

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Горелік Олександр Хаїмович

УДК 621.311.2: 65.011.56

**УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ
ЕНЕРГОБЛОКІВ АТОМНИХ І ТЕПЛОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ
ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ**

05.13.07 - Автоматизація технологічних процесів

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків - 2007

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в державному підприємстві «Харківський науково-дослідний інститут комплексної автоматизації» (НДІ ХІКА) Міністерства палива та енергетики України

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Куценко Олександр Сергійович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
завідувач кафедри системного аналізу і управління

Офіційні опоненти:

- доктор технічних наук, професор, **Тодорцев Юрій Костянтинович**, Одеський національний політехнічний університет, завідувач кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів

- доктор технічних наук, професор, **Ястребенецький Михайло Онисимович**, Харківська філія державного науково-технічного центру з ядерної та радіаційної безпеки, завідувач відділу

- доктор технічних наук, професор, член-кореспондент НАН України, **Воронівський Геннадій Кирилович**, Харківська ТЕЦ-5 Міністерства палива та енергетики України, голова правління

Провідна установа:

Науково-виробнича корпорація «Київський інститут автоматики» Міністерства промислової політики України, м. Київ.

Захист відбудеться « ____ » _____ 2007 р. о _____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.07 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків-2, вул. Фрунзе 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків-2, вул. Фрунзе 21.

Автореферат розісланий « ____ » _____ 2007 р.

Вчений секретар
Спеціалізованої вченої ради Д 64.050.07

І.П. Гамаюн

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасна енергетика базується на використанні потужних енергоблоків, що є основним компонентом сучасних ТЕС і АЕС. Важливим критерієм якості функціонування енергоблоків поряд з економічністю та екологічною досконалістю варто вважати експлуатаційну надійність окремих систем і енергоблоку в цілому. Однією з найбільш напружених з погляду надійності систем є автоматизована система управління технологічними процесами енергоблоку. Це обумовлено, насамперед, відносно невисокою надійністю програмно-технічних комплексів, що є основою цифрових систем контролю та управління енергоблоками.

Автоматизовані системи управління, в яких інформаційні функції та значна частина функцій управління виконувалися з використанням засобів обчислювальної техніки, були розроблені вперше в енергетиці для серійних енергоблоків атомних електростанцій з реактором ВВЕР-1000. Була поставлена і вирішена задача створення в складі АСУТП надійних загальноблокових управляючих обчислювальних систем (УОС) та інформаційно-обчислюваних систем (ІОС) для збору, обробки, оперативного подання й архівації великого обсягу інформації. У таких системах збирається вихідна інформація (від датчиків) від 10 до 25 тисяч одиниць, а кількість параметрів, що розраховуються, досягає 100 тисяч.

Незважаючи на відносно невисоку надійність окремих складових обчислювальної техніки, завдяки вжитим заходам по структурному резервуванню засобів збору, дублюванню обчислювачів, засобів зв'язку, засобів подання інформації та троїруванню комплексів управління, загальноблокова УОС забезпечила надійну експлуатацію енергоблоків.

У цих системах вже були закладені основи функцій по аналізу, обробці та «осмисленню» інформації, по формуванню команд управління. Однак, у зв'язку з недостатньою продуктивністю і надійністю засобів обчислювальної техніки, які використовувались, ці завдання не були вирішені повною мірою.

Системи управління серійних енергоблоків передбачалося замінити через 10 років експлуатації. На даний час ресурс на багатьох енергоблоках АЕС вичерпано. Відповідно до Енергетичної стратегії України на період до 2030 року передбачається не тільки будівництво нових, але й подовження терміну експлуатації діючих енергоблоків. З огляду на це, а також у зв'язку з введенням в експлуатацію нових енергоблоків на Хмельницькій і Рівненській АЕС, починаючи з 2000 року було поставлене завдання розробки нових сучасних обчислювальних систем та інформаційно-управляючих систем для блоків, що вводяться в експлуатацію, і поетапної повузлової заміни підсистем контролю й управління на діючих блоках АЕС із реакторами ВВЕР-1000 МВт.

При розробці нових систем управління ставиться завдання використання сучасних інформаційних технологій не тільки для розширення архівів і підвищення інтенсивності збору та первинної обробки інформації, але і для розширення функцій інтелектуальної обробки інформації. К зазначеним функціям відносяться: ідентифі-

кація станів і режимів роботи енергоблоків, визначення аварійного стану об'єкта; інтелектуальна підтримка оператора; образне подання стану найважливіших технологічних систем блоку; аналіз правильності роботи систем захистів і блокувань по стану параметрів блоку; збільшення точності фіксації часу виникнення подій, визначення першопричини аварій.

При тому велика увага приділяється вивченню динамічних характеристик об'єкта, параметрів та характеристик потоків подій, а також застосуванню для управління й регулювання в нормальних і нестационарних режимах, у тому числі при пусках і прогріві агрегатів, цифрових багатоканальних систем управління й регулювання, що параметрично налагоджуються.

Таким чином, створення всережимних АСУТП потужних енергоблоків, що забезпечують високу надійність функціонування ТЕС і АЕС, являє собою важливу науково-технічну проблему. Її вирішення вимагає попереднього глибокого аналізу інформаційних потоків у системі автоматизованого управління енергоблоком, рішення ряду нових науково-технічних завдань, що у сукупності забезпечують створення науково-методичної, алгоритмічної й програмної бази та як наслідок підвищення ефективності автоматизованих систем управління складними енергетичними об'єктами, що й визначає актуальність теми дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, виконані в дисертаційній роботі, визначалися тематикою робіт «Центрального НДІ комплексної автоматизації» (ЦНДІКА) і його Харківського відділення до 1991 року та державного підприємства «Харківський НДІ комплексної автоматизації» (ХІКА) з 1992 року по розробці АСУТП для ТЕС і для серійних енергоблоків АЕС з реактором ВВЕР-1000.

Тематика та напрям роботи обумовлені завданнями, які поставлені:

- «Комплексною програмою модернізації й підвищення безпеки АЕС», № 504-р, затвердженої Кабінетом Міністрів України 29.08.2002 р.;

- Програмою повузлової заміни підсистем АСУТП енергоблоків АЕС із ВВЕР-1000 і ВВЕР-440 на 2000-2006 р.», підтвердженої Національною Атомною Енергогенеруючою Компанією (НАЕК) «Енергоатом» 31.07.2000 р.

Тематика роботи пов'язана також з планами робіт ХІКА відповідно до договорів:

- «Розробка ІОС енергоблоку №2 Хмельницької АЕС», № 140 від 07.08.2000 р., замовник ВП «Хмельницька АЕС»;

- «Розробка ІОС енергоблоку №4 Рівненської АЕС», № 151 від 18.02.02 р., замовник ВП «Рівненська АЕС»;

- «Розробка проекту реконструкції й поставка інформаційного забезпечення і програмного забезпечення верхнього рівня ІОС енергоблоку №1 Хмельницької АЕС», № 186 від 01.11.05 р.

Реалізація цих робіт визначила тематичні плани ХІКА як головної системної організації по АСУТП в енергетиці України і особисту участь здобувача як виконавця в теоретичних і експериментальних дослідженнях, результати яких були використані при розробці та введенні ІОС і функціонально-групового управління (ФГУ) на серійних енергоблоках АЕС і енергоблоках ТЕС, а також при модернізації цих систем, що перебувають в експлуатації.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка та обґрунтування наукових основ вдосконалення функцій і структури інформаційно-обчислювальних і управляючих систем енергоблоків на основі аналізу й раціональної організації інформаційних потоків та синтезу систем управління режимами енергоблоку з метою підвищення надійності й економічності експлуатації ТЕС і АЕС.

Для досягнення цієї мети в дисертаційній роботі поставлені й вирішені наступні основні завдання:

- аналіз досвіду розробки та експлуатації базових інформаційно-обчислювальних (ІОС) і управляючих (УОС, ФГУ) систем в АСУТП енергоблоків;
- ідентифікація та визначення характеристик потоків подій у нормальних і аварійних режимах;
- дослідження помилок, що виникають при контролі параметрів енергоблоку у зв'язку з дискретним характером виміру й представлення інформації;
- розробка основних функцій ІОС і ФГУ, виходячи з особливостей об'єкта управління, у тому числі функції інтелектуальної підтримки оператора;
- аналіз завдань інформаційно-управляючих систем при безпосередньому цифровому регулюванні (БЦР) параметрів енергоблоку, формалізація алгоритмів БЦР і розробка структури системи функціонально-групового управління в складі розподіленої УОС;
- розробка та дослідження моделей прогріву і навантаження турбоустановок, аналіз динаміки енергоустаткування в пускових режимах, синтез і дослідження математичних моделей об'єкта і системи управління прогрівом для синтезу управління в цих режимах;
- дослідження відхилень запропонованих цифрових законів регулювання від типових лінійних законів, оцінка впливу процедури мажоритирування вихідних команд, а також точності синхронізації у часі на погрішності регулювання параметрів;
- синтез і впровадження ІОС і УОС для об'єктів автоматизованого управління атомних і теплових енергоблоків;
- розробка і обґрунтування основних концептуальних рішень щодо поетапної модернізації діючих систем.

Об'єкт дослідження - процеси автоматизованого управління енергоблоками АЕС і ТЕС у нормальному, пусковому та аварійному режимах.

Предмет дослідження - інформаційне і математичне забезпечення основних функцій автоматизованих систем управління енергоблоками ТЕС і АЕС, що є важливими з точки зору підвищення надійності їх експлуатації.

Методи досліджень. У роботі використано методи теорії автоматичного управління, методи аналізу випадкових процесів та теорії стохастичних потоків подій, методи моделювання та системного аналізу.

При дослідженні способів управління навантаженням турбоустановок у пускових режимах було використане математичне моделювання перехідних процесів у розподілених системах на основі аналізу рівнянь прогріву деталей довільної форми в часткових похідних.

Методи теорії автоматичного управління були використані при дослідженні стійкості систем навантаження турбоустановок по тепловому стану, а також при розробці цифрової системи управління й регулювання, що налагоджується параметрично.

Наукова новизна одержаних результатів складається в науковім обґрунтуванні концепції побудови всережимних цифрових систем управління та методів удосконалення інформаційного й математичного забезпечення систем управління енергоблоків з метою підвищення їх надійності.

Наукові результати, отримані в дисертаційній роботі:

1. Уперше запропоновано метод аналізу інформаційного забезпечення АСУТП за критеріями динамічної точності з урахуванням затримки в поданні даних. Це дозволило підвищити реакції багаторівневих УОС на зміни дискретних і аналогових сигналів.

2. Уперше досліджено потоки подій, які виникають в АСУТП енергоблоків АЕС при нормальних і аварійних ситуаціях, що дозволило визначити максимальний потік подій у ситуаціях, пов'язаних з відмовою устаткування.

3. Уперше запропоновано нові методи та алгоритми управління енергоблоками в пускових режимах і досліджена їх стійкість.

4. Уперше досліджені похибки цифрових законів управління, що обумовлені процедурою мажоритірованія вихідних команд, а також точністю часової синхронізації, що дозволило обґрунтувати структуру функціонально-групового управління в складі розподіленої УОС і підвищити точність тимчасової синхронізації.

5. Одержали подальший розвиток методи синтезу систем безпосереднього цифрового регулювання параметрів енергоблоку що параметрично налагоджуються, які базуються на запропонованому комплексі цифрових модулів, що дозволило запропонувати та реалізувати нові високоточні й надійні структури управляючих систем.

6. Одержали подальший розвиток математичні моделі прогріву деталей енергоблоків довільної форми у вигляді звичайних диференціальних рівнянь, отриманих

на основі точного рішення рівняння теплопровідності, для використання при розробці систем управління прогрівом та навантаженням у нестационарних режимах.

7. Обґрунтована концепція модернізації управляючих обчислювальних систем в АСУТП атомних енергоблоків, що експлуатуються, яка передбачає поетапну заміну систем в час планово-попереджувальних ремонтів зі збереженням характеристик систем на всіх етапах.

Практичне значення одержаних результатів роботи полягає в удосконаленні процесів автоматизованого управління енергоблоками, що в кінцевому підсумку дозволило підвищити експлуатаційну надійність АЕС і ТЕС, а також знизити експлуатаційні витрати на виробництво електроенергії.

Результати роботи використані і практично реалізовані при створенні алгоритмічного забезпечення та програмно-технічних засобів систем управління енергоблоками. З використанням результатів роботи розроблені та введені в експлуатацію великі багаторівневі управляючі обчислювальні системи, які тиражувалися на всіх блоках АЕС із ВВЕР-1000 (акт комісії Запорізької АЕС від 20.11.2006 р.).

Розроблена та введена в експлуатацію нова УОС в АСУТП енергоблоків № 2 Хмельницької АЕС і № 4 Рівненської АЕС в 2004 р..

На основі УОС «Комплекс Титан-2» для теплових блоків на ТЕС «Інкоу» і «Нанкін» у КНР і Запорізької ТЕС було спроектовано та впроваджено АСУТП на 6 блоках по 300 МВт (акт комісії Запорізької ТЕС від 20.11.2006 р.).

Починаючи з 2000 р., відповідно до програми повузлової заміни АСУТП на всіх дев'яти серійних енергоблоках з реактором ВВЕР-1000 України і на 4-х блоках Росії проводиться поетапна модернізація АСУТП із використанням розробленої УОС «Комплекс-2М».

Наукові результати роботи і розроблена на їх основі методологія підготовки інформаційного забезпечення та результати розробки системи автоматичного управління, що параметрично налагоджується, використані при впровадженні ФГУ на Рівненській, Південно-Українській та Запорізькій АЕС.

Економічний ефект при модернізації АСУТП тільки одного блоку 300 МВт складає більше 220 тис. грн. на рік (акт комісії Запорізької АЕС від 20.11.2006 р.).

Наукові і науково-методичні положення, одержані в дисертації, використовуються в навчальному процесі кафедри електричних станцій НТУ «ХП».

Особистий внесок здобувача.

Всі основні наукові результати дисертаційної роботи отримані безпосередньо здобувачем [9, 10, 11, 12, 14, 15, 35].

В опублікованих роботах зі співавторами здобувачем виконане наступне:

- в [1, 19, 24, 25, 26] запропонована структура комплексу технічних засобів, визначені алгоритми функцій управління, а також алгоритми функцій контролю захистів і блокувань, ідентифікації стану аварій, обґрунтована й запропонована диференціація дискретних, аналогових параметрів по припустимих запізнюваннях їхньо-

го подання операторів-технологів, обговорені й запропоновані способи діагностики й відновлення системи, а також методи генерації й корекції завдань;

- в [1, 3, 41] запропоновані схеми й способи автоматичного управління параметрів, способи відпрацювання керуючих сигналів;

- в [8, 17, 19, 22, 36] запропонована концепція поетапної модернізації, а також структура функції й характеристики ІОС і УОС енергоблоків;

- в [6, 7, 8] досліджені можливості мікропроцесорних систем при реалізації інформаційно-управляючих систем великої розмірності на верхньому рівні АСУТП АЕС;

- в [20] запропоновано метод пошукової оптимізації процесу горіння в топці котлоагрегату енергоблоку 800 Мвт за критерієм максимуму коефіцієнта корисної дії;

- в [1, 25, 26] розроблені базові математичні модулі НЦР, розроблена концепція ФГУ, запропонована структура, алгоритмічне забезпечення й способи керування функціональними групами.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові положення та результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на:

- Всесоюзній нараді «Автоматизовані системи управління ТЕС»(Київ, 1973 р.);

- Всеозюзній конференції «Досвід створення й впровадження АСУ в енергетику» (Москва, 1981 р.);

- Всеозюзній науково-технічній нараді по автоматизованих системах управління на АЕС із блоками ВВЕР-1000 (Енергодар, 1987 р.);

- Міжнародній конференції «Автоматика-1999» (Харків, 1999 р.);

- XI Міжнародній науково-технічній конференції із проблем математичного моделювання турбоустановок (Харків, 2000 р.);

- Міжнародній конференції «Автоматика-2001» (Харків, 2001 р.);

- XII Міжнародній науково-технічній конференції із проблем математичного моделювання турбоустановок (Харків, 2003 р.);

-IV Міжнародній тематичній конференції по технологіям виміру, контролю, управління й людино-машинним інтерфейсом атомних станцій (Коломбо. Штат Огайо, 2004 р.);

- Міжнародній конференції з проблем безпеки АЕС (Харків, 2005 р.).

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 42 друкованих праці, серед яких 3 монографії, 29 статей в наукових фахових виданнях, що входять в перелік ВАК України, та 3 авторських посвідчення.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота включає вступ, 7 розділів та висновки і викладена на 269 сторінках основного тексту, який містить в собі 6 рисунків та 1 таблицю на 7 сторінках, список використаних джерел 147 найменувань на 13 сторінках. Додаток містить 30 сторінок. Повний обсяг дисертації 299 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовується актуальність виконаних досліджень; формулюється позначення роботи та перелік розв'язуваних завдань, наведено короткий зміст роботи.

Перший розділ присвячений аналізу стану автоматизації технологічних процесів енергоблоків ТЕС і АЕС, а також перспективам модернізації діючих і створенню нових АСУТП енергоблоків.

У розділі виділені основні етапи становлення і розвитку цього напрямку, починаючи від створення перших дослідно-експериментальних інформаційно-управляючих систем на базі засобів обчислювальної техніки (блок 50 МВт ХарГЕС-2, 1961-1962 р.) до введення в експлуатацію у 2004 р. сучасних АСУТП енергоблоків АЕС із реакторами ВВЕР-1000 на Хмельницькій (блок № 2) АЕС.

Відзначається великий внесок у становлення й розвиток автоматизації технологічних процесів і створення АСУТП в енергетиці, що внесли колективи науково-дослідних інститутів, у тому числі Всесоюзного теплотехнічного інституту (ВТІ), Центрального котлотурбінного інституту (ЦКТІ), Центрального НДІ комплексної автоматизації (ЦНДІКА), Харківського НДІ комплексної автоматизації (ХІКА), Київського інституту автоматики (КІА), Харківського, Київського і Одеського політехнічних університетів, проектних інститутів («Теплоенергопроект» і його відділення), розроблювачів і постачальників систем та технічних засобів (ЗАТ СНВО «Імпульс», ВО «Моноліт», СП «Вестрон»), енергосистем і електростанцій, налагоджувальних та ін. організацій.

Перехід в енергетиці до будівництва та введення в експлуатацію потужних блокових енергоустановок, як на ТЕС так і, особливо на АЕС, поставив завдання створення систем управління для цих важливих і складних об'єктів управління. Це, у свою чергу, обумовило необхідність пошуку нових рішень по функціям, структурі й технічним засобам для систем управління.

Створення перших вітчизняних систем управління енергоблоками з використанням засобів обчислювальної техніки відбувалось в умовах відсутності досвіду розробки та експлуатації подібних систем для потужних енергоблоків. При створенні систем були використані різнотипні технічні засоби різних виробників і тому системи були неоднорідними, що призвело надалі до труднощів при їх експлуатації та ремонті. Не були також вирішені питання, пов'язані з реалізацією цифрових регуляторів, з похибками, одержаними в результаті використання засобів обчислювальної техніки через дискретний характер виміру і надання параметрів, з недостатніми знаннями динаміки процесів у нестационарних режимах, з резервуванням, з синхронізацією резервних каналів управління та інше.

Розробка та дослідження інформаційно-управляючих систем блокового рівня ТЕС і особливо, АЕС пов'язана з рішенням завдань збору, обробки, представлення й використання для оперативного управління більших обсягів інформації.

Тому що необхідно забезпечити високу надійність прийому й обробки великого обсягу сигналів, небажано концентрувати прийом більше 500-750 сигналів в одному пристрої збору інформації. Отже, тільки низових пристроїв збору і видачі інформації, пристроїв зв'язку з об'єктом (ПСО), з урахуванням резервування для прийому особливо-важливих сигналів, у системі може бути більше 40. При такій кількості пристроїв зв'язку з об'єктом виникає необхідність у рівні концентрації ПСО в утворенні рівня локальних мереж, тому що прийом великої кількості абонентів у загальноблокову мережу обмежений. Це також необхідно й по інших міркуваннях. Так, наприклад, на атомному блоці необхідно мати роздільні мережі по системах безпеки. Таким чином, у реальній інформаційно-управляючій системі енергоблоку може бути кілька рівнів прийому-передачі інформації, а саме:

- рівень ПСО;
- рівень концентраторів (локальні мережі зі шлюзами);
- рівень обчислювачів і архівів;
- рівень засобів відображення інформації для оператора.

Необхідно також ураховувати, що у загальних для всієї системи рівнях обчислювачів і засобів подання, а також рівнях концентрації інформації від ПСО, з метою забезпечення заданої надійності, необхідно передбачати міри щодо резервування, а це також збільшує число абонентів у мережі загальноблокового рівня.

Таким чином, поряд із проблемами вибору засобів обчислювальної техніки, баз даних, операційних середовищ і мереж при розробці блокових інформаційно-управляючих систем вимагають рішення ще чотири великі проблеми:

- проблема надійної доставки інформації на всі рівні з припустимими запізненнями і похибками; при цьому маються на увазі не тільки метрологічні характеристики, але і динамічні похибки інформації через запізнення при її передачі;
- проблема синхронізації інформації в каналах резервування, особливо, при прийнятті рішень по управлінню;
- проблема діагностики та відновлення програмних і технічних засобів, а також питання генерації та корекції завантажувальних модулів, у тому числі корекції настройки регуляторів;
- питання, пов'язані з розробкою та дослідженням математичного і алгоритмічного забезпечення функцій обробки інформації й виробітки команд управління блоком, як у нормальних, так і нестаціонарних режимах.

Саме рішення цих проблем присвячені теоретичні та експериментальні дослідження здобувача.

В **другому розділі** наведені результати аналізу характеристик потоків подій у нормальних і аварійних режимах атомного енергоблоку із серійним реактором ВВЕР-1000, а також методика оцінки динамічної погрішності виміру параметрів при дискретному способі їх збору, обробки, представлення і реєстрації.

Для оцінки динамічної похибки виміру параметрів була проведена оцінка запізнювань у передачі інформації в розробленої УОС «Комплекс-Титан-2», для серійних енергоблоків з реактором ВВЕР-1000. У цій системі, аналогова та дискретна інформація, що приймається пристроями зв'язку з об'єктом (ССО-К) до подання оператору–технологу обробляється на чотирьох рівнях обчислювальних машин (див. рис.1), при цьому кожний акт прийому – передачі та подання відбувається з деяким запізнюванням T_n . Так, субкомплекси зв'язку з об'єктом ССО-К витрачають на збір і первинну обробку інформації $T_k = 260 \div 400$ мс, концентратор (ССО-У) – $T_v = 1 \div 2$ с, обчислювальний комплекс (ОК) $T_b = 1 \div 2$ с і робоче місце оператора – технолога (РМОТ) оновлює параметри на фрагментах мнемосхем $T_p = 2 \div 16$.

Розходження часу збору й обробки залежить від обсягу параметрів, що збираються, у ССО-У і ССО-К від налагодження циклів збору у ОК і РМОТ.

Рис. 1. Схема взаємодії рівнів УОС

Цикли збору на всіх рівнях асинхронні, тобто акти обміну на всіх чотирьох рівнях i , в тому числі, акт збору інформації в ССО-К, випадковим образом зміщуються в часі один відносно іншого. Таким чином, загальний час передачі сигналу параметра є випадкова величина, яка дорівнює сумі чотирьох випадкових величин T_n . Можна вважати, що час передачі на кожному рівні T_n випадкова величина, розподілена з рівномірною щільністю в межах від $T_{n \min}$ до $T_{n \max}$. Тоді математичне очікування величини затримки дорівнює:

$$m_{T_n} = \frac{T_{n \max} + T_{n \min}}{2}. \text{ Математичне очікування загального запізнювання має}$$

вигляд: $m_T = \sum_{n=1}^{n=4} m_{T_n}$.

Таблиця 1

В таблиці зазначено: Δ^A_m - помилка при фіксації в архіві; Δ^D_m - помилка при поданні на дисплеї; АР- автоматичне регулювання; t_d - час затримки до відображення на дисплеї; t_A - час затримки до фіксації в архіві.

Встановлено, що закон розподілу ймовірності затримки по передачі параметра нормальний і ймовірність передачі із затримкою, що не перевищує 10% від середньої величини, дорівнює 0,8. З урахуванням динаміки вимірюваних параметрів були визначені найбільш імовірні динамічні похибки (табл.1).

Шляхом аналізу позаштатних ситуацій, що супроводжуються зупиненням блоку, визначені потоки подій в аварійних режимах. На рис. 2 наведені графіки потоків подій (N) у реакторному відділенні (РВ) і машинному залі (МЗ) при зупиненні одного з блоків АЕС. Доведено, що максимуми потоків подій в аварійному режимі по дискретних і аналогових параметрах у межах одного відділення різночасні. Це пояснюється тим, що зміна аналогових параметрів є наслідком зміни станів захистів,

блокувань, ключів і механізмів. Послідовність максимумів потоків подій у РВ і МЗ залежить від того, де виникла причина відмови або аварії.

Рис. 2. Графік потоків подій у реакторному відділенні (а) і машинному залі (б)

У табл. 2 наведені результати оцінки потоків подій по зміні станів дискретних і аналогових параметрів у режимі нормальної експлуатації.

Таблиця 2

Оскільки в режимі нормальної експлуатації ймовірність причинного зв'язку між подіями в РВ і МЗ відносно мала, то максимальний потік подій у цілому по блоку для цього режиму визначається як максимальна сума подій по РВ і МЗ протягом однієї хвилини.

На кількість подій впливають також прийняті в проекті способи введення дискретної інформації. Так, наприклад, в аварійних ситуаціях при знеструмленні окремих захистів і блокувань, а також схем засувок в архів АСУТП блоку попадає багато неінформативних подій (до 460 подій у секунду при відмові в реакторному відділенні). При аваріях у випадку знеструмлення датчиків з'являється сигнал «невірогідність», а надалі при подачі живлення (східчастий пуск) знову відновлюється сигнал. Отже, можливе виключення із протоколів реєстрації зустрічних подій, тобто, наприклад, «відкрито-невірогідність» і «невірогідність- відкрито». Це дасть можливість виключити сотні «порожніх» подій.

Дані по потоках подій, що приводяться в роботі, визначалися за матеріалами, що відносяться до часу після налагодження функцій реєстрації поточних подій (РПП), сигналізації параметрів і датчиків дискретної інформації. При цьому була проаналізована відмова з наступним відключенням блоку.

У результаті проведеного аналізу інформаційних потоків і запізнювань у передачі інформації в АСУТП енергоблоків АЕС:

- розроблена методика оцінки динамічних похибок вимірюваних параметрів при дискретному способі їх збору, обробки і представлення в АСУТП енергоблоку, заснована на оцінці запізнювань при прийманні й передачі інформації, а також динамічних характеристик параметрів;

- встановлено збір параметрів шляхом диференціювання періодів збору дискретних і аналогових параметрів.

Виконані дослідження дозволили встановити, що максимальний потік переходів за апертуру в аварійній ситуації може скласти 110 переходів за 1 с. Тому навіть у позаштатних ситуаціях кількість аналогових параметрів, яку необхідно передати на верхній рівень, через перевищення апертури, становить по блоку $\approx 3\%$ від того числа (≈ 3000), що в цей час збирається в обчислювальні комплекси (ОК) верхнього блокового рівня на діючих блоках. Отже, перехід на передачу подій може дати значне зменшення часу обміну із ОК, що дозволить більш ефективно використати його обчислювальні ресурси при модернізації ІОС у складі АСУТП енергоблоків.

У **третьому розділі** розробляються математичні моделі прогріву деталей енергоблоків довільної форми для вирішення задач автоматизації управління у пускових режимах.

Відомо, що основним завданням системи автоматичного управління енергоблоків при пусках є підйом параметрів при підтримці темпу прогріву масивних деталей турбін на заданому рівні. Це обумовлено необхідністю не перевищувати припустимої температурної напруги різних конструктивних елементів. Оскільки прогрів визначається темпом підйому параметрів пара, виникає необхідність опису прогріву металу окремих деталей залежно від температури пара. У деяких роботах зміна температури деталей у заданих точках, залежно від температури пара емпірично, описана диференційними рівняннями першого та другого порядку. Відоме описання прогріву звичайними диференційними рівняннями, які зв'язують температуру металу в окремих точках деталей, що нагріваються, з температурою середовища, що гріє. Однак, ці рівняння отримані для окремих випадків прогріву плоскої стінки і циліндра, а темп навантаження енергоблоків обмежується заданим темпом прогріву деталей складної форми.

У роботі розглянуті рівняння прогріву деталей довільної форми. На підставі точного рішення рівняння теплопровідності в частинних похідних визначена структура рівнянь і показані зв'язки між коефіцієнтами отриманих рівнянь, формою деталей, що нагріваються, і початковими умовами.

У роботі розглянуті два випадки прогріву тіла середовищем, що гріє, який має однакову температуру на ділянці підведення тепла (рис.3) при ізоляції ділянки, що не нагрівається на поверхні, або при витoku тепла на цій ділянці і прогріві при підведенні тепла на двох поверхнях (рис.4).

На підставі рішення рівняння теплопровідності при стрибку температури середовища, що гріє, для однорідного і ізотропного тіла була отримана залежність, яка зв'язує зміни зображення по Лапласу температури середовища, що гріє, $\theta_0(S)$ із зображенням температури деталі, що нагрівається у точці з координатами x, y, z , - $\theta(x, y, z, S)$, де S комплексна змінна:

$$\theta(x, y, z, S) = \theta_0(S) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{M_n(x, y, z)}{T_n S + 1} + S \sum_{n=1}^{\infty} \frac{N_n(x, y, z) T_n}{T_n S + 1}, (1)$$

де функції $M_n(x, y, z)$, $N_n(x, y, z)$ і постійна часу T_n визначаються формою деталі, що нагрівається і теплофізичними характеристиками матеріалу цих деталей.

Рис. 3. Прогрів тіла, що нагрівається внутрішній поверхні,
з ізоляцією зовнішньої поверхні.

Рис. 4. Прогрів тіла при внутрішньомуна і зовнішньому відводі тепла

Тобто, температура в точці тіла, що нагрівається, яка має координати x, y, z може бути визначена на підставі рішення наступної системи рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1 \dot{\theta}_1 + \theta_1 = M_1(x, y, z, t) \cdot \theta_0(t), \\ T_2 \dot{\theta}_2 + \theta_2 = M_2(x, y, z, t) \cdot \theta_0(t), \\ \dots\dots\dots \\ T_n \dot{\theta}_n + \theta_n = M_n(x, y, z, t) \cdot \theta_0(t), \\ \theta(x, y, z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \theta_n, \end{array} \right. \quad (2) \text{ при початкових умовах: } \begin{array}{l} \theta_1 = N_1(x, y, z), \\ \theta_2 = N_2(x, y, z), \\ \dots\dots\dots \\ \theta_n = N_n(x, y, z). \end{array}$$

Або як рішення рівняння виду:

$$\left[\prod_{n=1}^{\infty} (T_n \cdot P + 1) \right] \cdot \theta(x, y, z, t) = \left[\sum_{m=1}^{\infty} M_m(x, y, z) \prod_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^{\infty} (T_n \cdot P + 1) \right] \cdot \theta_0(t), \quad (3)$$

де P – символ диференціювання, при початкових умовах:

$$\begin{aligned} \theta(x, y, z, 0) &= \sum_{n=1}^{\infty} N_n(x, y, z) \\ \frac{d\theta(x, y, z, t)}{dt} /_{t=0} &= - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{N_n(x, y, z)}{T_n}, \quad (4) \\ \dots\dots\dots \\ \frac{d^m \theta(x, y, z, t)}{dt^m} /_{t=0} &= (-1)^m \sum_{n=1}^{\infty} \frac{N_n(x, y, z)}{T_n^m}. \end{aligned}$$

Початкові умови (4) впливають із рівності загальних рішень системи (2) і рівняння (3).

Для визначення температури в будь-якій точці деталі, що нагрівається, необхідно знати в загальному випадку не тільки початкове значення температури в цій точці, але й початковий розподіл температур, тоді можливо визначити $N_n(x, y, z)$.

Відповідно до (1) і (2) рішення рівняння теплопровідності при зміні температури середовища, що гріє, у часі для будь-якої точки деталей довільної форми, що нагріваються, може бути представлено сумою реакції нескінченного числа аперіодичних ланок з коефіцієнтами передачі M_n і постійними часу T_n , що убувають залежно від номера, а також початкової аперіодично згасаючої складовою N_n .

Структурна схема моделі рішення рівняння теплопровідності, що відповідає (1), показана на рис. 5.

Рис. 5. Структурна схема рішення рівняння теплопровідності

Таким чином, температура тіла в будь-якій точці в операторній формі може бути визначена як сума перерахованих складових.

При нагріванні тіла на двох поверхнях (рис.4) при температурах середовищ, що гріють $\theta_{10}(t)$ і $\theta_{20}(t)$ температура деталі в точці (x, y, z) дорівнює:

$$\theta(x, y, z, s) = \theta_{10}(s) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{M_{1n}(x, y, z)}{T_n s + 1} + \theta_{20}(s) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{M_{2n}(x, y, z)}{T_n s + 1} + s \sum_{n=1}^{\infty} \frac{N_n(x, y, z) T_n}{T_n s + 1}. \quad (5)$$

Вирази (1), (2), (3) і (5) можуть бути спрощені, тому що при заданій точності можна обмежитися тільки декількома складовими, відкинувши аперіодичні ланки, починаючи з деякого номера.

Дослідження, виконані в цьому розділі, дають підстави для вибору форми рівнянь прогріву при експериментальному їх визначенні. Коефіцієнти рівнянь можуть бути визначені або по кривих розгону, або, наприклад, методом моментів у випадку довільної зміни $\theta_0(t)$. При використанні рівнянь моделі необхідно враховувати, що вони вірні на ділянках прогріву з незмінними α_1 і α_2 .

У **четвертому розділі** розглядаються результати дослідження алгоритмів навантаження турбін паром номінальних параметрів з позитивним зворотним зв'язком по тепловому стану та при стабілізації потоку тепла на прогрів.

Як вже відзначено, при автоматичних пусках прагнуть підтримувати різницю температур, що характеризує термонапружений стан критичного елемента конструкції турбіни, на заданому рівні. У цьому випадку при пусках паром номінальних параметрів навантаження турбіни може бути однозначно визначена залежно від температури металу. Таким чином, по мірі росту температури металу турбіни збільшиться завдання по навантаженню, а при збільшенні навантаження створюються умови для росту температури, отже, в автоматичній системі подібного типу існує позитивний зворотний зв'язок по температурі (тепловому стані турбіни).

Позитивний зворотний зв'язок принципово не усуває, а за визначених умов збільшує відхилення від заданого режиму прогріву. Відомо кілька автоматів пуску турбін, у яких використовується принцип формування завдання з позитивним зв'язком по тепловому стану. Цей же принцип може використовуватися у всережимних системах управління турбоагрегатами АЕС. Тому доцільно проводити аналіз стійкості та точності систем навантаження з позитивним зворотним зв'язком по тепловому стану.

Структурна схема подібної системи навантаження турбіни при пуску паром номінальних параметрів показана на рис. 6.

Система містить у собі об'єкт, представлений передатною функцією ділянки регулювання навантаження турбіни W_N , ділянки нелінійного перетворення $\theta_n(N)$ навантаження (N) від температури пара (θ_n) поблизу поверхні деталі, що обігривається, по прогріву якої здійснюється управління навантаженням, і передатною функцією W_M , що зв'язує температуру пара θ_n у регулюючій ступені турбіни і температуру металу стінки θ_M .

Рис. 6. Структурна схема системи навантаження з позитивним зворотним зв'язком по тепловому стану

W_N – передавальна функція ділянки регулювання навантаження; W_{pN} – передавальна функція регулятора навантаження; W_M – передавальна функція прогріву металу деталі турбоагрегату; N – навантаження; θ_{II} – температура пара поблизу поверхні нагріву; θ_M – температура металу; $N_3=F(\theta_M)$ – залежність заданого значення навантаження від θ_M ; $\theta_n(N)$ – залежність температури пара від навантаження.

Система управління складається з регулятора навантаження (передавальна функція W_{pN}) і приладу формування завдання по навантаженню залежно від температури металу $N_3=F(\theta_M)$.

Розглянуті елементи системи навантаження у випадку, коли обмежується прогрів стінки або фланця в зоні регулюючого ступеня.

Якщо весь період навантаження розбити на ділянки, у межах яких $\alpha(N)=\alpha_i = \text{const}$, де α коефіцієнт тепловіддачі від пари до стіни, то передатна функція, що зв'язує зміну температури пара і температуру металу, може бути визначена в першому наближенні, у такий спосіб:

$$W_M(P) = \frac{K_M}{T_M(\alpha_i)P + 1}.$$

Коефіцієнт K_M і постійна часу T_M визначаються за схемою заміщення:

$$K_M = \frac{\frac{\delta_{II}}{\lambda_{II}}}{\frac{1}{\alpha_i(N)} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{\delta_{II}}{\lambda_{II}}}, \quad T_M = \frac{\left[\frac{1}{\alpha_i(N)} + \frac{\delta}{2\lambda} \right] \left(\frac{\delta}{2\lambda} + \frac{\delta_{II}}{\lambda_{II}} \right) \cdot c_M \rho \delta}{\frac{1}{\alpha_i(N)} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{\delta_{II}}{\lambda_{II}}},$$

де $\alpha_i(N)$ – коефіцієнт тепловіддачі від пари до стінки; δ – товщина стінки, фланця; δ_{II} – товщина ізоляції; λ – теплопровідність металу; λ_{II} – теплопровідність ізоляції; c_M – теплоємність металу стінки, фланця; ρ – щільність металу.

Передатна функція САР навантаження (див. рис. 6) має вигляд:

$$W_{cN} = \frac{W_N W_{pN}}{1 + W_N W_{pN}}.$$

З огляду на те, що час встановлення заданого навантаження значно менше часу навантаження турбіни по тепловому стану, приймаємо $W_{cN} = 1$.

Функція формування завдання регулятора навантаження по температурі металу $F(\theta_M)$ може бути визначена із граничних умов на поверхні стінки або фланця:

$$q = \alpha(N) [\theta_{II}(N) - \theta_M - \Delta\theta], \quad (6)$$

де q – потік теплоти, який підводиться до поверхні деталі, що обігривається; θ_M – температура металу, вимірювана на зовнішній поверхні; $\Delta\theta = \theta_{M.в.} - \theta_M$ – різниця температур на внутрішній і зовнішній поверхнях стінки фланця.

При прогріві з постійною різницею $\Delta\theta = \Delta\theta_3$ потік теплоти q при незмінних теплофізичних характеристиках металу та належної ізоляції зовнішньої поверхні можна вважати постійним $q=q_3$.

На рис. 7 представлені графіки функцій $\theta_{\Pi}(N)$ (для турбін типу ВК-100), визначені експериментально при різних пусках. Як видно, $\theta_{\Pi}(N)$ може бути представлена лінійними функціями: $\theta_{\Pi}(N) = A_i + k_i(N - N_i)$, де k_i – нахил графіка функції $\theta_{\Pi}(N)$ у крапці $\theta_{\Pi} = A_i$; N_i – значення навантаження при $\theta_{\Pi}(N_i) = A_i$.

Рис. 7. Графіки функцій $\theta_{\Pi}(N)$ турбін

Будемо вважати k_i , N_i , A_i у межах кожній ділянці незмінними. У припущенні $\Delta\theta = \Delta\theta_3$, $q = q_3$ завдання по навантаженню може бути визначене так (див. 6):

$$N_3 = F(\theta_M) = \frac{\theta_M}{K_{ip}} - \frac{\left[A_{ip} - \Delta\theta_3 - \frac{q_3}{\alpha_{ip}} \right]}{k_{ip}} + N_{ip}, \text{ де } A_{ip}, k_{ip}, \alpha_{ip}, N_{ip} - \text{коєфіцієнти,}$$

прийняті в системі управління при розрахунку завдання по потужності N_3 для ділянки i .

Ці коєфіцієнти в загальному випадку (у зв'язку з тим, що характеристики об'єкта ми знаємо з деякою неточністю) відрізняються від A_i , k_i , α_i , N_i . Відповідно до рис.6 передатна функція системи навантаження з позитивним зворотним зв'язком по тепловому стану на кожній ділянці може бути записана у вигляді:

$$W_c = \frac{K_c}{T_c p + 1},$$

$$\text{де } K_c = \frac{K_M}{1 - \frac{K_M k_i}{k_{ip}}}; \quad T_c = \frac{T_M (\alpha_i)}{1 - \frac{K_M k_i}{k_{ip}}}.$$

У таблиці 3 наведені передавальні функції, диференційні рівняння і рішення диференційних рівнянь системи при різних значеннях співвідношення $\beta = K_M k_i / k_{ip}$.

При $\beta = 1$ система навантаження поводить ся як інтегратор, на виході якого на кожній ділянці і температура зростає з постійною швидкістю.

При $\beta < 1$ система навантаження описується передавальною функцією аперіодичної ланки, у цьому випадку система навантаження зменшує швидкість прогріву і різницю $\Delta\theta$.

При $\beta > 1$ система навантаження нестійка і збільшує швидкість прогріву.

Таблиця 3

На рис. 8 представлені графіки навантаження у всіх трьох випадках.

Таким чином показано, що при помилці завдання функції $F(\theta_M)$, при неправильній установці термопари, що заміряє температуру металу, виникають наростаючі відхилення від заданого режиму прогріву. Розроблено і досліджено також алгоритм

навантаження турбіни при стабілізації потоку тепла на прогрів. Показано, що система, у якій регулюється потік тепла, має більшу швидкодію, чим система регулювання критичного показника теплового стану.

Рис. 8. Графіки навантаження турбіни при різних β

$N_I, \theta_I, \Delta\theta_I$, при $\beta > 1$; $N_{II}, \theta_{II}, \Delta\theta_{II}$, при $\beta = 1$; $N_{III}, \theta_{III}, \Delta\theta_{III}$, при $\beta < 1$.

У систему навантаження по тепловому потоку входять регулятор потоку теплоти РПТ на прогрів циліндра високого тиску в зоні регулюючого ступеню, що діє на мотор синхронізатора турбіни, тобто на задатчик гідравлічної системи регулювання обертів і потужності – (ГРО) (рис.9).

Рис. 9. Схема навантаження турбоустановки при стабілізації потоку тепла на прогрів.

1 - блок нелінійності α (N) ; 2 - блок підсумовування; 3 - блок множення;
4, 6 - регулюючі блоки; 5 - диференціатор.

Регулятор, у свою чергу, містить у собі датчик потоку теплоти (ДПТ), що складається із блоку нелінійності 1, на виході якого сигнал пропорційний коефіцієнту тепловіддачі α (N), блоку підсумовування 2, сигнал якого пропорційний різниці температур пари і металу внутрішньої стінки ЦВД у регулюючій ступені, і блоку множення 3. Вихідний сигнал блоку ДПТ дорівнює в регулюючому блоці 4 із заданим значенням потоку теплоти, і регулятор впливає на ГРО, установлюючи навантаження таким, при якому потік тепла дорівнює заданому.

Для корекції заданого значення теплового потоку при зміні теплофізичних характеристик металу і витоку теплоти через ізоляцію протягом пуску, а також для компенсації помилок у визначенні потоку теплоти, у систему може бути включений коригувальний регулятор КР (диференціатор Д и регулятор ПП), що виробляє сигнал корекції Δq по відхиленню «критичного» показника прогріву від завдання, наприклад, швидкості зміни $\dot{\theta}_{\text{мн}}$ від заданого значення швидкості зміни $\dot{\theta}_z$.

Результати дослідження системи навантаження турбіни, у якій використовується регулятор, що стабілізує потік теплоти на прогрів на заданому рівні з коригувальним регулятором швидкості прогріву ЦВД наведені на рис. 10.

Рис 10. Графіки зміни параметрів при автоматичному навантаженні турбіни:

а) – система без коригувального регулятора; б) – включення системи з коригувальним регулятором після набору початкового навантаження вручну; q^* - задане значення потоку тепла на прогрів; q - потік тепла на прогрів; $\Delta\theta_{\text{прс}}$ - різниця температур пари - метал внутрішньої стінки; $\Delta\theta_{\text{прс}}$ – розрахункове значення різниці $\Delta\theta_{\text{прс}}$; $\theta_{\text{мн}}$ – температура стінки низу ЦВД у зоні регулюючого ступеня; $\theta_{\text{мвр}}$, $\theta_{\text{мнр}}$ - розрахункові значення температур стінки внутрішньої і зовнішньої; $\Delta\theta_{\text{ст}}$ – різниця температур по стінці розрахункова; $\dot{\theta}_{\text{мн}}$ – швидкість зміни $\theta_{\text{мн}}$; $\theta_{\text{мнр}}$ - розрахункове значення $\theta_{\text{мн}}$; N - навантаження; N_p - розрахункові графіки навантаження.

У **п'ятому розділі** розглянуті питання розробки та дослідження параметрично налагоджуваних регуляторів для систем автоматичного регулювання і управління,

реалізованих на нижньому рівні інформаційно-обчислювальних і управляючих систем блоку, а також для систем функціонально-групового управління. Пакет модулів регуляторів дозволяє реалізувати системи взаємозалежного програмного регулювання, регуляторів що коректують, регуляторів з корекцією налагоджень.

Розглянуті також засоби крокового управління. Відомо, що алгоритми управління ФГУ здійснюються по кроковому принципу. Весь алгоритм управління механізмами, що входять у функціональну групу, розділяється на ряд кроків. При цьому, можливе виконання паралельних послідовностей кроків, що розгалужуються.

У дисертації наведені структури і математичний опис основних модулів пакета. На рис. 11 наведена структурна схема одного з основних модулів - «Регулювання з виконавчим механізмом постійної швидкості» з використанням попорційно-диференційного модуля (ПД), що може перебувати в чотирьох режимах: увімкнено; узгодження; робота; вимкнено.

Рис. 11. Структура алгоритмічного модуля ПІ регулятора з виконавчим механізмом постійної швидкості

САР і ФГУ реалізуються як на енергоблоках ТЕС, так і АЕС. Аналіз технологічних алгоритмів управління показав, що всережимні системи управління обладнанням блоків, включають 20-30 функціональних груп.

«Пряме» програмування таких систем, а також необхідність коригування алгоритмів управління і, отже, програм при налагодженні вимагають тривалої роботи великих колективів кваліфікованих програмістів. Тому розроблено процедуру налагодження математичного та програмного забезпечення, що дозволяє на основі використання бібліотеки типових алгоритмічних програмних модулів генерувати і коректувати робочі програми управляючих комплексів (УК), що реалізують підсистеми управління конкретних функціональних груп, і представлення алгоритмів на екранах дисплеїв.

Конкретні алгоритми управління, контури регулювання і системи формування завдань набираються у вигляді структурних схем із типових алгоритмічних модулів (АМ) на екрані дисплея (рис.12) і реалізуються в управляючих комплексах. Кожний тип алгоритмічного модуля описує певний вид перетворення вхідної інформації. Вид перетворення закладено у внутрішній структурі модуля і відображено у його назві. Сукупність стандартних алгоритмічних моделей регулювання та управління складають бібліотеку АМ. Усього в бібліотеку АМ включено 25-30 модулів. Але бібліотека відкрита для розширення. Така методика алгоритмізації завдань САР і ФГУ дозволила скоротити час та вартість робіт із програмування і істотно полегшити доведення технологічних алгоритмів, а також їх коригування.

У **шостому розділі** наведені відомості про розробку структури та функцій інформаційно-обчислювальних і інформаційно-управляючих систем в АСУТП енергоблоків. При цьому інформаційно-управляюча система містить у собі як ІОС, так і ФГУ. Були розроблені дві базові структури УОС. Перша система «Комплекс-

Титан2» була розроблена для серійних блоків АЕС із реактором ВВЕР-1000 на початку 80-х років (рис.13).

УОС має чотири рівні: комплекси зв'язку з об'єктом і концентратори, потім рівень обчислювальних комплексів і рівень робочих місць операторів-технологів. Зв'язки пристроїв нижнього рівня із пристроями верхнього рівня виконані радіальними за принципом «кожний з кожним». УОС містить у собі крім чисто інформаційних і інформаційно-управляючих комплексів нерезервованих (різні модифікації), також керуючі троїровані комплекси ФГУ.

Недоліками цієї системи залишаються вповільнені реакції по поданню інформації операторові (найменший час реакції 1,5 - 2 с по дискретним) і невисока розв'язна здатність по фіксації часу виникнення сигналів не краще 60-100 мс по обмеженому кількості дискретних сигналів і до 1 - 1,5 с по аналогових сигналах.

Ці недоліки усунуті в новій УОС, яка розроблена та впроваджена на блоках Хмельницької та Рівненської АЕС (рис.14).

РМОТ-2 – робоче місце операторів-технологів; ОК – обчислювальні комплекси; ССО-К і УЛУ2-ЕВМ – комплекси зв'язку з об'єктом; АКРБ, АСУТ, А701, СВРК – зовнішні системи.

Нова система має також чотирьохрівневу структуру (мікропроцесорні комплекси управління, концентратори, резервовані сервера прикладних завдань і архівування та робоче місце операторів.

Змінена також і технологія передачі інформаційних сигналів від концентраторів у мережу верхнього рівня (по готовності концентраторів), що дало можливість прибрати один рівень запізнювання. Таким чином, поліпшені часові характеристики УОС.

РМО – робоче місце операторів-технологів; СА – сервер архівування; СПЗ- сервер прикладних задач; ІК – інженерний комплекс; КССО – концентратори; МСКУ – мікропроцесорні комплекси збору інформації і управління; АКРБ, АСУТ, СВРК – зовнішні системи; ШЛ – шлюз зв'язку; НС – робоче місце начальників змін, цехів.

Багаторазово збільшилася продуктивність процесорів і ємність запам'ятовувальних пристроїв, що дозволяє вирішувати додаткові обчислювальні завдання і зробити архіви тривалістю практично рівною всьому часу експлуатації блоків. На порядок при тих же принципах резервування збільшилася надійність функцій і системи в цілому, при зменшенні відмов і збоїв окремих пристроїв. Модернізована система забезпечує виконання інформаційних, управляючих і допоміжних функцій.

Функції УОС реалізуються в рамках наступних функціональних підсистем: контролю і реєстрації; обслуговування захистів і блокувань; прикладних завдань; контролю (представлення) параметрів безпеки (Рис.15); інформаційно-довідкової; підтримки функціонування; автоматизованого налагодження; ФГУ.

Слід зазначити деякі особливості реалізації функцій в новій системі. Потужні ресурси сучасних технічних засобів (обсяг оперативної та дискової пам'яті, продук-

тивність процесорів, висока пропускна здатність мереж) дозволили уникнути інформаційного поділу системи по відділеннях РО і ТО, як це було в УОС, що була впроваджена раніше. У кожному вузлі системи доступна вся безпосередньо вимірювана і розрахована інформація. Поточні та довгостроковий архіви ведуться по блоку в цілому.

Важливою особливістю нової системи є підхід, при якому система подання параметрів безпеки (СППБ) реалізується не на виділеному комплексі (так була реалізована СППБ, поставлена на діючі блоки АЕС фірмою «Вестингауз»), а як функціональна підсистема, для якої виділена частина загальносистемних ресурсів у рамках базового комплексу технічних засобів. Таке рішення дозволило скоротити кількісний склад технічних засобів, зменшити зону обслуговування персоналу і зробило систему дешевше. Функції системи контролю генератора також інтегровані в УОС, а функції сигналізації і реєстрації параметрів турбогенератора реалізовані в рамках підсистеми контролю та реєстрації.

Досвід розробки систем для блоків Хмельницької й Рівненської АЕС, що включають всі інгредієнти систем управління використано при розробці структури й функції повнофункціональної всережимної АСУТП блоку з використанням засобів обчислювальної техніки.

У **сьомому розділі** наведені відомості про використання отриманих наукових результатів при розробці та впровадженні АСУ енергоблоків на ТЕС і АЕС. У роботі наведені, у вигляді прикладів, короткі відомості по основних об'єктах, на яких уперше були реалізовані результати виконаних досліджень (блок 300 МВт Зміївській ТЕС, блок 800 МВт Запорізької ТЕС, головний блок 1000 МВт із реактором ВВЕР-1000 Запорізької АЕС, нові блоки аналогічної потужності на Хмельницькій і Рівненській АЕС, блоки 300 МВт у Китаю на ТЕС «Нанкін» і «Інкоу»).

Результати досліджень, виконаних здобувачем, були використані при впровадженні інформаційно-обчислювальних систем і систем функціонально-групового управління на всіх серійних енергоблоках з реактором ВВЕР-1000, уведених в експлуатацію в Україні, Росії і Болгарії з 1984 по 2001 рік - усього на 15 блоках.

Надалі при добудуванні блоку №2 Хмельницької АЕС і блока №4 Рівненської АЕС були введені в експлуатацію модернізована (знову розроблена) ІОС, а також на блоці №4 РАЕС модернізована ФГУ. Після 2000 р. була розпочата робота з модернізації 14 блокових ІОС на всіх станціях в Україні та Росії (крім блоку №1 Ростовської АЕС). Однак, повна одночасна заміна ІОС і ФГУ на діючих енергоблоках вважалася неможливою з наступних причин:

- відносно велика вартість системи;
- неможливість виконання заміни всієї ІОС (особливо тієї частини, що контролює параметри систем безпеки), протягом одного планово-попереджувального ремонту.

Тому, як вже відзначалося, була розроблена програма поетапної заміни ІОС.

На першому етапі замінюються засоби подання інформації. На другому етапі замінюються центральні обчислювальні комплекси і один комплекс зв'язку систем безпеки. На третьому етапі замінюються всі комплекси зв'язку з об'єктом, крім одного з комплексів, що збирають інформацію по системам безпеки.

Розробка нових і реконструкція існуючих інформаційних і управляючих систем для блоків АЕС проводилася відповідно до затвердженого ГКЯР України в 2000 р. нормативного документу (НП 306.5.02/3.035-2000 «Вимоги по ядерній і радіаційній безпеці до інформаційних і управляючих систем, важливим для безпеки атомних станцій»), що відповідають вимогам і нормам МАГАТЕ.

Ці вимоги були враховані як при створенні ІОС для нових енергоблоків Хмельницької та Рівненської АЕС, так і при реконструкції ІОС на діючих енергоблоках АЕС України і Росії.

У розділі наведені також короткі описи системи автоматичного регулювання високої надійності для АЕС і системи оптимізації горіння блоків 800 МВт, у яких використані науково-технічні результати дисертаційної роботи.

У додатку приводяться матеріали, що підтверджують практичне використання і впровадження результатів дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

Результатом дисертаційної роботи є вирішення важливої науково-технічної проблеми розробки нових і вдосконалення діючих загальноблокових інформаційно-обчислювальних і управляючих систем у складі АСУТП потужних енергоблоків АЕС і ТЕС з метою підвищення їх експлуатаційної надійності.

Основні результати і висновки дисертаційної роботи полягають у наступному:

1. Виконано аналіз інформаційного забезпечення АСУТП серійних енергоблоків. Запропоновано методику визначення динамічної точності виміру параметрів з урахуванням затримки, що виникає при дискретному характері подання інформації операторові, з урахуванням динамічних характеристик зміни параметрів. Надано рекомендації з реакцій багаторівневої УОС на зміну сигналів, по диференційному виборі періодів збору дискретних і аналогових сигналів, що дозволило вибрати періоди збору сигналів всіх рівнів УОС.

2. Досліджено потоки подій, що виникають в АСУТП, до складу яких входить УОС «Комплекс-Титан 2», діючих енергоблоків АЕС, і дані рекомендації зі способів фіксації подій в архівах УОС із використанням типових сценаріїв аварій.

3. Запропоновані і досліджені алгоритми управління прогрівом і навантаженням енергоблоків з позитивним зворотним зв'язком по тепловому стану і при стабілізації потоку тепла на прогрів. Виконано аналіз стійкості алгоритмів навантаження. Розроблені і випробувані на реальних об'єктах схеми регуляторів навантаження, що реалізують ці способи.

4. Досліджено похибки цифрових законів регулювання, обумовлені процедурою мажоритіровання вихідних команд, а також кінцевою точністю тимчасової си-

нхронізації, що дозволило вибрати точність тимчасової синхронізації в троїрованих комплексах управління.

5. Розроблено методи синтезу систем безпосереднього цифрового регулювання і управління, що нагоджуються параметрично, з використанням типових алгоритмічних модулів. Це дозволило розробити систему автоматизованого проектування та корекції систем автоматичного регулювання з використанням дисплеїв.

6. Розроблено математичну модель прогріву деталей турбоустановок складної форми на основі аналізу точного рішення рівняння теплопровідності. Це спрощує завдання визначення оптимальних програм підйому параметрів пари при навантаженні енергоблоків, завдяки опису прогріву звичайними рівняннями невисокого порядку.

7. Запропоновано та обґрунтовано концепцію поетапної модернізації УОС на блоках, що перебувають в експлуатації, з максимальним використанням планово-попереджувальних ремонтів (ППР) і забезпеченням на всіх етапах заданих експлуатаційних характеристик УОС: метрологічних, швидкісних і надійних. На підставі концепції виконується поетапна реконструкція на всіх діючих серійних енергоблоках в Україні і Росії з інтеграцією в УОС функцій інформаційної підтримки оператора, контролю генератора, з розширенням функцій контролю захистів і блокувань та діагностики основного технологічного обладнання.

8. Виконано синтез двох базових інформаційно-управляючих обчислювальних систем (УОС) «Комплекс-Титан 2М» і «Комплекс-2М», визначена їх структура та функції в тому числі функції підтримки оператора. Ці системи були впроваджені в складі АСУТП на всіх серійних енергоблоках АЕС із реактором ВВЕР-1000 у період з 1984 р. по 2001р. («Комплекс-Титан 2 і 2М»), а також на енергоблоках, що добудовуються, №2 Хмельницької АЕС і №4 Рівненської АЕС («Комплекс-2М»).

9. УОС «Комплекс-Титан» адаптовані в АСУТП теплових енергоблоків ТЕС на блоках 300 МВт на Запорізькій ТЕС, Харківській ТЕЦ-5, на 4-х блоках у Китаї.

10. Запропоновано цифрову багатоканальну систему автоматичного регулювання високої надійності, яка проходить випробування на Рівненській АЕС на блоці №1 ВВЕР-440.

11. Розроблені і впроваджені цифрові локальні системи на блоках 800 МВт:

- оптимізація горіння на підставі використання розрахунку техніко-економічних показників (ККД котла);

- цифрова система управління підйомом обертів турбогенератора.

Виконані в роботі дослідження і їх результати дозволили вирішити важливе науково-практичне завдання розробки впровадження і удосконалення АСУТП діючих і потужних енергоблоків, що знаходяться в експлуатації на АЕС і ТЕС.

АНОТАЦІЇ

Горелік А.Х. Удосконалення систем автоматизованого управління атомних і теплових електростанцій для підвищення їх експлуатаційної надійності. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація технологічних процесів. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2007.

Дисертація присвячена проблемі розроблення наукової концепції створення нових і модернізації інформаційно-обчислювальних і управляючих систем, що перебувають в експлуатації, у складі АСУТП енергоблоків АЕС і ТЕС.

У роботі запропоновані і досліджені структури та функції ІОС і ФГУ. Визначено потоки подій і обсяги інформації, що збирається, у нормальних і аварійних режимах енергоблоків. Досліджено помилки, що виникають при контролі параметрів при дискретному характері виміру з урахуванням циклів вимірів і динаміки об'єкта. Оцінено вплив точності синхронізації розрахунків управляючих впливів у цифрових системах управління і регулювання з резервуванням на помилки виконання законів регулювання.

Результати цих досліджень були використані при розробці інформаційно-обчислювальних систем і систем функціонально-групового управління при виборі циклів опитувань і технології збору сигналів та при завданні циклів синхронізації в ІОС і ФГУ енергоблоків ТЕС і АЕС.

Формалізовано завдання управління і регулювання, виконана розробка типових алгоритмічних модулів САР і ФГУ, що набудовуються параметрично. Досліджено динамічні моделі об'єктів управління – запропоновано математичний опис прогріву деталей енергоблоків довільної форми при пусках звичайними диференціальними рівняннями, отриманими на підставі точного рішення рівняння теплопровідності. Досліджено стійкість способів управління прогрівом і навантаженням турбоустановок по тепловому стану при стабілізації потоку тепла на прогрів.

Результати досліджень способів навантаження, виконаних на реальних турбоустановках ТЕС, були використані при створенні систем навантаження при пусках турбоустановок АЕС. Результати виконаних теоретичних і експериментальних досліджень були використані при розробці та введені в промислову експлуатацію ІОС і ФГУ на серійних енергоблоках АЕС із реактором ВВЕР-1000 і енергоблоках ТЕС, у тому числі в складі АСУТП нових енергоблоків на Хмельницькій (№ 2) і Рівненській (№ 4) АЕС. Отримані результати використовуються при створенні нових і модернізації діючих АСУТП, на енергоблоках ТЕС України.

Ключові слова: енергоблок, інформаційні та керуючі функції і системи, системи регулювання, що параметрично налагоджуються, функціонально-групове управління, модель об'єкта, програмно-технічні комплекси, інтелектуальна підтримка, динамічна модель, цифрове регулювання.