

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

Нікуліна Олена Миколаївна

УДК 62-5:629.036

**БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИЙ ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ
СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ
РЕАКТОРНОЇ УСТАНОВКИ АЕС**

спеціальність 05.13.07 – автоматизація процесів керування

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

Харків – 2008

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі системного аналізу і управління
Національного технічного університету «Харківський
політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

Науковий керівник

доктор технічних наук, доцент
Северин Валерій Петрович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
професор кафедри системного аналізу і
управління

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Ястребенецький Михайло Онисимович,
Державний науково-технічний центр
з ядерної та радіаційної безпеки,
завідувач відділу, м. Харків

доктор технічних наук, професор
Дуель Михайло Олександрович,
ДП «Харківський науково-дослідний
інститут комплексної автоматизації»,
вчений секретар, м. Харків

Захист відбудеться 30 жовтня 2008 р. о 13.00 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 « ____ » _____ 2008 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Гамаюн І. П.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. При проектуванні систем автоматичного керування (САК) реакторних установок (РУ) ВВЕР атомних електростанцій особлива увага приділяється покращенню їх маневрених характеристик і показників стійкості, що істотно залежать від динамічних властивостей систем керування та можуть бути забезпечені розвитком розрахункових методів проектування САК реакторних установок шляхом підвищення їх точності.

Системи керування реакторної установки повинні задовольнити численні вимоги з безпеки, надійності та якості процесів. Однією з основних наукових задач створення САК є задача багатокритеріального параметричного синтезу системи. Особливостями цієї задачі є вплив на показники якості систем керування реакторної установки багатьох конструктивних параметрів, математичні моделі високого порядку, складність визначення значень параметрів з урахуванням умов фізичної і практичної реалізації процесів.

Зазвичай методи параметричного синтезу систем керування засновані на суттєвому зниженні порядку моделей систем і використанні спрощених критеріїв якості. При цьому теоретично отримані значення параметрів моделі, як правило, не забезпечують бажаних процесів у реальній системі. Вузким місцем параметричного синтезу систем керування є недостатнє застосування чисельних методів для оптимізації показників якості, що зумовлене обмеженою областю визначення показників. Істотного підвищення якості багатокритеріального синтезу систем можна досягти векторною оптимізацією показників за покроковим підходом послідовного виконання вимог до систем. У зв'язку з цим виникає необхідність у розробці моделей і методів багатокритеріального параметричного синтезу САК РУ, заснованих на методах оптимізації показників якості систем керування, що і визначає актуальність даної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі системного аналізу і управління Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» відповідно до плану науково-дослідних робіт МОН України в рамках держбюджетної теми «Розвиток теорії і методів параметричного синтезу багатоцільових і багатокритеріальних керованих систем з невизначеними параметрами» (№ ДР 0105U000585), де здобувач був виконавцем.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка методів багатокритеріального параметричного синтезу систем автоматичного керування реакторної установки АЕС на основі чисельних методів оптимізації показників якості систем. В роботі поставлені та розв'язані наступні задачі:

аналіз методів синтезу систем автоматичного керування реакторної установки і можливостей використання чисельних методів оптимізації;

розробка методів і алгоритмів одновимірного пошуку для багатокритеріального синтезу систем керування на основі покрокового підходу за показниками якості систем з обмеженою областю визначення та їх дослідження;

розробка та дослідження методів параметричного синтезу систем шляхом побудови векторних багатовимірних методів та алгоритмів оптимізації показ-

ників якості з використанням одновимірного пошуку;

математичне моделювання систем керування тепловою потужністю ядерного реактора та параметричний синтез систем керування реактора векторними методами оптимізації;

розробка математичних моделей систем керування продуктивністю живильним турбонососом парогенератора, ідентифікація параметрів та визначення векторними методами оптимального закону керування продуктивністю;

багатокритеріальний параметричний синтез систем керування потужністю теплоносія реакторної установки на основі математичних моделей систем автоматичного керування реактора та парогенератора.

Об'єктом дослідження являються процеси керування в елементах реакторної установки АЕС в нормальних режимах експлуатації.

Предмет дослідження становлять методи параметричного синтезу систем автоматичного керування реакторної установки.

Методи дослідження. Теорія оптимізації і теорія обчислень використовувалися під час розробки і дослідження методів оптимізації. Фундаментальні положення теорії автоматичного керування, теорія операційного обчислення, чисельні методи інтегрування систем диференціальних рівнянь використовувалися для розробки і дослідження показників якості систем автоматичного керування реакторної установки. Методи математичного моделювання, методи простору станів і передавальних функцій, теорія диференціальних рівнянь – під час розробки математичних моделей САК РУ. Сучасні системи комп'ютерної математики застосовувалися для обчислення значень параметрів систем керування, параметричного синтезу, дослідження ефективності методів оптимізації.

Наукова новизна одержаних результатів. Основний науковий результат роботи складається в розв'язанні задачі параметричного синтезу систем автоматичного керування реакторної установки АЕС на основі розвитку методів оптимізації показників якості систем керування.

Наукова новизна визначається наступними положеннями:

дістали подальшого розвитку методи синтезу систем автоматичного керування з одним змінним параметром на основі модифікації методів одновимірного пошуку для оптимізації векторних функцій за покроковим підходом, що враховують умови стійкості систем керування, вимоги до їх показників якості та дозволяють підвищити рівень автоматизації процесу синтеза;

вперше розроблені методи багатокритеріального параметричного синтезу систем автоматичного керування на основі розвитку багатовимірних методів оптимізації з використанням одновимірних методів, які формалізують завдання управління процесами та суттєво покращують показники якості систем;

дістали подальшого розвитку статичні й динамічні математичні моделі систем керування ядерним реактором у просторі станів, що забезпечують обчислення статичних помилок та проведення параметричного синтезу систем керування тепловою потужністю і дозволяють підвищити якість процесів;

дістав подальшого розвитку параметричний синтез систем керування парогенератора на основі розробки динамічних моделей та ідентифікації їх параметрів з використанням методів оптимізації, що дозволяє підвищити якість ос-

новних процесів в системі керування продуктивністю;

вперше побудовані математичні моделі для систем керування потужністю теплоносія реакторної установки за моделями систем керування реактора й парогенератора та проведено багатокритеріальний параметричний синтез систем, який забезпечує визначення оптимального закону керування та підвищення надійності систем.

Практичне значення одержаних результатів полягає у тому, що для покращення якості процесів керування реакторною установкою атомної електростанції в нормальних режимах експлуатації одержані математичні моделі систем автоматичного керування у просторі станів тепловою потужністю реактора ВВЕР-1000, продуктивністю парогенератора ПГВ-1000 й потужністю теплоносія та розроблені методи багатокритеріального параметричного синтезу систем керування на основі одновимірних та багатовимірних методів оптимізації, що дозволяє підвищити ступінь наукової обґрунтованості технічних проектів з удосконалення систем керування реакторної установки.

Розроблені моделі, методи, програми для параметричного синтезу систем автоматичного керування реакторної установки впроваджені на ВАТ «Турбоатом» та ДП ХПЗ ім. Т.Г. Шевченко (м. Харків).

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

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати дисертації, які виносяться на захист, одержані здобувачем самостійно, серед них — методи і алгоритми розв'язання задач одновимірної мінімізації функцій з обмеженою областю визначення; багатовимірні методи оптимізації критеріїв якості з обмеженою областю визначення; програми методів одновимірної і багатовимірної векторної оптимізації; результати оптимізації різних складних систем автоматичного керування; математичні моделі систем автоматичного керування тепловою потужністю ядерного реактора ВВЕР-1000, продуктивністю парогенератора ПГВ-1000, потужністю реакторної установки та результати багатокритеріального параметричного синтезу цих систем.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідалися й обговорювалися на: X, XII, XIII Українських конференціях з автоматичного управління «Автоматика» (м. Севастополь, 2003 р.; м. Харків, 2005 р.; м. Вінниця, 2006 р.), X, XIII Міжнародних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2002 р., 2005 р.), Міжнародних конференціях «Інтерпартнер. Високі технології в машинобудуванні: моделювання, оптимізація, діагностика» (м. Харків, 2003–2006 рр.).

Публікації. Результати дисертації опубліковані у 18 наукових працях, серед яких 15 у фахових виданнях ВАК України.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, 4 розділів, висновку, додатків та списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації складає 234 сторінки, 50 ілюстрації на 34 окремих сторінках, 35 таблиць на 30 окремих сторінках, 3 додатка на 18 сторінках, 188 найменувань використаних літературних джерел на 19 сторінках.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

У **вступі** обґрунтована актуальність дослідження, сформульована мета і позначені основні задачі роботи, дана характеристика наукової новизни і практичної значущості отриманих результатів, приведені відомості про апробацію і практичну реалізацію основних результатів роботи.

У **першому розділі** проведений аналіз задач, пов'язаних з параметричним синтезом систем автоматичного керування.

Реакторна установка є частиною складного енергетичного об'єкту – енергоблоку атомних електростанцій з багатьма керованими величинами. Системи автоматичного керування реакторної установки об'єднують ряд локальних систем керування її елементами. Розглянуто як САК РУ, так і системи керування її найважливішими елементами – ядерним реактором та парогенератором.

Аналіз різних показників якості розглянутих систем керування визначив, що якнайповніше поставлені до систем керування вимоги дозволяють врахувати прямі показники якості (ППЯ) і інтегральні квадратичні оцінки (ІКО). Розглянуті можливості застосування ППЯ і ІКО як критеріїв якості САК РУ, що мають обмежену умовами стійкості область визначення.

Проаналізовані різні підходи і методи параметричного синтезу систем керування і обґрунтовані переваги використання для синтезу методів оптимізації. Розглянуті основні підходи до оптимізаційних задач з обмеженою областю визначення і проаналізовані можливості застосування для вирішення задач параметричного синтезу різних методів одновимірного пошуку і багатовимірної оптимізації. Розглянуті недоліки методів розв'язання задач умовної і багатокритеріальної оптимізації і відмічена ефективність заснованих на покроковому підході прямих методів векторної оптимізації та перспективність багатовимірних методів, заснованих на методах одновимірного пошуку.

В кінці розділу приведено обґрунтування вибору мети дисертаційної роботи і сформульовані задачі дослідження.

Другий розділ присвячений розробці і дослідженню методів синтезу систем автоматичного керування з одним змінним параметром на основі модифікації методів одновимірного пошуку.

Задачі параметричного синтезу САК зводяться до задач векторної оптимізації критеріїв якості – ІКО і ППЯ, які визначені тільки в області стійкості САК. На основі покрокового підходу для послідовного обліку обмежень області стійкості формуються векторні цільові функції критеріїв якості систем керування у вигляді двовимірної функції $F(x) = (F_1(x); F_2(x))$ вектора змінних параметрів $x \in R^p$, де p – вимірність простору, перша проекція функції визначає рівень обмеження, а друга проекція складається за принципом лексикографічної задачі оптимізації. Таким чином, для мінімізації ІКО формується векторна функція:

$$F(x) = \begin{cases} (0; P(x)), & P(x) > 0, \\ (k-1; -\rho_k(x)), & P(x) = 0 \wedge \rho_i(x) > 0 \wedge \rho_k(x) < 0, i = \overline{0, k-1}, k = \overline{2, n-1}, \\ (n-1; I(x)), & P(x) = 0 \wedge \rho_k(x) > 0, k = \overline{2, n-1}, \end{cases} \quad (1)$$

де $P(x)$ – штрафна функція необхідних умов стійкості; $\rho_k(x)$ – коефіцієнти стійкості Рауса-Гурвіця; n – порядок САК; $I(x)$ – функція ІКО. Проекції цієї функції: $F_1(x)$ – функція рівня (кількість виконаних обмежень), $F_2(x)$ – функція штрафу. ІКО дає єдиний числовий критерій якості, що характеризує швидкість загасання і перерегулювання перехідного процесу в сукупності, без визначення того і іншого окремо. Аналогічно визначена векторна цільова функція для ППЯ.

З метою оптимізації векторних цільових функцій одного змінного параметру з $p=1$ розглянуті і модифіковані найбільш ефективні з існуючих методів одновимірного пошуку – методи Свенна, адаптації кроку (АК), дихотомії (Д), ділення відрізка навпіл (Д2), Фібоначі (Ф), золотого перетину (ЗП), квадратичної (І2) і кубічної інтерполяції (І3). Для побудови методів векторної оптимізації, які розв’язують задачу параметричного синтезу систем автоматичного керування, введено дві операції із значеннями векторних функцій – порівняння і віднімання цих значень. Два значення $U = (U_1, U_2)$ і $V = (V_1, V_2)$ функції порівнюємо бінарною операцією «краще» \prec і віднімаємо бінарною операцією віднімання \div :

$$U \prec V = \begin{cases} 1, & U_1 > V_1 \vee U_1 = V_1 \wedge U_2 < V_2, \\ 0, & U_1 < V_1 \vee U_1 = V_1 \wedge U_2 \geq V_2, \end{cases} \quad U \div V = \begin{cases} V_1 - U_1, & U_1 \neq V_1, \\ U_2 - V_2, & U_1 = V_1. \end{cases} \quad (2)$$

Перша операція використовується всіма методами, а друга – методами інтерполяції та під час обчислення градієнта і гессіана у багатовимірних методах. По векторним модифікаціям цих методів розроблені їх алгоритми.

Алгоритм векторного методу адаптації кроку. Вхідні параметри: (u, F_u) – початкова точка пошуку, h – початковий крок пошуку, e – допустима погрішність. Вихідні параметри: (u, F_u) – оптимальна точка. **1.** Покласти $r=0$. **2.** Покласти $u = u + h$, $F_v = F(u)$. **3.** Якщо $F_v \prec F_u$, покласти $F_u = F_v$, інакше перейти до п. 6. **4.** Якщо $r \geq 0,5$, покласти $r = 2$, інакше покласти $r = 0,5$. **5.** Перейти до п. 8. **6.** Покласти $u = u - h$. **7.** Якщо $r = 2$, покласти $r = 0,25$, інакше покласти $r = -0,5$. **8.** Покласти $h = hr$. **9.** Якщо $|h| > e$, перейти до п. 2. **10.** Зупинитися. На кроці 3 використовується векторне порівняння (2).

Алгоритм функції $(a, b, c, F_a, F_b, F_c) = \text{metSI}(c, F_c, h)$ векторного методу Свенна. Вхідні параметри: (c, F_c) – початкова точка пошуку, h – початковий крок пошуку. Вихідні параметри: (a, F_a) – точка лівого кінця інтервалу, (b, F_b) – точка правого кінця інтервалу, (c, F_c) – внутрішня точка інтервалу. **1.** Обчислити $b = c + h$, $F_b = F(b)$. **2.** Якщо $\neg(F_b \prec F_a)$, перейти до п. 5. **3.** Покласти $a = c$, $F_a = F_c$, $c = b$, $F_c = F_b$, $h = h + h$, $b = b + h$, $F_b = F(b)$. **4.** Якщо $F_b \prec F_c$, перейти до п. 3, інакше перейти до п. 9. **5.** Покласти $h = -h$, $a = c + h$, $F_a = F(a)$. **6.** Якщо $\neg(F_a \prec F_c)$, перейти до п. 9. **7.** Покласти $b = c$, $F_b = F_c$, $c = a$, $F_c = F_a$, $h = h + h$, $a = a + h$, $F_a = F(a)$. **8.** Якщо $F_a \prec F_c$, перейти

до п. 7. **9.** Зупинитися. Векторний метод Свенна відрізняється від скалярного кроками 2, 4, 6 і 8, в яких звичайне скалярне порівняння $<$ замінено векторною операцією «краще» за формулою (2).

Алгоритм векторного методу золотого перетину. Вхідні параметри: a , b – кінці інтервалу невизначеності, h – початковий крок пошуку, e – допустима погрішність. Вихідні параметри: (u, F_u) – оптимальна точка. **1.** Обчислити $t = (\sqrt{5} - 1)/2$, $h = t(b - a)$, $u = b - h$, $F_u = F(u)$, $v = a + h$, $F_v = F(v)$. **2.** Якщо $F_u < F_v$, перейти до п. 3, інакше перейти до п. 5. **3.** Покласти $b = v$, $F_b = F_v$, $v = u$, $F_v = F_u$. **4.** Обчислити $h = u - a$, $u = b - h$, $F_u = F(u)$, перейти до п. 7. **5.** Покласти $a = u$, $F_a = F_u$, $u = v$, $F_u = F_v$. **6.** Обчислити $h = b - v$, $v = a + h$, $F_v = F(v)$. **7.** Якщо $|d| > e$, перейти до п. 2. **8.** Якщо $F_a < F_u$, покласти $u = a$, $F_u = F_a$. **9.** Якщо $F_b < F_u$, покласти $u = b$, $F_u = F_b$. **10.** Зупинитися. Векторне порівняння (2) на кроках 2, 8 і 9 – це головна відмінність векторного методу золотого перетину від скалярного.

Для дослідження надійності та ефективності розроблених алгоритмів векторних методів одновимірного пошуку створені тестові моделі систем керування і методика тестування алгоритмів. З цією метою розроблений генератор тестових задач САК різного порядку n для мінімізації ІКО і оптимізації ППЯ. На рис. 1а), б) приведені результати мінімізації ІКО складових векторної функції (1) і траєкторія пошуку векторним методом адаптації кроку. Початкова точка позначена кругом і знаходиться в ністійкій області, кінцева – ромбом. На рис. 1в) показані перехідні процеси цієї ж САК: тонкою лінією – в початковій точці, товстою – в оптимальній.

а) функція $F_1(x)$

б) функція $F_2(x)$

в) перехідні процеси

Рис. 1. Результати мінімізації ІКО САК $n = 10$, $p = 1$

Проведені результати обчислювальних експериментів на тестових системах керування дозволили порівняти ефективність методів одновимірного пошуку під час оптимізації векторних функцій, складених для параметричного синтезу САК з урахуванням обмеженості області визначення критеріїв. Найбільш ефективними методами одновимірного пошуку є метод адаптації кроку, метод ділення відрізка навпіл, метод золотого перетину (табл. 1). У таблиці приведена кількість обчислень векторної функції (1) мінімізації ІКО з припус-

тимую точністю 10^{-3} різними методами одновимірного пошуку.

Таблиця 1

Результати мінімізації ІКО векторними методами одновимірного пошуку.

n	Д2	Д	Ф	ЗП	І2	І3	АК	n	Д2	Д	Ф	ЗП	І2	І3	АК
3	12	15	13	13	16	10	8	25	27	32	-	25	76	20	19
5	13	17	13	13	24	13	9	30	33	27	19	23	15	23	24
10	14	16	11	11	7	7	12	35	35	-	-	32	56	30	23
15	20	25	13	13	33	14	11	40	32	-	20	31	37	28	25
20	23	26	19	19	16	19	17	41	33	-	19	31	24	-	30

У **третьому розділі** розробляються методи багатокритеріального параметричного синтезу систем автоматичного керування на основі розвитку багатовимірних методів оптимізації з використанням одновимірних методів.

Модифіковані найбільш ефективні з існуючих методів багатовимірного пошуку, які застосовують методи одновимірної оптимізації. Узагальнені поняття антиградієнта та гессіана для векторної функції. Для векторних методів першого порядку – найшвидкішого спуску, Полака-Ріб'єра (ПР), Флетчера-Рівса, а також методів змінної метрики Девідона-Флетчера-Пауелла і Бroyдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно (БФГШ) розроблений алгоритм векторного обчислення антиградієнта, а для векторного методу Ньютона-Рафсона (НР) другого порядку – алгоритм векторного обчислення антиградієнта і гессіана. Ці алгоритми засновані на скінченнорізницевиx формулах, у яких віднімання значень векторних функцій виконується за формулою (2), що забезпечує ефективний напрямок покращення значень векторної функції за антиградієнтом.

Алгоритм векторного методу обчислення антиградієнта і гессіана (функція $(g, H) = \text{agradHes}(x, F_x, h)$). Вхідні параметри: (x, F_x) – початкова точка, h – поточний крок пошуку. Вихідні параметри: g – антиградієнт, H – гессіан. **1.** Покласти $a = 1/(2\delta)$, $b = 1/\delta^2$, $y = x$, $z = x$, $g = x$, $n = \dim x$, $H = E$, $i = 1$. **2.** Обчислити $y_i = x_i + \delta$, $F_y = F(y)$, $z_i = x_i - \delta$, $g_i = (F_x \div F_y)a$. **3.** Обчислити $H_{ii} = ((F_y \div F_x) + (F_z \div F_x))b$. **4.** Покласти $f_i = F_y$, $y_i = x_i$, $z_i = x_i$, $i = i + 1$. **5.** Якщо $i < n$, перейти до п. 2. **6.** Покласти $i = 1$, $l = 0$. **7.** Обчислити $z_i = z_i + d$. **8.** Обчислити $j = l + i + 1$, $F_z = F(z)$, $H_{ij} = ((F_z \div f_i) + (F_x \div f_i))b$. **9.** Покласти $H_{ji} = H_{ij}$, $z_j = x_j$, $l = l + 1$. **10.** Якщо $j < n$, перейти до п. 8. **11.** Покласти $z_j = x_j$, $i = i + 1$. **12.** Якщо $i < n - 1$, перейти до п. 7. **13.** Зупинитися. На кроці 1 алгоритму параметр приросту незалежних змінних δ задається емпірично на підставі обчислювальних експериментів. Кроки 2, 3 і 8 виконують векторне віднімання за формулою (2).

Для вищенаведених методів і методів нульового порядку – Гаусса-Зейделя (ГЗ) і Пауелла розроблений узагальнений алгоритм методів одновимірної оптимізації у вигляді функції $(y, F_y, s) = \text{Search}(x, F_x, d, s, t)$. По векторним модифікаціям всіх вказаних методів складені їх алгоритми.

Алгоритм векторного методу Ньютона-Рафсона. Вхідні параметри: x

– початкова точка, h – крок пошуку, ε – допустима погрешність. Вихідні параметри: (x, F_x) – кінцева точка. **1.** Покласти $F_x = F(x)$, $s = 1$. **2.** Обчислити $(g, H) = \text{agradHes}(x, F_x, h)$. **3.** Розв’язати систему лінійних рівнянь $Hd = -g$. **4.** Обчислити $(y, F_y, s) = \text{Search}(x, F_x, d, s, t)$, $h = \|y - x\|$. **5.** Якщо $h > \varepsilon$, покласти $x = y$, $F_x = F_y$ і перейти до п. 2. **6.** Зупинитися.

Алгоритм векторного методу БФГШ. Вхідні параметри: x – початкова точка, h – поточний крок пошуку, ε – допустима погрешність. Вихідні параметри: (x, F_x) – кінцева точка. **1.** Покласти $F_x = F(x)$, $g_x = \text{agrad}(x, F_x, h)$, $n = \dim x$, $G = E$, $r = 1$, $d = g_x$. **2.** Обчислити $(y, F_y, r) = \text{Search}(x, F_x, d, r, t)$, $s = y - x$, $h = \|s\|$. **3.** Обчислити $g_y = \text{agrad}(y, F_y, h)$, $p = g_x - g_y$. **4.** Обчислити $v = Gp$, $V = 1 + (Gpp^T)/(s^T p)$, $S = ss^T/s^T p$, $P = (sG^T p^T + Gps^T)/s^T p$, $G = G + VS - P$. **5.** Обчислити $d = -Gg_y$. **6.** Покласти $x = y$, $F_x = F_y$, $g_x = g_y$. **7.** Якщо $h > \varepsilon$, перейти до п. 2. **8.** Зупинитися. На кроках 1 і 3 обчислюється узагальнений антиградієнт.

Розроблені алгоритми векторних методів багатовимірного пошуку досліджені на задачах мінімізації ІКО систем керування різного порядку n з метою аналізу надійності і ефективності. Процес мінімізації ІКО векторним методом БФГШ при $n = 6$ ілюструють рис. 2а), б), на яких показані графіки проєкцій векторної цільової функції (1) і кращі точки пошуку мінімуму ІКО. На рис. 2в) показані перехідні процеси цієї ж САК в початковій і оптимальній точках.

а) функція $F_1(x)$ б) функція $F_2(x)$ в) перехідні процеси

Рис. 2. Результати мінімізації ІКО САК $n = 6$, $p = 2$

Обчислювальні експерименти на тестових задачах дозволили порівняти ефективність векторних методів багатовимірного пошуку під час параметричного синтезу САК різного порядку. У табл. 2 приведена кількість обчислень векторної функції (1) мінімізації ІКО з припустимою точністю 10^{-3} кращими методами різних типів з адаптацією кроку в залежності від кількості змінних параметрів $n - 1$. Також проведено дослідження методів синтезу за ППЯ.

Результати мінімізації ІКО методами багатовимірного пошуку

n	ПР	БФГШ	НР	ГЗ	n	ПР	БФГШ	НР	ГЗ
5	169	158	114	183	11	11466	2921	15178	8077
6	336	304	184	300	12	23812	3911	25353	15582
7	647	555	295	629	13	56236	8269	59675	29512
8	1440	840	406	1148	14	—	19632	96843	56949
9	3430	1345	708	2237	15	—	27298	—	—
10	6741	1955	1976	4261	16	—	99080	—	—

Четвертий розділ присвячений багатокритеріальному параметричному синтезу систем автоматичного керування реакторної установки АЕС. Принципова схема для моделювання САК реакторної установки представлена на рис. 3 і включає ядерний реактор (ЯР), регулятор нейтронної потужності (РНП), привід поглинаючого стрижня (ППС), регулятор теплової потужності (РТП), головний циркуляційний насос (ГЦН), регулятор потужності теплоносія (РПТ), парогенератор (ПГ), регулятор рівня (РР), регулюючий живильний клапан (РЖК), головний паровий колектор (ГПК) регулятор продуктивності (РП), живильний турбонасос (ЖТН), підігрівач високого тиску (ПВТ), циліндр високого тиску (ЦВТ), сепаратор (С), регулюючий клапан подачі пари (РКП), регулюючий клапан турбіни (РКТ), слідкуючий привід (СП), трубопроводи. Для досягнення поставленої мети сформовані допущення з математичного моделювання реакторної установки ВВЕР-1000. Із загальної САК РУ виділені локальні системи: система автоматичного керування тепловою потужністю реактора і система керування продуктивністю парогенератора, від показників яких істотно залежить динаміка установки в перехідних режимах.

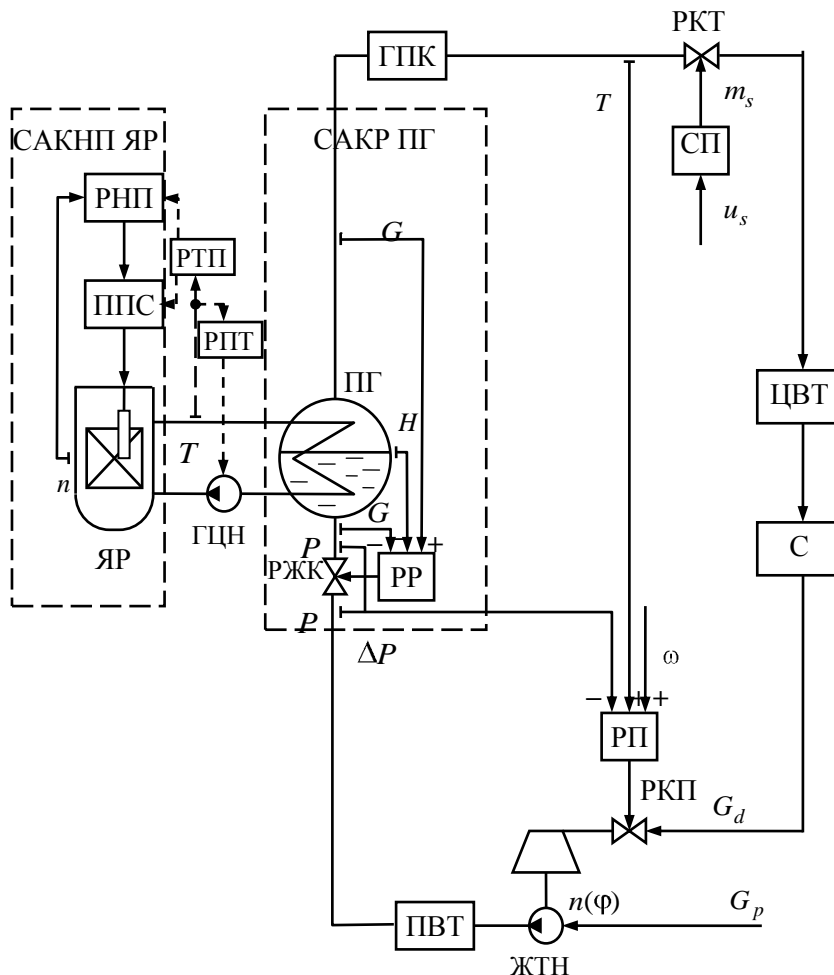


Рис. 3. Принципова схема систем керування

тужністю реактора і система керування продуктивністю парогенератора, від показників яких істотно залежить динаміка установки в перехідних режимах.

Для синтезу САК реакторної установки розроблені математичні моделі цих систем. На основі системи автоматичного керування нейтронною потужністю ядерного реактора (САКНП ЯР) ВВЕР-1000 розроблені математичні моделі САК тепловою потужністю реактора з різними регуляторами, призначені для параметричного синтезу:

$$\frac{dX_H}{dt} = A_H X_H + B_H q_{rs}, \quad q_r = C_H X_H. \quad (3)$$

Для ПІ регулятора

$$A_H = \begin{pmatrix} \gamma_n & \gamma_I & \gamma_{II} & \gamma_u & 0 & \gamma_r & \lambda_n & 0 & 0 \\ \lambda_I & -\lambda_I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_{II} & 0 & -\lambda_{II} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_{un} & 0 & 0 & a_{uu} & a_{uz} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{zu} & a_{zz} & a_{zr} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{rz} & a_{rr} & 0 & 0 & 0 \\ -b_{du} K_N & 0 & 0 & 0 & 0 & -K_{HP} K_N k_r b_{du} & a_{dd} & b_{du} & b_{du} K_N \\ -\lambda_N & 0 & 0 & 0 & 0 & -K_{HP} k_r \lambda_N & 0 & 0 & \lambda_N \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_r \lambda_{HI} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

$$B_H = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ K_N K_{HP} b_{du} \ K_{HP} \lambda_N \ \lambda_{HI})^T, \quad (5)$$

$$X_H = (v \ \xi_I \ \xi_{II} \ \theta_u \ \theta_z \ \theta_r \ \rho_d \ u_N \ u_{HI})^T, \quad C_H = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ k_r \ 0 \ 0 \ 0), \quad (6)$$

де $\lambda_I, \lambda_{II}, \lambda_n$ – постійні радіоактивного розпаду; γ_I, γ_{II} – відносні долі двох груп запізнілих нейтронів; γ_n – коефіцієнт лінеаризації за потужністю; γ_u, γ_r – коефіцієнти реактивності; $b_{un}, a_{uu}, a_{uz}, a_{zu}, a_{zr}, a_{rz}, a_{rr}$ – коефіцієнти матриці реальних значень параметрів реактора, отримані на підставі теорії термодинаміки; a_{dd}, b_{du} – коефіцієнти ППС; v – відносна координата нейтронної потужності; ξ_I, ξ_{II} – відносні координати концентрацій двох груп запізнілих нейтронів; $\theta_u, \theta_r, \theta_z$ – відносні координати температур палива, теплоносія, оболонки твела; ρ_d – реактивність за переміщенням ППС; $u_N, u_{HI}, K_N, K_{HP}, \lambda_N, \lambda_{HI}$ – інтегральні складові і параметри ПІ регуляторів САК нейтронною і тепловою потужностей реактора; k_r – коефіцієнт переходу від температури до теплової потужності; q_r і q_{rs} – тепла потужність та її уставка.

Розв'язані задачі параметричного синтезу САК тепловою потужністю, знайдені оптимальні значення параметрів різних регуляторів систем. Якнайкращий з розглянутих оптимальний ПІ регулятор має параметри: $K_{HP} = 0,62$, $\lambda_{HI} = 0,059$. Процес мінімізації ІКО векторним методом Ньютона-Рафсона САК тепловою потужністю реактора з ПІ регулятором ілюструють рис. 4а), б), на яких показані графіки проекцій векторної цільової функції (1) і траєкторія пошуку мінімуму ІКО. На рис. 4в) показані перехідні процеси цієї ж САК в початковій і кінцевій оптимальній точках.

а) функція рівня б) функція штрафу в) перехідні процеси
Рис. 4. Результати мінімізації ІКО САК тепловою потужністю реактора

Розроблені математичні моделі систем автоматичного керування продуктивністю парогенератора ПГВ-1000 на основі САК рівнем парогенератора (САКР ПГ) з різними регуляторами у відносних координатах стану:

$$\frac{dX_C}{dt} = A_C X_C + B_{C\phi} \phi_s + B_{Cq} q_s + B_{Cu} u_s, \quad g_w = C_{Cg} X_C. \quad (7)$$

Для ПІ регулятора:

$$A_C = \begin{pmatrix} a_{tt} & a_{tm} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{mt} & a_{mm} & 0 & a_{mp} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{wm} & 0 & a_{wp} & 0 & 0 & a_{wk} & 0 & a_{wd} & 0 & b_{wb} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{pm} & 0 & a_{pp} & 0 & 0 & a_{pk} & 0 & a_{pd} & 0 & b_{pb} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{cm} & 0 & a_{cp} & 0 & a_{ca} & a_{ck} & 0 & a_{cd} & 0 & b_{cb} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{am} & a_{aw} & a_{ap} & a_{ac} & a_{aa} & a_{ak} & 0 & a_{ad} & 0 & b_{ab} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{kp} & 0 & 0 & a_{kk} & a_{ks} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ = & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{ss} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\beta_{wp} b_{vu} K_L - b_{vu} K_L & 0 & -\alpha_{sk} b_{vu} K_L & 0 & a_{dd} - b_{vu} K_L b_{vu} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\beta_{wp} \lambda_L & -\lambda_L & 0 & -\alpha_{sk} \lambda_L & 0 & -\lambda_L & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\alpha_{ws} a_w & 0 & 0 & 0 & 0 & -a_w & 0 & -k_{pw} a_w b_w a_w & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_p & b_p & b_v & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_a & 0 & b_a \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_{vk} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_v & 0 \\ k_t \lambda_{CI} & 0 & 0 & k_s \lambda_{CI} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_w \lambda_{CI} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$X_C = \begin{bmatrix} \theta_t & \theta_m & \xi_w & \pi_s & \xi_c & g_a & \pi_k & \mu_s & \mu_w & u_L & \pi_w & \pi_p & \mu_a & \pi_v & u_{CI} \end{bmatrix}^T, \quad (9)$$

$$B_{C\phi} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} K_{CP} b_a \begin{bmatrix} 0 & \lambda_{CI} \end{bmatrix}^T, \quad B_{Cq} = \begin{bmatrix} b_{tq} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T, \quad (10)$$

$$B_{Cu} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T, \quad C_{Cg} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \alpha_{ws} & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \alpha_{wp} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

де ϕ_s – значення уставки частоти обертання ротора приводної турбіни, q_s – ко-

ордината теплової потужності, u_s – збурююча дія; $a_{tt}, a_{tm}, a_{mt}, a_{mm}, a_{mp}, a_{wm}, a_{wp}, a_{wk}, a_{wd}, a_{pm}, a_{pp}, a_{pk}, a_{wd}, a_{cm}, a_{cp}, a_{ca}, a_{ck}, a_{cd}, a_{am}, a_{aw}, a_{ap}, a_{ac}, a_{aa}, a_{ak}, a_{ad}, a_{kp}, a_{kk}, a_{ks}, a_{ss}, a_{dd}, b_{vu}, b_{wb}, b_{pb}, b_{cb}, b_{ab}, b_{tq}, b_{ss}$ – коефіцієнти матриці реальних значень моделі парогенератора, отримані на підставі теорії термодинаміки; β_{wp} – коефіцієнт нахилу статичної характеристики регулюючого живильного клапана; k_w, k_s – коефіцієнти лінеаризації тиску; $\alpha_{sk}, \alpha_{ws}, \alpha_{wp}$ – коефіцієнти лінеаризації витрати води; k_{pp}, k_{pw} – коефіцієнти лінеаризації ПВТ; k_t – коефіцієнт переходу від температури до теплової потужності; θ_t, θ_m – координати температур теплоносія і металевої трубки; ξ_w, ξ_c – координати води і рівня; g_a, g_w – координати витрати пари над дзеркалом випаровування і води; $\pi_k, \pi_s, \pi_w, \pi_p, \pi_v$ – значення тиску в ГПК, пара в парогенераторі, води в ПВТ, ЖТН, ЦВТ; μ_s, μ_w, μ_a – координати РКТ, живильної води в ПГ, виконавчого механізму; $a_w, b_w, a_p, b_p, a_a, b_a, a_v, b_v, b_{vk}$ – коефіцієнти при координатах ПВТ, ЖТН, виконавчого механізму, ЦВТ; u_L, u_{CI} – інтегральна складова ПІ регулятора САК рівнем і продуктивністю ПГ; $K_L, \lambda_L, K_{CP}, \lambda_{CI}$ – параметри ПІ регулятора САК рівнем і продуктивністю. Коефіцієнти моделі (8)–(11) уточнені ідентифікацією методом векторної оптимізації за експериментальними перехідними процесами.

Розв’язані задачі синтезу систем керування продуктивністю парогенератора з різними регуляторами і показана найбільша ефективність ПІ регулятора з оптимальними значеннями параметрів: $K_{CP} = 16$, $\lambda_{CI} = 0,37$. Процес оптимізації ППЯ векторним методом Нелдера-Міда системи керування з ПІ регулятором ілюструють рис. 5а), б), на яких показані графіки проєкцій векторної функції і траєкторія оптимізації показників якості. На рис. 5в) приведені перехідні процеси цієї ж САК в початковій і оптимальній точках.

а) функція рівня

б) функція штрафу

в) перехідні процеси

Рис. 5. Результати мінімізації ППЯ САК продуктивністю парогенератора
На основі САК (3)–(6) і (7)–(11) розроблені математичні моделі САК по-

тужністю теплоносія реакторної установки з різними регуляторами. Модель з ПІ регулятором має вигляд у відносних координатах:

$$\frac{dX_R}{dt} = A_R X_R + B_R u, \quad q_t = C_R X_R, \quad (12)$$

$$A_R = \begin{pmatrix} A_H & 0 & 0 & 0 & B_H k_{pr} & 0 & 0 & 0 \\ C_H & a_{T2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B_C k_{ps} & A_C & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_C & a_{T3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{T1} & b_{T1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_{T3m} & 0 & a_m & b_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_e & b_e \\ C_r & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad X_R = \begin{pmatrix} X_H \\ \pi_{T2} \\ X_C \\ \pi_{T3} \\ \pi_{T1} \\ \pi_m \\ \mu_e \\ u_{RI} \end{pmatrix}, \quad (13)$$

$$B_R = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ K_{RP} b_e \ \lambda_{RI})^T, \quad C_R = (C_H \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0), \quad (14)$$

де u – вхідна дія; $C_H = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ b_{T2} k_{sp} \ 0 \ 0 \ 0)$; k_{pr} , k_{ps} – коефіцієнти переходу від тиску до потужності; $C_C = (b_{T3} k_{sp} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$, k_{sp} – коефіцієнт переходу від температури до тиску; π_{T1} , π_{T2} , π_{T3} – значення тиску у трубопроводах; π_m – значення тиску в ГЦН; μ_e – координата виконавчого механізму; a_{T1} , b_{T2} , a_{T2} , b_{T2} , a_{T3} , b_{T3} , a_m , b_m , a_e , b_e – коефіцієнти при координатах трубопроводів, ГЦН, виконавчого механізму, ЦВТ; u_{RI} – інтегральна складова ПІ регулятора; K_{RP} , λ_{RI} – змінні параметри ПІ регулятора; $C_r = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -\lambda_{RI} k_r \ 0 \ 0 \ 0)$.

Проведено багатокритеріальний параметричний синтез САК потужністю теплоносія реакторної установки (12)–(14). Процес мінімізації ІКО векторним методом Нелдера-Міда САК з ПІ регулятором показано на рис. 6а), б). На рис. 6в) показані перехідні процеси системи в початковій і кінцевій точках.

а) функція рівня б) функція штрафу в) перехідні процеси
Рис. 6. Результати мінімізації ІКО САК потужністю реакторної установки
Знайдено параметри оптимального ПІ регулятора системи: $K_{RP} = 0,077$,

$\lambda_{RI} = 0,0019$, що забезпечує монотонний перехідний процес з мінімальним часом регулювання $\tau = 236$ с.

У **додатках** наводяться допоміжні обчислення значень параметрів моделей реакторної установки, експериментальні характеристики парогенератора ПГВ-1000 і матеріали щодо впровадження результатів дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню науково-практичної задачі багатокритеріального параметричного синтезу систем автоматичного керування реакторної установки атомної електростанції на основі показників якості систем керування і чисельних методів оптимізації. Основні результати роботи полягають в наступному:

1. Проведено аналіз методів синтезу систем автоматичного керування реакторної установки і показані широкі можливості використання чисельних методів для оптимізації показників якості, що дозволяють суттєво підвищити рівень автоматизації проектування та вдосконалення систем керування.

2. Задача багатокритеріального параметричного синтезу систем автоматичного керування зведена до задачі векторної оптимізації показників якості з обмеженою областю визначення за допомогою формування векторних цільових функцій показників та операцій порівняння і віднімання їх значень, що дозволило розробити методи і алгоритми одновимірного пошуку для синтезу систем керування з одним змінним параметром. Дослідження розроблених методів одновимірного пошуку на тестових моделях систем керування підтвердило ефективність і надійність даного підходу.

3. Розроблені методи багатокритеріального параметричного синтезу систем керування шляхом побудови векторних багатовимірних методів та алгоритмів оптимізації показників якості, що використовують одновимірний пошук. Проведено дослідження ефективності цих методів при мінімізації інтегральних квадратичних оцінок та оптимізації прямих критеріїв якості для систем керування різного порядку з різним числом обмежень області стійкості та змінних параметрів. Векторні методи дозволили послідовно розв'язати три основні задачі проектування систем керування: перейти до області стійкості, утримати процес синтеза в цій області і знайти оптимум. Виявлено, що збільшення числа змінних впливає сильніше на кількість обчислень функції, чим збільшення числа обмежень.

4. Отримані математичні моделі систем автоматичного керування тепловою потужністю реактора ВВЕР-1000 в просторі станів з відносними змінними та з різними регуляторами, обчислені значення постійних параметрів моделей. Багатокритеріальний параметричний синтез систем керування тепловою потужністю зведено до оптимізації різними методами векторних функцій, які обчислюються за розробленими моделями та враховують обмеження області стійкості і вимоги оптимальності показників якості. Якнайкращі значення показників якості систем керування тепловою потужністю забезпечуються застосуванням

пропорційно-інтегрального регулятора.

5. Для систем автоматичного керування продуктивністю живильним турбонасосом парогенератора ПГВ-1000 з різними регуляторами побудовані математичні моделі в просторі станів з відносними змінними і обчислені значення постійних параметрів моделей. Параметри моделей ідентифіковані за експериментальними даними шляхом оптимізації векторних функцій, що враховують вимоги стійкості та мінімального відхилення від експериментальних даних. Параметричний синтез систем керування продуктивністю, який проводився різними векторними методами оптимізації, дозволив істотно поліпшити основні процеси керування. Найменше значення часу регулювання має система керування з пропорційно-інтегральним регулятором.

6. На підставі диференціальних рівнянь системи керування тепловою потужністю реактора і системи керування продуктивністю парогенератора розроблені математичні моделі систем автоматичного керування потужністю теплоносія реакторної установки. Представлені моделі систем з різними законами керування призначені для розв'язання задач параметричного синтезу систем. Проведений багатокритеріальний параметричний синтез систем керування потужністю реакторної установки ефективними векторними методами оптимізації дозволив обчислити оптимальні значення параметрів регуляторів. Результати цього синтезу показують, що найбільш ефективним регулятором систем автоматичного керування потужністю теплоносія є оптимальний за якістю перехідних процесів пропорційно-інтегральний закон керування.

7. Результати впроваджені на ВАТ «Турбоатом», ДП ХПЗ ім. Т.Г. Шевченка та навчальному процесі кафедри системного аналізу і управління НТУ «ХП».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

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

Здобувач модифікував методи та розробив алгоритми розв'язання задач одновимірної мінімізації функцій з обмеженою областю визначення.

2. Северин В. П. Градиентные методы оптимизации критериев качества с ограниченной областью определения / В. П. Северин, Е. Н. Никулина // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХП», 2002. – Т. 6, № 9. – С. 42-46.

Здобувачем реалізовані алгоритми градієнтних методів оптимізації систем керування за критеріями якості з обмеженою областю визначення.

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

Здобувач отримав результати дослідження ефективності градієнтних ме-

тодів оптимізації, заснованих на покроковому підході.

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

Здобувачем модифікована векторна модель задачі оптимізації з урахуванням особливостей застосування прямих критеріїв якості.

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

Здобувач верифікував алгоритми обчислення прямих критеріїв якості.

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

Здобувачем отримані результати дослідження ефективності алгоритмів обчислення прямих критеріїв якості в покроковому підході.

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

Здобувачем досліджена ефективність методів матричної експоненти і її інтегралу в методиці обчислення часу регулювання систем керування.

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

Здобувач протестував алгоритми обчислення прямих показників якості.

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

Здобувачем проведений аналіз алгоритму обчислення коефіцієнтів Рауса-Гурвіця для параметричного синтезу систем керування.

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

Здобувачем розроблені програми векторних градієнтних методів оптимізації для параметричного синтезу систем керування.

11. Северин В. П. Лаборатория методов оптимизации сложных систем / В. П. Северин, Е. Н. Никулина // Високі технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ», 2005. – № 19. – С. 115-120.

Здобувач провів верифікацію програм одновимірних і багатовимірних методів оптимізації для синтезу складних систем автоматичного керування.

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

Здобувачем показана ефективність використання векторних цільових функцій для оптимізації систем автоматичного керування.

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

Здобувачем запропоновані програми методів одновимірної і багатовимірної векторної оптимізації для синтезу автоматизованих систем.

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

Здобувач обчислив значення параметрів моделі парогенератора.

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

Здобувачем розроблені програми для оптимізації показників якості систем автоматичного керування реакторної установки.

16. Северин В. П. Векторная оптимизация систем автоматического регулирования атомного энергоблока / В. П. Северин, Е. Н. Никулина // Материалы 10-й Междунар. конф. по автоматическому управлению «Автоматика-2003». – Севастополь: СевНТУ, 2003. – Т. 1. – С. 91-93.

Здобувачем сформована тривимірна векторна штрафна функція прямих показників якості систем автоматичного керування реакторної установки.

17. Северин В. П. Оптимизация показателей качества переходных процессов в системах автоматического регулирования / В. П. Северин, Е. Н. Никулина // Материалы 12-й Междунар. конф. по автоматическому управлению «Автоматика-2005». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2005. – Т. 1. – С. 90-91.

Здобувач навів експериментальні дані з обчислення й оптимізації показників якості перехідних процесів в системах автоматичного керування.

18. Северин В. П. Оптимизация динамических показателей системы регулирования атомного реактора ВВЭР-1000 / В. П. Северин, Е. Н. Никулина // Материалы XIII Міжнар. конф. з автоматичного управління «Автоматика-2006». – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – С. 115.

Здобувачем на основі моделей реактора проведений аналіз показників якості його динамічних характеристик.

АНОТАЦІЇ

Нікуліна О. М. *Багатокритеріальний параметричний синтез систем автоматичного керування реакторної установки АЕС. – Рукопис.*

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.13.07 – автоматизація процесів керування. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2008.

Дисертація присвячена параметричному синтезу систем автоматичного керування (САК) реакторної установки, що включає ядерний реактор ВВЕР-1000 і парогенератор ПГВ-1000, за багатьма критеріями якості САК. Задачі параметричного синтезу САК зведені до задач векторної оптимізації критеріїв якості – інтегральних квадратичних оцінок і прямих показників якості, для яких розглянуті способи формування векторних цільових функцій, що враховують обмеженість області визначення критеріїв. Розроблено методи й алгоритми одновимірної і багатовимірної векторної оптимізації критеріїв якості САК.

Побудовано математичні моделі САК теплової потужності реактора, САК продуктивності парогенератора, САК потужності теплоносія реакторної установки в просторі станів з різними типами регуляторів, призначені для параметричного синтезу САК, і обчислені значення їх постійних параметрів. Вирішено задачу ідентифікації параметрів моделі САК продуктивності парогенератора за експериментальними даними. Розв'язання задач багатокритеріального параметричного синтезу САК реакторної установки проведено ефективними методами векторної оптимізації. Найкращі значення показників якості САК реакторної установки забезпечуються застосуванням пропорційно-інтегральних регуляторів з оптимальними значеннями їх параметрів.

Ключові слова: реакторна установка, система автоматичного керування, показники якості, параметричний синтез, методи векторної оптимізації.

Никулина Е.Н. *Многокритериальный параметрический синтез систем автоматического управления реакторной установкой АЭС. – Рукопись.*

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 – автоматизация процессов управления. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2008.

Диссертация посвящена параметрическому синтезу систем автоматического управления (САУ) реакторной установки (РУ), включающей ядерный реактор ВВЭР-1000 и парогенератор ПГВ-1000, по многим критериям качества системы. Задачи параметрического синтеза систем управления сведены к задачам векторной оптимизации критериев качества. Для оптимизации показателей качества систем управления – интегральных квадратичных оценок (ИКО) и прямых показателей качества (ППК) рассмотрены способы формирования векторных целевых функций, учитывающих ограниченность область определения показателей.

Разработаны и проведен сравнительный анализ методов синтеза систем управления с одним переменным параметром на основе модификации одно-

мерного поиска. Разработаны и исследованы методы многокритериального параметрического синтеза на основе развития многомерные методов оптимизации, использующие методы одномерного поиска. Применение методов векторной оптимизации позволяет в едином вычислительном процессе решить сразу три задачи: перейти из любой начальной точки поиска в область устойчивости, удержать процесс оптимизации в этой области и найти оптимум показателей качества. Проведены вычислительные эксперименты при различном числе варьируемых параметров. Увеличение числа переменных влияет сильнее на количество вычислений функции, чем увеличение числа ограничений.

На основе системы автоматического управления нейтронной мощностью ядерного реактора ВВЭР-1000 получена математическая модель система управления тепловой мощностью реактора в пространстве состояний с относительными переменными и вычислены значения ее постоянных параметров. Разработаны модели САУ тепловой мощностью с различными регуляторами, предназначенные для многокритериального параметрического синтеза систем. Задача параметрического синтеза систем тепловой мощностью проводилось различными методами векторной оптимизации. Наилучшие значения показателей качества САУ тепловой мощностью обеспечиваются применением пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора. Разработана математическая модель система автоматического управления производительностью парогенератора ПГВ-1000 в пространстве состояний на основе системы управления уровнем парогенератора и вычислены значения ее постоянных параметров. Разработаны модели САУ производительностью парогенератора с различными регуляторами, предназначенные для параметрического синтеза. Задача идентификации параметров модели систем управления производительностью парогенератора по экспериментальным данным процессов сведена к задаче оптимизации векторной целевой функции, учитывающей ограничения идентифицируемых параметров, ограничения устойчивости системы и функцию невязки экспериментальных данных и процессов моделей, вычислены значения параметров. Наименьшее время управления имеет САУ производительностью парогенератора с ПИ регулятором. На основе систем управления тепловой мощностью реактора и производительностью парогенератора разработана математическая модель системы управления мощностью теплоносителя реакторной установки. Представлены модели САУ мощностью теплоносителя реакторной установки с различными регуляторами. Проведен многокритериальный параметрический синтез САУ мощностью теплоносителя реакторной установки методами векторной оптимизации, позволивший вычислить оптимальные параметры регуляторов. Результаты этого синтеза показывают, что наиболее эффективным регулятором системы автоматического управления мощностью теплоносителя является оптимальный по качеству переходных процессов ПИ регулятор.

Ключевые слова: реакторная установка, система автоматического управления, показатели качества, параметрический синтез, методы векторной оптимизации.

Nikulina E.N. *Multicriterion Parametric Synthesis of Reactor Plant Automatic Control System of AES. – Manuscript.*

Thesis for a Candidate Degree in Technical Sciences, Speciality 05.13.07 – Automation of processes control. – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, 2008.

The thesis is devoted to the parametric synthesis of reactor plant automatic control system (ACS), which includes nuclear reactor WWER-1000 and steam generator SGW-1000 regarding a number of automatic control system quality criteria. Methods of vector efficiency functions forming taking into account limited applicable domain of the criteria have been considered to optimize automatic control system quality criteria – integral quadratic estimators and direct quality indexes. The tasks of the parametric synthesis of automatic control systems are reduced to the tasks of quality indexes vector optimization. The methods and algorithms of unidimensional and multidimensional vector optimization of ACS quality criteria have been worked out.

There have been constructed mathematical ACS models of thermo power of the reactor, ACS of the steam generator output, ACS of the heat carrier power of the reactor plant in the state space with different types of regulators intended for parametric control system synthesis and also their constant parameters have been calculated. The task of identification of ACS models parameters of the steam generator output according to the results of the experiment has been accomplished. The tasks of the parametric ACS synthesis are reduced to the optimization of vector efficiency functions. The tasks of multicriterion parametric control system synthesis of the reactor plant have been accomplished using effective methods of vector optimization. The best indexes of reactor plant ACS are provided by means of using proportional integral regulators with the optimal values of their parameters.

Key Words: reactor plant, automatic control system, quality indexes, parametric synthesis, vector optimization methods.