

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Потаніна Тетяна Володимирівна

УДК 621.311.25

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ТА МОДЕЛЕЙ
ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ
РОЗПОДІЛОМ НАВАНТАЖЕНЬ МІЖ ЕНЕРГОБЛОКАМИ АЕС**

Спеціальність 05.13.07 – автоматизація процесів керування

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Харків - 2009

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Єфімов Олександр В'ячеславович,
Національний технічний університет «Харківський
політехнічний інститут», завідувач кафедри
парогенераторобудування.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Дуель Михайло Олександрович,
Харківський науково-дослідний інститут
комплексної автоматизації Міністерства палива та енергетики
України, вчений секретар;

доктор технічних наук, професор
Артюх Станіслав Федорович,
Українська інженерно-педагогічна академія Міністерства
освіти і науки України,
завідувач кафедри електроенергетики.

Захист відбудеться « 18 » червня 2009 р. о 14.30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.07 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків-2, вул. Фрунзе, 21, корп. У-2, ауд. 507.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Автореферат розісланий « 12 » травня 2009 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Гамаюн І.П.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Одним з принципів, що закладаються до стратегії розвитку ядерної енергетики в різних країнах світу, є планування не тільки базових режимів роботи енергоблоків АЕС, але й забезпечення можливості їх роботи у режимі регулювання добового графіка енергоспоживання в енергетичних системах. Так, вимоги Європейських енергокомпаній EUR до стандартного проекту нових споруджуваних АЕС передбачають збільшення маневреності енергетичного устаткування та можливість роботи енергоблоків у діапазоні навантажень $30 \div 100$ % від номінальної потужності (зі швидкістю зміни навантаження 3 % від номінальної потужності за хвилину) з забезпеченням усіх критеріїв безпеки. Ефективної та безпечної експлуатації атомних електростанцій в такому режимі можна досягти за допомогою автоматизації процесу керування розподілом електричних навантажень між енергоблоками з врахуванням їх функціонального стану. Це вимагає удосконалення математичного та алгоритмічного забезпечення, яке знаходиться у розпорядженні автоматизованих систем керування технологічними процесами (АСК ТП) енергоблоків АЕС.

В зв'язку з цим, незважаючи на те, що на сьогодні серед ряда спеціалістів, які займаються питаннями оптимізації режимів роботи енергетичних систем в Україні, існує точка зору, що діючі вітчизняні енергоблоки АЕС не повинні приймати участь у регулюванні потужності енергетичних систем з міркувань безпеки, проблема вибору оптимальних стратегій при керуванні режимами роботи енергоблоків АЕС, зокрема проблема оптимального розподілу навантажень між ними з метою підвищення середньоексплуатаційної теплової економічності електростанцій, є актуальною. Профіцит виробництва електроенергії в Україні і можлива перспектива підключення АЕС України до енергетичних систем європейських держав також підтверджує актуальність цієї проблеми. Таким чином, тема дисертаційної роботи, яка присвячена розробці, удосконаленню та обґрунтуванню методів та моделей для автоматизованого оптимального розподілу навантажень між енергоблоками АЕС, які б враховували реальний стан устаткування в процесі експлуатації, з метою їх застосування при синтезі багатofункційних та всережимних АСК ТП нового покоління енергоблоків АЕС України підвищеної безпеки, є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі парогенераторобудування НТУ "ХПІ" у рамках бюджетних НДР МОН України: "Розробка, розвиток і удосконалення методів системного аналізу, теорії й засобів імітаційного моделювання й натурно-імітаційних експериментів для створення перспективних енергогенеруючих комплексів" (ДР № 0103U001505), "Розробка й розвиток теорії й методів математичного моделювання для автоматизованого структурно-параметричного аналізу, синтезу, діагностики і прогнозування надійності складних теплоенергетичних систем" (ДР № 0106U001482), де здобувач брала участь як виконавець окремих розділів.

Мета й завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка і удосконалення математичних методів, моделей та програмного забезпечення для автоматизованого керування розподілом навантажень між паротурбінними енергоблоками АЕС та підвищення за рахунок цього середньоексплуатаційної теплової економічності АЕС.

Для досягнення цієї мети були вирішені наступні основні завдання наукового дослідження:

– проведено аналіз методів, що застосовуються для оптимізації параметрів технологічних процесів та режимів роботи енергетичного устаткування паротурбінних енергоблоків в процесі їх експлуатації;

– проведено аналіз існуючих математичних моделей технологічних процесів, які відбуваються у системах та устаткуванні енергоблоків АЕС з ВВЕР-1000, з метою визначення можливості застосування цих моделей для розробки імітаційної моделі енергоблоків, яка дозволяє автоматизувати процеси керування режимами їх роботи;

- удосконалено математичні моделі окремих систем та устаткування енергоблоків АЕС з ВВЕР-1000 з метою включення цих моделей до структури імітаційної моделі енергоблоків;
- запропоновано імітаційну модель енергоблоків АЕС з ВВЕР-1000 з метою автоматизації процесів керування режимами їх роботи;
- визначені експлуатаційні характеристики систем та устаткування енергоблоків АЕС з ВВЕР-1000, що описують вплив змін параметрів технологічних процесів на техніко-економічні показники виробництва електроенергії;
- розв'язано задачу оптимального розподілу електричних навантажень між енергоблоками в залежності від функціонального стану їх устаткування.

Об'єкт дослідження – технологічні процеси, що відбуваються в основному й допоміжному устаткуванні паротурбінних енергоблоків двохконтурних АЕС під час експлуатації.

Предмет дослідження – методи та моделі, що необхідні для автоматизованого оптимального розподілу навантажень між паротурбінними енергоблоками АЕС з різним функціональним станом устаткування.

Методи наукового дослідження. При моделюванні функціонального стану систем та устаткування енергоблоків АЕС та визначенні експлуатаційних характеристик енергоблоків використано теорію планування експерименту, статистичні методи проведення й обробки за допомогою регресійного та дисперсійного аналізу результатів експерименту; для розв'язання задачі оптимального розподілу навантажень між енергоблоками АЕС використано чисельні методи нелінійного програмування.

Наукова новизна отриманих результатів:

- удосконалено математичні моделі парогенераторів, систем конденсації та регенерації енергоблоків АЕС з водо-водяним енергетичним реактором ВВЕР-1000, що дозволяють визначати параметри, які найбільшим чином впливають на показники ефективності роботи енергоблоків;
- вперше запропоновано імітаційну модель енергоблоків АЕС з ВВЕР-1000, що дозволяє визначати вплив змін теплових і гідравлічних параметрів устаткування енергоблоків на техніко-економічні показники виробництва електроенергії у вигляді експлуатаційних характеристик та автоматизувати процеси керування розподілом навантажень між енергоблоками;
- отримали подальший розвиток методи автоматизованого керування розподілом навантажень між енергоблоками АЕС, що дозволяють оптимізувати техніко-економічні показники виробництва електричної енергії залежно від функціонального стану устаткування енергоблоків.

Практичне значення отриманих у дисертаційній роботі результатів полягає в вирішенні ряду актуальних практичних задач, пов'язаних з автоматизацією процесів керування режимами роботи енергоблоків АЕС потужністю 1000 МВт. Зокрема: отримано експлуатаційні характеристики горизонтального парогенератора ПГВ-1000 у вигляді залежностей впливу змін в процесі експлуатації теплових і гідравлічних параметрів теплоносія та робочої речовини на паропродуктивність парогенератора; отримано залежності впливу відхилення від розрахункових проектних величин параметрів режимів роботи основного й допоміжного устаткування систем конденсації та регенерації енергоблоків АЕС з ВВЕР-1000 на основні показники їх роботи (електричну потужність і питому витрату теплоти) у вигляді інтегральних експлуатаційних характеристик енергоблоків; розроблено комплекс програм, який може бути ефективно застосований для розв'язання задачі автоматизованого керування розподілом навантажень між енергоблоками АЕС.

Результати досліджень розглянуті та рекомендовані Харківським науково-дослідним інститутом комплексної автоматизації як матеріали для проектування нових АСК ТП енергоблоків АЕС. Матеріали дисертації використовуються у навчальному процесі кафедри парогенераторобудування НТУ «ХП».

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати дисертації, що виносяться на захист, отримано здобувачем самостійно. Серед них: методика побудови і удосконалення математичних моделей парогенераторів ПГВ-1000, систем конденсації та регенерації енергоблоків АЕС з ВВЕР-1000; методика побудови залежностей впливу режимів роботи горизонтального парогенератора ПГВ-1000 на його паропроодуктивність і одержання залежностей впливу змін в процесі експлуатації теплових і гідравлічних параметрів теплоносія та робочої речовини; методика побудови і розробка імітаційної моделі енергоблока АЕС з ВВЕР-1000; методика побудови і одержання залежностей впливу відхилення від розрахункових проектних величин параметрів режимів роботи основного й допоміжного устаткування енергоблоків на основні показники їх роботи (електричну потужність і питому витрату теплоти) у вигляді експлуатаційних характеристик; наукове обґрунтування застосування методів нелінійного програмування для розв'язання задачі оптимального розподілу навантажень між енергоблоками електростанцій; розвинення методів автоматизованого керування розподілом навантажень між енергоблоками АЕС.

Апробація результатів дисертаційної роботи. Результати дисертаційної роботи доповідалися на: міжнародній науково-практичній конференції "Інтегровані технології й енергозбереження" (м. Алушта, 2004 р.); XII-й, XIII-й, XV-й, XVI-й міжнародних конференціях "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я" (м. Харків, 2004, 2005, 2007, 2008 рр.); 12-й міжнародній конференції з автоматичного управління "Автоматика-2005" (м. Харків, 2005 р.); II-й міжнародній науково-практичній конференції "Сучасні наукові дослідження – 2006" (м. Дніпропетровськ, 2006 р.); конференції Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України "Моделювання-2006" (м. Київ, 2006 р.).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи викладено в 11 наукових працях, серед них 7 статей у фахових виданнях ВАК України.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'ятьох розділів, висновків, додатків. Повний обсяг дисертації становить 213 сторінок. Робота містить 12 рисунків за текстом, 7 таблиць за текстом, 10 рисунків на 10 сторінках, 4 таблиці на 3 сторінках, чотири додатки на 23 сторінках, список використаних джерел з 128 найменувань на 16 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета й задачі дослідження.

У першому розділі проведено огляд методів оптимального розподілу навантажень між енергоблоками електростанцій та існуючих математичних моделей систем та устаткування енергоблоків, здійснено математичну постановку задачі оптимального розподілу навантажень між енергоблоками АЕС залежно від функціонального стану їх устаткування.

У розділі проаналізовано оптимізаційні методи, що застосовуються для розв'язання задачі розподілу навантажень між енергоблоками електростанцій, і які є досить різноманітними (метод відносних приростів, градієнтні методи, гібридні методи, метод динамічного програмування тощо), оскільки їх вибір безпосередньо пов'язаний з існуючими моделями устаткування енергоблоків і способами одержання інформації про параметри технологічних процесів, що змінюються під час експлуатації енергетичного устаткування. Аналіз підходів і методів розв'язання задачі розподілу навантажень засвідчив актуальність їх подальшого вдосконалення на основі оцінки впливу функціонального стану устаткування енергоблоків на техніко-економічні показники виробництва електричної енергії і теплоти.

У розділі також проаналізовано різноманітні моделі систем та устаткування енергоблоків АЕС, що розроблені і використовуються, зокрема моделі реакторів, парогенераторів, турбін, тепломасообмінного устаткування систем регенерації, сепарації та проміжного перегріву пари, конденсації та теплофікації, а також програмні комплекси, що створені для внутрішньостанційної оптимізації режимів роботи устаткування. До таких належать розробки провідних наукових шкіл

Московського енергетичного інституту, НТУУ «Київський політехнічний інститут», НТУ «Харківський політехнічний інститут», Інституту проблем машинобудування НАН України, НУ «Львівська Політехніка», Одеського національного політехнічного університету, Севастопольського інституту ядерної енергетики та промисловості, Всеросійського теплотехнічного інституту, Державного конструкторського бюро "Гидропресс" (РФ), Інституту проточних машин ПАН та Гданської політехніки (Польща), Вавсок (Німеччина), *E – plantTM* (США) та інші розробки. Проведений аналіз показав, що для основного та допоміжного устаткування енергоблоків електростанцій розроблено математичні моделі різного рівня деталізації, що не дає можливість безпосередньо використовувати більшість з них для створення імітаційної моделі енергоблока як єдиного цілого. Це, наприклад, стосується математичних моделей устаткування парогенеруючих установок та турбоустановок, які значно впливають на ефективність, надійність та безпеку роботи АЕС. Більшість моделей систем й устаткування енергоблоків розроблялися для розв'язання певного кола конкретних задач проектування й експлуатації, тому їхня в деяких випадках досить докладна деталізація, врахування факторів, що не справляють істотного впливу на техніко-економічну ефективність роботи енергоблоків, ускладнюють вирішення ряду задач керування енергоблоками і, зокрема, задачі розподілу навантажень між ними. Цим обумовлена актуальність розробки імітаційної моделі енергоблоків АЕС з ВВЕР-1000 на основі математичних моделей систем та устаткування такого єдиного рівня деталізації, що відповідає вимогам експлуатаційного персоналу до точності розрахунків техніко-економічних показників роботи АЕС.

Аналіз зроблених висновків дозволив формалізувати постановку основної задачі дисертаційної роботи – задачі оптимального розподілу заданого сумарного електричного навантаження між n енергоблоками АЕС, що формулюється так: знайти такий розподіл навантажень (тобто набір), що забезпечує задану величину сумарного навантаження N_{CT} й мінімальну загальну витрату теплоти Q_{CT}

де $Q_{CT}(N_{CT})$ – загальна витрата теплоти на всіх енергоблоках АЕС, що залежить від сумарного навантаження N_{CT} , $Q_i(N_i)$ – витрата теплоти i -го енергоблока, що залежить від навантаження N_i цього енергоблока; обмеження на припустимі електричні навантаження енергоблоків і сумарне навантаження станції:

Другий розділ присвячений розробці імітаційної моделі горизонтального парогенератора ПГВ-1000 та удосконаленню математичних моделей устаткування систем конденсації та регенерації з врахуванням можливості їх включення в імітаційну модель енергоблока АЕС з ВВЕР-1000.

Програма розрахунку парогенератора входить окремим модулем (блоком) в ієрархічно впорядковану структуру імітаційної моделі енергоблока. Блок програм розрахунку параметрів парогенератора ПГВ-1000 для енергоблока АЕС з ВВЕР-1000 визначає його паропроductивність і параметри робочої речовини у водяному й паровому об'ємах агрегату, у сепараторі, паровому колекторі та паропроводі, а також параметри теплоносія у трубній системі парогенератора при відомих конструктивних параметрах поверхні теплообміну та тепловій потужності реактора; здійснює розрахунок теплового балансу парогенератора.

Аналогічним чином, на основі проведеного аналізу теплових та гідравлічних процесів, що відбуваються у системах конденсації та регенерації енергоблоків АЕС, а також конструктивних характеристик їх устаткування, удосконалено одномірні моделі цих систем з рівнем деталізації, що є необхідним для створення імітаційної моделі енергоблока АЕС, і розроблені програми, що реалізують ці моделі.

У **третьому розділі** наведено методи розробки імітаційної моделі енергоблоків АЕС з ВВЕР-1000 та її реалізації у вигляді автоматизованого комплексу програм на основі розробленої математичної моделі горизонтального парогенератора ПГВ-1000, удосконалених математичних моделей систем конденсації та регенерації енергоблоків АЕС, а також раніше розроблених одномірних математичних моделей турбіни типу К-1000-60/1500 та її системи сепарації і проміжного перегріву пари.

Теплова схема енергоблока (ТС), що є його найважливішою системною характеристикою, при імітаційному моделюванні представляється орієнтованим технологічним графом. Вузли графа – технологічне устаткування, яке входить до складу теплової схеми. Орієнтація дуг графа збігається з напрямком руху робочих речовин і теплоносіїв і передачі механічної, теплової й електричної енергій у технологічних зв'язках енергоблока.

Для структурного подання схеми енергоблока створено структурні блоки і сформовані об'єкти, за допомогою яких описується основне технологічне устаткування і які перебувають в ієрархічному підпорядкуванні.

Імітаційну модель енергоблоків АЕС з ВВЕР-1000 (3) організовано у вигляді операторів: оператор збереження кількості речовини, оператор теплового процесу, оператор тисків, оператор збереження енергії, оператор коефіцієнта корисної дії, оператор ефективності. Оператори приймають конкретні числові значення залежно від логічної інформації, що міститься в структурі технологічного графа, а їх склад, кількість і порядок залежать від структури теплової схеми енергоблока й цілей використання моделі.

Імітаційна модель енергоблока крім набору операторів, що визначаються інформаційною структурою моделі, містить сукупність методів розв'язання задач розрахунків.

Управління імітаційною моделлю енергоблока здійснює імітацію різних функціональних станів енергоблока шляхом змін параметрів устаткування й структури теплової схеми (вибір незалежних параметрів, івня деталізації моделі). Цей оператор за допомогою множини формалізованих математичних процедур може здійснювати цілеспрямовані зміни всіх числових і логічних змінних інформаційної структури моделі. До його складу також входять: методи розв'язання задач нелінійного програмування, методи планування експерименту й статистичної обробки його результатів (регресійний і дисперсійний аналіз даних), методи ідентифікації математичних моделей устаткування та інші методи.

Розроблена імітаційна модель енергоблоків АЕС з ВВЕР-1000 дозволяє вирішувати задачі, котрі виникають під час неоперативного керування енергоблоками, а саме:

- задача аналізу впливу параметрів устаткування, структури теплових схем і зовнішніх умов експлуатації на показники ефективності роботи енергоблоків, тобто задача визначення експлуатаційних характеристик виду

- задача структурно-параметричної оптимізації показників ефективності роботи енергоблоків:

- задача діагностики технічного стану устаткування на основі аналізу залежностей виду

- задача оптимального розподілу електричних і теплових навантажень у часі t між n енергоблоками електростанції залежно від технічного стану їх устаткування з метою досягнення оптимальних показників ефективності роботи всієї електростанції

- задача оцінки ефективності роботи енергоблоків протягом прогнозованого періоду їх експлуатації на основі аналізу показників надійності (наприклад, імовірності безвідмовної роботи) їхніх теплових схем і устаткування

Розроблений на базі описаної імітаційної моделі енергоблоків АЕС з ВВЕР-1000 автоматизований комплекс програм має блокову (модульну) структуру з ієрархічною впорядкованістю.

Четвертий розділ містить результати вирішення за допомогою розробленого автоматизованого комплексу програм задачі побудови математичних моделей інтегральних експлуатаційних характеристик (4) енергоблоку АЕС потужністю 1000 МВт з реактором ВВЕР-1000, що враховують зміни параметрів роботи парогенераторів ПГВ-1000 під час експлуатації.

За результатами проведення експерименту на імітаційній моделі енергоблока АЕС з ВВЕР-1000 і обробки даних експерименту методами регресійного й дисперсійного аналізу одержано моделі інтегральних експлуатаційних характеристик енергоблоків, а саме:

- 1) математичну модель залежності відносної паропроодуктивності горизонтальних парогенераторів ПГВ-1000
- 2) функціональну залежність електричної потужності енергоблока від зміни в процесі експлуатації параметрів основного й допоміжного устаткування
- 3) функціональну залежність питомої витрати теплоти енергоблока від зміни в процесі експлуатації параметрів основного й допоміжного устаткування

Отримані моделі інтегральних експлуатаційних характеристик дозволяють оцінювати вплив різних факторів на ефективність роботи енергоблока АЕС з ВВЕР-1000: змін теплових та гідравлічних параметрів теплоносіїв і робочих речовин основного й допоміжного устаткування, енергосистемних параметрів, кліматичних умов експлуатації (температури охолоджувальної води, температури навколишнього повітря). Ці моделі використовуються для розв'язання задач оптимального розподілу навантажень між енергоблоками електростанцій. Експлуатаційні характеристики енергоблока АЕС дозволяють представити витрату теплоти по окремому i -му енергоблоку у вигляді добутку питомої витрати теплоти й електричної потужності, що є функціями відхилень параметрів енергетичного й тепломеханічного устаткування від номінальних значень. При вирішенні задачі розподілу навантажень між енергоблоками дану залежність можна розглядати як математичну модель з одним основним керованим фактором – електричною потужністю при відомих фактичних значеннях інших параметрів. Такий підхід дозволяє, використовуючи ієрархічний принцип організації керування атомною електростанцією, передавати на верхній рівень тільки ті інформаційні сигнали, які пов'язані з визначенням цільової функції цього рівня.

У п'ятому розділі представлено застосування оптимізаційних процедур градієнтних методів для розв'язання задачі (1)-(2) – задачі оптимального розподілу навантажень між енергоблоками АЕС. Витрата теплоти i -го енергоблока на підставі експлуатаційних характеристик представляється поліномом, де коефіцієнти визначаються методом найменших квадратів.

Це задача нелінійного програмування з лінійними обмеженнями та сепарабельною цільовою функцією. Для розв'язання задачі (13) обрано метод проекції градієнта Розена, який дозволяє розв'язувати задачу в тому випадку, коли множина припустимих розв'язків E не співпадає з усім простором \square^n , а є частиною гіперплощини в ньому. Якщо цільова функція увігнута, то теорема Куна-Таккера забезпечує в точці оптимального розв'язку, що одержаний методом проекції градієнта, глобальний мінімум. У випадку, коли цільова функція не є увігнутою, цей розв'язок – лише локальний екстремум, але значення цільової функції в цій точці є значно меншим від того, що може бути одержано при використанні евристичних методів розподілу навантажень.

Метод проекції градієнта є ітераційним методом оптимізації. Відомо, що напрямком найшвидшого спуску є антиградієнт цільової функції. В вибраному методі антиградієнт проектується таким чином, що значення цільової функції зменшується і у той же час зберігається приналежність точок траєкторії до множини E . На кожному кроці ітерації наступна припустима точка N^{k+1} з послідовності N^k , що знаходиться згідно з правилом, проектується на множину припустимих розв'язків за допомогою матриці проектування. Матриця проектування будується на кожному кроці ітерації з врахуванням того, які з обмежень в точці N^k є насиченими.

Якщо знайдено точку N^k , в якій $\mathbf{s}_k = 0$ та усі елементи \mathbf{u}_i матриці такі, що $\mathbf{U}_i \geq 0$, то ітераційний процес закінчується і точка N^k є оптимальним розв'язком задачі (13).

Вибір початкової точки N^0 здійснюється за допомогою ЛП $_{\tau}$ -послідовностей.

На початку ітераційного процесу також задано величину ε і, якщо значення цільової функції $Q(N^k)$ і $Q(N^{k+1})$ відрізняються менше, ніж на ε , тобто, ітераційний процес припиняється.

При програмній реалізації методу враховано той факт, що через похибки округлення вектор s_k може відрізнятись від нульового. Тому, якщо серед елементів u_i були від'ємні, будувалися матриця M , в якій викреслено рядок, що відповідає максимальному за модулем від'ємному елементу вектора u , та відповідна матриця проектування P . Якщо для вектора виконувалася умова, де, , він використовувався як напрямок руху.

Використання цього методу як складової частини імітаційного програмного комплексу для АСК ТП енергоблоків АЕС дає можливість ефективно вирішувати задачі оптимального розподілу навантажень між енергоблоками і значно скоротити кількість ітерацій в процесі їх розв'язанні.

У додатках наведені опис та технічні характеристики устаткування енергоблоків АЕС, результати обробки даних імітаційного експерименту методами регресійного та дисперсійного аналізу, а також приведені акти впровадження та апробації результатів роботи і довідка про їх використання в навчальному процесі.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена науково-прикладна задача оптимального розподілу навантажень між енергоблоками АЕС на основі імітаційного моделювання функціонального стану енергоблоків. Основні результати й висновки дисертаційної роботи полягають у наступному:

1. Проведено аналіз існуючих математичних моделей систем й устаткування енергоблоків електростанцій та методів оптимального розподілу навантажень між енергоблоками. Показано актуальність удосконалення моделей устаткування енергоблоків з метою досягнення одного рівня деталізації для них і створення на їх основі імітаційної моделі енергоблока, що дозволяє вирішувати задачі розподілу навантажень між енергоблоками електростанцій, а також інші задачі аналізу, управління й діагностики з метою підвищення ефективності й безпеки функціонування енергоблоків.

2. У результаті проведення аналізу теплових і гідравлічних процесів, що протікають у горизонтальних парогенераторах, системах конденсації та регенерації енергоблоків АЕС з водоядними енергетичними реакторами ВВЕР-1000, удосконалено методику й алгоритм побудови математичних моделей цих систем і устаткування з метою включення їх в імітаційну модель енергоблока; одержано залежність впливу змін теплових і гідравлічних параметрів теплоносія та робочої речовини на паропродуктивність горизонтальних парогенераторів ПГВ-1000 у вигляді регресійного рівняння, оцінки коефіцієнтів якого обчислюються в результаті статистичної обробки багатofакторного експерименту, проведеного на імітаційній моделі парогенератора.

3. Запропоновано імітаційну модель енергоблока АЕС з реактором ВВЕР-1000, що дозволяє визначати вплив змін теплових і гідравлічних параметрів основного й допоміжного устаткування енергоблока на техніко-економічні показники вироблення електроенергії зі ступенем точності, що відповідає вимогам експлуатаційного персоналу, а також автоматизувати процеси неоперативного управління режимами роботи енергоблоків.

4. Отримав подальший розвиток комплекс програм, що дозволяє у складі АСК ТП енергоблоків вирішувати задачі визначення експлуатаційних характеристик і оптимального розподілу навантажень між енергоблоками АЕС у залежності від їх функціонального стану зі ступенем точності, що відповідає вимогам експлуатаційного персоналу.

5. На імітаційній моделі енергоблока АЕС з ВВЕР-1000 проведено експеримент з метою дослідження залежності електричної потужності та питомої витрати теплоти від функціональних станів, що змінюються в процесі експлуатації основного й допоміжного устаткування

енергоблоків. У результаті отримано інтегральні експлуатаційні характеристики енергоблока АЕС з ВВЕР-1000 з урахуванням параметрів парогенераторів, які змінюються в процесі експлуатації.

6. Поставлено у вигляді задачі нелінійного програмування з лінійними обмеженнями та сепарабельною цільовою функцією задачу оптимального розподілу електричних навантажень між енергоблоками АЕС і вирішено її методом проекції градієнта Розена, який було включено до складу програмного комплексу, що імітує функціональний стан енергоблока.

7. Результати роботи розглянуті та рекомендовані Харківським науково-дослідним інститутом комплексної автоматизації як матеріали для проектування нових АСК ТП енергоблоків АЕС і впроваджені у навчальний процес кафедри парогенераторобудування НТУ «ХПІ».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Потанина Т. В. Анализ математических методов и подходов к решению задачи оптимального распределения нагрузок между энергоблоками электростанций / А. В. Ефимов, Т. В. Потанина, Е. Д. Меньшикова, М. М. Межлумов // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків : НТУ «ХПІ», 2004. – № 2. – С. 72–75.

Здобувачем проведено аналіз методів оптимізації, що застосовувалися для розв'язання задачі розподілу навантажень між енергоблоками електростанцій.

2. Потанина Т. В. Моделирование решения задачи поверочного расчета парогенератора АЭС с ВВЭР-1000 / А. В. Ефимов, Е. Д. Меньшикова, Т. В. Потанина, Т. А. Гаркуша // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2005. – № 29. – С. 15–20.

Здобувачем розроблено математичну модель розрахунку горизонтального парогенератора, яка призначена для включення її в імітаційну модель енергоблоків АЕС з ВВЕР-1000.

3. Потанина Т. В. Алгоритмізація та програмування розрахунку горизонтального парогенератора для імітаційної моделі енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000 / Т. В. Потанина, О. В. Єфімов, О. Д. Меньшикова, Т. А. Гаркуша // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація». – Львів : НУ «Львівська політехніка», 2006. – № 561. – С. 3–7.

Здобувачем розроблені логіко-структурна блок-схема математичної моделі та узагальнений ітераційний алгоритм розрахунку горизонтального парогенератора ПГВ-1000, а також програма, що реалізує алгоритм розрахунку.

4. Потанина Т. В. Анализ функционирования энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000 на основе имитационного моделирования / А. В. Ефимов, Т. В. Потанина // Электронное моделирование. – К. : Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Пухова НАН України, 2007. – Т. 29. – № 1. – С. 115–120.

Здобувачем визначено методи розробки й реалізації єдиної імітаційної моделі технологічних процесів в основному й допоміжному устаткуванні енергоблоків АЕС з ВВЕР-1000.

5. Потанина Т. В. Разработка имитационной модели энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 для решения задач анализа, управления и диагностики / А. В. Ефимов, Т. В. Потанина // Енергетика: економіка, технології, екологія. – К. : НТУУ «КПІ», 2006. – № 2. – С. 84–91.

Здобувачем для моделювання технологічної схеми енергоблока побудовано ієрархічно організовану структуру та розроблено технологічний орієнтований граф енергоблока АЕС.

6. Потанина Т. В. Разработка модели влияния изменения параметров теплоносителя и рабочего вещества на паропроизводительность парогенераторов ПГВ-1000 энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 / Т. В. Потанина, А. В. Ефимов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2007. – № 9. – С. 60–65.

Здобувачем отримано регресійну модель, що описує залежність паропродуктивності горизонтального парогенератора ПГВ-1000 від зміни теплових і гідравлічних параметрів легководного теплоносія й робочої речовини.

7. Потанина Т. В. Применение метода проекции градиента для решения задачи оптимального распределения нагрузок между энергоблоками АЭС / А. В. Ефимов, Т. В. Потанина, И. С. Белов, Т. А. Гаркуша // Интегровані технології та енергозбереження. – Харків : НТУ «ХПІ», 2008. – № 1. – С. 89–96.

Здобувачем розроблено методику застосування методу проекції градієнта Розена для розв'язання задачі оптимального розподілу навантажень між енергоблоками АЕС.

8. Потанина Т. В. Методи і підходи до створення імітаційної моделі енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000 для рішення завдань аналізу, діагностики і оптимального управління / Л. Л. Товажнянський, О. В. Єфімов, Т. В. Потанина, Т. А. Гаркуша // Науковий вісник Академії наук вищої освіти України «Енергетика та ресурсозбереження». – Харків : НТУ «ХПІ», 2008. – № 6 (32). – С. 19–33.

Здобувачем визначено коло задач, які можна розв'язувати за допомогою імітаційної моделі енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000.

9. Потанина Т. В. Управление распределением нагрузок между энергоблоками электростанций в условиях неопределенной информации об их состоянии / А. В. Ефимов, Т. В. Потанина // Автоматика-2005 : 12-а міжнар. конф. з автоматичного управління, 30 травня – 3 червня 2005 р., Харків : матеріали конф. – Х. : НТУ «ХПІ», 2005. – Т. 2. – С. 118.

Здобувачем розглянуто підходи до розв'язання задачі розподілу навантажень між енергоблоками електростанцій в умовах невизначеної інформації про їх стан.

10. Потанина Т. В. Модель горизонтального парогенератора в структуре имитационной модели энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 / А. В. Ефимов, Т. В. Потанина, Е. Д. Меньшикова, Т. А. Гаркуша // Сучасні наукові дослідження – 2006 : II міжнар. наук.-практ. конф., 20-28 лют. 2006 р., Дніпропетровськ : матеріали конф. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2006. – Т. 15. – С. 67–69.

Здобувачем проаналізовано можливості включення імітаційної моделі парогенератора ПГВ-1000 до структури імітаційної моделі енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000.

11. Потанина Т. В. Разработка имитационной модели энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 для решения задач анализа, управления и диагностики / А. В. Ефимов, Т. В. Потанина // Моделирование – 2006: конференция, посвященная 25-летию основания Института проблем моделирования в энергетике им. Пухова НАН Украины и 90-летию со дня рождения ак. Г. Е. Пухова, 16-18 мая 2006 г., Киев : сб. трудов конф. – К.: ИПМЭ им. Пухова НАН Украины, 2006. – С. 217–220.

Здобувачем розроблено блок-схему програмного комплексу, який є програмною реалізацією імітаційної моделі енергоблоку АЕС.

АНОТАЦІЇ

Потанина Т.В. Удосконалення методів та моделей для автоматизації процесу керування розподілом навантажень між енергоблоками АЕС. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07. – автоматизація процесів керування. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків. – 2009 р.

Дисертація присвячена удосконаленню математичних методів, моделей та програмного забезпечення для автоматизованого керування розподілом навантажень між паротурбінними

енергоблоками АЭС та підвищення за рахунок цього середньоексплуатаційної теплової економічності АЭС.

Запропоновано імітаційну модель енергоблока АЭС з реактором ВВЕР-1000. Отримано інтегральні експлуатаційні характеристики енергоблока АЭС з ВВЕР-1000, що враховують зміни параметрів основного та допоміжного устаткування під час їх експлуатації. Вирішено задачу оптимального розподілу навантажень між енергоблоками АЭС методом проекції градієнта Розена.

Ключові слова: автоматизація процесу керування розподілом навантажень, імітаційна модель енергоблока АЭС, інтегральні експлуатаційні характеристики, методи нелінійного програмування.

Потанина Т.В. Совершенствование методов и моделей для автоматизации процесса управления распределением нагрузок между энергоблоками АЭС. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 – автоматизация процессов управления. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков. – 2009 г.

Диссертация посвящена совершенствованию методов, моделей и программного обеспечения для автоматизированного управления распределением нагрузок между паротурбинными энергоблоками АЭС и повышению за счет этого среднеэксплуатационной тепловой экономичности АЭС.

Проведен обзор существующих математических моделей систем и оборудования паротурбинных энергоблоков АЭС и методов оптимального распределения нагрузок между оборудованием и энергоблоками электростанций. Усовершенствованы методика и алгоритм построения математической модели парогенераторной установки, систем конденсации и регенерации, разработаны реализующие их программы, позволяющие в автоматизированном режиме в составе АСУ ТП определять влияние изменения основных тепловых и гидравлических параметров первого и второго контуров АЭС на паропроизводительность парогенераторов. Получена в виде регрессионного уравнения зависимость влияния изменения тепловых и гидравлических параметров теплоносителя и рабочего вещества на паропроизводительность горизонтальных парогенераторов ПГВ-1000; оценки коэффициентов уравнения вычислены в результате статистической обработки многофакторного эксперимента, проведенного на имитационной модели парогенератора. Проведено комплексное исследование энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 как сложной технической системы. Для моделирования технологической схемы энергоблока построена иерархически организованная структура, состоящая из блоков и объектов, характеризующихся своими атрибутами и схемой поведения. Предложен технологический ориентированный граф энергоблока, позволяющий организовать расчетный процесс адекватного оценивания структурно-параметрических изменений, происходящих в технологической схеме энергоблока в процессе эксплуатации АЭС. Предложена имитационная модель энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000. Получены интегральные эксплуатационные характеристики энергоблока АЭС с ВВЭР-1000, учитывающие изменяющиеся в процессе эксплуатации параметры парогенераторов. Решена задача оптимального распределения нагрузок между энергоблоками АЭС методом проекции градиента Розена, включенным в состав программного комплекса, имитирующего функциональное состояние энергоблоков.

Ключевые слова: автоматизация процесса управления распределением нагрузок, имитационная модель энергоблока АЭС, интегральные эксплуатационные характеристики, методы нелинейного программирования.

Potantina T. V. Development of methods and models for control processes automation of optimal load distribution between NPP units. – Manuscript.

Dissertation for the Candidate of technical sciences degree by speciality 05.13.07 – Control

processes automation. – National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute, Kharkiv. – 2009.

Dissertation covers to development of mathematical methods, models and the software for automated control by load distribution of between NPP turbine power units and to increase the average operational thermal profitability of NPP.

The simulation model of the NPP power unit with VVER-1000 reactor is developed. Integrated operational characteristics of the NPP power unit with VVER-1000, taking into account basic and auxiliary equipment parameters changing while in service are received. The problem of optimal load distribution between NPP units of gradient projection method of Rosen is solved.

Key words: control processes automation of optimal load distribution, simulation model of NPP unit, integrated operational characteristics, the nonlinear programming methods.