

ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису

ЄФІМОВ Олександр Вячеславович

УДОСКОНАЛЕННЯ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ  
ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК ЕНЕРГОБЛОКІВ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ  
НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ПАРАМЕТРІВ СТАНУ І ДІАГНОСТИКИ  
УСТАТКУВАННЯ

05.13.07 - автоматизація технологічних процесів та  
виробництва

Автореферат дисертації на здобуття наукового  
ступеня доктора технічних наук

Харків - 1996

Кей



Дисертація є рукопис

Робота виконана в Інституті проблем машинобудування НАН України

Офіційні опоненти - доктор технічних наук, професор  
Тодорцев Юрій Костянтинівич

- доктор технічних наук, професор  
Ільченко Олег Трохимович

- доктор технічних наук, професор  
Ястребенецький Михайло Онисимович

Провідна організація - Інститут технічної теплофізики  
НАН України

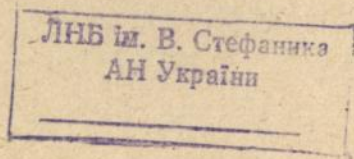
Захист відбудеться "28" СІЧНЯ 1995 р. о 14<sup>30</sup> год.  
на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 02.09.06  
Харківського державного політехнічного університету  
( 310002, м.Харків, МСП, вул.Фрунзе, 21).

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Хар-  
ківського державного політехнічного університету.

Автореферат розісланий "26" травня 1995 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Кизилов В.У.



## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Всесірне підвищення якості функціонування, надійності та безпеки роботи теплоенергетичних об'єктів являє собою важливу народногосподарську проблему. У зв'язку з цим зростають вимоги до розробки нових ефективних методів аналізу якості функціонування енергетичних турбоустановок, їх керування, діагностики та удосконалювання, що підвищують надійність і безпеку роботи теплоенергетичних об'єктів як вже діючих, так і нового покоління.

Відомо, що системи керування функціонуванням устаткування та діагностики несправностей на діючих і проєктованих енергоустановках є резервом зростання ефективності їх експлуатації. Існуючі в цей час системи аналізу якості функціонування й діагностики на теплоенергетичних об'єктах виконують, в основному, функції контролю, залишаючи осторонь такі важливі питання як раннє розпізнавання небажаних змін параметрів технологічних процесів і передбачення тенденцій їх розвитку, автоматизація процедури ідентифікації причин несправностей. У той же час необхідність прийняття експлуатаційним персоналом крупних теплоенергетичних систем і об'єктів безпомилкових рішень в умовах значної невизначеності інформації часто ставить операторів у скрутне становище. Важливість розробки потужних систем аналізу параметрів технологічних процесів, якості функціонування, керування і діагностики паротурбінних установок, наприклад, з усією певністю виявилася після аварій на АЕС "Тримайл Айленд-2" (США) у 1979 р., АЕС "Сан-Лоран" (Франція) у 1980 р., Чорнобильській АЕС (Україна) у 1986 р., АЕС "Вандельос" (Іспанія) у 1989 р. Тому у нас в країні та за рубежом проблема удосконалювання керування технологічними процесами теплоенергетичних установок енергоблоків електро-

станцій на базі інтерфейсу між оператором (технологом) і ЕОМ при збиранні, систематизації та обробці значних потоків інформації про функціонування теплоенергетичного устаткування є важливою та актуальною і має велике народногосподарське значення.

Розроблені та подані в дисертації математичні методи, алгоритми і програмні комплекси застосовувалися ІПМаш НАН України для виконання: всесоюзної комплексної науково-технічної програми О.Ц.027 "Створення і розвиток автоматизованих систем наукових досліджень (АСНД) і систем автоматизованого проектування (САПР) із застосуванням стандартної апаратури КАМАК і вимірювально-обчислювальних комплексів" (завдання ОЗ.І9, 1981-1985 рр.); спільного рішення МВЕ і ВМ СРСР, Міністерства СРСР і АН СРСР по створенню інтегрованої експертної системи "Енергомашексперт", затвердженого Бюро з машинобудування при РМ СРСР 29.09.87 р.; програми МВЕ і ТМ СРСР "Енергомашелектроніка" (наказ №416 від 19.11.86 р.) та міжвідомчого координаційного плану робіт на 1987-1990 рр. з технічної діагностики тепломеханічного устаткування електростанцій і мереж (наказ Міністерства СРСР №270 від 29.05.86 р.); проекту Держкомітету України з науки і техніки №30 "Створення систем діагностики, контролю надійності роботи і прогнозування ресурсу основних елементів ГТУ і ПТУ за програмою Б.БІ.01 (1992-1995 рр.); республіканського плану спільних робіт установ АН УРСР, Мінвузу УРСР і підприємств Міністерства УРСР для вирішення найважливіших науково-технічних проблем теплоенергетики в XI п'ятиріччі; цільової комплексної науково-технічної програми РН.ЦОЗ "Зниження матеріалоемності устаткування і споруд" (підпрограма РН.81.03.Ц, завдання ОІ.03.ПІ); цільової бюджетної теми №96 "Розробити і впровадити в АСКТП АЕС програмно-обчислювальні комплекси визна-

чення експлуатаційних характеристик і діагностування функціонального стану енергетичних турбоустановок", затвердженої постановою №348 ДКНТ СРСР від 30.07.86 р.; держбюджетної тематики АН УРСР у період з 1980 по 1990 рр.; господарських договорів з підприємствами Міністерства атомної промисловості та енергетики СРСР, Міністерства енергетики СРСР, Міністерства середнього машинобудування СРСР, Міністерства енергетики України, з фірмою "Діагностика машин" (Польща).

Мета роботи. Підвищення ефективності й безпеки функціонування теплоенергетичних установок енергоблоків електростанцій шляхом застосування автоматизованих імітаційних програмних комплексів для керування технологічними процесами виробництва електроенергії й теплоти.

Основні задачі роботи:

- розробити та удосконалити математичні моделі технологічних процесів теплоенергетичних установок для імітації їх функціонального стану в процесі експлуатації;

- розробити та реалізувати на сучасних типах комп'ютерів автоматизований комплекс програм для розрахунку і керування параметрами технологічних процесів у теплоенергетичних установках;

- сформулювати та розв'язати проблему взаємодії вимірвальних систем і автоматизованих програмних комплексів на діючих теплоенергетичних установках і організувати на основі цієї взаємодії універсальні вимірвально-обчислювальні комплекси;

- розробити та реалізувати на практиці методи аналізу параметрів і керування технологічними процесами теплоенергетичних установок та їх систем за допомогою вимірвально-

обчислювальних комплексів;

- провести оптимізацію параметрів і розробити оптимальні схеми технологічних процесів в окремих вузлах і в системах діючих і перспективних теплоенергетичних об'єктів і установок;

- розробити метод діагностики технічного стану теплоенергетичних установок і устаткування за допомогою автоматизованих програмних комплексів.

Розв'язки вищеперелічених теоретичних і практичних задач виносяться автором на захист.

Методи досліджень. Для розв'язання поставлених задач використовувались: теорія математичного моделювання складних технічних систем, методи теорії графів, методи теорії імовірності та математичної статистики, теорії випадкових процесів, оптимізацій, чисельні методи, метод експериментальних досліджень в промислових умовах з використанням виміральної техніки, метод техніко-економічного аналізу.

Теоретична цінність роботи полягає в розробці й дослідженні принципів побудови автоматизованих програмних комплексів, що імітують функціональний стан теплоенергетичних установок на електростанціях, і застосовуваних в них математичних методів, моделей та алгоритмів, що підвищують якість керування технологічними процесами виробництва електроенергії й теплоти.

Наукова новизна. На основі виконаних досліджень одержано нові наукові результати:

- на базі теорії математичного моделювання складних

технічних систем та експериментальних досліджень науково обґрунтовано застосування методу імітації функціонального стану теплоенергетичних установок при їх експлуатації на електростанціях як основи сучасної методології аналізу якості функціонування, керування технологічними процесами та діагностики теплоенергетичних об'єктів;

- розроблено математичні моделі та алгоритми автоматизованого комплексу програм АКАФТ для структурно-параметричного аналізу та удосконалення якості функціонування теплоенергетичних установок на електростанціях;

- сформульовано і розв'язано проблему організації трирівневих вимірювально-обчислювальних комплексів (ВОК) як засобу інтелектуальної підтримки діяльності персоналу електростанцій на основі взаємодії виміркових систем і автоматизованих програмних комплексів АКАФТ, що використовуються в практиці енергетики;

- розроблено та експериментально перевірено методи одержання за допомогою АКАФТ, працюючого у складі ВОК, типових режимних та інтегральних експлуатаційних характеристик теплоенергетичних установок та їх енергетичного та тепломагнітного устаткування;

- розроблено метод і проведено ієрархічну структурування значущості теплових і гідравлічних параметрів теплоенергетичних установок різних типорозмірів, які ранжовано за мірою впливу на основні показники енергоблоків;

- розроблено метод оптимального розподілу навантаження між турбоагрегатами електростанцій, заснований на застосуванні інтегральних експлуатаційних характеристик;

- розроблено метод керування режимами теплових навантажень систем теплофікації теплоенергетичних установок за критеріями ефективності та безпеки їх роботи;

- розроблено метод, алгоритми і програмний модуль діагностики технічного стану теплоенергетичних установок за допомогою ВОК, заснований на імовірнісному прогнозуванні зміни за часом експлуатаційних характеристик працездатного устаткування.

Практична цінність роботи полягає в створенні на основі розроблених математичних методів, моделей та алгоритмів універсального автоматизованого програмного комплексу АКАФТ для сучасних типів комп'ютерів, взаємодіючого із застосовуваними в теплоенергетиці вимірювальними системами, і розв'язанні за його допомогою широкого кола конкретних задач по підвищенню ефективності керування технологічними процесами, їх удосконалюванню та діагностиці технічного стану устаткування різних об'єктів теплоенергетичної промисловості.

За допомогою комплексу АКАФТ одержано вірогідні режимні та інтегральні експлуатаційні характеристики турбоустановок типу ПВК-200-130 Кураховської і Старобешевської ГРЕС, К-300-240-2 Зміївської ГРЕС, К-220-44 і К-500-60/1500 Нововоронезької АЕС, К-1000-60/1500 Південно-Української і Запорізької АЕС, К-1000-60/3000 Ровенської АЕС, К-750-65/3000 Ігналінської АЕС, що дозволяють аналізувати вплив параметрів і керувати технологічними процесами в широкому діапазоні навантажень. На основі аналізу якості функціонування цих турбоустановок на електростанціях запропоновано нові схемні розв'язки, по яких розроблено та впроваджено конструкції для удосконалювання вузлів і елементів, в тому числі: вузлів СПП-ПВТ, СПП-ПНТ, систем кінцевих ущільнень циліндрів турбін, систем регенерації високого та низького тиску, систем теплофікації для підігріву сітьової води. Розроблено програму керування режимами безпечних теплових навантажень системою теплофікації теплоенергетичних установок К-500-60/1500 і

К-1000-60/1500. За допомогою комплексу АКАФТ, що працює у складі ВОК на 5-му енергоблоці Нововоронезької АЕС (Росія) і 1-му, 2-му енергоблоках Ігналінської АЕС (Литва), здійснюється аналіз параметрів і діагностика технічного стану енергетичного і теплообмінного устаткування турбоустановок К-500-60/1500 і К-750-65/3000.

Особистий внесок дисертанта. Запропоновано метод імітації функціонального стану теплоенергетичних установок при їх експлуатації на електростанціях як основа сучасної методології аналізу якості функціонування, керування технологічними процесами і діагностики теплоенергетичних об'єктів (роботи 1,2,7,11,13,14); розроблено математичні моделі та алгоритми для автоматизованого програмного комплексу АКАФТ (роботи 1,3,9,10,21,22); запропоновано використання АКАФТ у складі ВОК на електростанціях для аналізу якості функціонування, керування і діагностики теплоенергетичних установок і устаткування (роботи 2,18,23); розроблено і експериментально перевірено методи одержання за допомогою АКАФТ режимних та інтегральних експлуатаційних характеристик теплоенергетичних установок (роботи 1,2,7,12,18,23); розроблено метод ієрархічної структуризації значущості технологічних параметрів теплоенергетичних установок (роботи 1,2,19); запропоновано застосування інтегральних характеристик для оптимального розподілу електричних навантажень між турбоустановками електростанції (роботи 2,16); розроблено метод керування режимами теплових навантажень систем теплофікації турбоустановок ТЕС і АЕС (роботи 1,8,10); розроблено метод технічної діагностики устаткування теплоенергетичних установок, заснований на імовірнісному прогнозуванні змін за часом експлуатаційних характеристик (роботи 2,20-23); запропоновано технічні розв'язки щодо оптимізації структури і пара-

метрів технологічних процесів у теплоенергетичних установках (роботи I,2,4-6,8,9,II,I2,I7).

Впровадження роботи. Результати роботи впроваджено в період з 1980 по 1994 рр.:

- на НВО "Турбоатом" (м.Харків) у вигляді пакета прикладних програм для проектування технологічних схем енергетичних турбоустановок і результатів досліджень експлуатаційних характеристик турбоустановок АЕС (1980 р.); у вигляді режимних характеристик, номограм регулювання теплового навантаження сітєвих підігрівачів, технологічних схем зливу сепарата і кінцевих ущільнень турбоустановки К-1000-60/1500 (1982 р.); у вигляді технологічних схем надійних дренажних систем регенеративних підігрівачів турбоустановок АЕС нового покоління (1989 р.);

- на Нововоронезькій АЕС у вигляді удосконалених технологічних схем турбоустановок К-220-44 і К-500-6-/1500 методами математичного моделювання (1984 р.); у вигляді системи програм, що моделює функціонування турбоустановки К-500-60/1500 5-го енергоблока, та енергетичних і теплофікаційних характеристик (1986 р.); у вигляді експлуатаційних характеристик турбоустановки К-220-44 і системи діагностики функціонального стану турбоустановки К-500-60/1500 (1988 р.);

- на Ігналінській АЕС у вигляді експлуатаційних характеристик турбоустановки К-750-65/3000, одержаних за допомогою математичної моделі (1986 р.); у вигляді комплексу математичних моделей і програм для розрахунку параметрів функціонального стану і діагностики устаткування турбоустановок К-750-65/3000 I-го і 2-го енергоблоків (1989 р.);

- на фірмі "Діагностика машин" (м.Гданськ, Польща) у вигляді комплексу програм імовірнісної діагностики теплоенергетичного устаткування (1994 р.).

Економічний ефект від впровадження результатів роботи на різних підприємствах склав 902,7 тис.крб., підтверджений внесок автора - 620 тис.крб. у цінах 1991 р.

Апробація роботи. Наукові та практичні результати роботи докладалися на:

- 10-я міжнародній конференції по парових і газових турбінах для теплових електростанцій, м.Карлови Вари, Чеська республіка, жовтень, 1994 р.;

- всесоюзних науково-технічних конференціях і семінарах "Підвищення ефективності роботи конденсаційних установок і систем охолодження циркуляційної води теплових і атомних електростанцій", сел.Комсомольське, вересень 1983 р.; "Підвищення економічності, надійності та маневреності енергетичного устаткування ТЕС", м.Львів, жовтень, 1984 р.; "Підвищення ефективності та оптимізація теплоенергетичних установок", м.Саратов, травень, 1985, 1987 рр.; "Системні оцінки ефективності та вибір напрямку технічного прогресу в енергетиці", м.Іркутськ, вересень, 1989 р.;

- республіканських науково-технічних конференціях "Математичне моделювання процесів і конструкцій енергетичних і транспортних турбінних установок в системах їх автоматизованого проектування", м.Готвальд, вересень, 1982, 1985, 1988, 1991 рр.;

- нарадах і засіданнях науково-технічних рад Міністерства атомної промисловості та енергетики СРСР, Міністерства енергетики України, НВО "Турбоатом" ім.С.М.Кірова (м.Харків), НВО ЦКТИ ім.І.І.Ползунова (м.Санкт-Петербург), підприємства "Укртехенерго" (м.Львів), підприємства "Укренерготеплоізоляція" (м.Харків), Нововоронезький АЕС, Ігналінський АЕС, Зміївський ГРЕС, Курахівський ГРЕС, Старо-бешевський ГРЕС, Інституту проточних машин ПАН (м.Гданськ,

Польща), фірми "Діагностика машин" (м.Гданськ, Польща), фірми "Церпрецис ГмбХ" (м.Триптіс, Німеччина), 1982-1994 рр.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 44 наукових праці, в тому числі 2 монографії, 19 статей, 2 депоновані рукописи, 21 теза доповідей науково-технічних конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел із 243 бібліографічних найменувань, 3 додатків. Основний обсяг роботи 264 стор., 86 рисунків і 27 таблиць; обсяг додатків на 122 стор.; усього 542 стор.

### ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і визначено задачі дослідження, наведено перелік нових наукових і практичних результатів, дано загальну характеристику роботи.

У першому розділі проведено огляд існуючих методів аналізу параметрів технологічних процесів у теплоенергетичних установках та устаткуванні, описано методологію математичного моделювання цих процесів і подано імітаційну модель функціонального стану теплоенергетичної установки.

Складність теплоенергетичної установки як технологічної системи виявляється в її багатопараметричності, складному структурному та функціональному зв'язку параметрів, наявності різних обмежень на зміну параметрів і зв'язків, частковій стохастичності їх зміни. Дослідження таких систем традиційними аналітичними методами не може бути виконано з достатньою повнотою та деталізацією. Це потребувало розробки спеціальних методів дослідження, в тому числі математичного моделювання технологічних схем турбоустановок на ЕОМ. У галузі розробки математичних моделей технологічних процесів

у теплоенергетичних установках різними авторами був створений ряд універсальних програм. Серед них найбільш відомі роботи ЦНДІКА, СЕІ, НВО ЦКТІ, ІПМаш НАН України, де створено велими досконалі методи моделювання процесів у теплоенергетичних установках. Ці методи, в основному, орієнтовані для розв'язання певного кола задач проектування і не можуть бути безпосередньо використані для аналізу функціонального стану, керування та діагностики теплоенергетичних установок та устаткування, оскільки або не мають необхідного рівня деталізації, або не дозволяють оперативно відстежувати зміну структури і параметрів технологічного процесу. У зв'язку з цим велику актуальність набуває розробка методів математичного моделювання технологічних процесів у різних теплоенергетичних установках для імітації їх функціонального стану під час експлуатації та організація на цій основі автоматизованих програмних комплексів для керування та удосконалювання технологічних процесів і діагностики об'єктів теплоенергетичної промисловості.

Одним з таких методів є імітаційне моделювання, при якому модель об'єкта будується як його інформаційний аналог, що відтворює технологічні процеси і характерні для об'єкта функціональні явища в їх логічній (структурній), параметричній та часовій залежностях.

При імітаційному моделюванні структура теплоенергетичної установки (рис.1) подається орієнтованим технологічним графом

$$G = \bigcup_{i=1}^m N_i \Leftrightarrow \bigcup_{i=1}^m \bigcup_{j \in R_i} N_j \quad (1)$$

де  $N_i$ ,  $N_j$  - імена технологічних елементів (об'єктів) процесу;  $R_i$  - множина елементів, до яких ідуть вихідні з елемента і технологічні зв'язки;  $\Leftrightarrow$  - знак двобічної відповідності;  $m$  - кількість елементів в установці, кожен з яких

характеризується деякою сукупністю числових параметрів.

### Математична модель процесів теплоенергетичної установки

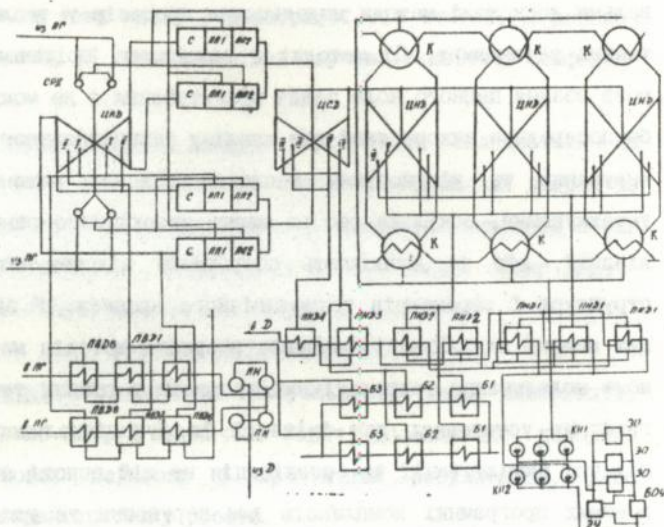


Рис. I

має вигляд

$$\left\{ \Omega(x) \mid \Phi_i(x) = 0, \quad x \in M, \quad i = \overline{1, S} \right\}, \quad (2)$$

де  $\Omega, \Phi_i$  - функціональні відношення (логічно-числові оператори), що описують якість установки як технічної системи і технологічні процеси, що відбуваються в ній, і складаються з рівностей, нерівностей, логічних умов, таблиць;  $i$  - номер відношення;  $S$  - кількість відношень математичної моделі;  $x = \langle x, y, b, \lambda, w \rangle$  - інформаційна структура моделі, в якій:  $x$  - вектор незалежних змінних,  $y$  - вектор залежних змінних,  $\lambda = \langle \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r \rangle$  - вектор зовнішніх умов;  $w$  - кортеж змінних керування;  $M$  - область можливих станів елементів установки.

Структурно програмні комплекси, що моделюють теплоенергетичні установки, складаються із внутрішньої та зовнішньої

частин. Внутрішня частина являє собою логічно-числові оператори, визначені інформаційною структурою технологічного процесу, а зовнішня - систему засобів для опису розв'язуваних задач і математичних методів їх розв'язання. Така організація моделюючих комплексів привела до того, що і керування їми складається із внутрішнього та зовнішнього.

Внутрішнє керування забезпечує автоматичне функціонування операторів моделі об'єкта як єдиного цілого. Керування предикатною частиною логічно-числових операторів здійснюється системою декодуючих і керуючих функцій, визначених на предметних змінних технологічного графа  $\Gamma$ . Залежно від змісту логічної інформації, що міститься в структурі графа, висловлювальні функції логічно-числових операторів приймають конкретні значення, внаслідок чого формується та розв'язується конкретна система відношень.

Імітаційна модель функціонального стану теплоенергетичної установки в операторній формі має вигляд

$$\{ \forall q(x) \mid \forall m(x) = 0; \forall p(x) = 0; \forall \Pi(x) = 0; \forall E(x) = 0; \forall \eta(x) = 0; \forall e(x) = 0; \forall d(x) = 0; \} \quad (3)$$

де  $\forall q$ ,  $\forall m$ ,  $\forall p$ ,  $\forall \Pi$ ,  $\forall E$ ,  $\forall \eta$ ,  $\forall e$ ,  $\forall d$  - логічно-числові оператори відповідно технологічної ефективності, збереження кількості речовини, тиску, термодинамічних параметрів, збереження енергії, ККД турбіни й параметрів проточної частини, внутрішніх параметрів тепломасообмінного і насосного устаткування, діагностики стану устаткування.

Зовнішнє керування програмного комплексу, що моделює теплоенергетичну установку, призначено для імітації її різних функціональних станів шляхом зміни параметрів і структури технологічних процесів. Оператор зовнішнього керування  $\text{var}(x, \Sigma)$  являє собою двомісний логічно-числовий оператор, який, маючи відкриту множину формалізованих процедур  $\Sigma$ ,

можє здійснювати цілеспрямовані зміни числових і логічних змінних інформаційної структури моделі  $x$ . До складу  $\Sigma$  також входять: методи розв'язання задач нелінійного програмування; планування експерименту та статистичної обробки його результатів, ідентифікації математичної моделі та ін. За допомогою оператора зовнішнього керування розв'язуються такі типи задач:  $x_{var}$ ,  $G_{var}^T$ ,  $A_{const}$ ,  $S_{const}$ ,  $W_{const}$  - структурно-параметрична варіація;  $x_{const}$ ,  $G_{const}^T$ ,  $A_{var}$ ,  $S_{const}$ ,  $W_{const}$  - варіація зовнішніх параметрів і зв'язків;  $x_{const}$ ,  $G_{const}^T$ ,  $A_{const}$ ,  $S_{const}$ ,  $W_{var}$  - зміна режиму роботи математичної моделі (автоматичний або діалоговий) і складу операторів;  $x_{const}$ ,  $G_{const}^T$ ,  $A_{const}$ ,  $S_{var}$ ,  $W_{const}$  - зміна деталізації моделювання.

На основі вищеперелічених типів можуть бути розв'язані багато які задачі, що виникають при керуванні або дослідженні технологічних процесів у теплоенергетичних установках, у тому числі і поставлені в цій дисертаційній роботі: задача аналізу впливу параметрів, структури і зовнішніх умов протікання процесу, при розв'язанні котрих, змінюючи інформаційну структуру  $x$  моделі (2), можна аналізувати вектор вихідних даних  $Y = f(x, G^T, A)$ ; задача структурно-параметричної оптимізації вигляду

$$\text{extr}_x \Omega(x) \mid \phi_i(x) = 0, x_m \leq x \leq x^m, y_m \leq y \leq y^m, \\ G^T \in \langle G_1^T, G_2^T, \dots \rangle, A \in \langle \lambda_1, \lambda_2, \dots \rangle, i = \overline{1, S};$$

задача визначення вигляду режимних та інтегральних експлуатаційних характеристик турбоустановок (задача прямої ідентифікації)  $\Delta Y = A(\Delta x, \Delta G^T, \Delta A)$ , коли по відомих  $\Delta Y$ ,  $\Delta x$ ,  $\Delta A$ ,  $\Delta G^T$  визначається оператор  $A$ ; задача діагностики технічного стану устаткування (задача зворотної ідентифікації), коли по відомих  $Y$ ,  $A$ ,  $G^T$ ,  $A$  визначається вектор параметрів  $x$ ;

задача оптимального розподілу теплових та електричних навантажень  $Y_i$  в часі  $\tau$  між теплоенергетичними установками на електростанції з метою досягнення  $Y_{\Sigma} = \text{extr} \left( \sum_{i=1}^n Y_i, (X(\tau), B^*(\tau), A(\tau)) \right)$ .

У другому розділі описано автоматизований комплекс програм АКАФТ, розроблений на основі математичної моделі функціонального стану теплоенергетичних установок для структурно-параметричного аналізу параметрів технологічних процесів, їх керування, удосконалювання та технічної діагностики.

АКАФТ має модульну структуру з ієрархічною упорядкованістю (рис.2). Керуюча програма організовує роботу всього

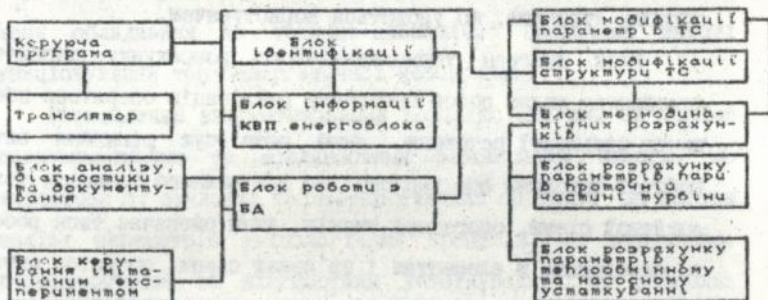


Рис.2

комплексу по виконанню завдань, що надходять від користувачів. Спеціально розроблений транслятор вхідної мови (по типу проблемно-орієнтованих мов) робить лексичний та синтаксичний аналіз уведених користувачем директив.

Блок програм, що обслуговує базу даних (БД), призначений для зберігання різної інформації, що накопичується в процесі експлуатації установки. Структурно БД розділяється на власне базу даних, що здійснює безпосереднє зберігання останніх, і систему керування БД, яка, використовуючи індексно-довільний метод, забезпечує інтерфейсний доступ до записів, що зберігаються.

Блок програм структурних зв'язків технологічних схем тепло-

енергетичних установок перевіряє можливість зв'язку устаткування одне з одним з погляду смислу технологічного процесу; керує роботою семантичних підпрограм транслятора, що здійснюють такі перетворення в структурі: підключення, відключення, переключення, заміну, виключення та включення теплоенергетичного устаткування в схему техпроцесу; робить вибір технологічних зв'язків між устаткуванням.

Блок програм зміни параметрів технологічного процесу керує увідом вихідних даних, необхідних для розрахунку параметрів технологічного процесу теплоенергетичної установки, і проведенням їх корекції, а також керує роботою лексичного та синтаксичного блоків транслятора, що здійснюють відповідну обробку директив, що вводяться користувачем.

Блок програм термодинамічного розрахунку параметрів техпроцесу являє собою програмну реалізацію оператора збереження кількості речовини, який розв'язує рівняння витрат робочої речовини або теплоносіїв для кожного елемента технологічної схеми, оператора тисків, який визначає тиск робочого середовища в елементах і зв'язках схеми, оператор ентальпій, який визначає ентальпії та температури робочого середовища в енергетичному та теплообмінному устаткуванні, оператора енергії, який визначає теплові та енергетичні показники установки і забезпечує необхідну для розв'язання конкретної задачі точність розрахунку цих показників.

Блок програм докладного розрахунку параметрів у проточній частині турбіни проводить розрахунок процесу розширення пари в напрямляючих і робочих лопатках турбіни по їх перерізах і здійснює зв'язок між розрахунками проточної частини і теплоенергетичної установки в цілому.

Блок програм розрахунку параметрів технологічного процесу в тепломасообмінному і насосному устаткуванні здійс-

нє розрахунок параметрів у сепараторах, пароперегрівачах, конденсаторах, підігрівачах низького та високого тиску, деаераторах, випарниках, насосах та іншому теплоенергетичному устаткуванні.

До блока керування імітаційним експериментом включено програми, що реалізують статистичні методи планування експерименту та його обробку за допомогою багатфакторних регресійного та дисперсійного аналізів даних.

Блок програм аналізу розрахунків, діагностики та документування результатів нагромаджує та друкує результати розрахунку параметрів технологічного процесу, діагностики стану обладнання та техніко-економічні показники якості функціонування теплоенергетичної установки.

Розроблений автоматизований комплекс програм за своїми характеристиками та можливостями задовольняє вимоги, що ставляться на сучасних теплоенергетичних об'єктах до систем аналізу параметрів технологічних процесів, їх керування, удосконалювання та діагностики устаткування, що дозволяє використовувати його у складі спеціальних БОК.

У третьому розділі розроблено принципи взаємодії вимірвальних систем і АКАФТ, розглянуто організацію БОК на електростанціях, описано імітаційні та натурні експерименти на діючих теплоенергетичних установках різного профілю і проведено порівняння їх результатів.

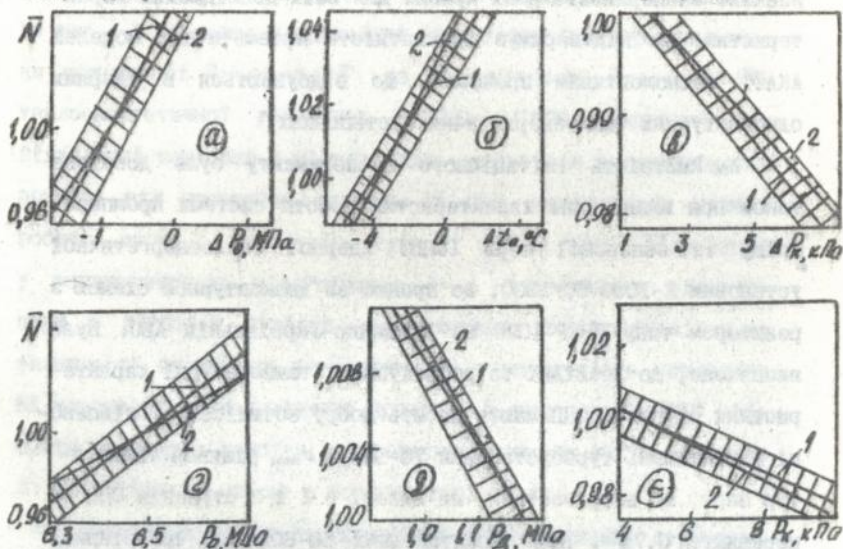
Для збору, передачі та обробки інформації, необхідної для розв'язання задач розрахунку та аналізу параметрів устаткування теплоенергетичних об'єктів, їх керування та діагностики, запропоновано застосування імітаційного експерименту за допомогою спеціальних БОК, який має три рівні: нижній - вимірвальний комплекс об'єкта; середній - комутаційний комплекс; верхній - обчислювальний комплекс АКАФТ. Ниж-

ній рівень призначений для збору інформації, її реєстрації та попередньої обробки. Він складається із датчиків, що забезпечують збір інформації (оперативної та неоперативної), багатоканальних реєструючих пристроїв, комп'ютерів, які використовуються для попередньої обробки вимірів. Схема вимірів нижнього рівня ВОК включає до себе сукупність контрольних точок по всіх параметрах технологічного процесу, необхідних для визначення експлуатаційних характеристик, діагностики і прогнозування стану окремих теплоенергетичних систем. Вся інформація нижнього рівня через міжкомп'ютерний зв'язок надходить на середній рівень, де збирається в БД вимірів ВОК. З комутаційного комплексу інформація передається в АКАФТ на верхній рівень ВОК, призначений для аналізу даних, моделювання технологічних процесів і проведення імітаційних експериментів. Для цього використовується ЕОМ типу IBM PC AT, яка одержує запит від комутаційного комплексу на передачу даних, приймає їх за допомогою спеціально розроблених динамічних макетів інформації та записує в оперативну пам'ять.

Для перевірки адекватності модельованих в АКАФТ технологічних процесів теплоенергетичних установок реальним було проведено порівняння результатів імітаційних експериментів і натурних випробувань на теплоенергетичному устаткуванні Зміївської ГРЕС (Україна), Ігналінської АЕС (Литва) і Південно-Української АЕС (Україна), що являють собою енергетичні об'єкти різного профілю.

На рис.3,а,б,в зображено залежності впливу на потужність турбоустановки  $N$  зміни тиску  $\Delta p_0$  і температури  $\Delta t_0$  своєї пари і тиску в конденсаторі  $\Delta p_k$ , одержані в ході натурних випробувань, а також у результаті розрахунків, проведених на математичній моделі технологічного процесу уста-

новки К-300-240-2 Зміївської ГРЕС. Із рисунка видно, що границі допустимої основної абсолютної похибки результатів



1-натурний, 2-імітаційний експеримент, заштрихована область довірчій інтервал

Рис. 3

натурних випробувань практично включають до себе значення  $N$ , одержані в результаті імітаційного експерименту. Це доводить ідентичність результатів імітаційного експерименту і натурних випробувань, тобто адекватність математичних моделей АКАФТ реальним технологічним процесам, що відбуваються в теплоенергетичних установках, працюючих на органічному паливі.

Порівняння результатів натурального та імітаційного експериментів для ядерних одноконтурних теплоенергетичних установок (реактор РБМК) проводилось спільно з підприємством "Укртехенерго" (м.Львів) під час теплових випробувань турбоустановок К-750-65/3000 енергоблока МІ на Ігналінській АЕС (Литва). Розрахункові залежності (рис.3,г,д,е), що описують характеристики технологічних процесів установки К-750-

65/3000, попадають у довірчі інтервали вимірів, побудовані навколо експериментальних кривих для всіх досліджених характеристик. Це підтверджує адекватність математичних моделей АКАФТ технологічним процесам, що відбуваються в ядерних одноконтурних теплоенергетичних установках.

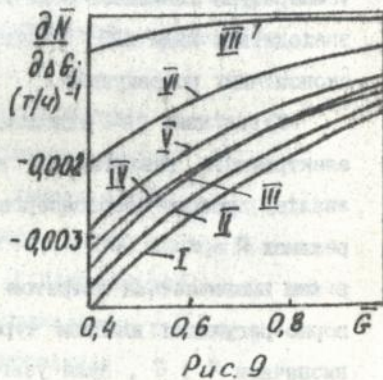
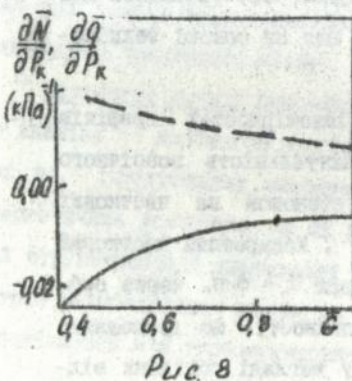
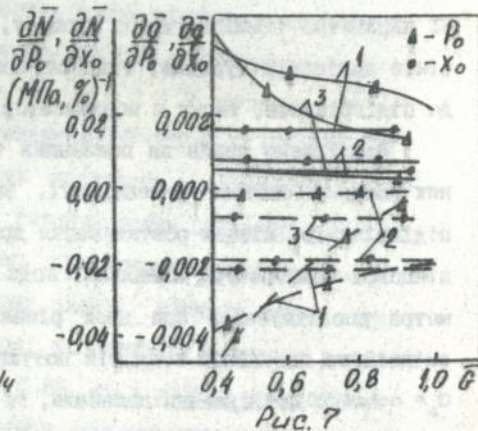
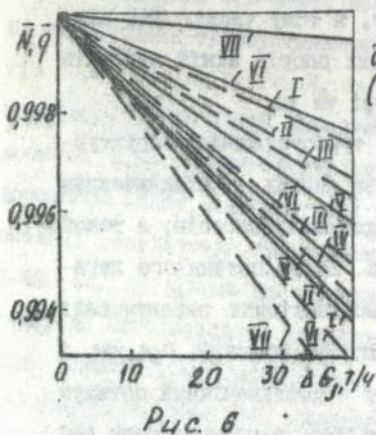
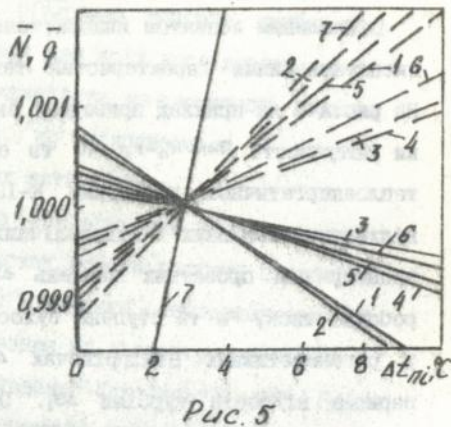
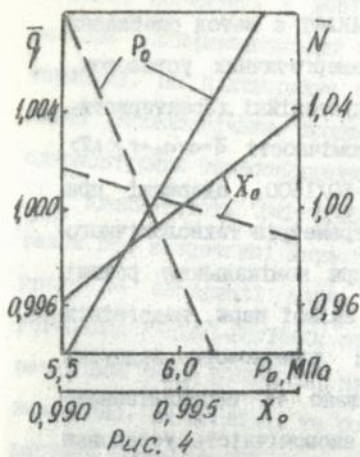
Адекватність імітаційного експерименту була доведена також при визначенні характеристик роботи системи промислових нагріву та сепарації пари (СПП) ядерної теплоенергетичної установки К-1000-60/1500, що працює за двоконтурною схемою з реактором типу ВВЕР-1000 на Південно-Українській АЕС. Було визначено, що дослідні та розрахункові температурні характеристики ступенів СПП мають досить добру збіжність. У діапазоні навантажень турбоустановки 70-100 %  $N_{ном}$  різниця температур пари, що нагрівається, на виході з I і II ступенів СПП не перевищує 0,7% , при навантаженнях 50-60%  $N_{ном}$  ця різниця досягає 0,9%. Добра збіжність дослідних і визначених за допомогою АКАФТ температурних характеристик СПП вийшла і при аналізі результатів випробувань теплоенергетичної установки К-220-44, що працює на ядерному паливі. Різниця температур пари, що нагрівається, на виході зі ступенів в усьому робочому діапазоні не перевищувала 0,8%, що є цілком припустимим для аналізу роботи СПП, визначення температурних характеристик при різних навантаженнях теплоенергетичної установки і для оцінки технічного стану.

Четвертий розділ присвячений розробці методів одержання та аналізу за допомогою програмних комплексів типових режимних та інтегральних експлуатаційних характеристик теплоенергетичних установок та їх устаткування, методу ієрархічної структуризації значущості теплових і гідравлічних параметрів технологічних процесів, методу оптимального розподілу навантаження між турбоустановками електростанції.

Важливим аспектом використання АКАФТ є метод одержання експлуатаційних характеристик теплоенергетичних установок. На рис.4-6 як приклад приведені експлуатаційні характеристики потужності  $N = N/N_0 = f_1(\Delta X)$  та економічності  $\bar{q} = q/q_0 = f_2(\Delta X)$  теплоенергетичної установки К-1000-60/1500, одержані при відхиленні теплових і гідравлічних параметрів технологічного процесу від проектних значень  $\Delta X$  при номінальному режимі роботи: тиску  $P_0$  та ступеня сухості свіжої пари, недогрівів у регенеративних підігрівачах  $\Delta t_{\text{н}}$ ; додаткового відпуску пари з відборів турбіни  $\Delta G_1$ . Одержано та проаналізовано залежності впливу на потужність та економічність установки БІ параметра технологічного процесу, в тому числі: ККД відсіків циліндрів турбіни, гідравлічних опорів ліній відборів до підігрівачів, тиску в конденсаторі та ін.

Досліджено вплив на показники турбоустановки структурних змін у системі регенерації, зв'язаних з відключенням підігрівачів, місцем розташування дренажних насосів, а також кінцевої температури живильної води. Вплив останнього параметра досліджувався при двох різних вихідних передумови: змінній та постійній тепловій потужності реактора  $Q_R = \text{var}$  і  $Q_R = \text{const}$ . Дослідження показали, що термодинамічний оптимум температури живильної води для тихохідних турбоустановок АЕС знаходиться вище 225 °С, прийнятих у них на основі техніко-економічних розрахунків.

У зв'язку з підсиленням нерівномірностей графіків електричного навантаження зростає актуальність всебічного аналізу роботи теплоенергетичних установок на часткових режимах  $N = f_1(c, \Delta X)$ ;  $\bar{q} = f_2(c, \Delta X)$ . Конкретний частковий режим визначається витратою свіжої пари  $\bar{G} = G/G_0$  через стопорно-регулюючі клапани турбіни. Залежності, що дозволяють визначити  $N$  і  $\bar{q}$ , були узагальнені у вигляді похідних від-



носної зміни потужності та питомої витрати теплоти за параметрами  $\Delta x_j$ ,  $j = \overline{1, n}$  у функції відносної витрати свіжої пари  $\partial \dot{N} / \partial \Delta x_j = F_1(\vec{\zeta})$ ;  $\partial \dot{q} / \partial \Delta x_j = F_2(\vec{\zeta})$ . Вплив на потужність та економічність тиску і ступеня сухості свіжої пари теплоенергетичної установки К-1000-60/1500 досліджувався при різних умовах паророзподілу: при фіксованому (для відповідного режиму) положенні стопорно-регулюючих клапанів (рис.7, криві 1); при постійній масовій витраті свіжої пари (рис.7, криві 2); при ковзному початковому тиску (рис.7, криві 3).

Рис.8 ілюструє вплив зміни тиску в конденсаторі, а рис.9 - вплив додаткового відпуску пари з відборів турбіни. Дослідження впливу на потужність та економічність недогрівів і гідравлічних опорів теплообмінників СШ і регенерації показали, що в міру зниження навантаження відбувається значний перерозподіл впливу параметрів цих систем, зв'язаний з перерозподілом витрат пари.

Проведені дослідження впливу умов роботи теплофікаційної системи дозволили оцінити зміну потужності та теплової економічності турбоустановки при зміні температури навколишнього повітря, витрати сітрової води, недогрівів у сітових підігрівачах і гідравлічних опорів ліній відборів до них у великому діапазоні зміни електричного навантаження.

Аналогічні експлуатаційні характеристики були одержані для теплоенергетичних установок ПВК-200-130, К-300-240, К-220-44, К-500-60/1500, К-1000-60/3000, К-750-65/3000.

Результати досліджень технологічних процесів теплоенергетичних установок були оброблені методами регресійно-дисперсійного аналізу з метою встановлення форми найбільш імовірного функціонального зв'язку між параметрами техпроцесу, ступеня впливу та ієрархічної значущості кожного з них. Режимні експлуатаційні характеристики (рис.4-6), що являють

собов по суті діаграми розсіювання залежної змінної від компонент вектора незалежних змінних, після перевірки гіпотези нормальності розподілу за  $\chi^2$  - критерієм і відсутності мультиколінеарності, оброблялися методом лінійного регресійного аналізу. У цьому випадку регресійне рівняння має векторно-матричний вигляд

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ \dots \\ Y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \dots (X_{11} - \bar{X}_1) \dots (X_{p-1,1} - \bar{X}_{p-1}) \\ \dots \\ 1 \dots (X_{1n} - \bar{X}_1) \dots (X_{p-1,n} - \bar{X}_{p-1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \dots \\ \beta_{p-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ \dots \\ e_n \end{bmatrix}$$

або

$$\bar{Y} = \bar{X} \bar{\beta} + \bar{e} \quad (4)$$

Тут матриця  $\bar{Y}$  - вектор значень залежної змінної (потужності, теплової економічності установки);  $\bar{X}$  - регресійна матриця незалежних змінних (технологічних параметрів);  $\bar{X}_j$  - середнє значення  $j$  змінної ( $j = \overline{1, p-1}$ );  $\beta$  - вектор коефіцієнтів регресії;  $e$  - вектор випадкових похибок.

Для визначення коефіцієнтів регресії  $\bar{\beta}$  був використаний метод найменших квадратів (МНК). У цьому випадку

$$\bar{\beta} = (\bar{X}' \bar{X})^{-1} \bar{X}' \bar{Y} \quad (5)$$

Розв'язання нормального рівняння (5) здійснювалось багатокроковим методом Дулітла, який був включений до системи програм АКАФТ. При цьому на кожному кроці в рівняння регресії (4) додавалась незалежна змінна, що найбільш сильно зменшує дисперсію залежної змінної, що дозволило оцінити ступінь впливу кожної з незалежних змінних на результуючу функцію і, таким чином, провести їх ранжування за цією ознакою. У результаті були одержані регресійні рівняння впливу теплових і гідравлічних параметрів теплоенергетичних установок на потужність  $N$  і питому витрату теплоти  $\bar{e}$  (у вигляді апроксимуваних гіперплощин) при режимах роботи від 0,4 Б до 1,0 Б. Перевірка статистичної значущості цих рівнянь здійснювалась критерієм Фішера  $F$ , а частинних незалежних змінних - критерієм Стюдента  $t$ . Для визначення ієрархічних рівнів

незалежних змінних - параметрів техпроцесу - використовувались критичні точки  $t$ -розподілу. За допомогою описаного методу була проведена повна ієрархічна структуризація значущості теплоенергетичних параметрів різних теплоенергетичних установок, працюючих на органічному та ядерному паливах, та їх окремих систем. Така структуризація дозволяє коректно (починаючи з вищих ієрархічних рівнів) проводити оптимізацію параметрів теплоенергетичного устаткування та керувати режимами його роботи за напрямом, що визначається апроксимуючою гіперплощиною.

Регресійні рівняння для показників теплоенергетичних установок на різних режимах роботи були узагальнені за допомогою апроксимації за МНК у вигляді інтегральних характеристик впливу параметрів на технологічний процес

$$\begin{aligned} \bar{N} &= B_0 + \sum_{i=1}^P B_i \Delta X_i = \left[ \sum_{n=0}^4 b_n \bar{G}^n \right]_0 + \sum_{i=1}^P \left[ \sum_{n=0}^4 b_n \bar{G}^n \right]_i \Delta X_i, \\ \bar{Q} &= B'_0 + \sum_{i=1}^P B'_i \Delta X_i = \left[ \sum_{n=0}^4 b'_n \bar{G}^n \right]_0 + \sum_{i=1}^P \left[ \sum_{n=0}^4 b'_n \bar{G}^n \right]_i \Delta X_i. \end{aligned} \quad (6)$$

Одержані інтегральні експлуатаційні характеристики дозволяють оцінити вплив кліматичних умов (температур навколишнього повітря та охолодної води), параметрів технологічного процесу, енергосистемних умов (потрібних електричних і теплових навантажень) на роботу теплоенергетичних установок і можуть використовуватися для керування техпроцесом виробництва електроенергії та теплоти.

При умовах, що склалися в промислово розвинених країнах, коли частина енергоблоків станцій та промислових підприємств повинна працювати з неповним навантаженням, задача раціонального розподілу навантаження між окремими установками є дуже важливою для експлуатації. Одержані інтегральні експлуатаційні характеристики (6) дозволяють проводити оптимізацію розподілу електричних наванта-



вок; розробкою температурних характеристик для керування режимами роботи теплофікаційних систем; визначенням безпечних експлуатаційних діапазонів навантаження сітєвих підігрівачів.

Процес зміни теплового навантаження в сітєвих підігрівачах може бути описаний за допомогою одержаних температурних характеристик, які являють собою залежності температури сітєвої води  $t_i^{\text{св}}$  на виході з кожного підігрівача у функції від режимних параметрів і параметрів елементів теплофікаційної системи. До режимних параметрів віднесено електричне навантаження турбіни  $N$  і температура навколишнього повітря  $t_{\text{ов}}$ . Як параметри елементів теплофікаційної системи розглядалися недогріви в сітєвих підігрівачах  $\Delta t_i$  і гідравлічні опори ліній відборів до них  $\Delta P_i$ . Температурна характеристика  $i$ -го підігрівача має вигляд

$$t_i^{\text{св}} = t_i(t_{\text{ов}}, N, \Delta t_1, \Delta P_1, \dots, \Delta t_i, \Delta P_i). \quad (9)$$

Установлення явного виду функцій  $t_i^{\text{св}}$  здійснювалось шляхом статистичної обробки імітаційного експерименту на АКАФТ. За допомогою одержаних температурних характеристик проведено дослідження можливого діапазону теплового навантаження сітєвих підігрівачів турбоустановок АЕС на номінальному та частинному режимах (35-100%  $N$ ) в інтервалі температур навколишнього повітря  $t_{\text{ов}} = +18 + 24^\circ\text{C}$ . За результатами досліджень побудовано номограми керування режимами роботи систем теплофікації цих установок з урахуванням і без урахування обмежень, що накладаються припустимими з погляду безпеки швидкостями відбірної пари. Ці номограми дозволяють за значеннями температури  $t_{\text{ов}}$  і потужності турбіни  $N$  визначити: кількість несучих теплове навантаження сітєвих підігрівачів, необхідну для забезпечення потрібного графіка температур сітєвої води; температуру сітєвої води  $t_i^{\text{св}}$  за кожним підігрівачем;

максимально можливе теплове навантаження теплоенергетичної установки  $Q$  у заданих умовах.

За допомогою АКАФТ досліджено можливості підвищення теплового навантаження турбоустановок АЕС потужністю 1000 МВт (до  $Q_0 = 523$  МВт і більше). Обмеженням теплофікаційних можливостей турбоустановок, що розглядаються, було нижнє граничне значення об'ємної витрати пари  $G_{min}$  через останній ступінь ЦНТ, при якому забезпечувалась безвідривна течія пари у напрямлюючих і робочих лопатках останнього ступеня. За результатами досліджень побудовано залежності зміни об'ємної витрати пари через останній ступінь ЦНТ при різних значеннях температур охолодної води  $t_{ох}$  у функції величини відносної електричної потужності  $N$  для турбоустановок з різним компонуванням устаткування. На основі залежностей проведено аналіз регульовального діапазону електричної потужності цих турбоустановок. Проведені на основі тринадцяти порівнюваних структурних варіантів оптимізаційні техніко-економічні розрахунки показали, що оптимальна схема теплофікаційної системи енергоблока 1000 МВт складається з чотирьох сітєвих підігрівачів (з охолоджувачами дренажу біля другого), що живляться паром 6-3-го відборів турбіни. Така схема забезпечує високу економічність відпуску теплоті та припустиму з точки зору надійності турбоустановки відносну частку пари, що відбирається на кожний сітєвий підігрівач.

У результаті досліджень на АКАФТ варіантів схем кінцевих ущільнень циліндрів турбіни запропоновано оптимальну для теплоенергетичних установок АЕС потужністю 1000 МВт схему ущільнень зі сполученим роздавальним колектором, що працює за принципом "самоущільнення". Для цієї схеми вибрано траси і розраховано швидкості пари, що забезпечують перепад тисків між останніми камерами 0,005-0,01 МПа, що виключає попадання

водогі в ущільнення ЦНТ.

Досвід експлуатації теплоенергетичних установок АЕС виявив ряд недоліків існуючих технологічних схем вузлів СПП-ПВТ, особливо на частинних режимах роботи з навантаженням менше  $60\% N_{ном}$ . Це викликало необхідність в проведенні на АКАФТ досліджень з метою оптимізації схеми зливу високотемпературного сепарату. У результаті запропоновано технологічну схему, в якій злив сепарату здійснюється через насос в лінію основного конденсату перед деаератором. Це приводить до підвищення економічності всієї теплоенергетичної установки на  $0,044\%$  і забезпечує надійність вузла СПП-ПВТ при роботі на режимах з частинним навантаженням.

У шостому розділі описано метод і програмний модуль діагностики технічного стану теплоенергетичних установок на базі БОК, засновані на імовірнісному прогнозуванні зміни за часом експлуатаційних характеристик працездатного устаткування.

Стан  $S$  кожного теплоенергетичного об'єкта в період експлуатації визначається значеннями ряду параметрів (діагностичних функцій)  $F_i(i=1, n)$ , які є мірами якості його функціонування в момент часу  $t$ . Технічна діагностика теплоенергетичного устаткування за допомогою АКАФТ зводиться до проведення серії перевірок  $\Pi < n_1, \dots, n_k >$ , що являють собою чисельний експеримент на математичних моделях устаткування, що характеризується визначенням на основі показників КВП вхідним діям  $Y_k^{(i)}$ , що надходить на модель  $A_k^{(i)}$ , і відгуком моделі на це діяння (результат перевірки)  $R_k^{(i)} = A_k^{(i)} Y_k^{(i)} = A_k^{(i)}(n_k)$  і до зіставлення одержаних у результаті чисельного експерименту та вимірених на енергооб'єкті значень діагностичних функцій з нормативними.

Попередньо розв'язується задача оптимізації відбору

перевірок, що визначають технічний стан устаткування, яка полягає в тому, щоб число перевірок було мінімальним  $\Pi \rightarrow \min$  і щоб кожна перевірка  $\pi_k$  містила максимально можливу кількість інформації  $J_{\pi_k} \rightarrow \max$ . Повна кількість інформації, яку містить розроблений алгоритм перевірок  $\Pi$  відносно станів  $S$ , дорівнює  $J_{\Pi \rightarrow S} = J_{\pi_1} + J_{\pi_2/\pi_1} + \dots + J_{\pi_k/\pi_{k-1}} + S$ .

При діагностиці технічного стану теплоенергетичного устаткування як діагностична виступає багатопараметрична функція  $F = F(\bar{X}, \tau)$ , яка характеризує вплив зміни вектора параметрів устаткування  $\bar{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ , що відбивають погіршення експлуатаційних характеристик у мікрремонтний період  $\tau$ , на ефективність функціонування. Математична модель технологічних процесів, що протікають в устаткуванні, яке діагностується, дозволяє одержати залежності, що прогнозують вплив кожного з параметрів  $k_i$  на  $F$  за часом  $\tau$

$$F = F(x_i, \tau), \quad i = \overline{1, n}. \quad (10)$$

Оскільки процеси, що прогнозуються в теплоенергетичному устаткуванні являють собою випадкові функції часу, для їх опису можна застосовувати математичний апарат прикладної теорії випадкових процесів. У цьому випадку при умові нормального розподілу для фіксованого моменту часу  $\tau = \tau_i$  випадковий процес  $x_i(\tau)$  перетворюється у випадкову величину  $x = x_i(\tau_i)$ , що характеризується одновірною густиною імовірностей  $f(x)$ .

Результатом імовірнісного прогнозування зміни параметрів є розрахована для устаткування імовірність працездатного стану

$$P_{i,pe}(x_i(\tau_i) < x) = \int_{x_{i,min}}^{x_{i,max}} f(x_i, \tau_i) dx, \quad (11)$$

де  $f(x_i, \tau_i)$  - відома густина імовірностей процесу, що прогнозується,  $x$  - гранично допустиме значення  $x_i$ .

Досвід експлуатації теплоенергетичного устаткування показав, що вплив сукупності параметрів  $\sum_{i=1}^m X_i$  являє собою алгебраїчну суму впливу окремих параметрів з урахуванням їх взаємної кореляції

$$F_{\Sigma} = \sum_{i=1}^m (F(X_i, \tau)) \quad i=\overline{1, m}, \quad m \leq n, \quad (I2)$$

а ймовірність цього аналізу складає

$$P_{F_{\Sigma}} = \prod_{i=1}^m P_{i, np}(X_i(\tau_i)). \quad (I3)$$

Вимір технологічних параметрів за допомогою КВП у процесі експлуатації робиться звичайно в умовах різних випадкових завад, похибок, збоїв. Ураховуючи це, результати виміру діагностичної функції  $F$  у фіксований момент часу на діючому устаткуванні можна розглядати як інтервальне оцінювання, тобто інтервал між статистиками, що містить з певною ймовірністю істинне значення  $F$ . Таким чином, функцію  $F$ , що вимірюється, можна розглядати як випадкову змінну із вибірки вимірів  $n$  з невідомим середнім значенням  $\mu$ . Мінімальне та максимальне значення функції  $F$  у вибірці  $n$  будуть відповідно нижньою та верхньою границями довірчого інтервалу  $F_{min} \leq F \leq F_{max}$ , а величина  $(1 - \alpha)$  - довірчою ймовірністю. Відомо, що в цьому випадку величина  $(F - \mu) / (s \sqrt{n})$  підлягає  $t$ -розподілу Стюдента з  $(n-1)$  ступенями свободи. Тут  $F$  - вибіркове середнє, тобто  $F = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i$ , а  $s$  - вибіркова дисперсія  $s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (F_i - F)^2$ . Тоді процентний довірчий інтервал для діагностичної функції приймає вигляд  $\mu = F \pm t_{n-1}^{\alpha/2} s \sqrt{n}$ , де  $t_{n-1}^{\alpha/2}$  - верхня (критична) процентна точка  $t$ -розподілу з  $(n-1)$  ступенями свободи, тобто така, при якій ймовірність значень, що перевищують  $t_{n-1}^{\alpha/2}$ , дорівнює  $\alpha/2$ . Це положення використовується для побудови за результатами вимірів цілої серії довірчих інтервалів для діагностичної функції  $F$ , що відрізняються один від одного ймовірністю  $P$ , знаходження значень цієї функції в кожному з інтервалів

$$P_F \left( -t_{n-1}^{\alpha/2} \leq \frac{\bar{F} - \mu}{S \sqrt{\frac{1}{n}}} \leq t_{n-1}^{\alpha/2} \right) = 1 - \alpha.$$

У процесі діагностики проводиться порівняння осередненого результату вимірів діагностичної функції  $F_{\text{вим}}$  і значення цієї ж функції  $F_{\Sigma}$ , обчисленого за допомогою АКАФТ і що являє собою суму впливів окремих можливих причин (позитивний результат перевірки  $\pi_*$ ) у момент часу, що відповідає проведеним вимірам. Для цього використовується статистична теорія перевірки альтернативних гіпотез

$$\begin{cases} H_0 : F_{\Sigma} = F_{\text{вим}} \\ H_1 : F_{\Sigma} \neq F_{\text{вим}} \end{cases}$$

Гіпотеза  $H_0$  відхиляється, якщо абсолютне значення  $t$ -розподілу Стюдента, що дорівнює  $|t_0| = \left| \frac{F_{\Sigma} - F_{\text{вим}}}{S \sqrt{\frac{1}{n}}} \right|$ , перевищує значення критичної процентної точки  $t_{n-1}^{\alpha/2}$ .

Тобто якщо виконується нерівність  $|t_0| > t_{n-1}^{\alpha/2}$ . У цьому випадку робиться висновок, що  $F_{\text{вим}} \neq F_{\Sigma}$ , а величина  $|F_{\Sigma} - F_{\text{вим}}| = \delta F$  використовується для прийняття рішення про причини, що мали вплив на технічний стан устаткування. Чим менше  $\delta F$ , тим більше імовірність того, що саме ці причини змінили стан устаткування. Причому більш імовірними серед інших будуть ті причини, при яких  $F_{\Sigma}$  попадає в границі довірчого інтервалу  $\epsilon = \pm t_{n-1}^{\alpha/2} S \sqrt{\frac{1}{n}}$ , де імовірність можливої похибки  $\alpha$  мінімальна. Імовірність прийняття рішення в результаті діагностики дорівнює  $P = (1 - \alpha) \prod_{i=1}^m P_i(X_i(\tau_i))$ . При виконанні гіпотези  $H_0$ , тобто у випадку, коли  $F_{\Sigma} = F_{\text{вим}}$ , імовірність прийняття рішення буде максимальною, оскільки імовірність похибки  $\alpha=0$ , і буде дорівнювати  $P = \prod_{i=1}^m P_i(X_i(\tau_i))$ .

Розроблений метод діагностики був реалізований у вигляді окремого програмного модуля, що входить до АКАФТ (рис.10). Фактори, що викликають відхилення значень діагностичних функцій для основного та допоміжного теплоенергетич-

ного устаткування ТЕП, ТЕС і АЕС, були узагальнені, систематизовані та внесені в БД комплексу.

За допомогою АКАТІТ проведено діагностику технічного стану систем сепарації та промперегріву теплоенергетичних установок К-500-60/І500, регенеративних підігрівачів низького тиску теплоенергетичної установки ПБК-200-І30 та іншого устаткування.

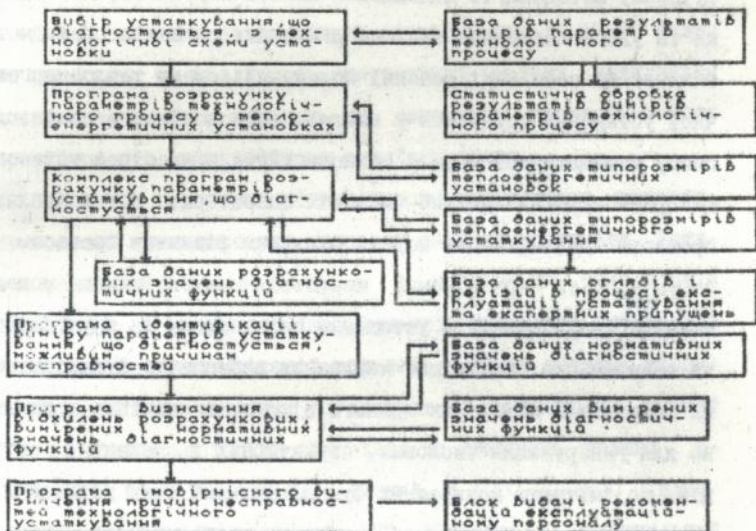


Рис. 10

У ВИСНОВКАХ сформульовано основні результати роботи.

У ДОДАТКУ 1 наведено перелік і розподіл контрольних точок вимірів при організації ВОК та ієрархічну структуру впливу параметрів технологічного процесу теплоенергетичних установок.

У ДОДАТКУ 2 наведено експлуатаційні характеристики устаткування теплоенергетичних установок різних типорозмірів.

У ДОДАТКУ 3 наведено документи про впровадження результатів досліджень.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

У дисертації одержано такі основні результати:

1. На базі теорії математичного моделювання технологічних процесів у технічних системах запропоновано застосування методу імітації функціонального стану теплоенергетичних установок у процесі експлуатації на електростанціях як основи сучасної методології підвищення якості керування, діагностики та удосконалювання теплоенергетичних об'єктів. Цей метод включає до себе такі основні положення: схема теплоенергетичної установки подається у вигляді технологічного графа; для опису математичної моделі технологічних процесів в установці використовуються логічно-числові оператори, що дозволяють провести ідентифікацію моделі реальним фізичним процесам за структурою та параметрами; керування математичною моделлю технологічних процесів установки складається із внутрішнього та зовнішнього; внутрішнє керування забезпечує функціонування операторів моделі як єдиного цілого, а зовнішнє призначено для генерування числових, структурних і режимних ситуацій, що імітують конкретний функціональний стан установки на електростанції; математична модель технологічних процесів теплоенергетичної установки дозволяє розв'язувати такі типи задач, що виникають в процесі експлуатації: аналіз технологічних параметрів; структурно-параметрична оптимізація; керування режимами роботи; удосконалювання техпроцесу; розподіл навантаження, діагностика технічного стану.

2. На основі методу імітації функціонального стану теплоенергетичних установок розроблено автоматизований комплекс програм для аналізу параметрів технологічних процесів, їх керування, удосконалювання та технічної діагностики устаткування теплоенергетичних об'єктів (АКАФТ). Комплекс програм реалізовано на персональних комп'ютерах типу РС. До

його складу увійшли такі основні програмні блоки: термодинамічного розрахунку технологічних схем установок різної структури з визначенням теплових і енергетичних показників; розрахунку, зміни і діагностики параметрів стану проточної частини турбіни, теплообмінного, насосного, конденсаційного, деаераційного та іншого устаткування за окремими нитками і корпусами технологічної схеми.

Для проведення імітаційного експерименту до АКАФТ включено програми, що реалізують статистичні методи планування експерименту та його обробки за допомогою багатфакторних регресійного та дисперсійного аналізів даних.

3.3 метою перевірки відповідності розроблених математичних моделей технологічних процесів теплоенергетичних установок реальним фізичним процесам і порівняння результатів імітаційного та натурального експериментів проведено спеціальні дослідження по ідентифікації моделей, а також натурні експерименти на діючих теплових установках на органічному паливі К-300-240 Зміївської ГРЕС (Україна) та ядерному паливі К-750-65/3000 Ігналінської АЕС (Литва), К-1000-60/1500 Південно-Української та Запорізької АЕС (Україна). Порівняльний аналіз результатів досліджень на математичних моделях і даних натурних випробувань показав їх адекватність.

4. Сформульовано та розв'язано проблему організації трирівневих ВОК на основі взаємодії теплоенергетичних вимірювальних систем, що використовуються в практиці, та АКАФТ. ВОК є засобом інтелектуальної підтримки діяльності персоналу теплоенергетичних об'єктів, призначеним для збору, передачі та обробки інформації, необхідної для розв'язання задач аналізу параметрів технологічних процесів, їх керування та технічної діагностики теплоенергетичного устаткування.

5. Розроблено такі методи аналізу параметрів і керування технологічними процесами теплоенергетичних установок та їх систем за допомогою АКАФТ у складі ВОК: одержання типових режимних експлуатаційних характеристик технологічних процесів енергетичного та тепломеханічного устаткування; ієрархічної структуризації та ранжування параметрів технологічних процесів; розробки інтегральних експлуатаційних характеристик для керування технологічними процесами; керування процесом розподілу електричного навантаження між турбоустановками електростанції; керування режимами роботи систем теплофікації теплоенергетичних установок.

6. За допомогою розроблених методів одержано вірогідні режимні та інтегральні експлуатаційні характеристики для керування технологічними процесами в теплоенергетичних установках типу ПВК-200-130, К-300-240, К-220-44, К-500-60/1500, К-1000-60/3000, К-750-65/3000. Досліджено вплив технологічних параметрів і структурних змін у проточних частинах турбін, системах регенерації, проміжного перегріву, конденсації, теплофікації на показники виробки електроенергії цими установками в реальних умовах експлуатації в широкому діапазоні навантажень (0,4-1,0 Б<sub>0</sub>) і проведено їх ранжування. Для перелічених типів установок розроблено номограми керування безпечними режимами роботи систем теплофікації.

Одержані результати дають можливість коректно проводити оптимізацію параметрів теплоенергетичного устаткування, режимів його роботи і розподілу навантажень між установками, а також аналізувати вплив змін параметрів технологічного процесу ще до проведення промислових випробувань і раціонально організовувати їх виміри. Це дозволяє істотно скоротити трудові, матеріальні та часові витрати на випробування та освоєння нових теплоенергетичних потужностей.

7. Проведено оптимізацію параметрів і розроблено оптимальні схеми технологічних процесів у системах регенерації високого та низького тиску, проміжного перегріву пари, конденсації пари, теплофікації, кінцевих ущільнень для діючих і перспективних теплоенергетичних установок на органічному та ядерному паливах потужністю 300, 500, 750, 1000 МВт.

8. Розроблено метод діагностики технічного стану теплоенергетичних установок, заснований на ймовірнісному прогнозуванні зміни експлуатаційних характеристик працездатного устаткування. На базі цього методу розроблено програмний комплекс діагностики, що входить до складу БОК теплоенергетичного об'єкта. Одержані за допомогою програмного комплексу діагностики позитивні результати за оцінкою технічного стану системи СПП-1000 установки К-1000-60/1500 Запорізької АЕС і регенеративних підігрівачів ПН-350-16-7 установки ПБК-200-130 ТЕС "Коженице" дозволили включити розроблений програмний комплекс окремим компонентом до затвердженого проекту АСК ТП енергоблока №6, що будується, нового покоління потужністю 1000 МВт на Нововоронезькій АЕС, системи діагностики турбоустановок К-500-60/1500 Нововоронезької АЕС, турбоустановок К-750-65/3000 Ігналінської АЕС, турбоустановки ПБК-200-130 ТЕС "Коженице".

9. Використання АКАФТ у складі БОК на 1-му енергоблоці Ігналінської АЕС (Литва) дозволило збільшити ефективність роботи (знизити питому витрату теплоти на річну виробку електроенергії) на 0,2% за рахунок підвищення ефективності керування технологічними процесами. Аналогічний ефект від впровадження АКАФТ у склад БОК на 5-му енергоблоці Нововоронезької АЕС (Росія) склав 0,17%.

Основний зміст роботи відображено в публікаціях:

1. Палагин А. А., Ефимов А. В. Имитационный эксперимент на математических моделях турбоустановок. - Киев: Наук. думка, 1986. - 130 с.
2. Палагин А. А., Ефимов А. В., Меньшикова Е. Д. Моделирование функционального состояния и диагностика турбоустановок. - Киев: Наук. думка, 1991. - 201 с.
3. Ефимов А. В., Палагин А. А., Литвиненко И. И. Моделирование теплового расчета пароводяного теплообменника контактного типа на ЭВМ// Вест. Харьк. политехн. ин-та. - № 45. Химическое машиностроение. - Вып. 8. - 1978. изд-во Харьк. гос. ун-та. - С. 14-18.
4. Палагин А. А., Ефимов А. В., Головченко А. М. Исследование вопросов включения смешивающих подогревателей в тепловые схемы турбоустановок насыщенного пара// Пробл. машиностроения. - вып. 10. - 1980. - С. 62-68.
5. Палагин А. А., Станиславский В. Я., Ефимов А. В. Проблемы совершенствования схемы турбоустановки мощностью 1000 МВт на насыщенном паре// Пробл. машиностроения. - 1980. - вып. 11. - С. 54-57.
6. Палагин А. А., Ефимов А. В., Станиславский В. Я. и др. Исследование регенеративной системы тихоходных турбин мощностью 1000 МВт на насыщенном паре//Пром. теплотехника. - 1980. - № 4. - С. 93-98.
7. Ефимов А. В., Аркадьев Б. А., Палагин А. А., Иоффе В. Ю. Энергетические характеристики турбоустановок АЭС// Теплоэнергетика. - 1981. - № 9. - С. 60-62.
8. Шубенко-Шубин Л. А., Аркадьев Б. А., Ефимов А. В. и др. Исследование возможностей повышения теплофикационной нагрузки турбоустановок АЭС мощностью 1000 МВт// Пром. теплотехника. - 1983. - № 5. - С. 65-74.

9. Ефимов А. В., Станиславский В. Я., Меньшикова Е. Д., Ильяченко Б. С. Исследование схем концевых уплотнений тихоходных турбоустановок насыщенного пара// Пробл. машиностроения. -1983. -Вып. 19. -С. 97-100.

10. Ефимов А. В., Палагин А. А., Станиславский В. Я., Меньшикова Е. Д. Исследование режимов работы теплофикационных установок влажнопаровых турбин// Пром. теплотехника. -1984. -№. -С. 60-66.

11. Палагин А. А., Ефимов А. В., Меньшикова Е. Д., Станиславский В. Я. Совершенствование технологических характеристик турбоустановок АЭС с помощью математических моделей. - Повышение эффективности и технико-экономическая оптимизация атомных электростанций: Сб. науч. тр. Саратов. политехн. ин-та. -1984. -С. 29-32.

12. Палагин А. А., Ефимов А. В., Меньшикова Е. Д. Исследование влияния тепловых и гидравлических параметров на показатели энергоблока К-1000-60/1500 на частичных режимах работы// Энерг. машиностроение. -1985. -вып. 39. -С. 79-82.

13. Палагин А. А., Ефимов А. В., Меньшикова Е. Д. Исследование технологических характеристик энергетического и тепло-механического оборудования АЭС методами имитационного моделирования// Вопр. атом. науки и технологии. -1985. -№5. -С. 31-39.

14. Кострыкин В. А., Ефимов А. В., Палагин А. А. и др. Определение технологических характеристик турбоустановок с помощью имитационных моделей// Энергетика и электрификация. -1986. -№1. -С. 27-31.

15. Бузлуков В. А., Теплицкий М. Г., Ефимов А. В. и др. Получение характеристик оборудования турбоустановок методом натурно-вычислительного эксперимента// Теплоэнергетика. -1987. -№3. -С. 19-21.

16. Палагин А.А., Ефимов А.В., Меньшикова Е.Д. и др. Разработка и применение интегральных энергетических характеристик турбоустановок АЭС// Пробл. машиностроения. -1987. -вып. 28. -С. 80-86.

17. Палагин А.А., Ефимов А.В., Кострыкин В.А. и др. Исследование режимов и структуры турбоустановок с помощью имитационных моделей//Теплоэнергетика. -1987. -№10. -С. 41-46.

18. Палагин А.А., Ефимов А.В., Бузлуков В.А. и др. Применение натурно-вычислительного эксперимента для получения характеристик паротурбинных установок// Пробл. машиностроения. -вып. 30. -1988. -С. 77-83.

19. Ефимов А.В. Статистический метод иерархической структуризации и ранжирования параметров паротурбинных установок// Пробл. машиностроения. -вып. 30. -1988. -С. 86-89.

20. Палагин А.А., Ефимов А.В., Меньшикова Е.Д., Бузлуков В.А. Диагностирование функционального состояния оборудования турбоустановок АЭС с помощью автоматизированных программных комплексов//Теплоэнергетика. -1989. -№2. -С. 28-32.

21. Ефимов А.В. Структура и математическое обеспечение системы программ технической диагностики теплоэнергетического оборудования. // Ин-т проблем машиностроения НАН Украины. - Харьков, 1993. - Рус. - Деп. в ВИНТИ 21.05.93 №1361-В93. - 18с.

22. Ефимов А.В. Методы и подходы к разработке программных комплексов для технической диагностики теплоэнергетического оборудования. // Ин-т проблем машиностроения НАН Украины. - Харьков, 1993. Рус. - Деп. в ВИНТИ 07.06.93 №1548-В93. - 16с.

23. Gardzilewicz A., Yefimov A. The heat and flow diagnostic procedure leading to a steam turbine repair Plan // Proc. 10th Conf. on Steam and Gas Turbines for

## АННОТАЦИЯ

Ефимов А. В. Совершенствование управления технологическими процессами теплоэнергетических установок энергоблоков электростанций на основе анализа параметров состояния и диагностики оборудования.

Диссертация является рукописью на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.07 - автоматизация технологических процессов и производств. Харьковский государственный политехнический университет. Харьков. 1995 г.

Защищается диссертационная работа, в которой на базе теории математического моделирования разработан метод имитации функционального состояния теплоэнергетических установок в процессе их эксплуатации на электростанциях, реализованный в виде автоматизированного комплекса программ. Разработаны и реализованы на практике методы анализа параметров технологических процессов теплоэнергетических установок, их управления, совершенствования и технической диагностики оборудования. Результаты работы позволяют повысить эффективность и безопасность функционирования теплоэнергетических объектов.

## SUMMARY

Yefimov A.V. Improvement of technological processes control of heat-and-power installation for power stations on the basis of state parameter analysis and diagnostics of equipment.

The thesis is a monograph submitted to a Doctor's degree of Technical Sciences in speciality 05.13.07 - Industry automatization of technological processes and production. Kharkov State Polytechnical University, Kharkov, 1995.

448738

The defended thesis de  
lation method of turbosets  
ted as the automated program complex on the basis of mathe-  
metical modelling. The method of parameter analysis of the  
technological processes for the turbosets, their control,  
improvement and diagnostics of equipment are developed and  
put into practice. The results obtained provide higher effi-  
ciency and operating safety of the power plants.

## Ключові слова:

Теплоенергетичні установки, технологічні процеси,  
математичне моделювання, імітаційна модель,  
автоматизований програмний комплекс, аналіз параметрів,  
керування, технічна діагностика.

Відповідальний за випуск  
д.т.н., проф. А.В.Дабагян.

Підписано до друку 19.05.95 г.  
Формат 60х90 1/16 . Ум.друк. арк. 2,0.  
Папір друку МІ. Обл.-друк. арк. 1,92.  
Тираж 120 пр. Зам. №744.

---

Ротопрент Інституту проблем машинобудування  
НАН України  
310046 Харків, вул.Пожарського 2/10.