденсаторах та їх діагностику на основі експлуатаційних даних. Результати впровадження і дослідної експлуатації свідчать про працездатність і ефективність розробленого методу автоматизованої лінійної параметричної діагностики. Його використання дозволяє знизити матеріальні і трудові витрати на попередження і пошук несправностей тепломасообмінного енергетичного устаткування і підвищити тим самим техніко-економічну ефективність і безпеку роботи енергоблоків ТЕС.

Список опублікованих праць за темою дисертації

1. Ефимов А.В., Меньшикова Е.Д., Адель Аль-Тувайни. Разработка имитационной модели котельной установки для автоматизированной системы управления и диагностики энергоблоков электростанций // Вестник Национального технического университета “ХПИ”. – Харьков: НТУ “ХПИ”. – 2001. – Вып. 7. – С. 72-78.

Здобувачем розроблено логіко-числові оператори математичної моделі котельної установки.

2. Ефимов А.В., Куценко А.С., Фролов Б.И., Адель Аль-Тувайни. Применение объектно-ориентированного подхода для разработки имитационной модели технологических процессов тепловых энергетических установок // Интегровані технології та енергозбереження. – Харків, 2002. – № 2. – С. 78-83.

Здобувач здійснив ієрархічну структурування основного і допоміжного устаткування теплоенергетичних установок і використав об’єктно-орієнтований підхід для розробки математичних моделей технологічних процесів у тепломасообмінних системах.

3. Ефимов А.В., Адель Аль-Тувайни, Зевин С.Л. Метод построения диагностических моделей оборудования энергоустановок // Вестник Национального технического университета "ХПИ". – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2002. – Вып. 13. – С. 153-157.

Здобувач розробив метод побудови діагностичних моделей тепломасообмінного устаткування у вигляді систем лінійних алгебраїчних рівнянь.

4. Ефимов А.В., Адель Аль-Тувайни, Меньшикова Е.Д., Гаркуша Т.А. Идентификация математических моделей технологических процессов в энергетическом оборудовании при решении задач диагностики // Вестник Национального технического университета "ХПИ". – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2003. – Вып. 3. – С. 20-23.

Здобувач розробив метод ідентифікації математичних моделей енергетичного устаткування на основі ітераційного розв'язання систем нелінійних алгебраїчних рівнянь.

АНОТАЦІЇ

Адель Мохаммед Р. Аль-Тувайні. Автоматизована діагностика технічного стану тепломасообмінних систем і устаткування енергоустановок на основі математичного моделювання. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.13.07 – автоматизація технологічних процесів. Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, 2003.

Дисертація присвячена розробці й обґрунтуванню нових методів підвищення ефективності і безпеки функціонування енергоустановок електростанцій шляхом застосування в управлінні технологічними процесами уніфікованого методу автоматизованої діагностики тепломасообмінних систем і устаткування на основі апарата математичного моделювання. Розроблені методи побудови лінійних моделей параметричної діагностики для енергетичного тепломасообмінного устаткування та ідентифікації математичних моделей технологічних процесів у ньому. Удосконалено алгоритми і математичні моделі цього устаткування різного функціонального призначення, що імітують його функціональний стан з деталізацією, необхідною для створення лінійних моделей діагностики. Наведено описи і блок-схеми відповідних їм програм для комп'ютерів, що входять до складу АСУ ТП енергоблоків. Проведено аналіз і систематизація факторів, які діагностуються, і відповідних їм параметрів і технологічних причин несправностей для основних тепломасообмінних систем і устаткування паротурбінних установок. Розроблено уніфіковані процедури їхньої автоматизованої параметричної діагностики. Виділено характерний об'єкт діагностування – конденсатор, розроблені його лінійні діагностичні моделі для різного співвідношення вимірюваних параметрів і тих, які

діагностуються. На прикладі конденсаторів турбоустановки “Toshiba” ТЕС “Doha West” (Кувейт) показана практична реалізація розробленого методу автоматизованої діагностики.

Ключові слова: діагностика, автоматизація, математичне моделювання, технологічні процеси, тепломасообмінне устаткування, енергоустановка, чисельний факторний експеримент, регресійний аналіз.

Адель Мохаммед Р. Аль-Тувайни. Автоматизированная диагностика технического состояния тепломассообменных систем и оборудования энергоустановок на основе математического моделирования. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 – автоматизация технологических процессов. Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, Харьков, 2003.

Диссертация посвящена разработке и обоснованию новых методов повышения эффективности и безопасности функционирования энергоустановок электростанций путем применения в управлении технологическими процессами унифицированного метода автоматизированной диагностики тепломассообменных систем и оборудования на основе аппарата математического моделирования. Проведен обзор существующих методов математического моделирования технологических процессов в тепломассообменных системах и оборудовании энергетических установок электростанций и автоматизированных методов диагностики их технического состояния. Осуществлена математическая постановка задачи линейной параметрической диагностики на основе применения регрессионного анализа для обработки результатов численных факторных экспериментов на нелинейных математических моделях, описывающих технологические процессы в тепломассообменном оборудовании. Для повышения адекватности нелинейных математических моделей технологических процессов и достоверности диагностических выводов в случаях несоответствия расчетных и эксплуатационных данных разработан метод идентификации моделей, основанный на итерационном определении числовых значений идентифицируемых параметров. Усовершенствованы и получили дальнейшее развитие алгоритмы и нелинейные математические модели тепломассообменных систем и оборудования различного функционального назначения – котельной установки, системы конденсации пара, системы регенеративного подогрева основного конденсата и питательной воды, испарительной установки для обессоливания морской воды – в составе тепловых схем энергоустановок электростанций, имитирующие их функциональное состояние с детализацией, необходимой для создания линейных моделей параметрической диагностики. Приведены описания и блок-схемы реализующих их программ для компьютеров, входящих в состав АСУ ТП энергоблоков. Проведен

анализ и систематизация диагностируемых факторов и соответствующих им параметров и технологических причин неисправностей для основных теплообменных систем и оборудования паротурбинных установок. Разработаны унифицированные процедуры их автоматизированной параметрической диагностики. Выделен характерный объект диагностирования – конденсатор, техническое состояние которого существенно влияет на экономичность всей энергоустановки, разработаны его линейные диагностические модели для различного соотношения измеряемых и диагностируемых параметров. На примере конденсаторов турбоустановки “Toshiba” ТЭС “Doha West” (Кувейт) показана практическая реализация разработанного метода автоматизированной параметрической диагностики.

Ключевые слова: диагностика, автоматизация, математическое моделирование, технологические процессы, теплообменное оборудование, энергоустановка, численный факторный эксперимент, регрессионный анализ.

Adel Mohamed R. Al-Tuwaini. *Automatised diagnostics of technical condition of heat-and-mass exchange systems and equipment of power-generation unit on the basis of mathematical modeling.* – Manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of Cand. Tech. Sci. on a speciality 05.13.07 – automatization of technological processes. – National technical university “Kharkov polytechnical institute”, Kharkov, 2003.

The dissertation is devoted to the development and substantiation of the new methods of improvement of the efficiency and security of power plants operation by means of application in the control by technological processes the consistent method of the automatised diagnostics of heat-and-mass exchange systems and equipment on the basis of the mathematical modeling body. New methods of construction of linear diagnostics models of heat-and-mass exchange power equipment and identification of the mathematical models of the technological processes in it have been developed. Algorithms and mathematical models of heat-and-mass exchange power equipment of various functional purposes have been improved with a point of view simulating their functional state with detailed expression necessary for making linear models of diagnostics. Descriptions and block-circuits implementing their programs for computers forming ACS of the technological processes of power-generating units are presented. Analysis and systematization of the factors under diagnostics and parameters corresponding to the as well as technological reasons of faults for main heat-and-mass exchange systems of steam turbine has been carried out. Consistent procedures of their automatised parametric diagnostics have been worked out. Typical object of diagnostics – condenser is marked out and its linear diagnostic models for various relations of measured and diagnostic parameters are developed. Practical

implementation of the developed methods of automatised diagnostics is shown by the example of the condenser of turbine “Toshiba” which operates at “Doha West” power plant in Kuwait.

Key words: diagnostics, automatization, mathematical modeling, technological processes, heat and mass exchange equipment, power installation, numerical factorial experiment, regression analysis.