

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

Северин Валерій Петрович

УДК 62-5:620.9

**МОДЕЛІ І МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ
СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОБЛОКУ
АТОМНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ**

Спеціальність 05.13.07 – автоматизація технологічних процесів

**Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук**

Харків – 2007

Дисертацією є рукопис.

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

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,
Державний науково-технічний центр
з ядерної та радіаційної безпеки,
завідувач відділу, м. Харків

доктор технічних наук, професор
Воронін Альберт Миколайович,
Національний авіаційний університет,
професор кафедри комп'ютерних
інформаційних технологій, м. Київ

Захист відбудеться 31 жовтня 2007 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.

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

Автореферат розісланий 29 вересня 2007 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Гамаюн І. П.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Найпотужнішими в енергосистемі України є 13 енергоблоків з реакторами ВВЕР-1000, які експлуатуються на чотирьох атомних електричних станціях (АЕС). Перспективними планами розвитку енергетики України передбачено будівництво нових енергоблоків ВВЕР-1000 підвищеної безпеки. Із збільшенням частки АЕС у виробництві електроенергії виникає необхідність їх підключення до регулювання навантаження енергосистеми. Це є особливо актуальним у зв'язку з перспективою інтеграції Об'єднаної електроенергетичної системи України в Європейську енергетичну систему, де вимоги до якості електроенергії набагато вищі. Під час модернізації існуючих і проектування нового покоління енергоблоків АЕС особлива увага приділяється підвищенню їх безпеки і надійності, поліпшенню маневрених характеристик. У зв'язку з цим виникає необхідність у розвитку точніших методів проектування систем автоматичного управління (САУ) енергоблоків.

Однією з основних інженерних проблем створення САУ є проблема оптимізації їх показників якості, особливості якої визначають велика кількість конструктивних параметрів систем управління енергоблоку, складність формалізації і визначення показників якості, суперечність вимог, що пред'являються до них, високий порядок моделей систем. Традиційні методи розрахунку систем управління зазвичай засновані на істотному спрощенні моделей і застосуванні наближених непрямих скалярних критеріїв якості. Найбільшим недоліком у розрахунках систем управління енергоблоків АЕС є те, що в цій галузі мало застосовуються моделі і методи теорії оптимізації. Для вирішення проблеми оптимізації динамічних процесів в системах автоматичного управління енергоблоку ВВЕР-1000 доцільно виділити його локальні САУ, від показників яких істотно залежить якість динаміки блоку в перехідних режимах. Необхідність в розробці моделей і методів оптимізації показників якості локальних систем управління енергоблоку АЕС з реактором ВВЕР-1000 для підвищення надійності, точності і якості автоматизації технологічних процесів і визначає актуальність дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» в рамках виконаних за замовленням ВАТ «Турбоатом» госпдоговірних тем «Дослідження роботи гідравлічної частини системи регулювання з дискретними вхідними сигналами» (№ ДР 01820090867), «Дослідження динаміки електронно-гідромеханічної системи регулювання. Відпрацювання і дослідження на натурному макеті слідкуючого приводу системи управління» (№ ДР 01850083226), під час виконання яких здобувач був виконавцем, та відповідно до плану науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України в рамках держбюджетних тем «Аналіз і синтез систем управління. Апроксимація характеристик та ідентифікація параметрів» (№ ДР 80058409), «Розвиток теорії і методів параметричного синтезу багатоцільових і багатокритеріальних керованих систем з невизначеними параметрами» (№ ДР 0105U000585), де здобувач був відповідальним виконавцем.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка й обґрунтування перспективної концепції синтезу систем управління енергоблоку АЕС на основі математичних моделей і чисельних методів векторної оптимізації показників якості, яка дозволить підвищити ступінь наукової обґрунтованості технічних проектів з удосконалення систем управління енергоблоків.

Поставлена мета досягається постановкою та вирішенням комплексу наступних взаємопов'язаних задач:

1. Аналіз методів синтезу САУ енергоблоку АЕС і можливостей концепції синтезу систем управління на основі прямих показників якості, покращених інтегральних квадратичних оцінок і чисельних методів оптимізації.

2. Розробка методів і алгоритмів обчислення прямих показників якості систем управління з високою точністю обчислень і оптимальною швидкістю, формалізація задач векторної оптимізації прямих критеріїв якості.

3. Розвиток методів і алгоритмів формування й обчислення покращених інтегральних квадратичних оцінок систем управління, дослідження ефективності алгоритмів обчислення та аналіз особливостей оцінок як критеріїв якості.

4. Обґрунтування та дослідження ефективності методів синтезу САУ на основі алгоритмів оптимізації прямих показників якості та інтегральних квадратичних оцінок з урахуванням їх особливостей як критеріїв оптимальності.

5. Математичне моделювання систем автоматичного управління нейтронною потужністю реактора ВВЕР-1000 в просторі станів з різними законами управління та оптимізація показників якості систем управління реактором.

6. Розробка математичних моделей систем стабілізації рівня води в парогенераторі ПГВ-1000 з різними регуляторами та оптимізація показників якості систем стабілізації.

7. Математичне моделювання слідкуючого приводу парової турбіни в просторі станів і оптимізація показників якості слідкуючого приводу для підвищення його точності, чутливості й швидкодії.

8. Розробка математичних моделей систем стабілізації частоти обертання парової турбіни К-1000-60/1500 в просторі станів з різними законами управління та оптимізація показників якості систем управління турбіною.

Об'єктом дослідження є процеси в системах автоматичного управління агрегатами енергоблока АЕС в нормальних режимах експлуатації.

Предмет дослідження складають моделі і методи оптимізації показників якості САУ агрегатів енергоблока АЕС.

Методи дослідження. Чисельні методи інтегрування систем диференціальних рівнянь застосовувалися для обчислень прямих показників якості систем управління, фундаментальні положення теорії автоматичного управління і теорії множин — для врахування умов стійкості систем управління під час оптимізації показників якості, положення теорії функцій комплексної змінної та операційного обчислення — під час формалізації покращених інтегральних квадратичних оцінок систем. Методи простору станів і передавальних функцій теорії автоматичного управління, положення теорій диференціальних рівнянь, електричних ланцюгів, гідравлічних систем і теоретичної механіки використовувалися під час розробки математичних моделей САУ енергоблоку. Сучасні системи комп'ютерної математики застосовувалися для обчислення значень параметрів систем управління енергоблоку АЕС, оптимізації показників якості систем та дослідження ефективності моделей і методів оптимізації.

Наукова новизна одержаних результатів. Основний науковий результат роботи полягає в розробці й обґрунтуванні перспективної концепції синтезу систем автоматичного управління енергоблоку АЕС на основі теоретичного розвитку й узагальнення моделей і методів оптимізації прямих показників якості й покращених інтегральних квадратичних оцінок.

Наукова новизна визначається наступними положеннями.

1. Отримав подальший розвиток на підставі чисельних методів інтегрування систем диференціальних рівнянь спосіб обчислення прямих показників якості САУ, що відрізняється високою точністю та швидкістю, дозволяє формалізувати постановку задач векторної оптимізації прямих критеріїв якості.

2. Удосконалено способи формування й обчислення покращених інтегральних квадратичних оцінок якості САУ по бажаній якості перехідного процесу, що істотно спрощує їх застосування та дозволяє формалізувати постановку задач чисельної оптимізації покращених інтегральних оцінок.

3. Вперше запропоновано покроковий принцип обліку обмежень задач оптимізації та розроблено клас векторних методів оптимізації, що дозволяє вирішувати задачі оптимізації інтегральних квадратичних оцінок і прямих показників якості САУ з нестійких початкових точок простору параметрів.

4. Вперше проведена оптимізація показників якості системи управління нейтронною потужністю ядерного реактора ВВЕР-1000 за лінійними та нелінійними математичними моделями САУ нейтронною потужністю.

5. Вперше формалізовані та вирішені задачі оптимізації показників якості системи стабілізації рівня води в парогенераторі ПГВ-1000 за вдосконаленими математичними моделями САУ рівнем парогенератора в просторі станів.

6. Дістав подальшого розвитку оптимальний параметричний синтез слідкуючого приводу парової турбіни на основі його математичних моделей у просторі станів та векторних критеріїв якості.

7. Отримала подальший розвиток оптимізація параметрів регуляторів систем стабілізації частоти обертання парової турбіни К-1000-60/1500 на основі її математичних моделей в просторі станів та прямих показників якості.

Практичне значення одержаних результатів. Побудовані математичні моделі в просторі станів для систем управління потужністю реактора, рівнем води в парогенераторі й частотою обертання парової турбіни. Створена та практично реалізована методика оптимізації показників якості систем управління, відмінними рисами якої є широкі можливості ефективної формалізації задач оптимізації, задання бажаних значень показників якості, оптимізації систем високого порядку з багатьма варійованими параметрами. Запропоновані моделі та методи реалізовані у вигляді програмного забезпечення багатокритеріального параметричного синтезу систем автоматичного управління. Розроблені моделі, методики, програми використовувалися підприємствами й організаціями, які займаються розробкою і модернізацією систем управління енергоблоків: ВАТ «Турбоатом», Державне підприємство «Харківський науково-дослідний інститут комплексної автоматизації» Міністерства палива та енергетики, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Подгорного НАН України, НВП «ХАРТРОН-АРКОС», ВАТ «Харківська ТЕЦ-5».

Матеріали дисертації використовуються в лекційних курсах «Моделі і методи прийняття рішень», «Методи оптимізації», «Математичні методи системного аналізу» на кафедрі системного аналізу і управління НТУ «ХП».

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати дисертації, які виносяться на захист, отримані здобувачем самостійно, серед них — концепція синтезу САУ на основі розвитку прямих показників якості, покращених інтегральних квадратичних оцінок і чисельних методів оптимізації; способи модифікації методів оптимізації і методика їх дослідження; розробка математичних моделей систем та їх ланок; концепція багатокритеріальної оптимізації динамічних систем; покроковий підхід до оптимізації показників якості САУ; формалізація обчислення показників якості і результати дослідження їх ефективності; тестові моделі, концепція і структура лабораторії методів оптимізації; концепції векторної цільової функції і векторного методу оптимізації; результати оптимізації показників якості систем управління реактором, парогенератором, паровою турбіною енергоблоку АЕС і слідкуючого приводу парової турбіни.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідалися й обговорювалися на II Всесоюзній конференції «Проблеми оптимізації в машинобудуванні» (м. Алушта, 1986 р.), Першому Радянсько-Японському семінарі з електромагнітних структур (Японія, м. Токіо, 1992 р.), IX Міжнародному симпозиумі з високовольтною технікою «ISH-95» (Австрія, м. Грац, 1995 р.), I Міжнародній конференції «Математичне моделювання в електротехніці й електроенергетиці» (м. Львів, 1995 р.), IV Міжнародній конференції з оптимізації і зворотних проблем в електромагнетизмі (Чехія, м. Брно, 1996 р.), I–IV, VI, IX, X, XII, XIII Міжнародних конференціях з автоматичного управління «Автоматика» (м. Київ, 1994 р.; м. Львів, 1995 р.; м. Севастополь, 1996 р.; м. Черкаси, 1997 р.; м. Харків, 1999 р.; м. Донецьк, 2002 р.; м. Севастополь, 2003 р.; м. Харків, 2005 р.; м. Вінниця, 2006 р.), I–V, X, XII, XIII Міжнародних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 1993–1997 рр., 2002 р., 2004 р., 2005 р.), Міжнародних конференціях «Інтерпартнер. Високі технології в машинобудуванні: моделювання, оптимізація, діагностика» (м. Харків, 1994 р., 2001–2006 рр.), Міжнародних конференціях «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика» (м. Харків, 1994 р.; м. Алушта, 1996 р., 2001–2003 рр., 2005 р.), Міжнародних конференціях «Силова електроніка і енергоефективність»

(м. Алушта, 1996 р., 1998 р., 2001-2003 рр., 2005 р., 2006 р.).

Публікації. Результати дисертації опубліковані у 89 наукових працях, серед яких 43 у фахових наукових виданнях ВАК України.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, 7 розділів, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертації складає 470 сторінок, 141 ілюстрація на 77 окремих сторінках, 38 таблиць на 30 окремих сторінках, 3 додатка на 37 сторінках, 357 найменувань використаних літературних джерел на 34 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі розкрита актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета і задачі дослідження, викладені наукова новизна і практична цінність одержаних результатів, особистий внесок здобувача у розробку теми дисертаційної роботи.

Перший розділ містить аналіз задач управління енергоблоком АЕС і методів синтезу САУ енергоблоку, обґрунтування напрямку досліджень.

Двоконтурна технологічна схема виробництва електроенергії енергоблоком з реактором ВВЕР-1000 представлена на рис. 1.

Рис. 1. Технологічна схема енергоблоку з реактором ВВЕР-1000

У ядерному реакторі (ЯР) ВВЕР-1000 енергія розпаду ядер урану передається теплоносію — воді, циркулюючій у першому контурі енергоблоку за допомогою головного циркуляційного насоса (ГЦН). Живильна вода другого контуру подається до парогенератора (ПГ) ПГВ-1000 через підігрівач високого тиску (ПВТ) живильним турбонасосом (ЖТН), що обертається приводною паровою турбіною (ППТ). У ПГ живильна вода, що підігрівається теплоносієм, перетворюється на пару, яка через головний паровий колектор (ГПК) подається в циліндр високого тиску (ЦВТ) парової турбіни (ПТ) К-1000-1500/60. З ЦВТ пара поступає до сепаратора-паропідігрівача (С), а з нього — до циліндрів середнього і низького тиску (ЦСТ і ЦНТ) турбіни і до ППТ. Турбіна обертає ротор електричного генератора (ЕГ), який виробляє електроенергію. Відпрацьована в конденсаторі (К) пара охолоджується водою з водосховища-охолоджувача (ВО), що подається циркуляційним насосом ЦН, і конденсатним насосом (КН) через підігрівач низького тиску (ПНТ) подається до деаератора (ДА). З деаератора живильна вода поступає до ЖТН, замикаючи другий контур енергоблоку. Для виконання своїх технологічних завдань енергоблок оснащений автоматизованою системою управління технологічним процесом (АСУТП), яка об'єднує локальні системи управління окремими технологічними процесами в елементах блоку: САУ потужністю ядерного реактора (САУП ЯР), САУ рівнем води в парогенераторі (САУР ПГ), САУ частотою обертання ПТ (САУЧ ПТ) та інші.

Проаналізовані задачі автоматичного управління енергоблоком і його основними агрегатами. Під час модернізації існуючих енергоблоків і проектування їх нового покоління особлива увага відводиться поліпшенню маневрених характеристик, відповідності європейським вимогам до якості електроенергії. Нові задачі управління енергоблоком вимагають поліпшення показників якості САУ. Розглянуті показники якості систем управління та їх можливості. Більшість інженерних вимог до якості реальних систем формуються у вигляді прямих показників якості (ППЯ), таких як перерегулювання, час регулювання, коливальність процесу. Інтегральні квадратичні оцінки (ІКО) дають числовий показник якості, що характеризує прямі показники якості у сукупності. Але вибір значень параметрів систем за мінімумом простої ІКО приводить до значно коливального перехідного процесу зі значним перерегулюванням. Покращені оцінки, що включають похідні помилки, дозволяють отримати перехідний процес у системі з кращими прямими показниками у порівнянні з простою оцінкою. Але обчислення покращених оцінок пов'язане зі значними труднощами, особливо для систем високого порядку. Існує безліч інженерних прийомів синтезу регуляторів, що дозволяють приблизно досягати бажаної якості проектованої системи за прямими показниками якості, проте чіткі методи вирішення таких задач відсутні, що зумовлено складною формалізацією

показників.

Задачі оптимізації ППЯ та ІКО мають однакові особливості: обчислення функцій обмежень і цільової функції в єдиному обчислювальному процесі і обмеженість областей визначення цих функцій у просторі змінних параметрів умовами стійкості. Розгляд методів оптимізації і можливостей їх застосування до синтезу систем управління показав, що в методах умовної оптимізації функції обмежень формуються і обчислюються незалежно одна від одної і від цільової функції, методи оптимізації цільових функцій з обмеженими областями визначення нерозвинені. Сучасні методи оптимізації не можуть бути ефективно використані для оптимізації показників якості систем управління.

Розділ завершується обґрунтуванням і формулюванням мети та задач дисертаційної роботи.

Другий розділ присвячений розробці методів обчислення прямих показників якості систем автоматичного управління, оцінці їх точності, дослідженню залежності від змінних параметрів і постановці задачі їх оптимізації.

Лінійна й нелінійна моделі САУ в просторі станів мають вигляд:

$$dX/dt = AX + BU, \quad dX/dt = f(X, U), \quad X_0 = 0, \quad y = CX, \quad (1)$$

де $X = X(t)$ — вектор стану; U — вхідна дія; $y = y(t)$ — керована координата; A, B, C — матриці параметрів САУ. Процеси в моделях (1) на інтервалі часу $[0, T_f]$ з L кроками інтегрування довжини $h = T_f/L$ будуються за формулами:

$$t_k = kh, \quad X_k = X(t_k), \quad y_k = y(t_k), \quad k = \overline{0, L}, \quad \varphi = e^{Ah}, \quad \Phi = \int_0^h e^{A\tau} d\tau, \quad g = \Phi B,$$

$$X_k = \varphi X_{k-1} + g, \quad X_k = X_{k-1} + \Phi f(X_{k-1}, U), \quad y_k = CX_k, \quad k = \overline{1, L}, \quad (2)$$

де перша формула в (2) представляє матричний метод для лінійної моделі при $U = 1(t)$, а друга — системний метод першого ступеня Ю.В. Ракитського для нелінійної моделі. За $y_\infty = y(\infty)$ для відхилення $z(t) = y(t) - y_\infty$ знаходяться значення $z_k = y_k - y_\infty$, $k = \overline{0, L}$, їх прирости $u_{lk} = z_{k-2} - z_{k-1}$, $u_{rk} = z_k - z_{k-1}$, $k = \overline{2, L}$ і, якщо $u_{lk}u_{rk} > 0$, обчислюється значення екстремуму e_i :

$$d_{uk} = (u_{lk} - u_{rk})/2, \quad s_{uk} = u_{lk} + u_{rk}, \quad r_{uk} = d_{uk}/s_{uk}, \quad e_i = z_{k-1} - d_{uk}r_{uk}/2, \quad (3)$$

де $i = \overline{1, n_e}$, n_e — число екстремумів в $[0, T_f]$. За значеннями екстремумів перехідного процесу обчислюються прямі показники якості: перерегулювання σ , розмах коливань ζ , показник загасання коливань λ . Нехай $\lfloor v \rfloor = \max\{v, 0\}$ — функція зрізки довільної змінної v . Для слідкуючої системи з $y_\infty = 1$

$$\sigma = \begin{cases} 0, & n_e = 0, \\ \lfloor \max e_i \rfloor, & n_e > 0, \end{cases} \quad \zeta = \begin{cases} 0, & n_e = 0, 1, \\ \max |e_{2i-1} - e_{2i}|, & n_e > 1, \end{cases} \quad \lambda = \begin{cases} 0, & n_e = 0, 1, \\ \max\{|e_i|/|e_{i-1}|\}, & n_e > 1. \end{cases}$$

Для системи стабілізації з $y_\infty = 0$, процес в якій обов'язково має хоча б один екстремум e_1 , $\sigma = \max |e_i|$, а під час обчислення ζ і λ не враховується e_1 .

Час регулювання t_c та його відносне значення τ з позначеннями (3) обчислюються за формулами:

$$u_i = \delta_z \operatorname{sign} z_{k-1} - z_{k-1}, \quad v_{0i} = r_{uk} h, \quad s_i = h \sqrt{r_{uk}^2 + 2u_i/s_{uk}}, \quad v_i = \begin{cases} v_{0i} + s_i, & v_i \leq 0, \\ v_{0i} - s_i, & v_i > 0, \end{cases}$$

$$t_i = t_{k-1} + v_i, \quad t_c = \max t_i, \quad \tau = t_c/T_f,$$

де t_i — момент попадання відхилення $z(t)$ в заданий інтервал $[-\delta_z, \delta_z]$ при $|z_{k-1}| \geq \delta_z \wedge |z_k| < \delta_z$. За наведеними формулами зіставлені алгоритми обчислення прямих показників якості систем автоматичного управління σ , ζ , λ , t_c , τ .

Для дослідження точності обчислення t_c використана тестова передавальна функція (ПФ) порядку n :

$$W(s) = \prod_{i=1}^n 1/(T_i s + 1); \quad T_i = 1/(n + 1 - i), \quad \text{Рис. 2. Порівняння методів}$$

$i = 1, n$. На рис. 2 представлені логарифмічні залежності машинного часу T_c у секундах від відносної похибки ε обчислення t_c при $n = 500$ матричним методом ММ, системними методами першого та другого ступенів SM1 і SM2, модифікаціями метода Мерсона з постійним кроком CS, дискретною й безперервною зміною кроку DVS і CVS. За цими та іншими даними експериментально встановлено, що зміна кроку інтегрування не ефективна, матричний метод оптимальний для лінійних систем за точністю і швидкодією.

З метою дослідження характеру залежності ППЯ від змінних параметрів САУ та оцінки достовірності формул та алгоритмів їх обчислення використана діаграма Вишнеградського, яка дана на рис. 3 для тестової ПФ

$$W(s) = 1/(s^3 + x_1 s^2 + x_2 s + 1) \quad (4)$$

з областями аперіодичних A , монотонних M , коливальних K , нестійких H процесів та точками, перехідні функції для яких показані на рис. 4. На рис. 5–8 представлені графіки ППЯ, побудовані для ПФ (4) при $T_f = 40$ с, $\delta_z = 0,05$. Аналіз цих графіків дозволяє дослідити залежність показників якості від змінних параметрів ПФ (4). Співставлення графіків та положення точок на них з областями й точками діаграми Вишнеградського, а також з показниками процесів на рис. 4 підтверджує достовірність обчислень прямих показників якості.

Аналіз вимог до процесів управління енергоблоком дозволяє встановити порядок переваги показників якості: σ , ζ , λ , τ . З урахуванням переваги показників та їх верхніх граничних значень σ_m , ζ_m , λ_m запропонована модель оптимізації показників як функцій вектору x змінних параметрів системи автоматичного управління у вигляді мінімізації проєкцій векторної цільової функції

$$F(x) = (\lfloor \sigma(x) - \sigma_m \rfloor, \lfloor \zeta(x) - \zeta_m \rfloor, \lfloor \lambda(x) - \lambda_m \rfloor, \tau(x)) \quad (5)$$

шляхом порівняння її значень бінарною операцією «краще» \prec :

$$F^{(k)} \prec F^{(j)} = \begin{cases} 1, & F_i^{(k)} < F_i^{(j)}, \\ 0, & F_i^{(k)} \geq F_i^{(j)}, \end{cases} \quad i = \begin{cases} m, & \exists m = \min\{r \mid F_r^{(k)} \neq F_r^{(j)}, r = \overline{1, 4}\}, \\ 4, & F_r^{(k)} = F_r^{(j)}, r = \overline{1, 4}. \end{cases} \quad (6)$$

Особливістю цієї задачі оптимізації є обмеженість області визначення введених показників якості системи управління умовами її стійкості.

Рис. 3. Діаграма Вишнеградського

Рис. 4. Перехідні функції

Рис. 5. Перерегулювання

Рис. 6. Розмах коливань

Рис. 7. Загасання коливань

Рис. 8. Час регулювання

За обмеженнями області спостереження перехідних процесів запропоновано спосіб обчислення ППЯ, що визначає їх також у нестійкій області САУ.

У **третьому розділі** розглянуті задачі обчислення й мінімізації покращених інтегральних квадратичних оцінок САУ, що включає можливість переходу до стійкої області з точок нестійкої області. Для стійкості лінійної САУ, що залежить від вектора варійованих параметрів $x \in R^p$ і має передавальну функцію

$$W(x, s) = \beta(x, s) / \alpha(x, s), \quad \alpha(x, s) = \sum_{i=0}^n \alpha_i(x) s^{n-i}, \quad \beta(x, s) = \sum_{i=0}^m \beta_i(x) s^{m-i}, \quad (7)$$

за критеріями Стодоли та Рауса-Гурвіця необхідно і достатньо виконання умов:

$$\alpha_i(x) > 0, \quad i = \overline{0, n}, \quad \rho_k(x) > 0, \quad k = \overline{2, n-1}, \quad (8)$$

де $\rho_k(x)$ — елементи першого стовпця таблиці Рауса. Аналізом критерію Рауса-Гурвіця та дослідженнями властивостей функцій $\rho_k(x)$

обґрунтована покрокова схема переходу до області стійкості D : якщо який-небудь з

Рис. 9. Елементи таблиці Рауса

елементів $\rho_k(x)$ не позитивний, пропонується його збільшувати зміною x до позитивного значення, а потім аналогічно збільшувати подальші елементи. На рис. 9 показані графіки функцій $\rho_k(x)$, побудовані при $\rho_{k-1}(x) > 0$ для тестової передавальної функції вигляду (7) з $n = 5$, $m = 0$, $\alpha_2 = x$ і з постійними рештою коефіцієнтів. Аналіз графіків наочно доводить можливість запропонованої схеми переходу до області стійкості за допомогою функцій $\rho_k(x)$.

Спростити схему переходу до області стійкості дозволяє введення допоміжних областей. Нерівностям (8) відповідають області виконання обмежень:

$$\Omega_1 = \{ x \mid \alpha_i(x) > 0, i = \overline{0, n} \}, \quad \Omega_k = \{ x \mid \rho_k(x) > 0 \}, \quad k = \overline{2, n-1}. \quad (9)$$

За ними формуються квазидопустимі області D_k і області рівнів H_k :

$$D_1 = \Omega_1; \quad D_k = D_{k-1} \cap \Omega_k, \quad k = \overline{2, n-1}; \quad D = D_{n-1}; \quad (10)$$

$$H_0 = R^p \setminus D_1; \quad H_k = D_k \setminus D_{k+1}, \quad k = \overline{1, n-2}; \quad H_{n-1} = D_{n-1}. \quad (11)$$

Порушення першої групи нерівностей (8) представляє штрафна функція

$$P(x) = \sum_{i=0}^n \lfloor -\alpha_i(x) \rfloor. \quad (12)$$

Обґрунтовано покроковий принцип переміщення до області стійкості: для переходу до області D з будь-якої точки простору змінних параметрів R^p необхідно, мінімізуючи в поточній області рівня лише одну відповідну їй штрафну функцію, послідовно переходити до області рівня з більшим індексом. Враховуючи кількість областей рівнів, таких кроків переходу до області стійкості буде не більше $n - 1$. За покроковим принципом, областями рівнів та штрафами нерівностей (8) сформована двовимірна векторна штрафна функція

$$F(x) = \begin{cases} (0; P(x)), & x \in H_0; \\ (k; -\rho_{k+1}(x)), & x \in H_k, \quad k = \overline{1, n-2}; \\ (n-1; 0), & x \in H_{n-1}. \end{cases} \quad (13)$$

Перша складова цієї функції — функція рівня $F_1(x)$ є лічильником виконаних обмежень, а друга — функція штрафу $F_2(x)$ визначає штраф за невиконання першого з порушених обмежень.

Графіки складових векторної функції (13) для тієї ж тестової передавальної функції, що використовувалася для рис. 9, представлені на рис. 10, 11. Верхня частина графіка функції рівня на рис. 10 відповідає області стійкості. Функція штрафу на рис. 11 в кожній області рівня, за винятком області стійкості з нульовим значенням $F_2(x)$, убуває у напрямку зростання $F_1(x)$.

Рис. 10. Функція рівня

Рис. 11. Функція штрафу

Обґрунтовано процес переходу в область стійкості шляхом мінімізації $F_1(x)$ с пріоритетною максимізацією $F_2(x)$ у вигляді оптимізації векторної функції (13) на основі порівняння її значень бінарною операцією «краще»

$$F^{(k)} \prec F^{(j)} = \begin{cases} 1, & F_1^{(k)} > F_1^{(j)} \vee F_1^{(k)} = F_1^{(j)} \wedge F_2^{(k)} < F_2^{(j)}, \\ 0, & F_1^{(k)} < F_1^{(j)} \vee F_1^{(k)} = F_1^{(j)} \wedge F_2^{(k)} \geq F_2^{(j)}. \end{cases} \quad (14)$$

Запропоноване формування покращеної ІКО $I(x)$ помилки $e(x, t)$:

$$I(x) = \int_0^\infty [e(x, t)]^2 dt, \quad e(x, t) = \sum_{k=0}^l w_k z_t^{(l-k)}(x, t), \quad (15)$$

де $z(x, t)$ — відхилення вихідної величини $y(x, t)$ від сталого значення $y_\infty = 1$; l — порядок покращеної оцінки, $l < n - m$; w_k — вагові коефіцієнти:

$$w_k = \mu^{l-k} \gamma_k, \quad k = \overline{0, l}, \quad \mu = t_e / t_s, \quad \gamma(s) = \sum_{k=0}^l \gamma_k s^{l-k}, \quad w(s) = \sum_{k=0}^l w_k s^{l-k}. \quad (16)$$

Тут t_e і t_s — час регулювання еталонного і стандартного процесів, $\gamma(s)$ і $w(s)$ — стандартний і ваговий поліноми. За ПФ (7) формується зображення помилки: $E(x, s) = \delta(x, s) / \alpha(x, s)$, де $\delta(x, s) = [\alpha(x, s) - \beta(x, s)w(s)] / s$. На підставі цього зображення і теореми Парсеваля розроблені алгоритми обчислення інтегральних квадратичних оцінок за модифікованою формулою А.М. Каца і методу К.Ю. Острема. Для мінімізації функції $I(x)$, визначеної тільки в області стійкості САУ, векторна функція (13) доповнена функцією покращеної оцінки:

$$F(x) = \begin{cases} (0; P(x)), & x \in H_0; \\ (k; -\rho_{k+1}(x)), & x \in H_k, \quad k = \overline{1, n-2}; \\ (n-1; I(x)), & x \in H_{n-1}. \end{cases} \quad (17)$$

На відміну від функції $I(x)$ векторна цільова функція (17) визначена у всьому просторі ва-

рійованих параметрів, а її друга складова в області стійкості співпадає з інтегральною квадратичною оцінкою. Розроблені алгоритми обчислення функції (17) з використанням методів А.М. Каца і К.Ю. Острема. На багатьох тестових ПФ (7) порядків n від 3 до 107 експериментально встановлено, що алгоритм за Остремом надійніше, точніше і швидше ніж алгоритм за Кацом.

Графіки проекцій векторної функції (17), для тієї ж тестової передавальної функції, що і для рис. 9–11, представлені на рис. 12, 13.

Рис. 12. Функція рівня для ІКО

Рис. 13. Функція штрафу для ІКО

В області стійкості, відповідній верхній частині графіка $F_1(x)$ на рис. 12, функція інтегральної оцінки на рис. 13 гладка і має єдиний мінімум.

Запропоновано мінімізувати покращені ІКО оптимізацією векторної цільової функції (17) з використанням порівняння її значень операцією (14).

Четвертий розділ присвячений розробці векторних методів оптимізації показників якості систем управління і методиці оптимізації регуляторів.

На підставі функції (17) узагальнений покроковий підхід до розв'язання задач оптимізації й обґрунтовано його використання під час оптимізації ППЯ. Для оптимізації векторних цільових функцій запропоновані модифікації прямих методів безумовної мінімізації: методу адаптації кроку В.Ф. Коропа для функцій однієї змінної, методів Хука-Дживса і Нелдера-Міда для функцій багатьох змінних, методу Вейля для глобального пошуку. Запропоновані векторні методи оптимізації відрізняються від методів мінімізації функцій використанням операцій порівняння значень векторних функцій (6) або (14).

Перехід до області стійкості передавальної функції (7) з $m = 0$ та різними значеннями n , починаючи з 3, проведений векторними методами оптимізацією штрафної функції (13) з точок, в яких не виконувалась жодна з нерівностей (8). За числом змінних $p = 2$ векторним методом Вейля знайдені стійкі точки для всіх $n < 17$, методом Хука-Дживса — для всіх $n < 49$, методом Нелдера-Міда — для всіх $n < 113$. За $p = n - 1$ методом Нелдера-Міда знайдені стійкі точки для всіх $p < 13$,

методом Хука-Дживса — для всіх $p < 18$. На рис. 14 показаний графік фу-

Рис. 14. Перехід в область стійкості

нкції рівня і траєкторія переходу до області стійкості векторним методом Нелдера-Міда для ПФ (7) з $n = 100$, $p = 2$. Області стійкості відповідає позначена ромбом найвища точка, траєкторія включає всі кращі точки пошуку, початкова точка позначена колом, кінцева — ромбом.

Мінімізація інтегральних квадратичних оцінок виконана векторними методами шляхом оптимізації функції (17) з тими ж початковими даними, що і під час переходу до області стійкості. З двома змінними коефіцієнтами передавальної функції векторним методом Хука-Дживса знайдено мінімум оцінок для всіх $n < 49$, методом Нелдера-Міда — для всіх $n < 108$. За $p = n - 1$ змінних параметрів методом Нелдера-Міда мінімум оцінок знайдено для всіх $p < 11$, методом Хука-Дживса — для всіх $p < 16$. На рис. 15, 16 представлені графіки складових векторної функції (17) і траєкторія мінімізації інтегральної квадратичної оцінки векторним методом Нелдера-Міда для тестової передавальної функції вигляду (7) з $n = 10$, $p = 2$. Методом Нелдера-Міда з нестійкої початкової точки досягнуто мінімум оцінки за 20 ітерацій і 40 обчислень векторної функції, 12 кращих точок пошуку відображено на графіках.

Застосування векторних методів оптимізації дозволяє в єдиному обчислювальному процесі перейти з будь-якої початкової точки до області визначення оцінки, утримати процес

Рис. 17. Діаграма с точками пошуку оптимізації в цій області і знайти мінімум ІКО.

Рис. 18. Оптимальні процеси

Рис. 15. Мінімізація ІКО на F_1

Рис. 16. Мінімізація ІКО на F_2

На підставі покрокового принципу оптимізації за аналогією з визначенням по виразах (9)–(12) функції (17) для мінімізації ІКО разом з функцією (5) запропонована векторна цільова функція для оптимізації ППЯ:

$$F(x) = \begin{cases} (0; P(x)), & x \in H_0; \\ (k; -\rho_{k+1}(x)), & x \in H_k, \quad k = \overline{1, n-2}; \\ (n-1; \sigma(x) - \sigma_m), & x \in H_{n-1}; \\ (n; \zeta(x) - \zeta_m), & x \in H_n; \\ (n+2; \tau(x)), & x \in H_{n+1}. \end{cases} \quad (18)$$

Таблиця 1

Оптимізація ППЯ

Параметри	Значення параметрів		
	$N_e = 1$	$N_e = 2$	$N_e = 3$
σ_m	0,05	0,05	0,05
ζ_m	0,065	0,065	0
λ_m	—	0,3	—
x_1^*	1,504	1,886	1,917
x_2^*	2,126	2,079	2,382
σ^*	0,015	0,050	0
ζ^*	0,065	0,065	0
λ^*	3,335	0,300	0
t_c^*, c	3,378	3,552	4,312
Маркер	Δ	\square	$*$

Результати трьох експериментів оптимізації цієї функції векторним методом Нелдера-Міда для тестової ПФ (4) представлені в табл. 1. У ній для кожного номера експерименту N_e дані граничні значення показників σ_m , ζ_m , λ_m , координати кінцевої точки x_1^* і x_2^* , значення ППЯ в кінцевій точці σ^* , ζ^* , λ^* , t_c^* . У останньому рядку показані маркери точок, зображених на рис. 17 діаграми Вишнеградського. Позначена колом початкова точка знаходиться в нестійкій області. Перехідні процеси, відповідні початковій і оптимальним точкам, представлені на рис. 18. На рис. 19, 20 для $N_e = 3$ дані графіки проєкцій векторної функції (18) і траєкторії пошуку, які підтверджують, що оптимальна точка, яка знаходиться в допустимій області та має мінімальний час регулювання, досягнута.

Рис. 19. Оптимізація ППЯ на F_1

Рис. 20. Оптимізація ППЯ на F_2

Наведені в табл. 1 результати за тими ж початковими даними отримані і під час оптимізації векторної функції (5), але за довший термін обчислень.

На основі запропонованих векторних моделей і методів оптимізації показників якості систем автоматичного управління розроблена методика оптимального параметричного синтезу регуляторів для систем управління енергоблоку. Пропорційний (П), інтегральний (І) і диференціальний (Д) регулятори формують за помилкою ε керуючу дію u на об'єкт управління згідно рівнянням:

$$u_P = K_P \varepsilon; \quad du_I / dt = \lambda_I \varepsilon; \quad dv_D / dt = -\lambda_D (v_D + 10\varepsilon), \quad u_D = v_D + 10\varepsilon, \quad (19)$$

де $K_p, \lambda_I, \lambda_D$ — параметри регуляторів, що входять у вектор $x \in R^p$. При цьому лінійна й нелінійна моделі систем управління (1) приймають вигляд:

$$dX(x,t)/dt = A(x)X(x,t) + B(x)U(t), \quad dX(x,t)/dt = f(x, X(x,t), U(t)), \quad (20)$$

$$y(x,t) = C(x)X(x,t), \quad (21)$$

де $U(t) = U_s 1(t)$ — вхідна дія, $y(x,t)$ — вихідна змінна, $X(x,0) = 0$, $y(x,0) = 0$. Константа U_s задає величину ступінчастої вхідної дії: для лінійної моделі $U_s = 1$, для нелінійної моделі $U_s \in [-1; 1]$. Вводяться обмеження параметрів $a_i \leq x_i \leq b_i$, $i = \overline{1, p}$ з областю обмежень $G_1 = \{x \mid a_i \leq x_i \leq b_i, i = \overline{1, p}\}$, яка ставиться перед областями (9) при визначенні n областей рівнів за виразами (10), (11), і формується штрафна функція

$$S(x) = \sum_{i=1}^p (\lfloor a_i - x_i \rfloor + \lfloor x_i - b_i \rfloor). \quad (22)$$

Для мінімізації ІКО за матрицями $A(x)$, $B(x)$ и $C(x)$ лінійної моделі (20), (21) методом Д.К. Фаддєєва визначається ПФ вигляду (7). Покращена ІКО (15) формується за еталонним часом регулювання t_e згідно з (16): якщо $l = 1$, то $t_s = 3c$, $\gamma(s) = s + 1$; якщо $l = 3$, то з табл. 1 $t_s = t_c^*$, $\gamma(s) = s^3 + x_1^* s^2 + x_2^* s + 1$. Векторна цільова функція вигляду (17) містить функцію (22) на рівні 0, функцію (12) на рівні 1, $-\rho_k(x)$ на рівнях $k = \overline{2, n-1}$, $I(x)$ на рівні n .

Під час оптимізації прямих показників якості для матриці $A(x)$ з (20) або для якобіана функції $f(x, X(x,t), U(t))$ визначається характеристичний поліном $\alpha(x, s)$. Векторна цільова функція вигляду (18) на перших $n-1$ рівнях співпадає з векторною функцією для мінімізації ІКО, а на останніх трьох або чотирьох рівнях, залежно від обліку $\lambda(x)$, містить ППЯ за аналогією з функцією (18). У разі обліку $\lambda(x)$ використовуються $n+3$ рівня, а без його урахування — $n+2$.

Векторні функції оптимізуються векторним методом Коропа при $p=1$ або векторними методами Нелдера-Міда, Хука-Дживса та Вейля при $p > 1$.

У **п'ятому розділі** вирішені задачі оптимізації показників якості систем управління нейтронною потужністю ядерного реактора ВВЕР-1000.

САУП ЯР включає реактор, датчик щільності потоку нейтронів n , регулятор потужності (РП) і привід поглинаючих стрижнів (ППС) (рис. 1). У режимі «Н» САУП підтримує постійну нейтронну потужність в діапазоні від 3% до 120% її номінального значення за заданою уставкою потужності. У режимі підтримки постійного тиску пари P_s на РП «Т» поступає сигнал з регулятора тиску (РТ). Можливий сигнал на РП з регулятора теплової потужності (РТП), визначеною температурою теплоносія T . САУП повинна забезпечувати високу якість управління у всіх режимах.

Розроблені нелінійні і лінійні моделі нейтронної кінетики реактора з однією, двома і шістьма групами запізнілих нейтронів (ЗН) вигляду:

$$dX_K/dt = f_K(X_K, \rho), \quad dX_K/dt = A_K X_K + B_K \rho, \quad v = C_K X_K, \quad (23)$$

де вектор X_K включає відносні координати нейтронної потужності v і концентрацій груп ЗН, $\rho = \rho_d - \alpha_q v - \rho_t$ — приведена до сумарної частки ЗН реактивність, ρ_d — викликана переміщенням поглинаючого стрижня реактивність, α_q — потужностний коефіцієнт реак-

тивності, ρ_t — температурна реактивність, визначувана моделлю теплоотвода:

$$dX_T/dt = f_T(X_T, v), \quad f_T(X_T, v) = A_T X_T + B_T v, \quad \rho_t = C_T X_T. \quad (24)$$

Вектор X_T включає температури палива, оболонки твела і теплоносія. За моделями (23) і (24) отримані моделі реактора як об'єкту управління:

$$dX_R/dt = f_R(X_R, \rho_d), \quad dX_R/dt = A_R X_R + B_R \rho_d, \quad v = C_R X_R, \quad C_R = (C_K \quad 0), \quad (25)$$

$$X_R = \begin{pmatrix} X_K \\ X_T \end{pmatrix}, \quad f_R(X_R, \rho_d) = \begin{pmatrix} f_K(X_K, \rho_d - \alpha_q v - C_T X_T) \\ f_T(X_T, v) \end{pmatrix}, \quad (26)$$

$$A_R = \begin{pmatrix} A_K - B_K \alpha_q C_K & -B_K C_T \\ B_T C_K & A_T \end{pmatrix}, \quad B_R = \begin{pmatrix} B_K \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (27)$$

Виконавчий механізм представлений диференціальним рівнянням

$$d\rho_d/dt = a_{dd}\rho_d + b_{du}u, \quad (28)$$

де u — дія регулятора. За конструктивними і технологічними параметрами реактора ВВЕР-1000 обчислені значення параметрів його моделей. На підставі моделей (25)–(28) і рівнянь законів управління (19) розроблені моделі САУП з різними регуляторами потужності для оптимізації параметрів регуляторів. Моделі з ПІ регулятором потужності мають вигляд: де v_s — уставка потужності, K_P і λ_I — параметри регулятора.

Для оптимізації ІКО і ППЯ САУП реактора сформований вектор $x \in R^p$ з параметрів РП K_P , λ_I , λ_D і накладені на значення варійованих параметрів обмеження з $a_i = 0$ і $b_i = 100$, $i = \overline{1, p}$. Лінійні і нелінійні моделі САУП виражені через x . Для отримання в моделях САУП при вхідній дії $v_s = 1(t)$ перехідних процесів без перерегулювання і коливальності мінімальним часом регулювання за-дані $\sigma_m = 0$ і $\zeta_m = 0$, параметр зони сталого значення $\delta_z = 0,05$. Оптимізовані ІКО і ППЯ САУП з різними типами РП.

У табл. 2 для різних РП представлені оптимальні значення параметрів K_P^* , λ_I^* , λ_D^* , проєкцій векторної цільової функції F_1^* , F_2^* , і часу регулювання t_c^* . При оптимальних значеннях параметрів П і ПД регуляторів статична помилка перевершує 10 %. І і ІД регулятори приводять до великого значення часу регулювання. ПІ і ПІД регулятори мають однакову ефективність.

Таблиця 2

Результати оптимізації параметрів РП

РП	K_P^*	λ_I^*	λ_D^*	F_1^*	F_2^*	t_c^* , с
П	45,8	—	—	13	0,232	23,2
І	—	0,083	—	14	0,343	343,3
ПІ	100	2,59	—	14	0,138	13,8
ПД	100	—	0,044	14	0,114	11,4
ІД	—	0,083	100	15	0,343	343,3
ПІД	100	2,59	100	15	0,138	13,8

На рис. 21, 22 представлений процес оптимізації ППЯ для системи управління потужністю з ПІ регулятором методом Нелдера-Міда. На графіках складових $F_1(x)$ і $F_2(x)$ векторної функції змінних параметрів $x_1 = K_P$ і $x_2 = \lambda_I$ показана траєкторія пошуку. В межах траєкторії кращих точок функція рівня $F_1(x)$ на рис. 21 приймає значення 12 і 14, яким від-

повідують процеси з перерегулюванням і монотонні процеси. Графік функції штрафу $F_2(x)$ на рис. 22 складається з графіків функцій $\sigma(x)$ і $\tau(x)$. Аналіз графіків дозволяє укласти, що в результаті оптимізації знайдена оптимальна точка, якій відповідає монотонний процес з мінімальним часом регулювання. Зменшення значення K_P в околиці оптимальної точки приведе до зростання перерегулювання. Зменшення λ_I поблизу оптимальної точки збільшує час регулювання монотонного перехідного процесу, а збільшення λ_I збільшує перерегулювання.

Рис. 21. Оптимізація САУП на F_1 Рис. 22. Оптимізація САУП на F_2

Для ПІ регулятора оптимальний за швидкодією процес забезпечується на верхній межі параметра K_P . У табл. 3 для ПІ регулятора за різними значеннями b_i і часу інтегрування T_f наведені оптимальні значення K_P^* , λ_I^* , t_c^* . Значення K_P^* досягає верхньої межі, його зменшення зменшує λ_I^* і збільшує t_c^* . На рис. 23 представлені оптимальні процеси зміни потужності у лінійних системах управління потужністю з ПІ регулятором.

Таблиця 3
Оптимізація параметрів ПІ РП

b_i	T_f, c	K_P^*	λ_I^*, c^{-1}	t_c^*, c
100	100	100,0	2,595	13,8
75	100	75,0	2,003	17,9
50	100	50,0	1,354	26,4
30	200	30,0	0,799	44,9
25	200	25,0	0,669	53,7
20	200	20,0	0,541	66,4
15	300	15,0	0,399	91,0
10	500	10,0	0,262	139,5

Рис. 23. Зміна потужності

Для оптимізації ППЯ нелінійних моделей САУП з ПІ регулятором при різних уставках потужності v_s визначено $y(x,t) = v(x,t)/v_s$. У табл. 4 для різних значень v_s , $b_i = 25$, $T_f = 200 c$, $K_P^* = 25$ дані оптимальні значення λ_I^* і t_c^* . Зменшення v_s зменшує λ_I^* і збільшує t_c^* .

Таблиця 4
Результати оптимізації нелінійної САУП

v_s	λ_I^*	t_c^*, c	v_s	λ_I^*	t_c^*, c
0,10	0,673	53,4	-0,20	0,659	54,7
0,05	0,671	53,6	-0,50	0,631	58,1
-0,05	0,667	53,9	-0,75	0,573	67,9
-0,10	0,664	54,2	-0,90	0,494	88,8

Шостий розділ присвячений оптимізації показників якості систем управління парогенератором ПГВ-1000.

Технологічну систему живлення парогенератора забезпечують САУ рівнем води в парогенераторі і САУ продуктивністю ПТН (рис. 1). САУР ПГ включає ПГ, датчики рівня H , датчики витрат живильної води G_w і пари G_s , регулятор рівня (РР) і регулюючий живиль-

ний клапан (РЖК). САУ продуктивністю включає САУР ПГ, датчики тиску живильної води P_w і пари P_s , регулятор живлення (РЖ) і клапан регулювання продуктивності (КРП). Найважливішим завданням автоматичного управління ПГ є стабілізація рівня води в ньому, яка виконується САУР.

Обґрунтовані допущення моделювання ПГ. На підставі диференціальних рівнянь (ДУ) теплового балансу отримана система ДУ (СДУ) процесу теплопередачі від теплоносія до води. По ДУ матеріального і теплового балансів робочого середовища в ПГ розроблена СДУ процесу паротворення. За законом збереження кількості руху робочого середовища в циркуляційному контурі ПГ отримане ДУ циркуляції. ДУ ГПК, приводу клапана регулювання турбіни (КРТ) і виконавчого механізму РЖК прийняті у вигляді ДУ першого порядку. Модель ПГ як об'єкту управління представлена в просторі станів:

$$dX_G/dt = A_G X_G + B_{Gq} q + B_{Gw} u + B_{Gs} u_s, \quad \xi_c = C_G X_G, \quad (29)$$

де вектор X_G розмірності 9 складається з координат середніх температур теплоносія і металу теплообмінних трубок, об'єму води в ПГ, тиску робочого середовища в ПГ і пари в ГПК, рівня дзеркала випаровування (ДВ) і витрати пари через нього, переміщень РЖК і КРТ; q — координата потужності теплоносія, u і u_s — керуючі дії на РЖК и КРТ, ξ_c — координата рівня ДВ; A_G , B_{Gq} , B_{Gw} , B_{Gs} , C_G — матриця і вектори параметрів ПГ.

На вхід САУР подається уставка рівня ξ_{cs} , виходом є ξ_c . На РР поступає сигнал погрішності $\varepsilon = \xi_{cs} - \xi_c + g_s - g_w$, де g_s і g_w — координати витрат пари і води, виражаючи які через змінні стану ПГ отримуємо сигнал погрішності у вигляді $\varepsilon = \xi_{cs} - D_G X_G$. Збурюючими діями є координата теплової потужності q і дія на КРТ u_s . РР формує дію u , яка подається до моделі ПГ і змінює вектор його стану X_G . За моделлю ПГ (29) і рівнянням регуляторів (19) побудовані моделі САУР з різними типами РР вигляду:

$$dX_L/dt = A_L X_L + B_{Lc} \xi_{cs} + B_{Lq} q + B_{Ls} u_s, \quad \xi_c = C_L X_L. \quad (30)$$

Для моделі САУР з ПР регулятором

Розв'язана задача ідентифікації параметрів моделі САУР ПГВ-1000 за експериментальними даними процесів відхилення рівня з відключеним і включеним РР. Для цього був сформований вектор ξ відносних змінних $\xi_i = (x_i - x_i^{(0)})/x_i^{(0)}$, $i = \overline{1, 34}$, де x_i — варійовані параметри, $x_i^{(0)}$ — ненульові елементи матриць моделі (29), обчислені за конструктивними і технологічними параметрами ПГВ-1000. За вектором ξ сформована векторна цільова функція вигляду (17) з додаванням на перший рівень функції (22), відповідної обмеженням $-d \leq \xi_i \leq d$, $i = \overline{1, 34}$, і заміною функції ІКО на функцію відхилення, що включає 140 точок експериментальних характеристик ПГВ-1000. Комбінованим застосуванням векторних методів Вейля, Хука-Дживса і Нелдера-Міда обчислені значення параметрів моделі ПГ, які забезпечують середньоквадратичне відхилення процесів в моделях від експериментальних процесів менше 1 %.

На рис. 24, 25 представлені процеси відхилення рівня в ПГ при відключеному і включеному РР: точками позначені експериментальні дані, $d = 0$ означає процеси за початковими значеннями змінних параметрів моделей, інші процеси отримані оптимізацією векторної функції при різних значеннях d . За початковими значеннями змінних параметрів моделей й відключеному регулятору рівень швидко необмежено знижується (рис. 24), а за включеним

регулятором процес зміни рівня нестійкий коливальний (рис. 25). При $d = 0,25$ процеси в моделях і в експериментах істотно відрізняються. При $d = 0,5$ і відключеному регуляторі процес в моделі ПГ добре співпадає з експериментальним процесом (рис. 24), але при включеному регуляторі процес в моделі не відображає коливального характеру експериментального процесу (рис. 25). При $d = 0,75$ і $d = 1$ спостерігається кращий збіг процесів в моделі з експериментальними процесами як при відключеному, так і при включеному РР (рис. 24, 25).

Рис. 24. Відхилення рівня без РР

Рис. 25. Відхилення рівня з РР

Для оптимізації ППК САУР (30) при збуренні u_s сформовані вектор x з варійованих параметрів регулятора K_P , λ_I , λ_D і векторна цільова функція з $n + 2$ рівнями. У табл. 5 для П, І, Д, ПІ, ПД, ІД і ПІД регуляторів представлені оптимальні значення параметрів K_P^* , λ_I^* , λ_D^* , складових векторної функції F_1^* , F_2^* і часу регулювання t_c^* . На рис. 26 представлені перехідні процеси зміни рівня ПГ при різних РР. Процес з позначенням РІО відповідає ПІ регулятору з ідентифікованими значеннями параметрів. Решта процесів відповідає регуляторам з оптимальними значеннями параметрів з табл. 5.

Таблиця 5

Оптимізація параметрів РР

РР	K_P^*	λ_I^*	λ_D^*	F_1^*	F_2^*	t_c^* , с
П	20,5	—	—	11	0,235	118
І	—	5,34	—	12	0,280	140
Д	—	—	95,0	12	1,051	526
ПІ	2,55	0,14	—	12	0,197	98
ПД	20,5	—	100,0	12	0,235	118
ІД	—	9,67	100,0	13	0,281	140
ПІД	2,55	0,14	100,0	13	0,197	98

Рис. 26. Зміна рівня

Рис. 27, 28 відображають кращі точки процесу оптимізації параметрів ПІ регулятора з вектором варійованих параметрів $x = (K_P, \lambda_I)$, отримані векторним методом Нелдера-Міда. У початковій точці, узятій з рішення задачі ідентифікації, з дванадцяти обмежень задачі оптимізації не виконується тільки одне останнє обмеження показника розмаху коливаний (рис. 27). В порівнянні з початковою точкою в кінцевій точці крім зникнення коливальності час регулювання зменшився в 2,1 рази. Унаслідок зміни значення K_P в околиці оптимальної точки ні розмах коливаний, ні час регулювання істотно не збільшуються. Зменшення λ_I поблизу оптимальної точки викликає збільшення коливальності, а збільшення λ_I збільшує час регулювання. Перехідні процеси в початковій і кінцевій точці показані на рис. 26.

Рис. 27. Оптимізація САУР на F_1 Рис. 28. Оптимізація САУР на F_2

Аналіз цих результатів дозволяє зробити висновок, що найбільш ефективним типом регулятора рівня є ПІ регулятор з оптимальними значеннями параметрів, який забезпечує

найбільш швидкий перехідний процес без коливань. Побудовані динамічні процеси зміни змінних стану оптимальної САУУ, аналіз яких показує, що оптимізація показників якості істотним чином поліпшила процеси управління.

Сьомий розділ присвячений оптимізації показників якості систем управління частотою обертання парової турбіни К-1000-60/1500.

САУЧ ПТ включає ПТ, датчик частоти ω , регулятор частоти (РЧ), слідкуючий привід (СП) і клапан регулювання турбіни (рис. 1). До СП можуть подаватися сигнали з РД через механізм управління турбіною (МУТ) або з регулятора електричної потужності (РЕП) N . Обґрунтовані допущення моделювання САУЧ та слідкуючого привода.

Створений ВАТ «Турбоатом» привід включає електрогідравлічний перетворювач (ЕП), відсічний золотник (ВЗ), сервомотор (СМ), датчики положення (ДП). Побудовані моделі ЕП, ВЗ, СМ і їх послідовного з'єднання. Розглянуто три структурні схеми СП і розроблені відповідні їм математичні моделі з різним числом датчиків: перша модель з датчиками по ВЗ і СМ, що варіюються коефіцієнтом посилення і коефіцієнтом негативного зворотного зв'язку (НЗЗ) по ВЗ; друга модель з датчиком по СМ, запропонованою Е.А. Пікуром коректуючою ланкою (КЛ) другого порядку, варійованими коефіцієнтом посилення і параметрами КЛ; третя модель з датчиками СМ, ВЗ, ЕП і варійованими коефіцієнтом посилення і коефіцієнтами зворотного зв'язку з ВЗ і ЕП. Для цих моделей поставлені і вирішені задачі оптимізації ІКО і ППЯ. В результаті оптимізації показників якості першої моделі знайдене оптимальне значення коефіцієнта посилення, значно менше 1, що свідчить про малу чутливість СП. Оптимізація показників якості другої моделі дозволила спростити КЛ до ланки першого порядку. Ця модель СП стійка при великих значеннях коефіцієнта посилення, їй відповідають аперіодичні процеси з перерегулюванням, але для неї неможливі монотонні процеси.

У третій моделі порядку $n = 14$ варіювалися загальний коефіцієнт посилення СП K і коефіцієнти зворотних зв'язків з ЕП k_y і ВЗ k_s . Результати оптимізації СП представлені у табл. 6 та на рис. 29.

Таблиця 6

Результати оптимізації слідкуючого привода

N	КЯ	N_e	$t_{e,c}$	K^*	k_y^*	k_s^*	F_1^*	F_2^*	σ^*	ζ^*	t_c^*, c
1	ІКО	1	0,07	2,6	0,45	0,75	14	0,0120	0,026	0,035	0,080
2	ІКО	3	0,10	1,8	0,60	0,90	14	0,0120	0,010	0,010	0,112
3	ІКО	3	0,15	0,7	0,68	1,26	14	0,0109	0,000	0,000	0,161
4	ППЯ	2	—	2,4	0,44	0,77	17	0,0816	0,050	0,065	0,082
5	ППЯ	2	—	3,0	0,46	0,69	17	0,0760	0,050	0,053	0,076
6	ППЯ	3	—	1,5	0,57	0,98	16	0,1183	0,000	0,000	0,118
7	ППЯ	3	—	2,0	0,61	0,99	16	0,1465	0,000	0,000	0,147
8	ППЯ	3	—	2,5	0,63	1,02	14	0,0000	0,000	0,000	0,174

У табл. 6 для номера обчислювальних експериментів N із застосованими ІКО і ППЯ приведені номер еталону

N_e з табл. 1, час еталонного процесу t_e для ІКО, оптимальні значення варійованих параметрів K^* , k_y^* і k_s^* , складові векторної функції F_1^* і F_2^* , значення ППЯ σ^* , ζ^* і t_c^* . Відповідні табл. 6 перехідні процеси представлені на рис. 29. Ця модель забезпечує високу якість

Рис. 29. Оптимальные процессы в СП

монотонного процесу за оптимальними значеннями коефіцієнта посилення, більшого 1.

На рис. 30, 31 показаний процес оптимізації ППЯ СП при $k_y = 0,57$, $x_1 = K$ и $x_2 = k_s$ для $\sigma_m = 0$ і $\zeta_m = 0$. Значенням 14, 15 і 16 функції рівня $F_1(x)$ на рис. 30 відповідають процеси з перерегулюванням, коливальні без перерегулювання і монотонні процеси відповідно. Область стійкості, що відповідає $F_1(x) \geq 14$, в порівнянні з областю стійкості СП з двома ДП істотно збільшилася. Графік функції штрафу на рис. 31 складається з графіків функцій $\sigma(x)$, $\zeta(x)$, $\tau(x)$. В процесі оптимізації ППЯ знайдена точка з найменшим часом регулювання для монотонного процесу.

Рис. 30. Оптимізація СП на F_1

Рис. 31. Оптимізація СП на F_2

За моделями СП, парового тракту турбіни і її ротора розроблені математичні моделі САУЧ у просторі станів. Для оптимізації параметрів САУЧ сформований вектор $x \in R^p$ з параметрів РЧ K_P , λ_I и λ_D . Визначена модель САУЧ як системи стабілізації частоти при вхідній збурюючій дії $v_s = -1(t)$, відповідній переходу турбіни з режиму номінальної потужності до режиму холостого ходу, і вихідній координаті y відхилення частоти у відсотках:

$$dX_F(x,t)/dt = A_F(x)X_F(x,t) + B_F v_s, \quad y(x,t) = 100C_F X_F(x,t).$$

Порядок цієї моделі для П регулятора рівний порядку моделі ПТ $n = 19$, для І, Д, ПІ и ПД регуляторів $n = 20$, для ІД и ПІД регуляторів $n = 21$. Для отримання оптимальних процесів з мінімальним часом регулювання задані обмеження задачі оптимізації ППЯ: відповідне допустимому відхиленню частоти 4 % значення максимального відхилення відносної координати частоти у відсотках $\sigma_m = 4$, допустиме значення розмаху коливань частоти $\zeta_m = 1$.

САУЧ з І, Д і ІД регуляторами виявилися неефективними, оскільки їх оптимальні процеси мають відхилення частоти, що перевищують 12 %. У всіх експериментах оптимальне значення коефіцієнта пропорційної складової регулятора K_P^* досягло верхнього обмеження $b_1 = 100$, оптимальні значення λ_I^* і λ_D^* знаходилися усередині допустимої області зміни параметрів. Значення F_1^* показують, що в оптимальних точках для П і ПД регуляторів не виконано обмеження на показник коливальності, а для ПІ і ПІД регуляторів задоволені всі обмеження. Результати оптимізації решти типів регуляторів представлені в табл. 7 і на рис. 32. У табл. 7 для номера обчислювального експерименту N і П, ПІ, ПД, ПІД регуляторів дані оптимальні значення їх параметрів K_P^* , λ_I^* , λ_D^* , а також відповідні ним значення складових векторної цільової функції F_1^* , F_2^* , максимального відхилення σ^* , розмаху коливань ζ^* і часу регулювання t_c^* . Відповідні табл. 7 перехідні процеси зміни координати частоти ПТ представлені на рис. 32. Для статичних систем управління з П і ПД регуляторами $y(\infty) = 1,0$, а для астатичних систем з ПІ і ПІД регуляторами $y(\infty) = 0$. В перших чотирьох експериментах прийнято допустиме значення розмаху коливань частоти $\zeta_m = 1$, а в останніх двох $\zeta_m = 0,5$.

Результати оптимізації ППЯ САУЧ

N	РЧ	λ_I^*	λ_D^*	F_1^*	F_2^*	σ^*	ζ^*	t_c^*, c
1	П	—	—	20	2,0	3,6	3,0	3,56
2	ПІ	27	—	22	0,3	3,5	1,0	5,19
3	ПД	—	1,1	21	1,7	3,5	2,7	3,16
4	ПД	31	1,1	23	0,2	3,4	0,8	3,50
5	ПІ	10	—	22	0,4	3,6	0,5	19,42
6	ПД	23	1,1	23	0,3	3,4	0,5	5,04

Рис. 32. Процеси в САУЧ

Процес оптимізації параметрів ПД регулятора, відповідний $N = 4$ в табл. 7, з варіюваними параметрами $x_1 = K_P$, $x_2 = \lambda_I$ і фіксованим значенням $\lambda_D = 1,1$ з табл. 7, показаний на рис. 33 і 34. Можна відзначити істотне розширення області виконання всіх обмежень для ПД регулятора в порівнянні з ПІ регулятором.

Рис. 33. Оптимізація САУЧ на F_1 Рис. 34. Оптимізація САУЧ на F_2

У порівнянні з початковою точкою в кінцевій точці із зменшенням максимального відхилення частоти час регулювання зменшився більш ніж у 4 рази.

В околиці оптимальної точки при зменшенні оптимального граничного значення $K_P^* = 100$ або при зміні λ_I час регулювання ненабагато збільшується.

Аналіз цих результатів дозволяє зробити висновок, що найбільш ефективним типом регулятора частоти є ПД регулятор з оптимальними значеннями параметрів, який забезпечує найбільш швидкий перехідний процес із найменшим відхиленням частоти.

У **додатках** наводяться допоміжні алгоритми обчислень, експериментальні характеристики парогенератора ПГВ-1000 і матеріали щодо впровадження результатів дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі дано вирішення науково-практичної проблеми оптимізації показників якості систем автоматичного управління енергоблоку АЕС на основі обґрунтованих методів і алгоритмів обчислення показників якості, векторних цільових функцій, векторних методів оптимізації і вдосконалених математичних моделей систем. Основні отримані наукові і практичні результати дозволяють сформулювати наступні висновки.

1. Проведено аналіз методів синтезу САУ енергоблоку АЕС і виявлено перспективні можливості концепції синтезу систем управління на основі прямих показників якості, покращених інтегральних квадратичних оцінок і чисельних методів оптимізації.

2. На підставі алгоритмів обчислення перехідних процесів запропоновані алгоритми обчислення прямих показників якості — перерегулювання, показників коливальності і часу регулювання. На моделях САУ високого порядку вперше проведено порівняння методів обчислення часу регулювання, що дозволило встановити найбільшу ефективність за точністю і швидкістю матричних методів. Врахована обмеженість області визначення ППЯ розширенням області визначення критеріїв за рахунок їх формування у вигляді штрафних функцій за межами області визначення показників якості. З урахуванням особливостей застосування і

обчислення прямих критеріїв сформована багатовимірна векторна цільова функція критеріїв і запропонована операція порівняння її значень.

3. Розглянуто коефіцієнти Рауса-Гурвіця як функції варійованих параметрів системи і показана принципова можливість досягнення області стійкості САУ за допомогою цих функцій. Запропоновано покроковий принцип послідовного задоволення обмежень для переходу до області стійкості й механізм його реалізації у вигляді пріоритетної оптимізації двовимірної векторної штрафної функції з використанням операції порівняння її значень. На підставі визначення коефіцієнтів покращених ІКО якості САУ за бажаним часом регулювання і стандартними передавальними функціями розроблені алгоритми обчислення оцінок методами Каца і Острема. Розроблені алгоритми обчислення двовимірних векторних цільових функцій, визначених у всьому просторі варійованих параметрів, з інтегральними квадратичними оцінками. Запропоновані постановки задач мінімізації інтегральних квадратичних оцінок у вигляді пріоритетної оптимізації векторних цільових функцій з використанням операції порівняння їх значень.

4. Для оптимізації векторних цільових функцій розроблені векторні модифікації прямих методів безумовної мінімізації функцій: для одновимірного пошуку — методу адаптації кроку, для багатовимірної оптимізації — методів Вейля, Хука-Дживса і Нелдера-Міда. Основна відмінність запропонованих векторних методів оптимізації від методів мінімізації скалярних функцій полягає в заміні операції порівняння значень скалярних функцій операцією порівняння значень векторних функцій. Застосування векторних методів оптимізації дозволяє в єдиному обчислювальному процесі перейти з будь-якої початкової точки пошуку до області визначення показників якості, утримати процес оптимізації в цій області і знайти оптимальні значення показників. На тестових прикладах САУ різного порядку від 3 до 112 проведено дослідження ефективності векторних методів оптимізації при рішенні задач переходу до області стійкості й оптимізації показників якості. Обчислювальні експерименти підтвердили високу ефективність застосування векторних методів оптимізації для мінімізації інтегральних квадратичних оцінок і оптимізації прямих показників якості.

5. На підставі диференційних рівнянь нейтронної кінетики ядерного реактора і теплових процесів побудовані математичні моделі реактора ВВЕР-1000 в просторі станів як об'єкту автоматичного управління з однією, двома і шістьма групами запізнілих нейтронів. Розроблені нелінійні й лінійні моделі систем управління нейтронною потужністю реактора в просторі станів з різними регуляторами, призначені для вирішення задач оптимізації параметрів регуляторів. Вирішені задачі мінімізації інтегральних квадратичних оцінок і оптимізації прямих показників для систем управління потужністю реактора ВВЕР-1000 з різними регуляторами. Результати вирішення задач оптимізації показників якості дозволяють зробити висновок, що найефективнішим типом регулятора потужності для ВВЕР-1000 є ПІ регулятор з оптимальними значеннями параметрів, що забезпечує найбільш швидкий перехідний процес без перерегулювання і коливань. Досліджено вплив періоду кампанії реактора і нелінійності моделей на показники якості систем автоматичного управління потужності реактора.

6. Для оптимізації параметрів регуляторів рівня води в парогенераторі ПГВ-1000 на підставі рівнянь теплопередачі, матеріального і теплового балансу, циркуляції, головного парового колектора, приводу клапана парової турбіни і виконавчого механізму регулюючого живильного клапана, розроблені математичні моделі систем управління з різними регуляторами. Векторними методами оптимізації вирішена задача ідентифікації параметрів моделі системи управління рівня парогенератора ПГВ-1000 за експериментальними даними процесів відхилення рівня. Результати розв'язання задач оптимізації показників якості для систем управління ПГВ-1000 з різними регуляторами дозволяють зробити висновок, що найефективнішим типом регулятора рівня для ПГВ-1000 є ПІ регулятор з оптимальними значеннями параметрів, що забезпечує найбільш швидкий перехідний процес без коливань.

7. Розроблена математична модель ЕП, складені моделі в просторі станів для послідовного з'єднання ЕП, ВЗ, СМ з одним, двома і трьома датчиками, розроблені відповідні їм математичні моделі з різним числом датчиків. В результаті оптимізації показників якості пер-

шої моделі отримано оптимальне значення коефіцієнта посилення, значно менше 1. Друга модель СП має стійкість при великих значеннях коефіцієнта посилення, їй відповідають аперіодичні процеси з перерегулюванням, але для неї неможливі монотонні процеси. Третя модель забезпечує високу якість монотонного процесу при оптимальному значенні коефіцієнта посилення, більшого 1.

8. Для розв'язання задач оптимізації параметрів регуляторів під час скидання навантаження турбіни розроблені математичні моделі САУЧ парової турбіни К-1000-60/1500 в просторі станів з різними регуляторами частоти. Векторними методами вирішені задачі оптимізації прямих показників якості для систем управління турбіни. Найефективнішим типом регулятора частоти під час скидання навантаження турбіни є ПД регулятор з оптимальними значеннями параметрів, що забезпечує найбільш швидкий перехідний процес з найменшим відхиленням частоти.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Голоскоков Е. Г., Северин В. П. Модификация метода деформируемого многогранника для оптимизации иерархической последовательности критериев // Вестник Харьковского политехнического института. – Харьков: ХПИ. – 1986. – Вып. 6. – № 229. – С. 27-30.

Здобувач модифікував метод Нелдера-Міда для оптимізації ієрархічної послідовності критеріїв на основі порівняння значень вектору критеріїв.

2. Голоскоков Е. Г., Пикур Э. А., Северин В. П. Методика идентификации параметров систем регулирования с помощью ЭВМ // Сборник трудов ИК АН УССР «Математическое обеспечение машиностроения». – К. – 1986. – С. 38-42.

Здобувачем сформовані система рівнянь та цільова функція для ідентифікації систем управління по частотним характеристикам.

3. Пикур Э. А., Северин В. П., Ласенко Р. Е. Математическая модель механической части электрогидравлического преобразователя // Вестник Харьковского политехнического института. – Харьков: ХПИ. – 1987. – Вып. 7. – № 240. – С. 38-40.

Здобувач розробив математичну модель механічної частини електрогидравлічного перетворювача з урахуванням пружності важіля.

4. Пикур Э. А., Рохленко В. Ю., Северин В. П. Математические модели гидравлического мостика сопло-заслонка // Вестник Харьковского политехнического института. – Харьков: ХПИ. – 1988. – Вып. 8. – № 252. – С. 19-21.

Здобувачем розроблені математичні моделі гідравлічного містка сопло-заслінка для моделювання електрогидравлічного перетворювача.

5. Пикур Э. А., Герасимов С. Д., Северин В. П. Математические модели золотника сервомотора высокого давления // Вестник Харьковского политехнического института. – Харьков: ХПИ. – 1989. – Вып. 9. – № 263. – С. 24-27.

Здобувач розробив лінійну та нелінійну математичні моделі гідравлічного відсічного золотника для моделювання слідкуючого приводу.

6. Пикур Э. А., Северин В. П. Линейная модель звена системы регулирования с беззолотниковым электрогидравлическим преобразователем // Вестник Харьковского политехнического института. – Харьков: ХПИ. – 1990. – Вып. 10. – № 277. – С. 39-42

Здобувачем розроблена лінійна математична модель внутрішнього контуру електрогидравлічного слідкуючого приводу парової турбіни.

7. Северин В. П. Исследование алгоритмов вычисления матричной экспоненты и интеграла матричной экспоненты // Вестник Харьковского политехнического института. – Харьков: ХПИ. – 1992. – Вып. 2. – № 2. – С. 43-48.

8. Северин В. П. Сравнение численных методов интегрирования по точности и скорости // Вестник Харьковского политехнического института. – Харьков: ХПИ. – 1993. – Вып. 12. – № 17. – С. 85-89.

9. Северин В. П., Головня М. Н., Позняк Н. А. Методы интерактивного моделирова-

ния и оптимизации динамических систем // Резание и инструмент. – Харьков: ХГПУ. – 1994. – Вып. 49. – С. 113-115.

Здобувач запропонував концепцію інтерактивного моделювання і оптимізації динамічних систем.

10. Северин В.П., Чернай В.Ф., Грозенок Д.Е. Проблемы параметрического синтеза многофункциональных систем автоматического управления в электроэнергетике // Технічна електродинаміка. – К. – 1998. – Т. 1, № 2. – С. 195-198.

Здобувачеві належить аналіз проблем параметричного синтезу багатofункціональних систем автоматичного управління в електроенергетиці.

11. Северин В. П. Проектирование сложных систем автоматического управления методом уровней ограничений // Технічна електродинаміка. – К. – 2001. – Т. 1. – С. 69-72.

12. Северин В. П. Пошаговый метод проектирования сложных технических систем // Високі технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2001. – Вип. 1. – №4. – С. 239-243.

13. Северин В. П., Никулина Е. Н. Одномерная минимизация функций с рекуррентной системой ограничений области определения // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2002. – Т. 1, № 8. – С. 141-145.

Здобувач запропонував покроковий підхід для одновимірної мінімізації функцій з рекуррентною системою обмежень області визначення.

14. Северин В. П. Математическое моделирование однозолотникового электрогидравлического преобразователя // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2002. – Т. 6, № 9. – С. 101-106.

15. Северин В. П. Оптимизация быстродействия следящего привода // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2002. – Т. 2, № 7. – С. 116-120.

16. Северин В. П. Пошаговый метод поиска допустимых значений параметров систем автоматического управления // Радиоэлектроника и информатика. – Харьков: ХНУРЭ. – 2002. – № 2. – С. 39-42.

17. Северин В. П. Векторная оптимизация динамических показателей качества электрогидравлического следящего привода // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2002. – Т. 2, № 12. – С. 451-454.

18. Северин В. П. Векторная оптимизация динамических показателей качества системы управления энергоблоком АЭС // Технічна електродинаміка. – К. – 2002. – Ч. 1. – С. 111-116.

19. Северин В. П. Многокритериальный синтез технических систем методами векторной оптимизации // Високі технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2002. – Вип. 1 (5). – С. 351-355.

20. Северин В. П. Многокритериальный синтез систем регулирования энергоблока АЭС // Энергетика: економіка, технології, екологія. – К. – 2002. – № 3. – С. 47-51.

21. Северин В. П., Никулина Е. Н. Градиентные методы оптимизации систем управления по критериям с ограниченной областью определения // Радиоэлектроника и информатика. – Харьков: ХНУРЭ. – 2002. – № 4. – С. 51-56.

Здобувач запропонував використати покроковий підхід в градієнтних методах оптимізації систем управління.

22. Северин В. П., Никулина Е. Н., Чернай В. Ф. Анализ задачи оптимизации прямых критериев качества для систем автоматического регулирования энергоблока // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2003. – Т. 1, № 6. – С. 75-80.

Здобувач проаналізував задачі оптимізації прямих критеріїв якості для систем автоматичного управління енергоблоку.

23. Северин В. П., Никулина Е. Н., Чернай В. Ф. Формирование прямых критериев качества функций веса систем автоматического регулирования // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2003. – Т. 2, № 7. – С. 69-74.

Здобувач запропонував принцип формування прямих критеріїв якості систем автоматичного управління на основі матричних методів інтегрування.

24. Северин В. П., Чернай В. Ф., Никулина Е. Н. Пошаговая оптимизация динамических систем по прямым показателям качества // Високі технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2003. – Вип. 2 (7). – С. 103-108.

Здобувачем запропоновано використати покроковий підхід до оптимізації прямих показників якості динамічних систем.

25. Северин В.П., Чернай В.Ф., Никулина Е.Н. Методика вычисления времени установления процесса регулирования в динамических системах высокого порядка // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2003. – Т.2, №10. – С. 388-391.

Здобувач запропонував методику обчислення часу регулювання систем управління на основі матричних методів інтегрування.

26. Северин В. П. Схема перехода в устойчивую область системы автоматического регулирования по критерию Рауса-Гурвица // Технічна електродинаміка. – К. – 2003. – Ч. 4. – С. 64-69.

27. Северин В. П. Иерархическая многокритериальная оптимизация систем автоматического регулирования // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2003. – № 18. – С. 41-46.

28. Северин В. П., Никулина Е. Н. Алгоритмы вычисления прямых показателей качества функций веса систем автоматического управления // Радиоэлектроника и информатика. – Харьков: ХНУРЭ. – 2004. – № 1. – С. 52-59.

Здобувач використав методи обчислення прямих показників якості для функцій ваги систем автоматичного управління.

29. Северин В. П., Никулина Е. Н., Чернай В. Ф. Анализ алгоритмов алгебраического критерия устойчивости систем автоматического регулирования // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2004. – № 4 – С. 121-125.

Здобувач проаналізував алгоритми критерію Рауса-Гурвіца з погляду їх застосування в методах оптимізації систем управління.

30. Северин В. П., Никулина Е. Н., Чернай В. Ф. Комплекс программ для исследования методов оптимизации // Високі технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2004. – Вип. 2 (9). – С. 243-248.

Здобувач розробив комплекс програм методів оптимізації для дослідження їх ефективності.

31. Северин В. П. Минимизация интегральных квадратичных оценок систем автоматического управления. Часть 1. Вычисление оценок // Проблемы управления и информатики. – К. – 2004. – № 4. – С. 5-16.

32. Северин В. П. Минимизация интегральных квадратичных оценок систем автоматического управления. Часть 2. Пошаговый подход // Проблемы управления и информатики. – К. – 2004. – № 5. – С. 5-15.

33. Северин В. П. Векторная оптимизация интегральных квадратичных оценок систем автоматического управления // Известия РАН. Теория и системы управления. – М. – 2005. – № 2. – С. 52-61.

34. Severin V. P. Vector Optimization of the Integral Quadratic Estimates for Automatic Control Systems // Journal of Computer and Systems Sciences International. – Moscow. – 2005. – Vol. 44, №. 2. – P. 207-216.

35. Северин В. П., Никулина Е. Н. Лаборатория методов оптимизации сложных сис-

тем // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2005. – № 19. – С. 115-120.

Здобувач розробив комплекс програм методів оптимізації для складних динамічних систем високого порядку.

36. Северин В. П., Никулина Е. Н. Векторные целевые функции для оптимизации показателей качества систем автоматического регулирования // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2005. – № 55. – С. 139-144.

Здобувач запропонував векторні цільові функції для оптимізації показників якості систем автоматичного управління.

37. Северин В. П. Моделирование системы автоматического регулирования ядерного реактора ВВЭР-1000 // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2005. – № 54. – С. 136-141.

38. Северин В. П. Проблема выбора компьютерных технологий оптимизации сложных производственных систем и ее решение в атомной энергетике // Високі технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2005. – Вип. 2 (11). – С. 373-378.

39. Северин В. П. Математическое моделирование и исследование динамики атомного реактора ВВЭР-1000 // Технічна електродинаміка. – К. – 2005. – Ч. 4. – С. 94-99.

40. Северин В. П., Чернай В. Ф., Никулина Е. Н. Компьютерная лаборатория методов оптимизации автоматизированных систем // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2005. – № 45. – С. 270-273.

Здобувач доповнив комплекс програм оптимізації програмами моделей багатокритеріальної оптимізації автоматизованих систем.

41. Северин В. П., Никулина Е. Н. Математическое моделирование парогенератора атомного энергоблока // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2006. – № 19. – С. 145-150.

Здобувач розробив математичну модель парогенератора енергоблоку атомної електростанції.

42. Северин В. П., Никулина Е. Н., Чернай В. Ф. Компьютерные технологии оптимальной настройки систем регулирования в машиностроении и их применение для энергоблока АЭС // Високі технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2006. – Вип. 2 (9). – С. 455-460.

Здобувач проаналізував комп'ютерні технології оптимальної настройки систем управління і особливості їх застосування для енергоблоку АЕС.

43. Северин В. П. Моделирование и оптимизация системы регулирования мощности ядерного реактора ВВЭР-1000 // Технічна електродинаміка. – К. – 2006. – Ч. 4. – С. 89-94.

АНОТАЦІЇ

Северин В.П. Моделі і методи оптимізації показників якості систем автоматичного управління енергоблоку атомної електростанції. – Рукопис.

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

Дисертація присвячена розробці перспективної концепції синтезу систем автоматичного управління енергоблоку атомної електростанції на основі математичних моделей і чисельних методів векторної оптимізації показників якості. Розроблені методи обчислення прямих показників якості й покращених інтегральних квадратичних оцінок, що мають високу точність і швидкодію. Обґрунтований покроковий принцип переходу до області стійкості системи, запропоновані векторні цільові функції, що включають умови стійкості і враховують пріоритети показників якості. Розроблені надійні методи оптимізації векторних цільових функцій. Отримані математичні моделі в просторі станів для систем автоматичного управ-

ліній ядерним реактором, парогенератором та паровою турбіною. Виконана оптимізація показників якості систем управління енергоблоку, яка дозволила оцінити ефективність різних регуляторів.

Ключові слова: системи автоматичного управління, енергоблок, ядерний реактор, парогенератор, парова турбіна, показники якості, методи векторної оптимізації.

Северин В.П. Модели и методы оптимизации показателей качества систем автоматического управления энергоблока атомной электростанции. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.07 – Автоматизация технологических процессов. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2007.

Диссертация посвящена разработке и обоснованию перспективной концепции синтеза систем автоматического управления (САУ) энергоблока атомной электростанции на основе математических моделей и численных методов векторной оптимизации показателей качества систем.

Обоснована необходимость разработки подходов к синтезу САУ энергоблока на основе методов оптимизации показателей качества с более полным учетом предъявляемых требований к качеству процессов управления.

Разработаны алгоритмы вычисления переходных процессов в различных моделях САУ на основе численных методов интегрирования. Предложены новые формулы и алгоритмы вычисления прямых показателей качества (ППК) — перерегулирования, показателей колебательности и времени регулирования. Сравнение методов вычисления времени регулирования на моделях САУ от 100 до 500 порядка показало наибольшую эффективность матричных методов интегрирования. Предложен алгоритм вычисления вектора ППК в виде единого вычислительного процесса. С учетом особенностей вычисления и применения ППК сформирована многомерная векторная целевая функция и предложена операция сравнения ее значений.

На основании критерия Рауса-Гурвица предложена двумерная векторная штрафная функция нарушения условий устойчивости и разработан алгоритм вычисления ее значений. Предложен пошаговый подход последовательного удовлетворения ограничений для перехода в область устойчивости и механизм его реализации в виде приоритетной оптимизации векторной штрафной функции. На основании определения коэффициентов улучшенных интегральных квадратичных оценок (ИКО) систем управления разработаны алгоритмы вычисления оценок. Предложены двумерные векторные целевые функции для оптимизации ИКО и ППК и разработаны алгоритмы их вычисления. Предложены новые постановки задач оптимизации ИКО и ППК в виде приоритетной оптимизации векторных целевых функций.

С использованием операций сравнения значений векторных функций для оптимизации векторных целевых функций разработаны векторные методы адаптации шага, Вейля, Хука-Дживса и Нелдера-Мида, позволяющие в едином вычислительном процессе перейти из любой начальной точки поиска в область определения показателей качества, удержать процесс оптимизации в этой области и найти оптимальные значения показателей. Вычислительные эксперименты на тестовых примерах САУ порядков от 3 до 112 подтвердили высокую эффективность применения векторных методов оптимизации показателей качества.

Построены нелинейные и линейные математические модели реактора ВВЭР-1000 в пространстве состояний как объекта автоматического управления с одной, двумя и шестью группами запаздывающих нейтронов. Разработаны нелинейные и линейные модели САУ нейтронной мощностью реактора в пространстве состояний с различными регуляторами, предназначенные для решения задач оптимизации параметров регуляторов. Результаты решения задач оптимизации показателей качества САУ реактором ВВЭР-1000 с различными регуляторами позволяют сделать вывод, что самым эффективным регулятором является пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор с оптимальными значениями параметров. Исследовано влияние периода кампании реактора и нелинейности моделей на показатели каче-

ства САУ реактором.

Разработаны модели САУ уровнем воды в парогенераторе ПГВ-1000 с различными регуляторами уровня, предназначенные для решения задач оптимизации параметров регуляторов. Векторными методами оптимизации решена задача идентификации параметров модели САУ уровнем воды в ПГВ-1000 по экспериментальным данным процессов отклонения уровня. Результаты решения задач оптимизации показателей качества САУ ПГВ-1000 с различными регуляторами показали, что самым эффективным регулятором уровня является ПИ регулятор с оптимальными значениями параметров.

Рассмотрены три структурные схемы электрогидравлического следящего привода для САУ паровой турбины и разработаны соответствующие им математические модели с одним, двумя и тремя датчиками. В результате оптимизации показателей качества первой модели получено оптимальное значение коэффициента усиления, значительно меньшее 1. Вторая модель следящего привода обладает устойчивостью при больших значениях коэффициента усиления, ей соответствуют апериодические процессы с перерегулированием. Третья модель обеспечивает высокое качество монотонного процесса при оптимальном значении коэффициента усиления, большем 1.

Построена математическая модель паровой турбины К-1000-60/1500 в пространстве состояний. Разработаны модели САУ частотой вращения турбины в пространстве состояний с различными регуляторами, предназначенные для решения задач оптимизации параметров регуляторов при сбросе нагрузки турбины. Решены задачи оптимизации показателей качества САУ турбиной векторными методами. Установлено, что самым эффективным регулятором частоты при сбросе нагрузки турбины является пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор с оптимальными значениями параметров.

Ключевые слова: системы автоматического управления, энергоблок, ядерный реактор, парогенератор, паровая турбина, показатели качества, методы векторной оптимизации.

Severin V. P. Models and methods of quality indices optimization for automatic control systems of atomic station power block. – Manuscript.

Thesis for a doctor's degree in speciality 05.13.07 – automation of technological processes. – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, 2007.

The thesis is devoted to the development of a perspective concept of atomic station power block automatic control systems synthesis on the basis of mathematical models and numeric methods of vector optimization of systems quality indexes. The methods for calculation of direct quality indexes and improved integral quadratic estimates have been created. The step-by-step principle of transition to the domain of system stability has been based. There have also been suggested vector goal functions including stability conditions and taking into consideration quality indexes priorities. The reliable optimization methods of vector goal functions have been suggested. Mathematical models in the state space for automatic control systems of nuclear reactor, steam generator and steam turbine have been worked out. The quality indexes optimization of power block control systems has been carried out, which allowed to estimate various regulator types efficiency.

Key words: automatic control systems, power block, nuclear reactor, steam generator, steam turbine, quality indexes, vector optimization methods.

Надруковано у СПДФО Ізрайлев Є.М.
Свідоцтво №04058841Ф0050331 від 21.03.2001 р.
61024, м. Харків, вул. Гуданова, 4/10.
