

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

НІКУЛІНА ОЛЕНА МИКОЛАЇВНА



УДК 004.9+685.9:620.9

**МЕТОДИ, МОДЕЛІ ТА ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ОПТИМІЗАЦІЇ
УПРАВЛІННЯ СКЛАДНИМИ ДИНАМІЧНИМИ СИСТЕМАМИ
(НА ПРИКЛАДІ ЕНЕРГОБЛОКУ АЕС)**

Спеціальність 05.13.06 – інформаційні технології

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі радіоелектроніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант

доктор технічних наук, професор
Северин Валерій Петрович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
професор кафедри системного аналізу та
інформаційно-аналітичних технологій.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Малахов Євгеній Валерійович,
Одеський національний університет
імені І. І. Мечникова, м. Одеса,
завідувач кафедри математичного
забезпечення комп'ютерних систем;

доктор технічних наук, професор
Нефьодов Леонід Іванович,
Харківський національний автомобільно-
дорожній університет, м. Харків,
завідувач кафедри автоматизації та
комп'ютерно-інтегрованих технологій;

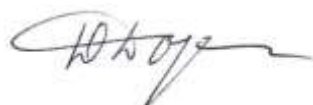
доктор технічних наук, професор
Удовенко Сергій Григорович,
Харківський національний економічний
університет імені С. Кузнеця, м. Харків,
завідувач кафедри інформатики та
комп'ютерної техніки.

Захист відбудеться 9 квітня 2020 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, вул. Кирпичова, 2.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

Автореферат розісланий 6 березня 2020 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Юрій ДОРОФЄЄВ

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Енергетичні установки великої потужності, літальні та космічні апарати, транспортні системи, потужні радіоелектронні прилади – все це складні динамічні системи (СДС), управління якими вимагає використання інформаційних технологій для створення або удосконалення спеціалізованих інформаційних управляючих систем (ІУС). Математичні моделі ІУС для складних динамічних систем характеризуються великим обсягом необхідної для їх описання інформації, високим порядком і великою кількістю параметрів та нелінійностей. Типовим прикладом ІУС складної динамічної системи є ІУС енергоблоку АЕС, що складається з багатьох локальних ІУС та потребує модернізації для експлуатації в нових умовах підвищення якості електричної енергії, що ускладнюється внаслідок гострої нагальної проблеми забезпечення маневреності енергоблоку. При модернізації ІУС енергоблоків АЕС необхідно підвищувати їх безпеку і надійність, покращувати їх маневрені характеристики, показники стійкості та якості. Аналогічні вимоги виникають і для ІУС багатьох інших складних динамічних систем у різних технічних галузях. У зв'язку з цим виникає необхідність у розробці інформаційної технології оптимізації управління складними динамічними системами.

Однією з основних інженерних проблем створення та вдосконалення ІУС складних динамічних систем є проблема оптимізації їх показників якості, особливості якої визначають велика кількість конструктивних параметрів, складність формалізації і визначення показників якості, суперечність вимог, що пред'являються до них, високий порядок моделей систем. Моделювання ІУС складних динамічних систем пов'язане з ідентифікацією структури та багатьох параметрів моделей, яка теж можлива тільки з використанням методів оптимізації. Традиційні інформаційні технології розрахунку ІУС зазвичай засновані на істотному спрощенні моделей та застосуванні наближених непрямих скалярних критеріїв якості. Найбільшим недоліком у розрахунках ІУС є те, що в цій галузі мало застосовуються моделі та методи оптимізації.

Таким чином, необхідність в розробці методів, моделей та інформаційної технології оптимізації управління складними динамічними системами для підвищення надійності, точності та якості автоматизації управління різними складними динамічними системами на прикладі оптимізації систем управління енергоблоку АЕС з реактором ВВЕР-1000 є актуальною науково-прикладною проблемою і визначає актуальність дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, представлені в роботі, виконувалися відповідно до пріоритетного напрямку розвитку науки і техніки України у рамках держбюджетних науково-дослідних робіт МОН України за темами: «Розвиток теорії та методів синтезу децентралізованого робастного керування розподіленими мережами поставок в умовах невизначеності» (№ ДР 0111U002285) та «Моделювання динамічних процесів в середній та зовнішній іоносфері в період аномального 24-го циклу сонячної активності» (№ ДР 0115U001180), де здобувач була виконавцем. У рамках ініціативних науково-дослідних робіт МОН України за темами «Розроб-

ка методів і алгоритмів багатоцільової оптимізації радіоелектронних та автоматичних систем» (№ ДР 0118U002008), де здобувач була керівником, «Розробка математичних моделей систем автоматичного управління енергоблоку АЕС для аналізу маневреності енергоблоку» (№ ДР 0118U002009) та «Розвиток методів багатокритеріального аналізу та синтезу систем автоматичного керування енергетичними процесами» (№ ДР 0118U002010), де здобувач була відповідальним виконавцем. У рамках гранту Президента України для підтримки наукових досліджень молодих вчених на 2017 р. за договором № Ф70/111-2017 «Прикладні рішення комплексного активного впливу на втрати електроенергії та її якості у розподільчих електромережах України» та у рамках договору з науководослідної роботи з ТОВ «НВП Моноліт Енерго» «Аналіз стійкості контурів керування і регулювання з програмно-технічними комплексами на базі технічних засобів автоматизації М2002М», де здобувач була відповідальним виконавцем.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка й обґрунтування методів, моделей та інформаційної технології оптимізації управління складними динамічними системами та їх дослідження на прикладі ІУС енергоблоку АЕС, що дозволить підвищити ступінь наукової обґрунтованості технічних проєктів зі створення та вдосконалення ІУС складних динамічних систем. Для досягнення наміченої мети поставлено задачі.

1. Провести аналіз сучасних інформаційних технологій управління складними динамічними системами, обґрунтувати вибір основних напрямів дисертаційного дослідження.

2. Розробити наукові та методологічні основи створення та застосування інформаційної технології для управління складними динамічними системами.

3. Розробити моделі для автоматизації управління енергоблоком АЕС з урахуванням його багаторівневої структури та створити загальні моделі складних динамічних систем для інформаційної технології оптимізації управління.

4. Удосконалити методи аналізу математичних моделей складних динамічних систем та виконати аналіз процесів в нелінійних моделях основних елементів енергоблоку АЕС.

5. Узагальнити моделі інформаційно-управляючих систем та побудувати моделі для оцінювання якості та підвищення функціональної безпеки енергоблоку АЕС для створення гарантоздатних автоматизованих систем управління.

6. Розробити критерії оцінювання якості функціональних моделей складних динамічних систем та виконати ідентифікацію параметрів моделей за експериментальними процесами в елементах енергоблоку АЕС.

7. Розробити методи обчислення показників якості динамічних систем та використати інформаційну технологію оптимізації управління складними динамічними системами для оптимізації управління енергоблоком АЕС.

Об'єктом дослідження є процеси управління складними динамічними системами.

Предмет дослідження складають методи, моделі та інформаційна технологія оптимізації управління складними динамічними системами.

Методи дослідження. Загальна теорія систем, методи системного аналізу та функціонального моделювання використані для побудови структури інфор-

маційної технології оптимізації процесів управління; теорія диференціальних рівнянь, нейтронної кінетики, ядерних перетворень, термодинаміки, теоретичної механіки, сплайн-апроксимації та методи математичного моделювання – для розробки математичних моделей об'єктів управління як динамічних систем; лінійна алгебра, теорія матриць, чисельні методи інтегрування систем диференціальних рівнянь та методи імітаційного моделювання – для аналізу процесів в динамічних системах та обчислення прямих показників якості систем управління; теорія автоматичного управління – для моделювання систем автоматичного управління та врахування умов стійкості систем управління під час оптимізації показників якості; методи простору станів і передавальних функцій теорії автоматичного управління – під час розробки математичних моделей систем управління; сучасні системи комп'ютерної математики – для обчислення значень параметрів систем управління енергоблоку АЕС; методи одновимірної, багатовимірної безумовної та умовної оптимізації, а також методи глобальної оптимізації та теорія прийняття рішень – для оптимізації показників якості процесів управління динамічними системами.

Наукова новизна одержаних результатів:

– вперше розроблено функціональну модель процесу оптимізації управління складними динамічними системами на основі об'єднання програмних блоків моделей динамічних систем і методів оптимізації, блоку обчислення критеріїв якості систем, блоку подання інформації про динамічні процеси і процеси оптимізації, модулів методів інтегрування та модуля структур даних з формуванням структур даних задач та процесів оптимізації, що дозволяє записувати структури даних в файл з можливістю продовження процесу оптимізації складної динамічної системи та представлення його результатів в текстовій та графічній формах;

– вперше запропоновано загальні моделі динамічних систем з відносними змінними стану, на основі яких побудовані нелінійні математичні моделі для автоматизації процесів управління ядерним реактором ВВЕР-1000 серії В-320, парогенератором ПГВ-1000, паровою турбіною К-1000-60/1500-2 та енергоблоком АЕС, що відрізняються врахуванням багатьох параметрів і нелінійностей та завдяки мінімальній кількості обчислень дозволяють точніше і швидше виконувати імітаційне моделювання, ідентифікацію та оптимізацію параметрів систем управління цими об'єктами;

– вперше запропоновано загальні моделі інформаційно-управляючих систем динамічних об'єктів, на основі яких розроблені моделі для оцінювання якості та підвищення функціональної безпеки інформаційно-управляючих систем ядерного реактора ВВЕР-1000 серії В-320, парогенератора ПГВ-1000, парової турбіни К-1000-60/1500-2 та енергоблоку АЕС для створення гарантоздатних автоматизованих систем управління складними динамічними системами критичного застосування;

– вперше розроблено комплексний критерій оцінювання якості математичних моделей складних динамічних систем, що враховує обмеження значень параметрів моделей, умови стійкості процесів та показник відхилення теоретичних і експериментальних процесів, що дозволяє виконати методами оптиміза-

ції ідентифікацію параметрів моделей в елементах енергоблоку АЕС за даними натурних експериментів;

– вперше обґрунтовано стійкість інформаційних управляючих систем другого контуру енергоблоків АЕС з реакторами ВВЕР-1000 при зміні параметрів ПІ регуляторів на основі аналізу ступеня стійкості та меж області стійкості для моделей цих систем;

– вперше розроблено інформаційну технологію оптимізації управління складними динамічними системами шляхом програмної реалізації розроблених методів та моделей, що дозволяє виконати оптимізацію інформаційних управляючих систем енергоблоку АЕС і наочно представити процес обробки інформації у вигляді таблиць та графіків для прийняття рішень при створенні автоматизованих систем управління;

– вдосконалено методи аналізу математичних моделей динамічних систем з використанням матричних методів інтегрування систем диференціальних рівнянь, на основі яких виконаний аналіз процесів в моделях складних динамічних систем, зокрема в нелінійних моделях основних елементів енергоблоку АЕС – ядерного реактора ВВЕР-1000, парогенератора ПГВ-1000, парової турбіни К-1000-60/1500-2, що дозволяє оцінити точність цих моделей;

– отримала подальший розвиток методологія оптимізації параметрів регуляторів інформаційних управляючих систем енергоблоку АЕС на основі нелінійних моделей ядерного реактора ВВЕР-1000, парогенератора ПГВ-1000, парової турбіни К-1000-60/1500-2.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено та програмно реалізовано методи, моделі та інформаційна технологія знайшли практичне застосування при оптимізації управління складними динамічними системами, що забезпечує покращення показників якості процесів управління і сприяє підвищенню надійності систем. Інформаційна технологія оптимізації управління складними динамічними системами, математичні моделі систем автоматичного управління для систем управління другого контуру енергоблоків АЕС з реакторами ВВЕР-1000, обґрунтування стійкості систем управління на основі аналізу ступеня стійкості та меж області стійкості при зміні параметрів ПІ регуляторів, результати оптимізації параметрів ПІ регуляторів систем управління другого контуру енергоблоків впроваджені в ТОВ «НВП Моноліт Енерго». Нелінійні математичні моделі парової турбіни К-1000-60/1500-2 та її автоматизованої системи управління у відносних змінних стану, методи, моделі та інформаційна технологія оптимізації управління складними динамічними системами, що містить моделі реактора ВВЕР-1000 серії В-320, парогенератора ПГВ-1000, різних парових турбін та всього енергоблоку АЕС, рекомендації з оптимізації параметрів регулятора частоти обертання ротора парової турбіни К-1000-60/1500-2 з використанням інформаційної технології оптимізації управління складними динамічними системами використовуються в АТ «ТУРБОАТОМ». Модуль методів інтегрування для розв'язання систем диференціальних рівнянь (СДР) різними методами інтегрування, критерії ідентифікації з модулю критеріїв систем для теоретичної постановки задачі ідентифікації параметрів моделей динамічних процесів за експериментальними даними з врахуванням усіх необхідних

умов задачі ідентифікації, блок методів оптимізації, що містить різні методи одновимірного пошуку та методи багатовимірної оптимізації для практичного розв'язання задачі ідентифікації параметрів моделей динамічних процесів використовуються в Інституті іоносфери НАН і МОН України. Використання вказаних результатів дозволяє підвищити якість проектування систем управління складними динамічними об'єктами, підвищити ступінь наукової обґрунтованості технічних проектів з удосконалення систем управління енергоблоків АЕС. Матеріали дисертації використовуються в навчальних заняттях з дисциплін «Алгоритми та структури даних», «Методи обчислень» та «Чисельні методи» на кафедрі радіоелектроніки, а також «Методи оптимізації систем та процесів керування», «Методи оптимізації та дослідження операцій», «Теорія прийняття рішень» на кафедрі системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій НТУ «ХП».

Особистий внесок здобувача. Всі основні положення і результати дисертації, які виносяться на захист, отримані здобувачем особисто. Серед них: функціональна модель процесу оптимізації управління складними динамічними системами; нелінійні математичні моделі процесів управління в ядерному реакторі ВВЕР-1000 серії В-320 – зосереджена та вертикально розподілена, у парогенераторі ПГВ-1000, у паровій турбіні К-1000-60/1500-2 та у всьому енергоблоці, а також алгоритми та програми обчислення множини лінійних та нелінійних моделей ІУС з ПД та нечіткими регуляторами; методи, алгоритми та програми матричних методів інтегрування лінійних та нелінійних СДР; комплекс методів, алгоритмів та програм безумовної, умовної та глобальної оптимізації; моделі критеріїв ідентифікації та якості ІУС; результати ідентифікації параметрів нелінійної моделі ІУС парогенератора ПГВ-1000 та моделей ІУС елементів другого контуру енергоблоку; результати оптимізації регуляторів ІУС ядерного реактора ВВЕР-1000, парогенератора ПГВ-1000, парової турбіни К-1000-60/1500-2 та всього енергоблоку. Постановка цілей і задач досліджень, аналіз і обговорення отриманих результатів виконувалися здобувачем разом з науковим консультантом. На основі критичного аналізу науково-технічної літератури здобувачем систематизовано дані щодо методів, моделей та інформаційних технологій оптимізації управління складними динамічними системами та їх дослідження на прикладі ІУС енергоблоку АЕС.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідались та обговорювались на: IV Міжнародній науковій конференції «Проектування інженерних і наукових додатків в середовищі MATLAB» (м. Астрахань, 2009); XVI Міжнародній науково-технічній конференції «Силова електроніка і енергоефективність» (м. Алушта, 2010); X регіональній науковій студентській конференції «Актуальні проблеми фізики та їх інформаційне забезпечення» (м. Харків, 2010); XVII, XIX, XX, XXII – XXV Міжнародних конференціях з автоматичного управління «Автоматика/Automatics» (м. Харків, 2010; м. Київ, 2012; м. Миколаїв, 2013; м. Одеса, 2015; м. Суми, 2016; м. Київ, 2017; м. Львів, 2018); V Міжнародній науково-технічній конференції «Інформаційні та керуючі системи АЕС: аспекти безпеки» (м. Харків, 2013); IX, XI – XIII Міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми енергозбереження та шляхи їх ви-

рішення» (м. Харків, 2013, 2015 – 2017); XXI, XXIII – XXVII Міжнародних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2013, 2015 – 2019).

Публікації. Результати дисертації опубліковано в 50 наукових працях, з них: 22 статті у наукових фахових виданнях України, які включено до міжнародних наукометричних баз (2 – SCOPUS), 25 – у матеріалах конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації двома мовами, вступу, 7 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатку. Повний обсяг дисертації складає 402 сторінки і містить 98 рисунків та 76 таблиць по тексту, 34 з них на окремих сторінках, 276 найменувань використаних джерел на 31 сторінці, 5 додатків на 61 сторінці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та задачі дослідження, викладено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, особистий внесок здобувача в розробку теми дисертаційної роботи. Наведено дані щодо впровадження результатів дисертаційних досліджень, їх апробацію та публікації.

Перший розділ містить аналіз проблем інформаційних технологій управління складними динамічними системами, обґрунтування напрямку досліджень.

Задачі створення інформаційних технологій управління складними динамічними системами розглядали вчені Л. С. Понтрягін, Р. Беллман, О. М. Шарковський, А. М. Кац, К. Ю. Острем, В. В. Солодовников, Б. Т. Поляк, П. С. Щербаков, В. Я. Ротач, А. П. Ладанюк, Ю. К. Тодорцев, М. В. Максимов, Є. В. Малахов, Л. І. Нефьодов, С. Г. Удовенко, М. Д. Годлевський, В. П. Северин та багато інших. Автором проаналізовано проблеми управління складними динамічними системами та визначено актуальність оптимізації процесів управління. Як приклад складної динамічної системи розглянуто найпотужніший в Україні енергоблок АЕС з ядерним реактором ВВЕР-1000. Проаналізовано сучасні інформаційні технології управління та оптимізації з метою їх використання для оптимізації процесів управління складними динамічними системами. Розглянуто методи моделювання процесів в складних динамічних системах та аналізу інформаційних управляючих систем, показники якості ІУС і можливості їх застосування до процесів управління складними динамічними системами. Проаналізовано існуючі підходи та методи синтезу ІУС, розглянуто обчислювальні методи оптимізації та можливості їх використання для оптимізації показників якості ІУС.

Проведений аналіз показав існування проблемної ситуації, яка полягає в протиріччі між запитами практики до якості процесів управління складними динамічними системами та недостатнім рівнем розвитку методів, моделей та інформаційних технологій оптимізації управління динамічними системами, що і обумовлює мету та напрями дисертаційного дослідження.

Другий розділ присвячений розробці структури і елементів інформаційної технології (ІТ) оптимізації управління СДС.

На рис. 1 показана загальна структура інформаційної технології аналізу та синтезу систем управління, яка включає шість основних функціональних елементів. Модулі представляють сукупність взаємопов'язаних програм для виконання відповідних функцій ІТ, а блоки – сукупність модулів для виконання більш складних функцій.

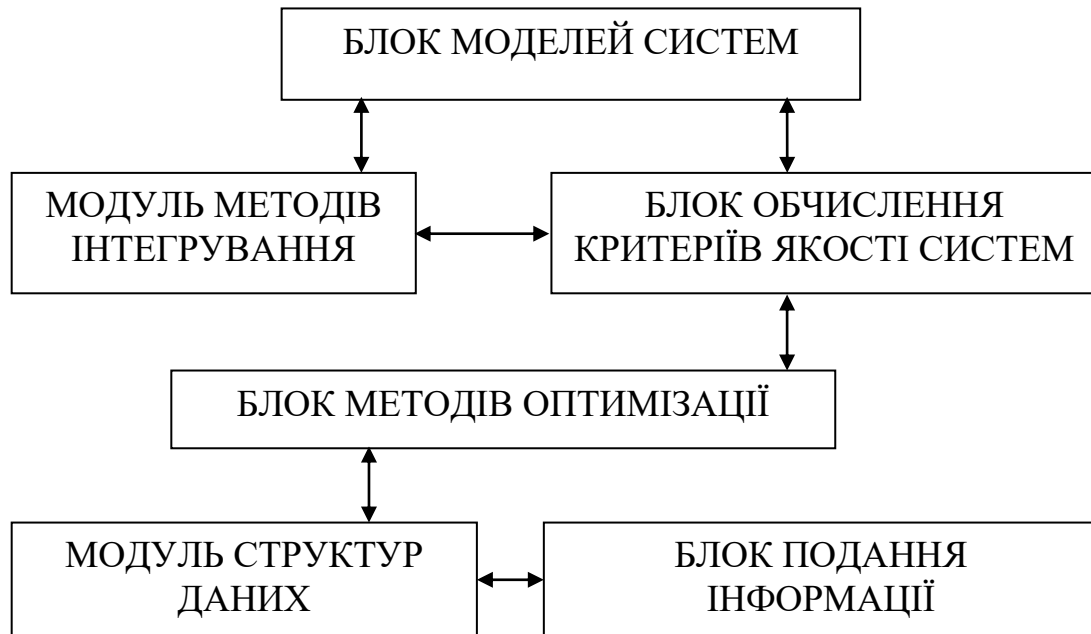


Рисунок 1 – Структура інформаційної технології

У блоці моделей систем представлені модулі конкретних динамічних систем, що включають програми математичних моделей динамічних систем, зокрема об'єктів управління, регуляторів, ІУС, що дозволяє моделювати ІУС енергоблоків АЕС, систему управління квадрокоптером, генератори імпульсів напруги та струму, фільтри Баттерворта та інші динамічні системи.

У модулі методів інтегрування зібрані програми матричних методів інтегрування СДР: методу матричної експоненти для інтегрування лінійних систем, системних методів першого, другого і третього ступенів для інтегрування нелінійних систем. У блоці обчислення критеріїв якості систем знаходяться модулі з програмами для обчислення різних критеріїв ІУС: прямих показників якості (ППЯ) систем, критеріїв стійкості ІУС, покращених інтегральних квадратичних оцінок (ІКО), критеріїв ідентифікації.

Блок методів оптимізації містить модулі з програмами різних типів методів оптимізації: методів одновимірного пошуку, методів багатовимірної безумовної оптимізації, методів умовної оптимізації, методів мінімізації суми квадратів, методів глобального пошуку, генетичних алгоритмів, векторних методів оптимізації. Для універсальності та спрощення використання методів розроблено модуль утиліт, який містить загальні підпрограми методів оптимізації. Якщо установлена ознака для запам'ятовування, процес оптимізації запам'ятовується у зовнішньому файлі. Цей процес можна відобразити в текстовому та графіч-

ному вигляді або продовжити.

Розроблено модуль загальних структур даних для зменшення кількості формальних параметрів підпрограм, підвищення надійності та узгодження роботи комплексу програм при його розвитку. Запропоновані глобальні структури даних – структура постійних даних задач і методів оптимізації, структура змінних параметрів стану процесу оптимізації та структура функцій для узгодження взаємодії методів оптимізації. Ці структури істотно підвищують гнучкість блоку методів оптимізації та спрощують його подальший розвиток, оскільки інтерфейсна частина підпрограм, пов'язана з мінімально можливою кількістю вхідних і вихідних формальних параметрів, практично не змінюється.

Блок подання інформації розв'язання задач включає три модуля, у яких реалізовані текстові та графічні можливості ІТ, що дозволяють представляти процес оптимізації у вигляді таблиць та графіків. Також реалізовані функції графічного представлення перехідних процесів у динамічних системах.

За структурою ІТ, представленою на рис. 1, розроблена функціональна модель процесу оптимізації, яка наведена в графічній нотації IDEF0 на рис. 2.

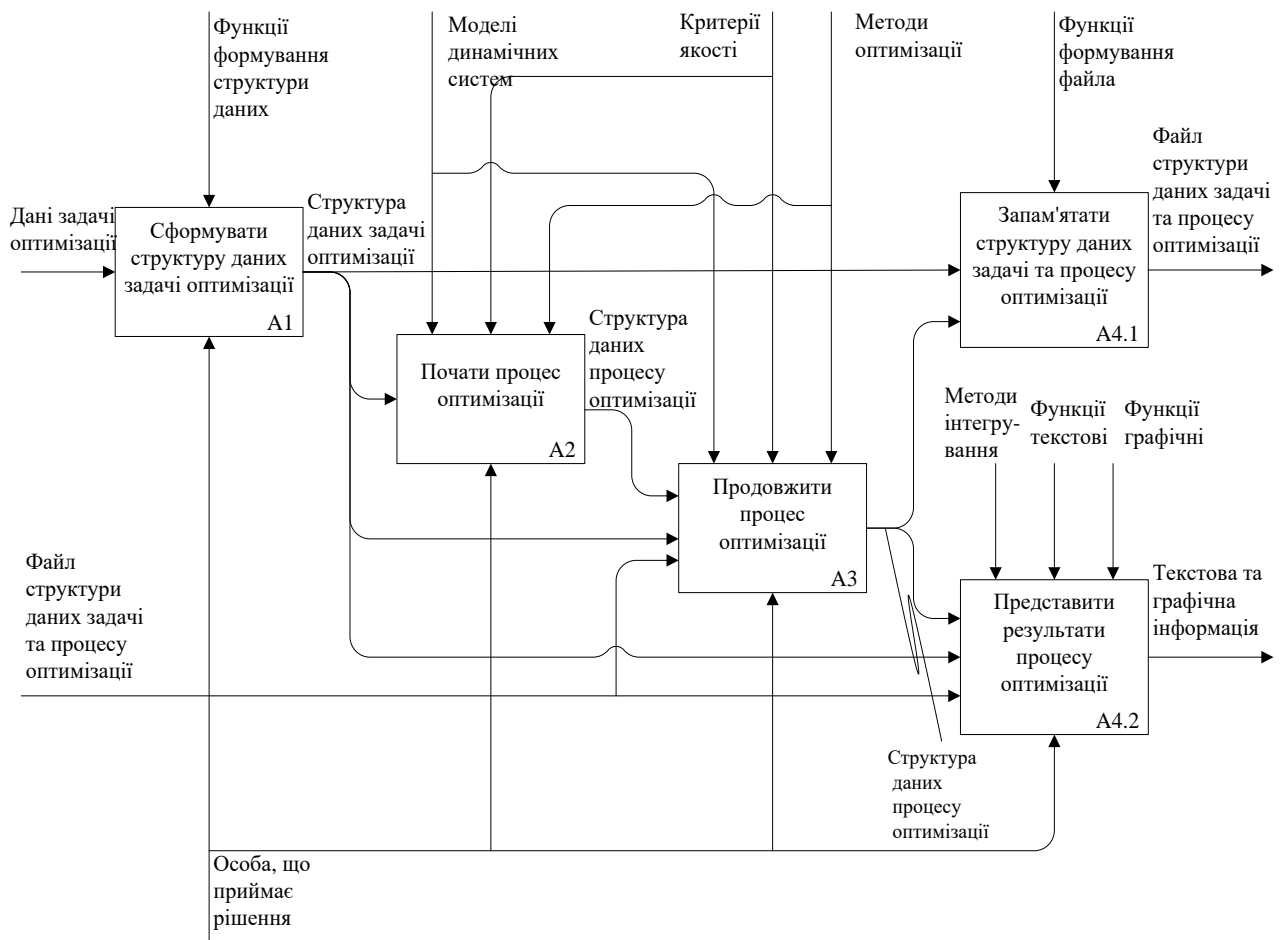


Рисунок 2 – Функціональна модель процесу оптимізації

Така модель враховує складність розв'язання задач оптимізації управління СДС та завдяки використанню структур даних задач і процесу оптимізації та розділенню процесу оптимізації на початок і продовження дозволяє за-

пам'ятовувати процес оптимізації з можливістю його продовження або представлення результатів, тобто найбільш повно використовуються можливості сучасної комп'ютерної техніки.

У третьому розділі узагальнено принципи моделювання динамічних систем та розроблено конкретні моделі динамічних систем для ІТ оптимізації управління на прикладі енергоблоку АЕС з реактором ВВЕР-1000 серії В-320.

Для аналізу та синтезу динамічних систем будуються їх математичні моделі. Представлено загальну математичну модель динамічної системи:

$$d\mathbf{X}/d\tau = \mathbf{f}(\mathbf{X}, \mathbf{x}, \mathbf{c}, \mathbf{g}), \quad \mathbf{X}_0 = \mathbf{X}(\tau_0), \quad \mathbf{y} = \mathbf{C}_y(\mathbf{X}), \quad (1)$$

де τ і τ_0 – відносна змінна часу та її початкове значення, $\mathbf{X} = \mathbf{X}(\tau)$ і \mathbf{X}_0 – вектори стану та початкових умов, $\mathbf{f}(\mathbf{X}, \mathbf{x}, \mathbf{c}, \mathbf{g})$ – векторна функція правих частин СДР, \mathbf{x} і \mathbf{c} – вектори змінних та постійних параметрів системи, \mathbf{g} – вектор зовнішніх дій, $\mathbf{C}_y(\mathbf{X})$ – оператор виходу моделі, \mathbf{y} – вектор вихідних змінних. У вигляді (1) представлена загальна математична модель об'єкту управління (ОУ):

$$d\mathbf{X}_O/d\tau = \mathbf{f}_O(\mathbf{X}_O, \mathbf{x}_O, \mathbf{c}_O, \mathbf{g}_O), \quad \mathbf{X}_{O0} = \mathbf{X}_O(\tau_0), \quad \mathbf{y} = \mathbf{C}_y(\mathbf{X}_O), \quad (2)$$

де $\mathbf{X}_O = \mathbf{X}_O(\tau)$ і \mathbf{X}_{O0} – вектори стану та початкових умов об'єкта управління, $\mathbf{f}_O(\mathbf{X}_O, \mathbf{x}_O, \mathbf{c}_O, \mathbf{g}_O)$ – векторна функція правих частин СДР об'єкта, \mathbf{x}_O і \mathbf{c}_O – вектори змінних та постійних параметрів ОУ, $\mathbf{g}_O = (u, v)^T$ – вектор зовнішніх дій, $\mathbf{C}_y(\mathbf{X}_O)$ – оператор виходу об'єкта.

Математичні моделі у вигляді лінійних СДР включають вектори стану та початкових умов, вектори змінних параметрів систем, вектор зовнішніх дій, оператор виходу моделі, вектор вихідних змінних. Математичні моделі у вигляді передавальних функцій (ПФ) включають вектори змінних параметрів систем. Моделі у вигляді ПФ приведені до моделей у вигляді СДР.

Як приклад складної динамічної системи приведена двоконтурна технологічна схема виробництва електроенергії енергоблоком АЕС, яка включає ядерний реактор (ЯР) ВВЕР-1000 серії В-320, парогенератор (ПГ) ПГВ-1000, парову турбіну (ПТ) К-1000-1500/60-2 та багато інших елементів. У свою чергу всі елементи енергоблоку теж є складними динамічними системами, що характеризуються складними динамічними процесами, нелінійними залежностями між різними показниками їх стану, великою кількістю конструктивних та технологічних параметрів, а також високим порядком математичних моделей.

Отримана зосереджена модель кінетики реактора у відносних змінних:

$$\begin{cases} dv/d\tau = \alpha_v[(\rho - 1)v + \sum_{i=1}^6 \mu_i \xi_i], \\ d\xi_i/d\tau = \alpha_i(v - \xi_i), i = 1, 6, \end{cases} \quad (3)$$

де v – щільність нейтронів, τ – час, α_v – постійна частки запізнілих нейтронів (ЗН), ρ – реактивність реактора, μ_i і ξ_i – параметри радіоактивного розпаду і концентрації ядер-випромінювачів ЗН, α_i – постійні радіоактивного розпаду.

Модель поступового тепловиділення представлена в формі Коші:

$$d\eta_i/d\tau = b_{iv}v - a_{in}\eta_i, \quad i = \overline{1,3}, \quad (4)$$

де $\eta = \eta_1 + \eta_2 + \eta_3$ – потужність поступового тепловиділення, b_{iv} , a_{in} – постійні параметри. Модель тепловідведення в відносних змінних стану:

$$\begin{cases} d\theta_u/d\tau = a_{uu}\theta_u + a_{uz}\theta_z + b_{un}v + b_{uq}\eta, \\ d\theta_z/d\tau = a_{zu}\theta_u + a_{zz}\theta_z + a_{zr}\theta_r, \\ d\theta_r/d\tau = a_{rz}\theta_z + a_{rr}\theta_r + b_{rl}\theta_l, \end{cases} \quad (5)$$

де θ_u і θ_z – середні температури поверхні палива і оболонки твела з цирконієвого сплаву, θ_r – середня температура теплоносія в активній зоні, θ_l – температура теплоносія на вході в активну зону, a_{uu} , a_{uz} , b_{un} , b_{uq} , a_{zu} , a_{zz} , a_{zr} , a_{rz} , a_{rr} , b_{rl} – значення теплових параметрів.

Модель зміни концентрації ксенону в відносних змінних стану:

$$\begin{cases} dv_J/d\tau = b_{Jv}v - a_{JJ}v_J, \\ dv_X/d\tau = b_{Xv}v - a_{XX}v_X + a_{XJ}v_J - a_{Xv}v_Xv, \end{cases} \quad (6)$$

де v_J і v_X – концентрації ядер йоду і ксенону, b_{Jv} , a_{JJ} , b_{Xv} , a_{XX} , a_{XJ} , a_{Xv} – значення параметрів радіоактивного розпаду йоду і ксенону.

Шляхом об'єднання СДР (3)–(6) отримана загальна СДР ЯР вигляду (2):

$$d\mathbf{X}_r/d\tau = \mathbf{f}_r(\mathbf{X}_r, \mathbf{c}_r, \rho), \quad \mathbf{X}_{0r} = \mathbf{X}_r(\tau_0), \quad v = C_r(\mathbf{X}_r), \quad (7)$$

з векторами змінних стану та початкових умов:

$$\mathbf{X}_r = (v \ \xi_1 \ \xi_2 \ \xi_3 \ \xi_4 \ \xi_5 \ \xi_6 \ \eta_1 \ \eta_2 \ \eta_3 \ \theta_u \ \theta_z \ \theta_r \ v_J \ v_X)^T,$$

$$\mathbf{X}_{0r} = (v_0 \ \xi_{01} \ \xi_{02} \ \xi_{03} \ \xi_{04} \ \xi_{05} \ \xi_{06} \ \eta_{01} \ \eta_{02} \ \eta_{03} \ \theta_{0u} \ \theta_{0z} \ \theta_{0r} \ v_{0J} \ v_{0X})^T.$$

Для побудови вертикально розподіленої моделі ЯР в його активній зоні (АЗ) введена вертикальна вісь Oz з початком O у центрі АЗ, де z – координата вертикального рівня АЗ. Циліндрична АЗ реактора висотою H_a за віссю Oz поділена на парну кількість зон n_z – однакових по об'єму циліндрів висотою $h_a = H_a/n_z$, які пронумеровані в напрямі руху теплоносія від низу АЗ реактора індексами $j = \overline{1, n_z}$ і мають координати центрів $z_1 = -H_a/2 + h_a/2$, $z_j = z_{j-1} + h_a$,

$j = \overline{2, n_z}$. Значення параметрів реактора і його змінних стану у кожній зоні припускаються однаковими. Максимальне значення щільності нейтронів n_m та постійний параметр розподілу нейтронного потоку β_c визначають розподіл нейтронної щільності за висотою АЗ за формулою $n(z) = n_m \cos(\beta_c z)$. За цією формулою обчислені значення нейтронної щільності у кожній зоні АЗ реактора у номінальному режимі $n_{0j} = n_m \cos(\beta_c z_j)$, $j = \overline{1, n_z}$, з яких сформований вектор значень нейтронної щільності в номінальному режимі \mathbf{n}_0 .

Рівняння вертикально розподіленої моделі нейтронної кінетики реактора з урахуванням шести груп ЗН з абсолютними змінними мають вигляд:

$$\begin{cases} dn_j/dt = (r_j - \beta) n_j / l^* + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_{ji}, & j = \overline{1, n_z}, \\ dC_{ji}/dt = \beta_i n_j / l^* - \lambda_i C_{ji}, & i = \overline{1, 6}, \end{cases}$$

де для кожної зони з номером j позначені: n_j – щільність нейтронів, r_j – реактивність реактора, $\beta = \sum_{i=1}^6 \beta_i$ – сумарна частка ЗН, l^* – середній ефективний час життя нейтронів, λ_i і C_{ji} – постійні радіоактивного розпаду і концентрації ядер-випромінювачів ЗН, β_i – частки ЗН. У рівноважному стані номінального режиму реактора початкові умови СДР $n_j = n_{0j}$, $C_{ji} = C_{0ji}$, $C_{0ji} = \beta_i n_{0j} / (\lambda_i l^*)$, $i = \overline{1, 6}$, $j = \overline{1, n_z}$. У векторних позначеннях така СДР має вигляд:

$$\begin{cases} d\mathbf{n}/dt = (\mathbf{r} - \beta \mathbf{1}) \circ \mathbf{n} / l^* + \mathbf{C} \boldsymbol{\lambda}, \\ d\mathbf{C}_i/dt = \beta_i \mathbf{n} / l^* - \lambda_i \mathbf{C}_i, & i = \overline{1, 6}. \end{cases}$$

Тут використані вектор з одиниць $\mathbf{1}$, знак добутку Адамара \circ для покомпонентного добутку векторів та матриця \mathbf{C} , яка зіставлена з векторів стовпців концентрацій ядер-випромінювачів ЗН у всіх зонах \mathbf{C}_i . З цієї СДР замість моделі (3) отримана розподілена модель нейтронної кінетики у відносних змінних:

$$\begin{cases} d\mathbf{v}/d\tau = \alpha_v [(\boldsymbol{\rho} - \mathbf{1}) \circ \mathbf{v} + \boldsymbol{\xi} \boldsymbol{\mu}], \\ d\boldsymbol{\xi}_i/d\tau = \alpha_i (\mathbf{v} - \boldsymbol{\xi}_i), & i = \overline{1, 6}. \end{cases} \quad (8)$$

Замість (4) розподілена модель поступового тепловиділення є СДР:

$$d\boldsymbol{\eta}_i/d\tau = b_{iv} \mathbf{v} - a_{i\eta} \boldsymbol{\eta}_i, \quad i = \overline{1, 3}. \quad (9)$$

На відміну від моделі (5) розподілена модель тепловідведення має вигляд:

$$\begin{cases} d\boldsymbol{\theta}_u/d\tau = a_{uu}\boldsymbol{\theta}_u + a_{uz}\boldsymbol{\theta}_z + b_{un}\mathbf{v} + b_{uq}\boldsymbol{\eta}, \\ d\boldsymbol{\theta}_z/d\tau = a_{zu}\boldsymbol{\theta}_u + a_{zz}\boldsymbol{\theta}_z + a_{zr}\boldsymbol{\theta}_r, \\ d\boldsymbol{\theta}_r/d\tau = a_{rz}\boldsymbol{\theta}_z + a_{rr}\boldsymbol{\theta}_r + b_{rl}\boldsymbol{\theta}_l. \end{cases} \quad (10)$$

Розподіленою моделлю зміни концентрації ксенону на відміну від (6) є:

$$\begin{cases} d\mathbf{v}_J/d\tau = b_{Jv}\mathbf{v} - a_{JJ}\mathbf{v}_J, \\ d\mathbf{v}_X/d\tau = b_{Xv}\mathbf{v} - a_{XX}\mathbf{v}_X + a_{XJ}\mathbf{v}_J - a_{Xv}\mathbf{v}_X \circ \mathbf{v}. \end{cases} \quad (11)$$

Шляхом об'єднання СДР (8)–(11) отримана вертикально розподілена модель СДР ЯР вигляду (2):

$$d\mathbf{X}_{rz}/d\tau = \mathbf{f}_{rz}(\mathbf{X}_{rz}, \mathbf{c}_{rz}, \boldsymbol{\rho}), \quad \mathbf{X}_{0rz} = \mathbf{X}_{rz}(t_0), \quad \mathbf{v} = C_{rz}(\mathbf{X}_{rz}), \quad (12)$$

з вектором змінних стану

$$\mathbf{X}_{rz} = (\mathbf{v}^T \xi_1^T \xi_2^T \xi_3^T \xi_4^T \xi_5^T \xi_6^T \boldsymbol{\eta}_1^T \boldsymbol{\eta}_2^T \boldsymbol{\eta}_3^T \boldsymbol{\theta}_u^T \boldsymbol{\theta}_z^T \boldsymbol{\theta}_r^T \mathbf{v}_J^T \mathbf{v}_X^T)^T.$$

На підставі рівнянь теплопередачі, матеріального і теплового балансу пароутворення, циркуляції, головного парового колектора (ГПК), приводу клапана регулювання парової турбіни (КРТ) і виконавчого механізму регулюючого живильного клапана (РЖК) побудовано нелінійну СДР парогенератора в просторі станів як об'єкта управління у відносних змінних стану:

$$\begin{cases} \theta_w = b_{wp}\pi_p - c_{wp}, \quad q_m = a_{qm}(\theta_m - \theta_w), \\ d\theta_t/d\tau = b_{tq}q - a_{tm}(\theta_t - \theta_m), \\ d\theta_m/d\tau = a_{mt}(\theta_t - \theta_m) - a_{mw}(\theta_m - \theta_w), \\ g_w = \alpha_{gw}\mu_w\sqrt{\pi_w - \pi_p}, \quad g_s = \alpha_{gs}\sqrt{\pi_p^2 - \pi_m^2}, \\ \pi_{pt} = \frac{b_{pw}g_w + b_{ps}g_s + q_m}{a_{pw}\xi_w + a_{ps}\xi_s}, \quad \frac{d\pi_p}{d\tau} = \pi_{pt}, \\ g_g = b_{gq}q_m - (a_{gw}\xi_w + a_{gs}\xi_s)\pi_{pt} - b_{gg}g_w, \\ \xi_{wt} = b_{wg}(g_w - g_g) - a_{wp}\xi_w\pi_{pt}, \quad d\xi_w/d\tau = \xi_{wt}, \\ d\xi_s/d\tau = b_{sg}(g_g - g_s) - a_{sp}\xi_s\pi_{pt}, \\ \xi_{ct} = (c_c - a_{cc}\xi_c)\pi_{pt} + b_{cg}(g_s - g_a), \quad d\xi_c/d\tau = \xi_{ct}, \\ \varepsilon_m = \pi_t/\pi_m, \quad \beta_m = \sqrt{1 - [(\varepsilon_m - \varepsilon_c)/(1 - \varepsilon_c)]^2}, \\ g_m = \alpha_{gm}\mu_s\beta_m\sqrt{\pi_m}, \quad d\pi_m/d\tau = a_{mg}(g_s - g_m), \\ \frac{dg_a}{d\tau} = \frac{c_a + b_{ac}\xi_c - b_{aw}\xi_w - b_{aa}g_a^2 - g_a(d_{ap}\xi_w\pi_{pt} + d_{aw}\xi_{wt} + d_{ac}\xi_{ct})}{1 + a_{aw}\xi_w + a_{ac}\xi_c}, \\ d\mu_w/d\tau = a_{ww}(u_w - \mu_w), \quad d\mu_s/d\tau = a_{ss}(u_s - \mu_s), \end{cases} \quad (13)$$

де $\theta_w, \theta_m, \theta_t$ – середні температури води, теплоносія і металевої трубки, $\pi_p, \pi_w, \pi_m, \pi_t$ – змінні тиску в ПГ, живильної води в трубках ПГ, в ГПК та за КРТ; q – теплова потужність парогенератора, q_m – теплота, що передається від теплоносія до трубок; g_w, g_s, g_m, g_g, g_a – витрати живильної води, пари з ПГ, пари з ГПК, генерованої пари в ПГ, пари через дзеркало випаровування; ξ_w, ξ_s, ξ_c – об’єми води та пари в ПГ, рівень води в ПГ; μ_w, μ_s – положення клапанів живильної води та турбіни; $\varepsilon_m = \pi_t/\pi_m, \varepsilon_c$ – постійне значення; β_m – параметр за формулою Бендемана, $a_{qm}, a_{tm}, a_{mt}, a_{mw}, a_{pw}, a_{ps}, a_{gw}, a_{gs}, a_{wp}, a_{sp}, a_{cc}, a_{aw}, a_{ac}, a_{ww}, a_{ss}$ – постійні параметри при внутрішніх змінних стану; $b_{wp}, b_{tq}, b_{pw}, b_{ps}, b_{gq}, b_{gg}, b_{wg}, b_{sg}, b_{cg}, b_{ac}, b_{aw}, b_{aa}$ – постійні параметри при вхідних діях; d_{ap}, d_{aw}, d_{ac} – постійні параметри при похідних; c_{wp}, c_c, c_a – постійні вільні параметри; $\alpha_{gw}, \alpha_{gs}, \alpha_{gm}$ – постійні параметри в рівняннях витрат; u_w, u_s – керуючий вплив на РЖК та на КРТ. Обчислено значення постійних параметрів моделі для ПГ ПГВ-1000. Модель ПГ (13) представлена у вигляді (2):

$$d\mathbf{X}_g/d\tau = \mathbf{f}_g(\mathbf{X}_g, \mathbf{x}_g, \mathbf{c}_g, \mathbf{g}_g), \quad \mathbf{X}_{0g} = \mathbf{X}_g(\tau_0), \quad \xi_c = C_g(\mathbf{X}_g), \quad (14)$$

де $\mathbf{X}_g = \mathbf{X}_g(\tau)$ і \mathbf{X}_{0g} – вектори стану та початкових умов моделі ПГ, $\mathbf{f}_g(\mathbf{X}_g, \mathbf{x}_g, \mathbf{c}_g, \mathbf{g}_g)$ – векторна функція правих частин СДР ПГ, \mathbf{x}_g і \mathbf{c}_g – вектори змінних та постійних параметрів ПГ, $\mathbf{g}_g = (q, u_w, \pi_t, u_s)^T$ – вектор зовнішніх дій, $C_g(\mathbf{X}_g)$ – оператор визначення вихідної змінної ПГ. В моделі (14):

$$\mathbf{X}_g = (\theta_t \ \theta_m \ \pi_p \ \xi_w \ \xi_s \ \xi_c \ \pi_m \ g_a \ \mu_w \ \mu_s)^T,$$

$$\mathbf{X}_{0g} = (\theta_{0t} \ \theta_{0m} \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ \pi_{0m} \ 1 \ 1 \ 1)^T.$$

Паровий тракт турбіни розділяється на задану кількість постійних об’ємів, для яких записані рівняння матеріального балансу. Шляхом перетворення цих рівнянь на основі рівняння Менделєєва – Клапейрона отримано диференціальні рівняння (ДР) тиску в постійних об’ємах парової турбіни, які включають витрату пари. Для витрати пари наведені загальна формула витрат зі змінним коефіцієнтом витрати та формула Флюгеля – Стодоли для постійного коефіцієнта витрати, а також формула витрати пари у відбір. За теоремою про головний момент кількості руху записано диференціальне рівняння руху ротора парової турбіни. При заданих базових значеннях часу та тиску шляхом перетворення ДР тиску у парових об’ємах отримана СДР парового тракту турбіни у вигляді Коші. Визначені параметри витрат та на основі експериментальних даних з використанням кубічної сплайн інтерполяції сформовані функції витрат для регулюючого клапана (РК) і регулюючої заслінки (РЗ) турбіни К-1000-60/1500-2. Визначено безрозмірні постійні параметри СДР динаміки турбіни та

отримана нелінійна модель парової турбіни К-1000-60/1500-2 у вигляді СДР у відносних змінних стану:

$$\left\{ \begin{array}{l} d\pi_1/d\tau = \alpha_1\sigma(\pi_0, \pi_1) - \beta_1\varphi_v(\mu_1, \pi_2/\pi_1)\sqrt{\pi_1} - \gamma_1\sigma_1(\pi_1, \pi'_1) - \delta_1, \\ d\pi_2/d\tau = \alpha_2\varphi_v(\mu_1, \pi_2/\pi_1)\sqrt{\pi_1} - \beta_2\sigma(\pi_2, \pi_3), \\ d\pi_3/d\tau = \alpha_3\sigma(\pi_2, \pi_3) - \beta_3\sigma(\pi_3, \pi_4) - \gamma_3\sigma_1(\pi_3, \pi'_3), \\ d\pi_4/d\tau = \alpha_4\sigma(\pi_3, \pi_4) - \beta_4\sigma(\pi_4, \pi_5) - \gamma_4\sigma_1(\pi_4, \pi'_4), \\ d\pi_5/d\tau = \alpha_5\sigma(\pi_4, \pi_5) - \beta_5\sigma(\pi_5, \pi_6) - \gamma_5\sigma_1(\pi_5, \pi'_5) - \delta_5, \\ d\pi_6/d\tau = \alpha_6\sigma(\pi_5, \pi_6) - \beta_6\sigma(\pi_6, \pi_7), \\ d\pi_7/d\tau = \alpha_7\sigma(\pi_6, \pi_7) - \beta_7\varphi_f(\mu_2, \pi_8/\pi_7)\sqrt{\pi_7} - \gamma_7\sigma_1(\pi_7, \pi'_7) - \delta_7, \\ d\pi_8/d\tau = \alpha_8\varphi_f(\mu_2, \pi_8/\pi_7)\sqrt{\pi_7} - \beta_8\sigma(\pi_8, \pi_9), \\ d\pi_9/d\tau = \alpha_9\sigma(\pi_8, \pi_9) - \beta_9\sigma(\pi_9, \pi_{10}) - \gamma_9\sigma_1(\pi_9, \pi'_9), \\ d\pi_{10}/d\tau = \alpha_{10}\sigma(\pi_9, \pi_{10}) - \beta_{10}\sigma(\pi_{10}, \pi_{11}) - \gamma_{10}\sigma_1(\pi_{10}, \pi'_{10}), \\ d\pi_{11}/d\tau = \alpha_{11}\sigma(\pi_{10}, \pi_{11}) - \beta_{11}\sigma(\pi_{11}, \pi_{12}) - \gamma_{11}\sigma_1(\pi_{11}, \pi'_{11}), \\ d\pi_{12}/d\tau = \alpha_{12}\sigma(\pi_{11}, \pi_{12}) - \beta_{12}\sigma(\pi_{12}, \pi_k) - \gamma_{12}\sigma_1(\pi_{12}, \pi'_{12}), \\ d\varphi/d\tau = \alpha_\varphi/(1 + \varphi) \left(\sum_{i \in I_N} \kappa_i \sigma(\pi_i, \pi_{i+1}) - v_l - v_s \right), \end{array} \right. \quad (15)$$

де π_0 і π_k – змінні тиску в ГПК і конденсаторі; π_i – змінні тиску в парових об'ємах $i = \overline{1,12}$; π'_i – змінні тиску у відборах $i = \overline{1,3,5,7,9,12}$; α_i і β_i – параметри витрат пари між паровими об'ємами турбіни $i = \overline{1,12}$; γ_i – параметри витрат пари до відборів $i = \overline{1,3,5,7,9,12}$; $\delta_1, \delta_5, \delta_7$ – параметри витоку пари; φ – частота обертання ротора; α_φ – постійний параметр рівняння ротора; κ_i – параметри обчислення потужності турбіни; v_l і v_s – втрати потужності та потужність електричного генератора; $I_N = \{2, 4, 8, 12\}$; $\varphi_v(x, y)$, $\varphi_f(x, y)$ – функції витрат РК і РЗ, що обчислюються за експериментальними даними з використанням кубічної сплайн інтерполяції; $\sigma(x, y)$, $\sigma_1(x, y)$ – безрозмірні функції витрат пари між паровими об'ємами турбіни та до відборів:

$$\sigma(x, y) = \begin{cases} 0, & x \leq y; \\ \sqrt{x^2 - y^2}, & x > y; \end{cases} \quad \sigma_1(x, y) = \begin{cases} 0, & x \leq y; \\ \sqrt{(x-y)x}, & x > y. \end{cases}$$

Вхідними змінними цієї моделі є координати сервомоторів РК і РЗ $\mu_1 = \mu_1(\tau)$ і $\mu_2 = \mu_2(\tau)$ відповідно, а також потужність електричного генератора. Тиск у відборах вважаємо постійним і рівним його значенням у номінальному режимі. Позначаючи вектор постійних параметрів моделі \mathbf{c}_t , вектор зов-

нішніх дій $\mathbf{g}_t = (\pi_0, \mu_1, \mu_2, v_s)^T$, відносну керовану величину частоти $y = \varphi$, вектор стану і векторну функцію правих частин наведеної СДР через $\mathbf{X}_t = (\pi_1 \ \pi_2 \ \dots \ \pi_{12} \ \varphi)^T$ та $\mathbf{f}_t(\mathbf{X}_t, \mathbf{c}_t, \mathbf{g}_t)$, модель турбіни представлено у векторному вигляді (2):

$$d\mathbf{X}_t/d\tau = \mathbf{f}_t(\mathbf{X}_t, \mathbf{c}_t, \mathbf{g}_t), \quad \mathbf{X}_{0t} = \mathbf{X}(t_0), \quad y = C_t(\mathbf{X}_t), \quad (16)$$

де вектор початкових умов $\mathbf{X}_{0t} = (\pi_{01} \ \pi_{02} \ \dots \ \pi_{012} \ 0)^T$.

Четвертий розділ присвячений узагальненню методів аналізу складних динамічних систем та аналізу процесів в реакторі ВВЕР-1000 серії В-320, парогенераторі ПГВ-1000, паровій турбіні К-1000-60/1500-2 на основі нелінійних математичних моделей цих об'єктів управління.

Формалізовані числові методи інтегрування СДР, які використовуються для побудови перехідних процесів у динамічних системах, а також обчислення ППЯ систем. Для підвищення точності та надійності обрані матричні методи інтегрування: метод матричної експоненти для інтегрування лінійних СДР, системні методи першого, другого і третього ступенів для інтегрування нелінійних СДР. Розроблені алгоритми методів інтегрування та допоміжних їх параметрів.

Якщо управління ЯР виконується тільки поглинаючими стрижнями, то отримано рівняння реактивності в відносних змінних

$$\rho = \rho_d + \rho_u + \rho_t + \rho_X, \quad (17)$$

де ρ_d – зміна реактивності при переміщенні поглинаючих стрижнів; ρ_u , ρ_t і ρ_X – зміни реактивності при зміні температур палива і теплоносія, а також концентрації ксенону. Якщо в ЯР має місце тільки борне управління, то

$$\rho = \rho_u + \rho_t + \rho_X + \rho_B, \quad (18)$$

де ρ_B – зміна реактивності при зміні концентрації бору. Якщо в ЯР виконується комбіноване управління поглинаючими стрижнями та борною кислотою, то

$$\rho = \rho_d + \rho_u + \rho_t + \rho_X + \rho_B. \quad (19)$$

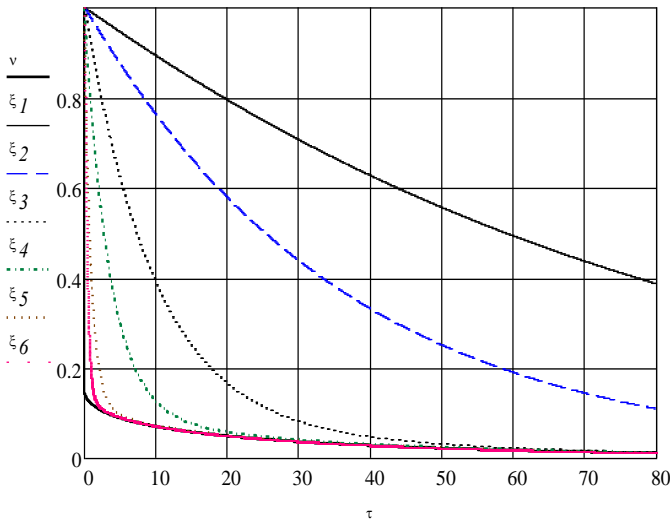
Врахуванням реактивності (17) в СДР (12) отримана модель з управлінням ЯР поглинаючими стрижнями у вигляді СДР. Початкові умови відповідають номінальному режиму та вхідним значенням реактивності поглинаючих стрижнів. Шляхом об'єднання СДР (12) і врахування реактивності (18) отримана СДР з управлінням ЯР борною кислотою:

$$d\mathbf{X}_{rb}/d\tau = \mathbf{f}_{rb}(\mathbf{X}_{rb}, \mathbf{c}_{rb}), \quad \mathbf{X}_{0rb} = \mathbf{X}_{rb}(t_0), \quad v = C_{rb}(\mathbf{X}_{rb}), \quad (20)$$

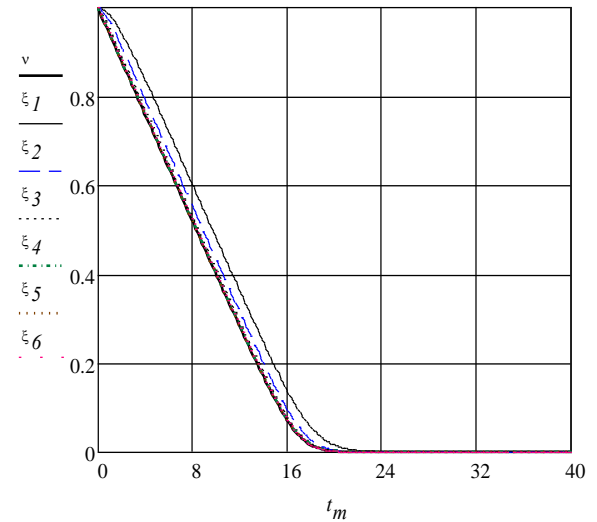
з векторами змінних стану та початкових умов:

$$\mathbf{X}_{rb} = (\mathbf{X}_r^T \ \xi_B)^T, \quad \mathbf{X}_{0rb} = (\mathbf{X}_{0r}^T \ \xi_{0B})^T.$$

На рис. 3 та 4 представлені процеси нейтронної кінетики з управлінням ЯР поглинаючими стрижнями та борною кислотою. Відповідні СДР проінтегровані системним методом першого ступеня (СМ1). Процес зміни нейтронної потужності ЯР в секундах на рис. 3 показує, що реактор переходить з номінального режиму в режим нульової потужності за 20 секунд, на рис. 4 в хвиликах – близько 20 хвилин, а концентрації запізнілих нейтронів монотонно зменшуються від номінальних значень до нульових значень.



Рисунку 3 – Змінні нейтронної кінетики при управлінні стрижнями



Рисунку 4 – Змінні нейтронної кінетики при управлінні бором

На рис. 5 концентрація борної кислоти монотонно зростає від номінального значення концентрації до концентрації в баку борного регулювання.

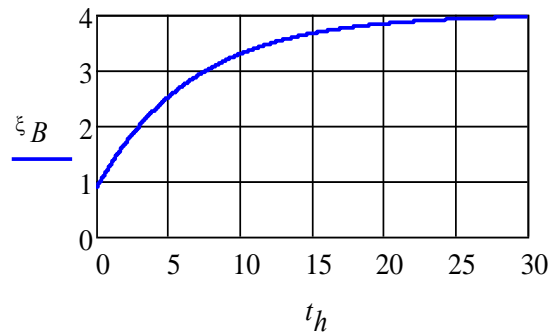
Для вертикально розподіленої моделі ЯР рівняння (17)–(19) приймають векторну форму в залежності від типу управління: управління стрижнями

$$\rho = \rho_d + \rho_u + \rho_t + \rho_X,$$

управління бором $\rho = \rho_u + \rho_t + \rho_X + \rho_B$, комбіноване $\rho = \rho_d + \rho_u + \rho_t + \rho_X + \rho_B$.

Аксіальний офсет (АО) визначає ступінь нерівномірності тепловиділення в ЯР по висоті АЗ й впливає на стійкість реактора. За долями миттєвого ε_m та поступового тепловиділення ε_p визначено вектор відносних значень теплової потужності у зонах $\mathbf{q} = \varepsilon_m \mathbf{v} + \varepsilon_p \mathbf{\eta}$ у долях максимального значення потужності, суми значень потужностей у нижній та верхній половині зон з рівною кількістю зон $n_{z2} = n_z/2$ кожна, а також загальну суму потужностей:

$$q_b = \sum_{j=1}^{n_{z2}} q_j, \quad q_t = \sum_{j=n_{z2}+1}^{n_z} q_j, \quad q_s = q_b + q_t.$$



Рисунку 5 – Зміна концентрації бору

Тоді аксіальний офсет визначається як $a_o = (q_t - q_b)/q_s$. Але ця формула при $q_s = 0$ не має сенсу. У цьому випадку задамо мале позитивне число ε_q , знайдемо $k_q = 1/\varepsilon_q$ та визначимо аксіальний офсет за формулою:

$$a_o = \begin{cases} (q_t - q_b)/q_s, & q_s \geq \varepsilon_q; \\ k_q(q_t - q_b), & q_s < \varepsilon_q. \end{cases} \quad (21)$$

Ця формула дозволяє дослідити зміну АО при повному скиданні навантаження.

З врахуванням вектора реактивності в СДР (12) отримана вертикально розподілена модель з управлінням ЯР поглинаючими стрижнями. Для представлення положення десятої регулюючої групи поглинаючих стрижнів введена відносна координата стрижнів $\zeta = z/H_a + 1/2$ з початковим значенням номінального режиму $\zeta_0 = \zeta(0) = 1$ верхньої межі АЗ і значенням нижньої межі $\zeta = 0$. Позначені межі зон $\zeta_j = j/n_z$ та обчислено відносне значення диференціальної ефективності стрижнів $\alpha_\zeta = k_z H_a / \beta$, де $k_z = dp_d/dz$ – максимальна диференціальна ефективність десятої регулюючої групи стрижнів. Визначимо зміну реактивності зони при повному введенні в неї стрижнів $\rho_{dm} = \alpha_\zeta / n_z$. Тоді функція зміни реактивності у зонах має вигляд:

$$\rho_{dj}(\zeta) = \begin{cases} 0, & \zeta > \zeta_j; \\ \alpha_\zeta(\zeta_j - \zeta), & \zeta \in [\zeta_{j-1}, \zeta_j]; \\ \rho_{dm}, & \zeta < \zeta_{j-1}; \end{cases} \quad j = \overline{1, n_z}. \quad (22)$$

За швидкістю поглинаючих стрижнів $v_z = dz/dt$ визначимо відносну швидкість $v_\zeta = d\zeta/d\tau = v_z t_b / H_a$. Використано закон рівномірного руху стрижнів $\zeta = 1 - v_\zeta \tau$ та покладено значення робочої швидкості стрижнів $v_z = 2 \text{ см/с}$. При цих вхідних умовах та початкових умовах номінального режиму ЯР виконане інтегрування СДР (12) з використанням програми СМ1, отримані перехідні процеси з управлінням ЯР поглинаючими стрижнями шляхом рівномірного переміщення стрижнів від верхньої межі АЗ ($\zeta = 1$) до її нижньої межі ($\zeta = 0$). Процеси на рис. 6 представляють змінні нейтронної потужності при керуванні стрижнями у 10 зонах в залежності від часу в хвилинах. Змінні потужності у зонах монотонно зменшуються з різним запізненням від номінальних значень до нульових значень. Процес зміни нейтронної потужності реактора у зонах показує, що реактор переходить з номінального режиму в режим нульової потужності приблизно за 5 хвилин. Процеси у зонах, симетричних відносно центру АЗ, починаються з однакового значення номінального режиму, але у нижчих зонах з меншими номерами процеси починаються з більшим запізненням.

Для управління ЯР борною кислотою шляхом об'єднання СДР (12) та ДР (20) і врахування реактивності (22) отримана СДР:

$$d\mathbf{X}_{rbz}/d\tau = \mathbf{f}_{rbz}(\mathbf{X}_{rbz}, \mathbf{c}_{rbz}), \quad \mathbf{X}_{0rbz} = \mathbf{X}_{rbz}(\tau_0), \quad \mathbf{v} = \mathbf{C}_{rbz}(\mathbf{X}_{rbz}), \quad (23)$$

з векторами змінних стану та початкових умов:

$$\mathbf{X}_{rbz} = (\mathbf{X}_{rz}^T \xi_B)^T, \quad \mathbf{X}_{0rbz} = (\mathbf{X}_{0rz}^T \xi_{0B})^T.$$

Інтегруючи отриману СДР при початкових умовах номінального режиму програмою СМ1, отримано перехідні процеси для введення в АЗ борної кислоти. На рис. 7 показані змінні нейтронної потужності у 10 зонах в залежності від часу в хвилинах. Цей процес показує, що реактор переходить з номінального режиму в режим нульової потужності приблизно за 27 хвилин. Процеси у зонах, симетричних відносно центру АЗ, починаються з однакового значення номінального режиму, але у вищих зонах процеси повільніші.

На рис. 8 і 9 показана зміна аксіального офсету.

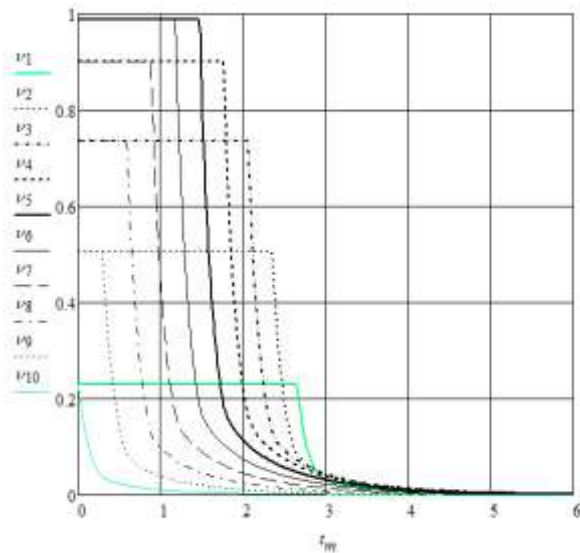


Рисунок 6 – Змінні нейтронної потужності при управлінні стрижнями

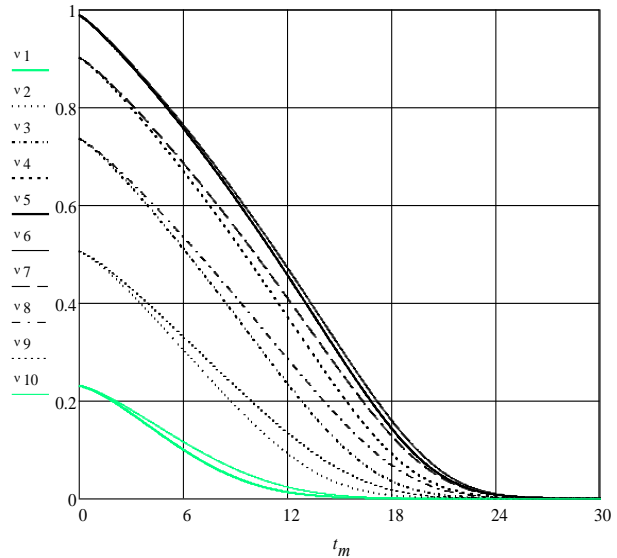


Рисунок 7 – Змінні нейтронної потужності при борному управлінні

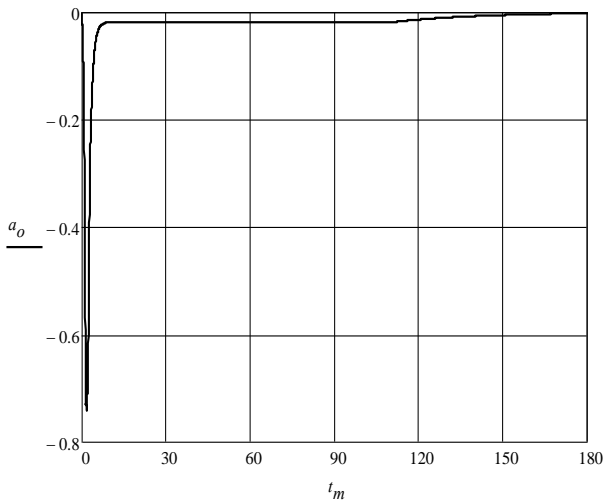


Рисунок 8 – Зміна аксіального офсету при управлінні стрижнями

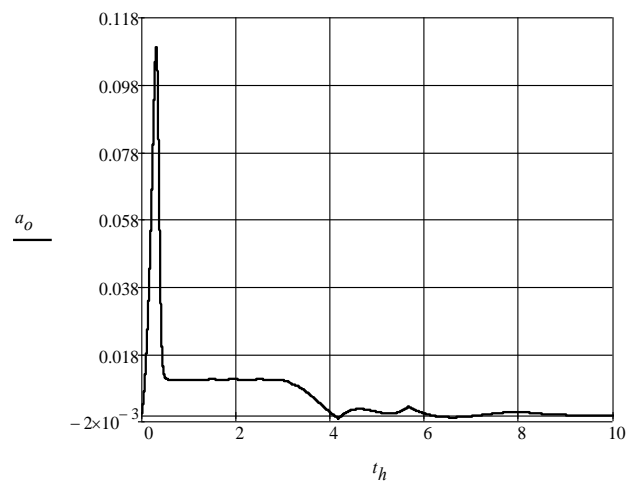


Рисунок 9 – Зміна аксіального офсету при управлінні бором

Аксіальний офсет на рис. 8 за декілька хвилин зменшується і доходить до мінімального значення, меншого $-0,7$, а потім зростає, спочатку швидко, а потім поступово, і приблизно за 3 години стає рівним нулю. Аксіальний офсет на рис. 9 за декілька хвилин збільшується і доходить до максимального значення, більшого $0,1$, а потім спадає, спочатку швидко, а потім поступово, і приблизно за 9 годин стає рівним нулю.

Для дослідження режиму скидання навантаження парогенератора на 20 % за допомогою моделі ПГ як об'єкта управління (14), задамо значення сигналу управління на КРТ $u_s = 0,8$. На рис. 10 показано графік перехідного процесу відхилення рівня води в парогенераторі ПГВ-1000. Відносна змінна рівня води ξ_c спочатку зменшується, потім зростає, відбувається «провал» рівня, але потім рівень знову зменшується. Цей процес зміни рівня води в ПГ, обчислений за моделлю (14), суттєво відрізняється від експериментального процесу зміни рівня при відключеному регуляторі рівня (РР).

Для дослідження процесів в режимі повного скидання навантаження парової турбіни К-1000-60/1500-2 за допомогою моделі (16) встановлено потужність електричного генератора $v_s = 0$. На рис. 11 представлено графік зміни відносної змінної частоти в процентах $y = 100\varphi$. Змінна частоти обертання ротора турбіни плавно збільшується протягом 3 с до свого максимального значення, а потім повільно починає знижуватися. Максимальний закид оборотів частоти турбіни К-1000-60/1500-2 склав 7,36 % від номінального значення частоти.

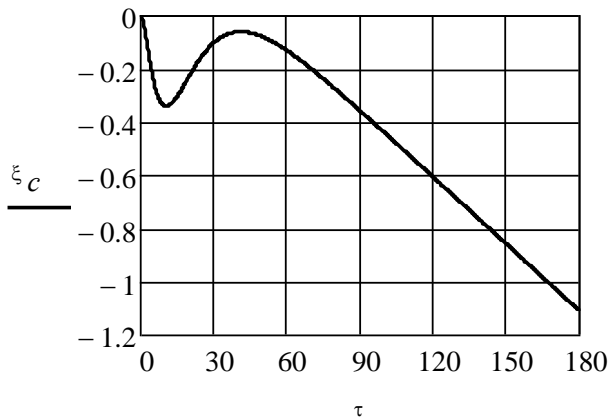


Рисунок 10 – Відхилення рівня води



Рисунок 11 – Зміна частоти

У **п'ятому розділі** розроблено моделі ІУС для складних динамічних об'єктів на прикладі ІУС енергоблоку з реактором ВВЕР-1000.

Загальна математична модель регулятора має вигляд:

$$d\mathbf{X}_C/d\tau = \mathbf{f}_C(\mathbf{X}_C, \mathbf{x}_C, \mathbf{c}_C, \varepsilon), \quad \mathbf{X}_{0C} = \mathbf{X}_C(\tau_0), \quad u = C_u(\mathbf{X}_C), \quad (24)$$

де $\mathbf{X}_C = \mathbf{X}_C(\tau)$ і \mathbf{X}_{0C} – вектори стану та початкових умов регулятора, $\mathbf{f}_C(\mathbf{X}_C, \mathbf{x}_C, \mathbf{c}_C, \varepsilon)$ – векторна функція правих частин СДР регулятора, \mathbf{x}_C і \mathbf{c}_C – вектори змінних та постійних параметрів регулятора, $C_u(\mathbf{X}_C)$ – оператор вихо-

ду регулятора. Інформаційна технологія дає можливість використовувати різні типи регуляторів, які включають пропорційний (П), інтегральний (І) і диференціальний (Д) регулятори, що формують керуючі дії:

$$u_P = K_P \varepsilon, \quad u_I = \frac{1}{T_I} \int \varepsilon d\tau, \quad u_D = \tau_D \frac{d\varepsilon}{d\tau}.$$

Тут K_P , T_I и τ_D – параметри регуляторів. Даним П, І та реальному Д законам управління відповідають ПФ регуляторів:

$$W_P = K_P, \quad W_I(s) = \frac{1}{T_I s}, \quad W_D(s) = \frac{K_D T_D s}{T_D s + 1}.$$

Остання ПФ при $K_D > 1$ наближено формує диференціальний закон з параметром $\tau_D = K_D T_D$, звичайно $K_D = 10$. Позначаючи $\lambda_I = 1/T_I$, $\lambda_D = 1/T_D$, запишемо ДР І регулятора та ДР реального Д регулятора:

$$du_I/d\tau = \lambda_I \varepsilon, \quad dv_D/d\tau = -\lambda_D (v_D + K_D \varepsilon), \quad u_D = v_D + K_D \varepsilon. \quad (25)$$

З П, І та Д регуляторів побудуємо ПІ та ПІД регулятори. Для оптимізації параметрів регуляторів K_P , λ_I і λ_D сформуємо з них вектор змінних параметрів $\mathbf{x} \in R^p$ розміру $p \in \{1, 2, 3\}$. На основі узагальнених моделей регулятора та ОУ представлена узагальнена модель ІУС у векторному вигляді СДР, що включає вектори стану, змінних та постійних параметрів, зовнішніх дій. Для лінійних ІУС з ПІ регулятором отримана модель у вигляді ПФ, що призначена для ідентифікації параметрів об'єктів управління.

Об'єднанням СДР (7) з рівняннями (24), (25) отримана модель ІУС реактора з ПІ регулятором нейтронної потужності з управлінням ЯР поглинаючими стрижнями вигляду (1):

$$d\mathbf{X}_{RR}/d\tau = \mathbf{f}_{RR}(\mathbf{X}_{RR}, \mathbf{x}_{RR}, \mathbf{c}_{RR}, v_s), \quad \mathbf{X}_{0RR} = \mathbf{X}_{RR}(0), \quad v = C_{RR}(\mathbf{X}_{RR}), \quad (26)$$

де $\mathbf{X}_{RR} = (\mathbf{X}_r^T \quad u_I \quad \zeta)^T$ і $\mathbf{X}_{0RR} = (\mathbf{X}_{0r}^T \quad 0 \quad 1)^T$ – вектор стану ІУС та його початкове значення, $\mathbf{x}_{RR} = (K_{PR} \quad \lambda_{IR})^T$ – вектор змінних параметрів ПІ регулятора. Для управління ЯР борною кислотою шляхом об'єднання СДР (20) отримана СДР з ПІД регулятором за формулами (25):

$$d\mathbf{X}_{RB}/d\tau = \mathbf{f}_{RB}(\mathbf{X}_{RB}, \mathbf{c}_{RB}), \quad \mathbf{X}_{0RB} = \mathbf{X}_{RB}(\tau_0), \quad v = C_{RB}(\mathbf{X}_{RB}), \quad (27)$$

де $\mathbf{X}_{RB} = (\mathbf{X}_{rb}^T \quad u_I \quad v_D)^T$ і $\mathbf{X}_{0RB} = (\mathbf{X}_{0rb}^T \quad 0 \quad 0)^T$ – вектор стану ІУС та його початкове значення, $\mathbf{x}_{RB} = (K_{PRB} \quad \lambda_{IRB} \quad \lambda_{DRB})^T$ – вектор змінних параметрів ПІД регулятора.

На підставі вертикальної розподіленої моделі ЯР побудовані моделі ІУС

нейтронної потужності реактора подібно ІУС з використанням зосередженої моделі. Об'єднанням СДР (12) отримана модель ІУС реактора з ПІ регулятором нейтронної потужності з управлінням реактором поглинаючими стрижнями вигляду (1):

$$d\mathbf{X}_{RRz}/d\tau = \mathbf{f}_{RRz}(\mathbf{X}_{RRz}, \mathbf{x}, \mathbf{c}_{RRz}, v_s), \quad \mathbf{X}_{0RRz} = \mathbf{X}_{RRz}(0), \quad v = C_{RRz}(\mathbf{X}_{RRz}), \quad (28)$$

де $\mathbf{X}_{RRz} = (\mathbf{X}_{rz}^T \quad u_I \quad \zeta)^T$ і $\mathbf{X}_{0RRz} = (\mathbf{X}_{0rz}^T \quad 0 \quad 1)^T$ – вектор стану ІУС і його початкове значення, $\mathbf{x} = (K_{PR} \quad \lambda_{IR})^T$ – вектор змінних параметрів ПІ регулятора.

Для управління ЯР борною кислотою шляхом об'єднання СДР (23) отримана СДР з ПІ регулятором за формулами (25):

$$d\mathbf{X}_{RBz}/d\tau = \mathbf{f}_{RBz}(\mathbf{X}_{RBz}, \mathbf{x}, \mathbf{c}_{RBz}, v_s), \quad \mathbf{X}_{0RBz} = \mathbf{X}_{RBz}(0), \quad v = C_{RBz}(\mathbf{X}_{RBz}), \quad (29)$$

де $\mathbf{X}_{RBz} = (\mathbf{X}_{rbz}^T \quad u_I)^T$ і $\mathbf{X}_{0RBz} = (\mathbf{X}_{0rbz}^T \quad 0)^T$ – вектор стану ІУС та його початкове значення, $\mathbf{x} = (K_{PR} \quad \lambda_{IR})^T$ – вектор змінних параметрів ПІ регулятора.

Для управління парогенератором сформовано сигнал помилки у відносних змінних

$$\varepsilon = \xi_{cs} - \xi_c + g_s - g_w, \quad (30)$$

де ξ_{cs} – уставка змінної рівня. Отримана модель ІУС рівня (ІУСР) ПГ з ПІ регулятором рівня (РР), у який СДР (13) доповнюється рівняннями:

$$\begin{cases} g_w = k_w \mu_w \sqrt{\pi_w - \pi_p}, \quad g_s = \alpha_{gs} \sqrt{\pi_p^2 - \pi_m^2}, \\ d\mu_s/d\tau = a_{ss}(u_s - \mu_s), \quad \varepsilon = \xi_{cs} - \xi_c + g_s - g_w, \quad u_p = K_{PG}\varepsilon, \\ du_I/d\tau = \lambda_{IG}\varepsilon, \quad u_w = u_p + u_I, \quad d\mu_w/d\tau = a_{ww}(u_w + \mu_{0w} - \mu_w), \end{cases} \quad (31)$$

де k_w – постійний параметр витрати через клапан живильної води.

Таким чином отримана модель ІУСР ПГ з ПІ РР вигляду (1):

$$d\mathbf{X}_G/d\tau = \mathbf{f}_G(\mathbf{X}_G, \mathbf{x}_G, \mathbf{c}_G, \mathbf{g}_G), \quad \mathbf{X}_{0G} = \mathbf{X}_G(0), \quad \xi_c = C_G(\mathbf{X}_G), \quad (32)$$

де $\mathbf{X}_G = (\mathbf{X}_g^T \quad u_I)^T$ і $\mathbf{X}_{0G} = (\mathbf{X}_{0g}^T \quad 0)^T$ – вектор стану ІУСР та його початкове значення, $\mathbf{x}_G = (K_{PG} \quad \lambda_{IG})^T$ – вектор змінних параметрів ПІ регулятора, \mathbf{c}_G – вектор постійних параметрів. На вхід ІУСР подається уставка рівня ξ_{cs} , збурюючими впливами є змінні теплової потужності q і сигнал на СП u_s , а також змінна тиску перед ПТ π_t , тому вектор зовнішніх дій $\mathbf{g}_G = (\xi_{cs} \quad q \quad u_s \quad \pi_t)^T$. Помилка ε надходить на вхід РР, який формує сигнал управління u_w , що подається в модель ПГ і змінює вектор його стану \mathbf{X}_G . Вихідною змінною ІУСР є

змінна рівня ξ_c .

Для моделювання ІУС турбіни слікуючий привід описано рівнянням

$$d\mu/d\tau = a_{vv}(\mu - \mu_0) + b_{vu}u. \quad (33)$$

Об'єднанням СДР (16) з рівняннями (25), (33) отримана модель ІУС парової турбіни з ПІ регулятором частоти (РЧ) вигляду (1):

$$d\mathbf{X}_T/d\tau = \mathbf{f}_T(\mathbf{X}_T, \mathbf{x}_T, \mathbf{c}_T, \mathbf{g}_T), \quad \mathbf{X}_{0T} = \mathbf{X}_T(0), \quad y = C_T(\mathbf{X}_T), \quad (34)$$

де $\mathbf{X}_T = (\mathbf{X}_t^T \ u_I \ \mu)^T$ і $\mathbf{X}_{0T} = (\mathbf{X}_{0t}^T \ 0 \ 1)^T$ – вектор стану ІУС та його початкове значення, $\mathbf{x}_T = (K_{PT} \ \lambda_{IT})^T$ – вектор змінних параметрів ПІ регулятора, \mathbf{c}_T – вектор постійних параметрів, $\mathbf{g}_T = (\pi_0 \ v_s)^T$ – вектор зовнішніх дій.

Об'єднанням моделей ЯР (7), паропроводів, ІУС ПГ (32), головного циркуляційного насосу (ГЦН), отримана нелінійна модель першого контуру енергоблоку АЕС:

$$d\mathbf{X}_I/d\tau = \mathbf{f}_I(\mathbf{X}_I, \mathbf{x}_I, \mathbf{c}_I, \mathbf{g}_I), \quad \mathbf{X}_{0I} = \mathbf{X}_I(0), \quad \mathbf{y}_I = \mathbf{C}_I(\mathbf{X}_I), \quad (35)$$

де $\mathbf{X}_I = (\mathbf{X}_r^T \ \theta_{TR} \ \mathbf{X}_G^T \ \theta_{TP} \ \theta_{CP} \ \theta_I)^T$ – вектор стану ІУС першого контуру, θ_{TR} , θ_{TP} і θ_{CP} – температури теплоносія, що передаються в ПГ, в ГЦН та на виході з ГЦН; θ_I – температура теплоносія на вході в реактор; $\mathbf{g}_I = (\xi_{cs} \ g_m \ \pi_w)^T$ і $\mathbf{y}_I = (v \ \xi_c \ g_s)^T$ – вектори вхідних і вихідних змінних. Нелінійна модель першого контуру як об'єкта управління має порядок $n_I = 29$.

Об'єднанням моделей ІУС ПГ (13), (33) та інших ІУС другого контуру АЕС, отримана нелінійна модель другого контуру:

$$d\mathbf{X}_{II}/d\tau = \mathbf{f}_{II}(\mathbf{X}_{II}, \mathbf{x}_{II}, \mathbf{c}_{II}, \mathbf{g}_{II}), \quad \mathbf{X}_{0II} = \mathbf{X}_{II}(0), \quad \mathbf{y}_{II} = \mathbf{C}_{II}(\mathbf{X}_{II}), \quad (36)$$

де $\mathbf{X}_{II} = (\pi_m \ \mathbf{X}_T^T \ \pi_k \ \pi_{l1} \ \pi_{l2} \ \pi_{l3} \ \pi_{l4} \ \pi_d \ \pi_f \ \pi_{w1} \ \pi_{w2} \ \pi_{w3})^T$ – вектор стану ІУС другого контуру; π_{l1} , π_{l2} , π_{l3} , π_{l4} – змінні тиску в послідовно з'єднаних чотирьох підігрівачів низького тиску (ПНТ); π_d і π_f – змінні тиску в деаераторі та в турбоживильному насосі (ТЖН); π_{w1} , π_{w2} , π_{w3} – змінні тиску в послідовно з'єднаних трьох підігрівачів високого тиску (ПВТ); $\mathbf{g}_{II} = (g_s \ v_{Ts})^T$ і $\mathbf{y}_{II} = (\varphi \ \pi_{w3})^T$ – вектори вхідних і вихідних змінних. Нелінійна модель другого контуру як об'єкта управління має порядок $n_{II} = 25$.

На підставі моделей елементів першого та другого контурів енергоблоку (35) і (36) складена модель енергоблоку як об'єкта управління:

$$d\mathbf{X}_u/d\tau = \mathbf{f}_u(\mathbf{X}_u, \mathbf{x}_u, \mathbf{c}_u, \mathbf{g}_u), \quad \mathbf{X}_{0u} = \mathbf{X}_u(0), \quad \mathbf{y}_u = \mathbf{C}_u(\mathbf{X}_u), \quad (37)$$

де $\mathbf{X}_u = (\mathbf{X}_I^T \quad \mathbf{X}_{II}^T)^T$ – вектор стану ІУС енергоблоку АЕС, $\mathbf{g}_u = (v_s \quad v_{Ts})^T$ і $\mathbf{y}_u = (v \quad \xi_c \quad \varphi \quad \pi_m)^T$ – вектори вхідних і вихідних змінних. Нелінійна модель енергоблоку АЕС як об'єкта управління має порядок $n_u = 54$.

У режимі «Н» система управління потужністю підтримує постійну нейтронну потужність в діапазоні від 3 % до 120 % її номінального значення. Математична модель ІУС підтримки потужності (ІУСПП) енергоблоку з ПП регулятором побудована за рівняннями (37), (25):

$$d\mathbf{X}_{UN}/d\tau = \mathbf{f}_{UN}(\mathbf{X}_{UN}, \mathbf{x}_{UN}, \mathbf{c}_{UN}, \mathbf{g}_{UN}), \quad \mathbf{X}_{0UN} = \mathbf{X}_{UN}(0), \quad v = \mathbf{C}_{UN}(\mathbf{X}_{UN}), \quad (38)$$

де $\mathbf{X}_{UN} = (\mathbf{X}_u^T \quad u_I)^T$ і $\mathbf{X}_{0UN} = (\mathbf{X}_{0u}^T \quad 0)^T$ – вектор стану ІУСПП енергоблоку АЕС та його початкове значення, $\mathbf{g}_{UN} = (v_s \quad v_{Ts})^T$ – вектор вхідних змінних, v_s – уставка потужності. Нелінійна модель ІУСПП енергоблоку АЕС має порядок $n_{UN} = 55$. Вектор змінних параметрів цієї моделі $\mathbf{x}_{UN} = (K_{PUN}, \lambda_{IUN})$.

У режимі «Т» підтримки постійного тиску пара P_s перед турбіною на регулятор нейтронної потужності (РНП) реактора в якості уставки надходить сигнал з регулятора тиску (РТ). Математична модель ІУС підтримки тиску (ІУСПТ) енергоблоку з ППД регулятором побудована за рівняннями (38), (25):

$$d\mathbf{X}_{UP}/d\tau = \mathbf{f}_{UP}(\mathbf{X}_{UP}, \mathbf{x}_{UP}, \mathbf{c}_{UP}, \mathbf{g}_{UP}), \quad \mathbf{X}_{0UP} = \mathbf{X}_{UP}(0), \quad \pi_m = \mathbf{C}_{UP}(\mathbf{X}_{UP}), \quad (39)$$

де $\mathbf{X}_{UP} = (\mathbf{X}_{UN}^T \quad u_I \quad v_D)^T$ і $\mathbf{X}_{0UP} = (\mathbf{X}_{0UN}^T \quad 0 \quad 0)^T$ – вектор стану ІУСПТ енергоблоку АЕС та його початкове значення, $\mathbf{g}_{UP} = (v_s \quad v_{Ts})^T$ – вектор вхідних змінних. Нелінійна модель ІУСПП енергоблоку АЕС має порядок $n_{UP} = 57$. Вектор змінних параметрів цієї моделі $\mathbf{x}_{UP} = (K_{PUP} \quad \lambda_{IUP} \quad \lambda_{DUP})^T$.

Шостий розділ присвячений узагальненню моделей інформаційно-управляючих систем для ідентифікації параметрів ІУС та використанню ІТ для ідентифікації параметрів динамічних систем на прикладі ІУС парогенератора ПГВ-1000 та ІУС інших елементів другого контуру енергоблоку АЕС.

Для задачі ідентифікації вектору параметрів систем \mathbf{x} за алгоритмом методу інтегрування СДР з постійним кроком отримано масив значень перехідного процесу $\mathbf{Z} = \mathbf{Z}(\mathbf{x})$. Сформоване середньоквадратичне відхилення (СКВ) для масивів експериментальних даних \mathbf{Y} і теоретичних значень $\mathbf{Z}(\mathbf{x})$ розміру L

$$s_0(\mathbf{x}) = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{i=0}^L [Y_i - Z_i(\mathbf{x})]^2}. \quad (40)$$

Для обліку всіх обмежень задачі ідентифікації за скалярними штрафними функціями сформована векторна цільова функція (ВЦФ) ідентифікації

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) = \begin{cases} (0; P(\mathbf{x})), & \mathbf{x} \in H_0, \\ (1; S(\mathbf{x})), & \mathbf{x} \in H_1, \\ (k; -\rho_k(\mathbf{x})), & \mathbf{x} \in H_k, \quad k = \overline{2, n-1}, \\ s_0(\mathbf{x}), & \mathbf{x} \in H_n, \end{cases} \quad (41)$$

де $P(\mathbf{x})$ – штрафна функція порушень двосторонніх обмежень параметрів; $S(\mathbf{x})$ – штрафна функція ступеню порушень нерівностей признака Стодоли; $\rho_k(\mathbf{x})$ – елементи першого стовпця таблиці Рауса, H_k – області рівнів, n – порядок моделі ІУС.

Створений клас ВЦФ, у якому для порівняння двох довільних значень ВЦФ (41) $\mathbf{U} = (U_1; U_2)$ і $\mathbf{V} = (V_1; V_2)$ програмно реалізовано операцію порівняння «краще»:

$$\mathbf{U} < \mathbf{V} = \begin{cases} 1, & U_1 > V_1 \vee U_1 = V_1 \wedge U_2 < V_2; \\ 0, & U_1 < V_1 \vee U_1 = V_1 \wedge U_2 \geq V_2. \end{cases} \quad (42)$$

Аналогічно запрограмовані операції «не краще», «гірше», «не гірше». З використанням цих операцій модифіковані методи оптимізації, які виконують пріоритетну максимізацію першої проекції ВЦФ $F_1(\mathbf{x})$ шляхом мінімізації її другої проекції $F_2(\mathbf{x})$, що відповідає покроковому виконанню обмежень для змінних параметрів ІУС і дозволяє отримати розв'язок задачі оптимізації

$$\mathbf{x}^* = \arg \min \{ F_2(\mathbf{x}) \mid F_1(\mathbf{x}) \rightarrow \max \}. \quad (43)$$

Використання ВЦФ для розв'язання задач ідентифікації ІУС дозволяє автоматизувати і прискорити процеси розв'язання цих задач з послідовним виконанням всіх вимог, що висуваються до систем.

Для оптимізації ВЦФ реалізовані методи безумовної оптимізації скалярних функцій з перезавантаженням операції порівняння для класу векторних функцій. Метод деформованого багатогранника Нелдера – Міда представлений алгоритмом, що реалізує функцію $[\mathbf{x}, \mathbf{f}_\mathbf{x}] = \text{metNM}(\mathbf{x}, \mathbf{F}(\mathbf{x}), \delta, \varepsilon)$.

Алгоритм 1. Метод Нелдера – Міда. Вхідні параметри: \mathbf{x} – початкова точка пошуку, $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ – процедура обчислення векторної функції, δ – розмір початкового багатогранника, ε – допустима похибка. Вихідні параметри: \mathbf{x} і $\mathbf{f}_\mathbf{x}$ – краща точка і значення функції в ній. 1. Покласти $n = \dim(\mathbf{x})$, $m = n + 1$, $j = 1$. 2. Покласти $\mathbf{X}_j = \mathbf{x}$, $X_{jj} = x_j + \delta$, $\mathbf{F}_j = \mathbf{F}(\mathbf{X}_j)$. 3. Якщо $j < n$, покласти $j = j + 1$ і перейти до п. 2. 4. Покласти $\mathbf{X}_m = \mathbf{x}$, $\mathbf{F}_m = \mathbf{F}(\mathbf{x})$. 5. Покласти $l = m$, $\mathbf{f}_\mathbf{x} = \mathbf{F}_m$, $h = m$, $\mathbf{f}_\mathbf{w} = \mathbf{F}_m$, $j = 1$. 6. Якщо $\mathbf{F}_j < \mathbf{f}_\mathbf{x}$, покласти $\mathbf{f}_\mathbf{x} = \mathbf{F}_j$, $l = j$. 7. Якщо $\mathbf{f}_\mathbf{w} < \mathbf{F}_j$, покласти $\mathbf{f}_\mathbf{w} = \mathbf{F}_j$, $h = j$. 8. Якщо $j < n$, покласти $j = j + 1$ і перейти до п. 6. 9. Покласти $\mathbf{x} = \mathbf{X}_l$, $\mathbf{w} = \mathbf{X}_h$. 10. Обчислити $\delta = \max_{i, j} |X_{ij} - x_i|$. 11. Якщо $\delta < \varepsilon$,

вихід. 12. Обчислити $\mathbf{c} = \frac{1}{n} \left(\sum_{j=1}^m \mathbf{X}_j - \mathbf{w} \right)$. 13. Обчислити $\mathbf{y} = 2\mathbf{c} - \mathbf{w}$, $\mathbf{f}_y = \mathbf{F}(\mathbf{y})$.

14. Якщо $\neg(\mathbf{f}_y < \mathbf{f}_x)$, перейти до п. 18. 15. Обчислити $\mathbf{z} = 2\mathbf{y} - \mathbf{c}$, $\mathbf{f}_z = \mathbf{F}(\mathbf{z})$.

16. Якщо $\mathbf{f}_z < \mathbf{f}_y$, покласти $\mathbf{X}_h = \mathbf{z}$, $\mathbf{F}_h = \mathbf{f}_z$, інакше, $\mathbf{X}_h = \mathbf{y}$, $\mathbf{F}_h = \mathbf{f}_y$. 17. Перейти до п. 5.

18. Покласти $j = 1$. 19. Якщо $j \neq h$ і $\mathbf{f}_y < \mathbf{F}_j$, покласти $\mathbf{X}_h = \mathbf{y}$, $\mathbf{F}_h = \mathbf{f}_y$ і перейти до п. 5.

20. Якщо $j < m$, покласти $j = j + 1$ і перейти до п. 19. 21. Якщо $\mathbf{f}_y < \mathbf{f}_w$, покласти $\mathbf{w} = \mathbf{y}$, $\mathbf{f}_w = \mathbf{f}_y$, $\mathbf{X}_h = \mathbf{y}$, $\mathbf{F}_h = \mathbf{f}_y$.

22. Обчислити $\mathbf{z} = 0,5(\mathbf{w} + \mathbf{c})$, $\mathbf{f}_z = \mathbf{F}(\mathbf{z})$.

23. Якщо $\mathbf{f}_z < \mathbf{f}_w$, покласти $\mathbf{X}_h = \mathbf{z}$, $\mathbf{F}_h = \mathbf{f}_z$ і перейти до п. 5.

24. Покласти $j = 1$. 25. Якщо $j \neq l$, покласти $\mathbf{X}_j = 0,5(\mathbf{X}_j + \mathbf{x})$, $\mathbf{F}_j = \mathbf{f}(\mathbf{X}_j)$.

26. Якщо $j < m$, покласти $j = j + 1$ і перейти до п. 25. 27. Перейти до п. 5.

Метод Хука – Дживса представлений алгоритмом, що реалізує функцію $[\mathbf{x}, \mathbf{f}_x] = \text{metHJ}(\mathbf{x}, \mathbf{F}(\mathbf{x}), \delta, \varepsilon)$.

Алгоритм 2. Метод Хука – Дживса. Вхідні параметри: \mathbf{x} – початкова точка, $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ – процедура обчислення векторної функції, δ – початковий крок досліджувачого пошуку, ε – допустима похибка. Вихідні параметри: \mathbf{x} і \mathbf{f}_x – найкраща точка пошуку та значення в ній цільової функції. 1. Покласти $\mathbf{f}_x = \mathbf{F}(\mathbf{x})$, $\delta = 2\delta$. 2. Якщо $\delta < \varepsilon$, вихід. 3. Покласти $\delta = \delta/2$. 4. Обчислити $(\mathbf{y}, \mathbf{f}_y) = \text{research}(\mathbf{x}, \mathbf{f}_x, \delta)$. 5. Якщо $\neg(\mathbf{f}_y < \mathbf{f}_x)$, перейти до п. 2. 6. Обчислити $\mathbf{z} = 2\mathbf{y} - \mathbf{x}$, $\mathbf{f}_z = \mathbf{F}(\mathbf{z})$. 7. Покласти $\mathbf{x} = \mathbf{y}$, $\mathbf{f}_x = \mathbf{f}_y$. 8. Обчислити $(\mathbf{y}, \mathbf{f}_y) = \text{research}(\mathbf{z}, \mathbf{f}_z, \delta)$. 9. Якщо $\mathbf{f}_y < \mathbf{f}_x$, перейти до п. 6, інакше, перейти до п. 2.

В алгоритмі 2 використано досліджувачий пошук, який реалізує функцію $(\mathbf{y}, \mathbf{f}_y) = \text{research}(\mathbf{x}, \mathbf{f}_x, \delta)$ за наступним алгоритмом.

Алгоритм 3. Досліджувачий пошук. Вхідні параметри: \mathbf{x} і \mathbf{f}_x – базова точка і значення в ній цільової функції, δ – крок досліджувачого пошуку. Вихідні параметри: \mathbf{y} і \mathbf{f}_y – найкраща точка досліджувачого пошуку та значення в ній цільової функції. 1. Покласти $n = \dim \mathbf{x}$, $\mathbf{y} = \mathbf{x}$, $\mathbf{f}_y = \mathbf{f}_x$, $\mathbf{u} = \mathbf{y}$, $i = 1$. 2. Обчислити $u_i = y_i + \delta$, $\mathbf{f}_u = \mathbf{F}(\mathbf{u})$. 3. Якщо $\mathbf{f}_u < \mathbf{f}_y$, покласти $y_i = u_i$, $\mathbf{f}_y = \mathbf{f}_u$ і перейти до п. 6. 4. Обчислити $u_i = y_i - \delta$, $\mathbf{f}_u = \mathbf{F}(\mathbf{u})$. 5. Якщо $\mathbf{f}_u < \mathbf{f}_y$, покласти $y_i = u_i$, $\mathbf{f}_y = \mathbf{f}_u$, інакше, покласти $u_i = y_i$. 6. Якщо $i < n$, покласти $i = i + 1$ і перейти до п. 2, інакше, вихід.

Початок процесу оптимізації (рис. 2) цих методів реалізовано у функціях $[\mathbf{x}, \mathbf{f}_x] = \text{metNM}0(\mathbf{x}, \mathbf{F}(\mathbf{x}), \delta, \varepsilon)$ за кроками 1–5 алгоритму 1 для методу Нелдера – Міда, $[\mathbf{x}, \mathbf{f}_x] = \text{metHJ}0(\mathbf{x}, \mathbf{F}(\mathbf{x}), \delta, \varepsilon)$ за кроком 1 алгоритму 2 для методу Хука – Дживса, а продовження процесу оптимізації – за наступними кроками. Аналогічно в ІТ використані інші методи багатовимірного пошуку.

Для розв'язання задачі ідентифікації параметрів ІУСР ПГ векторна функ-

ція (41) оптимізована з використанням операції порівняння (42) генетичними алгоритмами, методами Хука – Дживса за алгоритмом 1 та Нелдера – Міда з блоку методів оптимізації ІТ зі значенням параметра $d = 0,75$ допустимих відхилень обмежень від проєкцій початкового вектора. На рис. 12 і 13 представлені процеси відхилення рівня в ПГ при відключеному і включеному РР. При початкових значеннях варійованих параметрів моделей ПГ і відключеному РР рівень швидко знижується з коливаннями (рис. 12), а при включеному РР процес зміни рівня коливальний (рис. 13). Після ідентифікації спостерігається збіг процесів в моделі з експериментальними процесами як при відключеному, так і при включеному РР. Результати ідентифікації параметрів ПГ отримано шляхом оптимізації векторної функції (41). Значення складових $F_1 = 11$ і $F_2 = 0,435$, значення СКВ $\hat{s} = 0,435$ мм.

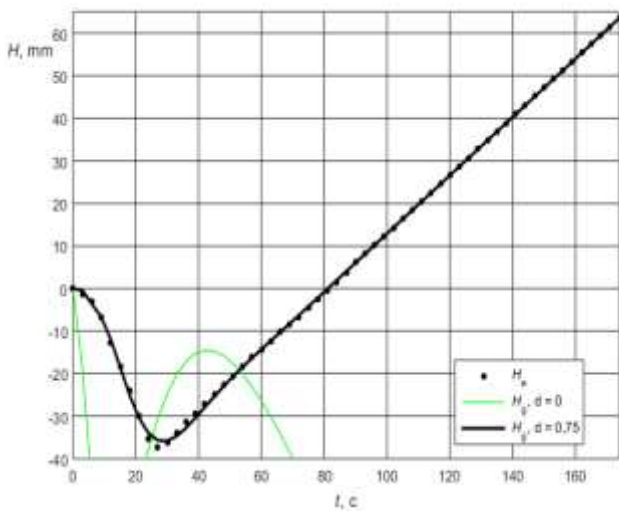


Рисунок 12 – Відхилення рівня води при відключеному регуляторі

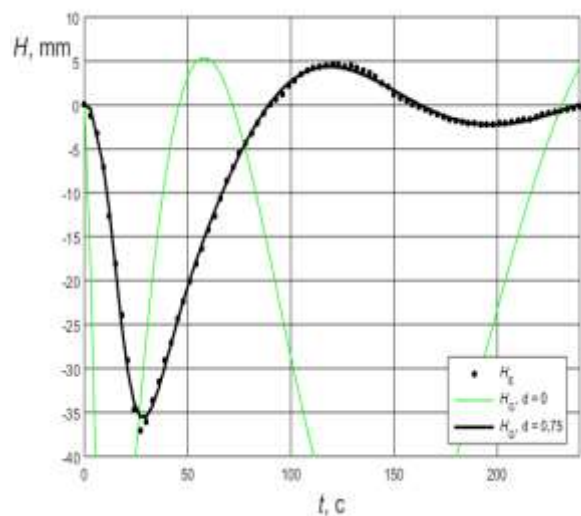


Рисунок 13 – Відхилення рівня води при включеному регуляторі

Загальні математичні моделі ІУС елементів другого контуру енергоблоку АЕС з ПІ регуляторами для ідентифікації ОУ мають вигляд СДР (1):

$$d\mathbf{X}/d\tau = \mathbf{f}(\mathbf{X}, \mathbf{x}, \mathbf{c}, g), \quad \mathbf{X}(0) = \mathbf{0}, \quad y = X_n(\tau), \quad (44)$$

де $\mathbf{X} = \mathbf{X}(\tau)$ – вектор стану, \mathbf{x} – вектор змінних параметрів об'єкта управління, $\mathbf{c} = (K_p, K_I)$ – вектор постійних параметрів ПІ регулятора ІУС, g – вхідний вплив, $\mathbf{f}(\mathbf{X}, \mathbf{x}, \mathbf{c}, g)$ – векторна функція формування СДР ІУС в просторі станів на основі відповідної ПФ, y – керована змінна, початкові умови нульові.

Під час експериментального налагодження пускового ПІ РР води у деаераторі (ДА) при значеннях параметрів $K_p = 6$ і $T_I = 25$ с отримані експериментальні сигнали, представлені на рис. 14. Для розв'язання задачі ідентифікації ДА вибрано ділянки цих графіків з 3084 точок для вхідної g_E і вихідної y_E змінних ДА, що відповідають включеному режиму налагодження на обраному проміжку часу, які приведені до одного початку координат і представлені на рис. 15.

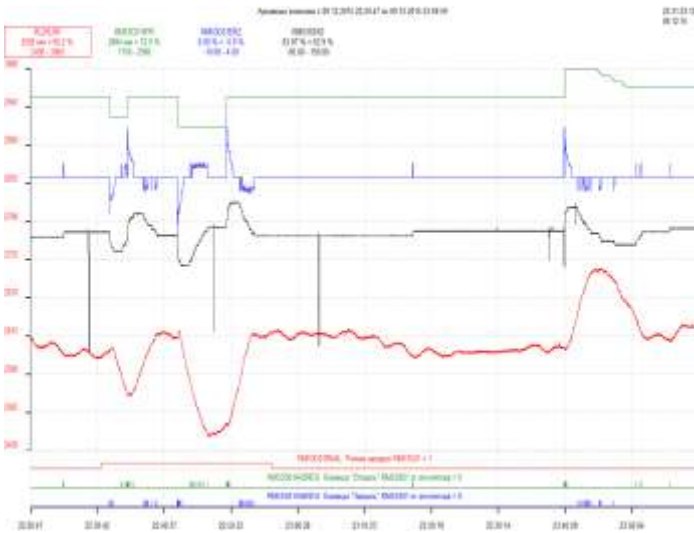


Рисунок 14 – Експериментальні дані регулювання рівня в ДА

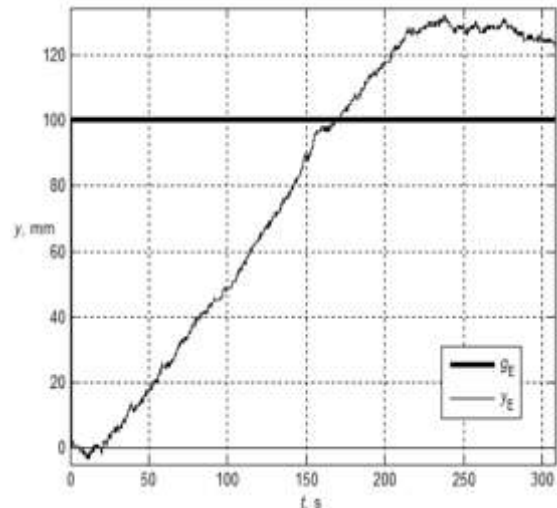


Рисунок 15 – Дані для ідентифікації ДА з РР

На рис. 16 показана траєкторія ідентифікації параметрів ПФ ДА порядку $n_O = 2$ в просторі трьох змінних параметрів $x_1 = \alpha_0$, $x_2 = \alpha_1$ і $x_3 = \alpha_2$, що складається з кращих точок пошуку. Початкова точка пошуку $x_0 = (10, 200, 1000)^T$ позначена колом, кінцева точка позначена ромбом. Задані початковий крок пошуку 1000 і допустима похибка по кроку 10^{-7} . На рис. 17 показані процеси зміни рівня в ДА при $n_O = 2$: y_E позначає експериментальний процес, y_0 – процес в початковій точці пошуку, y_1 – процес в кінцевій точці при ідентифікованих значеннях параметрів. По горизонтальній осі відкладено час в секундах, по вертикальній – відхилення рівня в міліметрах. За результатами ідентифікації зроблено висновок, що порядок ДА в процесах регулювання рівня та тиску $n_O = 2$, а їх ПФ $W_O(s) = 1/(\alpha_0 + \alpha_1 s + \alpha_2 s^2)$.

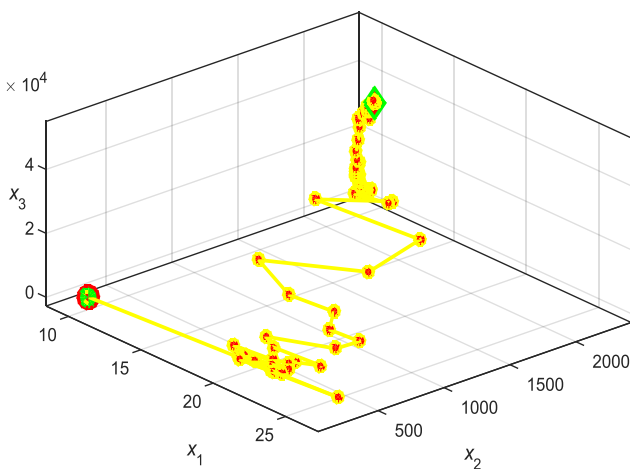


Рисунок 16 – Ідентифікація ДА з РР

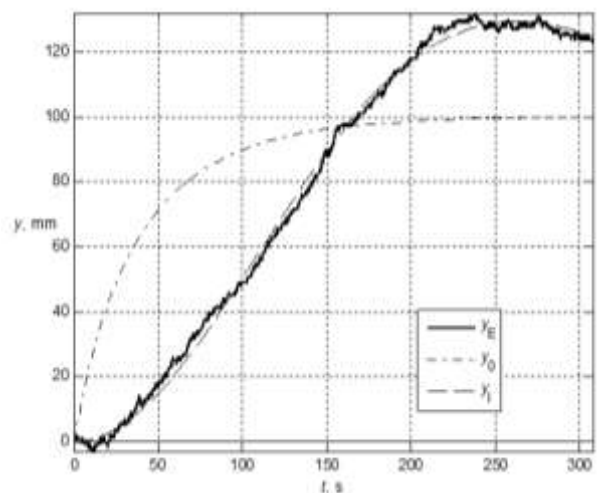


Рисунок 17 – Перехідні процеси в ІУС ДА

За результатами налагоджувальних випробувань систем управління другого контуру енергоблоків 1 і 2 Балаковської АЕС з реакторами ВВЕР-1000 та-

кож проведена ідентифікація коефіцієнтів ПФ для конденсаторів, головних парових колекторів, колекторів власних потреб, турбоживильних насосів, сепараторів пароперегрівачів, підігрівачів низького і високого тиску.

Обґрунтовано стійкість всіх розглянутих систем управління другого контуру для двох енергоблоків Балаковської АЕС з реакторами ВВЕР-1000 при зміні параметрів ПІ регуляторів. Проведений аналіз ступеня стійкості та меж області стійкості для систем управління деаераторів, конденсаторів, головних парових колекторів, колекторів власних потреб, турбоживильних насосів, сепараторів пароперегрівачів, підігрівачів низького і високого тиску енергоблоків 1 і 2 з реакторами ВВЕР-1000 Балаковської АЕС обґрунтовує стійкість таких систем управління інших енергоблоків з реакторами ВВЕР-1000.

Сьомий розділ присвячений узагальненню обчислення критеріїв якості ІУС – ППЯ і покращених ІКО, формуванні на їх основі ВЦФ та методів їх оптимізації, а також прикладам використання ІТ оптимізації управління складними динамічними системами.

По аналогії з ВЦФ ідентифікації (43) визначено ВЦФ оптимізації ППЯ динамічних систем:

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) = \begin{cases} (0; P(\mathbf{x})), & \mathbf{x} \in H_0, \\ (1; S(\mathbf{x})), & \mathbf{x} \in H_1, \\ (k; -\rho_k(\mathbf{x})), & \mathbf{x} \in H_k, k = \overline{2, n-1}, \\ (n; \sigma(\mathbf{x}) - \sigma_m), & \mathbf{x} \in H_n, \\ (n+1; \zeta(\mathbf{x}) - \zeta_m), & \mathbf{x} \in H_{n+1}, \\ (n+2; \lambda(\mathbf{x}) - \lambda_m), & \mathbf{x} \in H_{n+2}, \\ (n+3; \tau(\mathbf{x})), & \mathbf{x} \in H_{n+3}, \end{cases} \quad (45)$$

де $\sigma(\mathbf{x})$, $\zeta(\mathbf{x})$, $\lambda(\mathbf{x})$, $\tau(\mathbf{x})$ – функції перерегулювання, розмаха коливань, затухання коливань, часу регулювання; σ_m , ζ_m , λ_m – максимальні відхилення процесу, розмаху коливань, загасання коливань. Для багатьох систем врахування вимоги стійкості забезпечується обмеженнями ППЯ, тому ВЦФ (45) спрощено:

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) = \begin{cases} (0; P(\mathbf{x})), & \mathbf{x} \in H_0, \\ (1; \sigma(\mathbf{x}) - \sigma_m), & \mathbf{x} \in H_1, \\ (2; \zeta(\mathbf{x}) - \zeta_m), & \mathbf{x} \in H_2, \\ (3; \lambda(\mathbf{x}) - \lambda_m), & \mathbf{x} \in H_3, \\ (4; \tau(\mathbf{x})), & \mathbf{x} \in H_4. \end{cases} \quad (46)$$

Виконано оптимізацію параметрів регуляторів програмою векторного методу Нелдера – Міда з блоку методів оптимізації шляхом оптимізації ВЦФ (45) для ІУС рівня ПГ (32), ІУС допоміжного обладнання другого контуру, а ВЦФ (46) для ІУС нейтронної потужності реактора (26)–(29), ІУС частотою ПТ (34), ІУС нейтронної потужності (38) та тиску (39) енергоблоку. Результати оптимі-

зації зведені у табл., де $x_1 = K_P$ і $x_2 = \lambda_I$, а також представлені на рис. 22–29.

На рис. 22 і 23 представлений процес оптимізації параметрів ПІ РНП за ППЯ при управлінні стрижнями на основі розподіленої моделі ЯР. Тут на графіках складових ВЦФ $F_1(\mathbf{x})$ і $F_2(\mathbf{x})$ змінних параметрів показані кращі точки пошуку. Початкова точка відмічена колом, кінцева – ромбом.

Таблиця – Результати оптимізації

СДС	σ_m	ζ_m	F_{01}	F_{02}	x_{01}	x_{02}	F_1^*	F_2^*	x_1^*	x_2^*	σ^*	$t_c^*, \text{с}$
ЯР	0,05	0,01	2	0,17	90	1	4	0,18	73	0,22	0	163
ПГ	1	0	12	0,04	0,4	0,1	13	0,32	0,9	0,4	0,2	146
ПТ	0	0	2	0,04	5	1	4	0,21	33,8	11,6	0,02	6

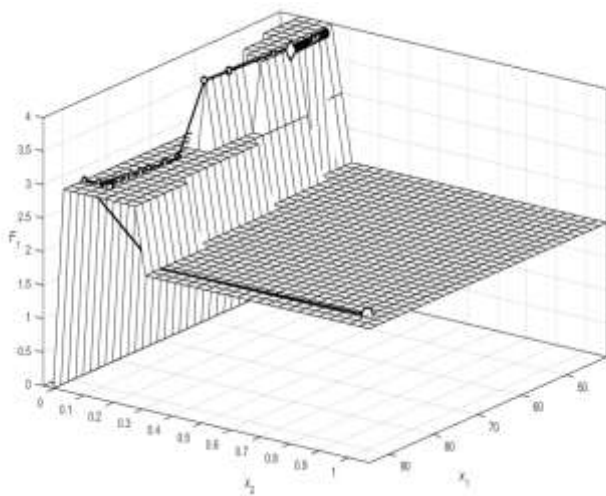


Рисунок 22 – Оптимізація ПІ РНП на графіку

$F_1(\mathbf{x})$

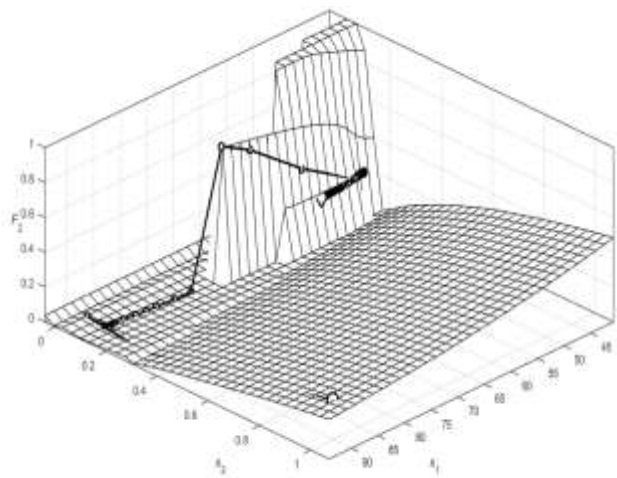


Рисунок 23 – Оптимізація ПІ РНП на графіку

$F_2(\mathbf{x})$

Процеси на рис. 24 представляють зміну керованої величини y ІУС з початковими та оптимальними значеннями параметрів ПІ регулятора в залежності від часу в секундах при зниженні нейтронної потужності на 20 %, y_0 процес у початковій точці, y – у кінцевій. Аксіальний офсет на рис. 25 за декілька десятків хвилин зменшується і доходить до мінімального значення $-0,249$, що відповідає допустимій області значень АО в залежності від рівня потужності реактора.

Процеси на рис. 26 представляють зміну відхилення керованої величини y ІУСР з початковими та оптимальними значеннями параметрів ПІ регулятора в залежності від часу в секундах при зниженні потужності на 20 %. Аналіз цих результатів дозволяє зробити висновок, що ПІ регулятор з оптимальними значеннями параметрів забезпечує найбільш швидкий перехідний процес без коливань. Оптимізація показників якості системи істотно поліпшила процеси управління. Процеси на рис. 29 представляють зміну керованої величини y ІУС з початковими та оптимальними значеннями параметрів ПІ регулятора в залежності від часу в секундах при зниженні потужності на 20 %.

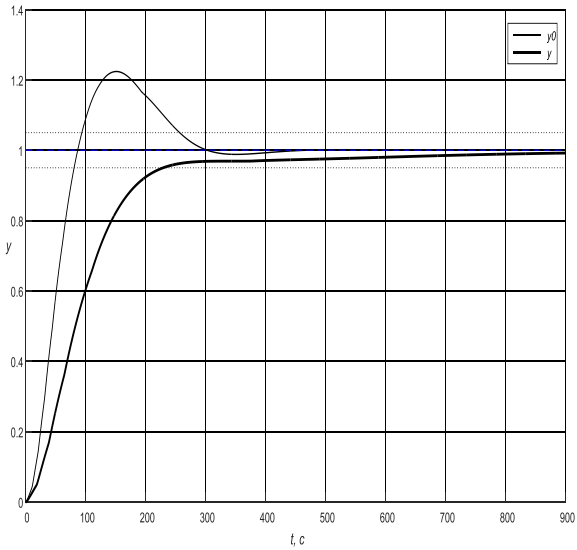


Рисунок 24 – Управління ЯР

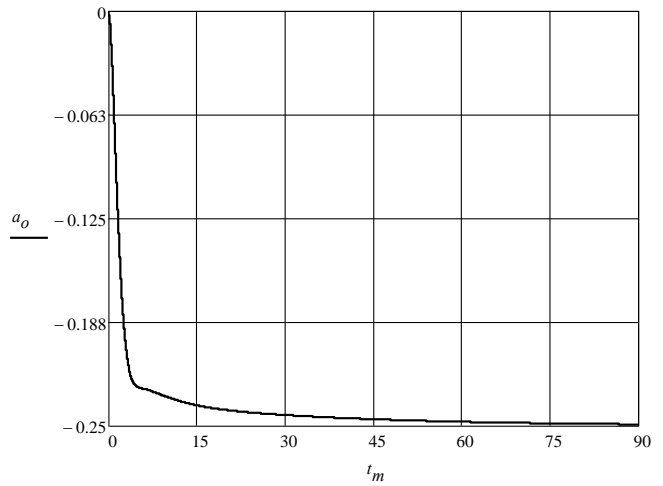


Рисунок 25 – Зміна аксіального офсету

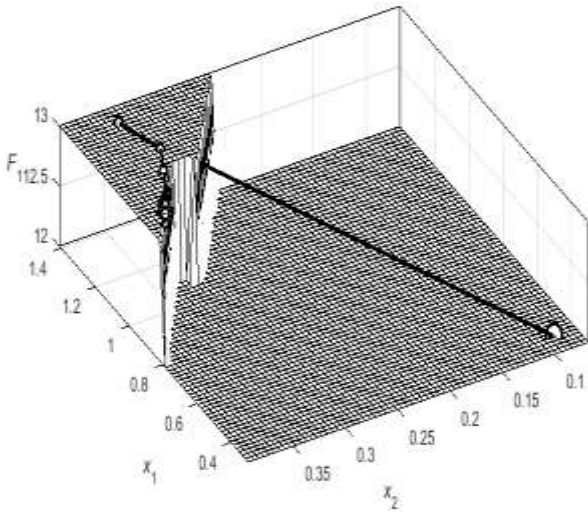


Рисунок 24 – Оптимізація ПІ РР на графіку $F_1(\mathbf{x})$

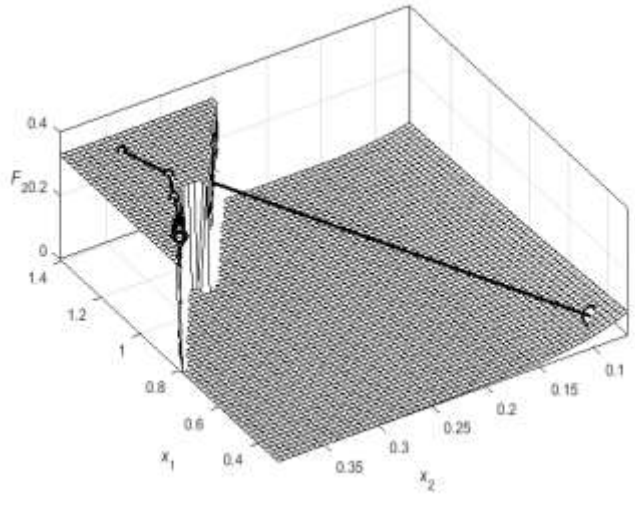


Рисунок 25 – Оптимізація ПІ РР на графіку $F_2(\mathbf{x})$

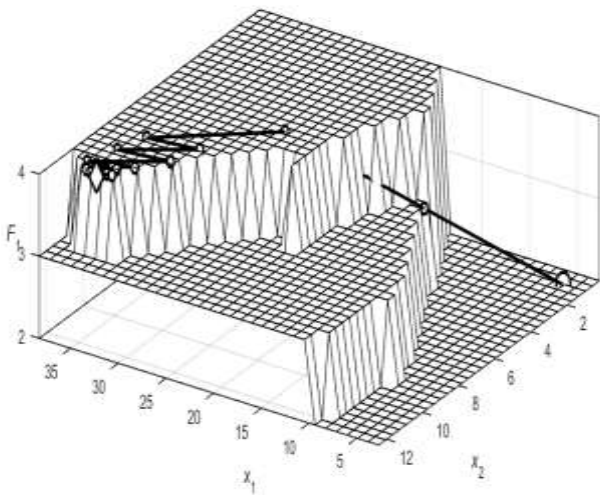


Рисунок 26 – Оптимізація ПІ регулятора частоти на графіку $F_1(\mathbf{x})$

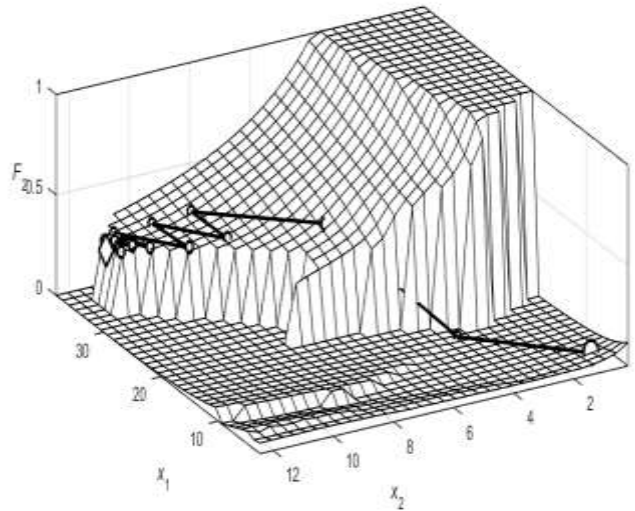


Рисунок 27 – Оптимізація ПІ регулятора частоти на графіку $F_2(\mathbf{x})$

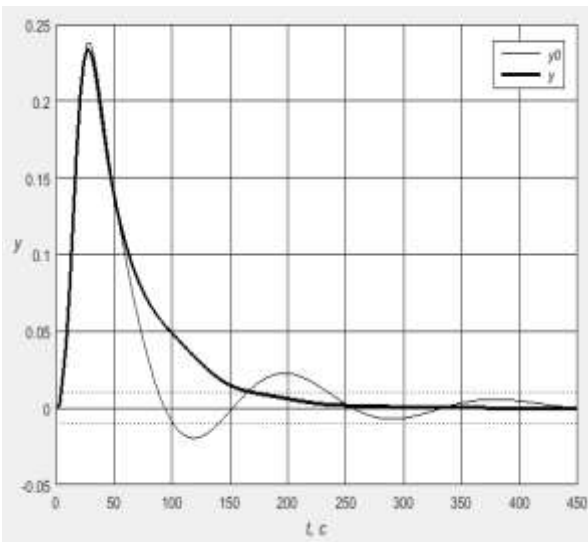


Рисунок 28 – Процеси при початкових та кінцевих значеннях параметрів ПІ регулятора рівня

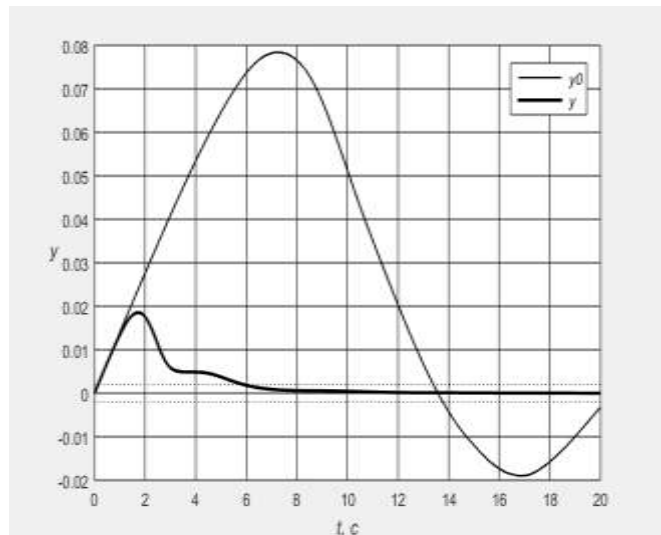


Рисунок 29 – Процеси при початкових та кінцевих значеннях параметрів ПІ регулятора частоти

В режимі «Н» ПІ регулятором нейтронної потужності з оптимальними значеннями його параметрів забезпечується монотонний процес зміни потужності, що відповідає умовам безпечної експлуатації ядерного реактора. В режимі «Т» ПІД регулятором тиску з оптимальними значеннями його параметрів забезпечується процес зміни тиску з мінімальним відхиленням від номінального значення без коливань, що відповідає умовам безпечної експлуатації парової турбіни.

У **додатках** наведено технічні та технологічні характеристики об'єктів управління енергоблоку АЕС, додаткові результати з ідентифікації об'єктів управління, процеси оптимізації інформаційно-управляючих систем енергоблоку, матеріали щодо впровадження результатів дисертаційної роботи та список публікацій за темою дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі отримано рішення науково-прикладної проблеми розробки методів, моделей та інформаційної технології оптимізації управління складними динамічними системами, які характеризуються високим порядком моделей і великою кількістю параметрів та нелінійностей, на основі об'єднання програмних блоків моделей систем і методів оптимізації, критеріїв систем, подання інформації про динамічні процеси і процеси оптимізації, модулів методів інтегрування та структур даних на прикладі оптимізації систем управління енергоблоку АЕС з реактором ВВЕР-1000. Основні отримані наукові і практичні результати дозволяють сформулювати такі висновки.

1. Проведено аналіз сучасних інформаційних технологій управління та оптимізації з метою їх використання для оптимізації процесів управління складними динамічними системами. Як приклад складної динамічної системи розглянуто енергоблок АЕС з ядерним реактором ВВЕР-1000. Проаналізовані методи моделювання процесів в складних динамічних системах та аналізу інформа-

ційних управляючих систем, показники якості ІУС і можливості їх застосування до процесів управління складними динамічними системами, існуючі підходи та методи синтезу ІУС, розглянуті обчислювальні методи оптимізації та можливості їх використання для оптимізації показників якості ІУС. Обґрунтовано вибір основних напрямів дисертаційного дослідження.

2. Розроблено наукові та методологічні основи створення та застосування інформаційної технології для управління складними динамічними системами, яка включає шість основних функціональних елементів – блок моделей систем, модуль методів інтегрування, блок обчислення критеріїв якості систем, блок методів оптимізації, блок подання інформації та модуль структур даних з формуванням структур даних задач та процесів оптимізації, а також функціональну модель процесу оптимізації управління складними динамічними системами, що дозволяє записувати структури даних в файл з можливістю продовження процесу оптимізації складної динамічної системи та подання його результатів в текстовій та графічній формах.

3. Запропоновано загальні моделі динамічних систем з відносними змінними стану, на основі яких побудовані нелінійні математичні моделі для об'єктів управління енергоблоку АЕС як складних динамічних систем. На підставі нейтронної кінетики реактора, поступового тепловиділення, теплових процесів в паливі, оболонках і теплоносії, змінні концентрацій ксенону і бору розроблені зосереджена та вертикально розподілена моделі ядерного реактора ВВЕР-1000 серії В-320. За рівняннями теплопередачі, матеріального і теплового балансу пароутворення, циркуляції, головного парового колектору, приводу клапана парової турбіни і виконавчого механізму регулюючого живильного клапана побудовано модель парогенератора ПГВ-1000. За рівняннями тиску в постійних об'ємах парової турбіни, які включають витрату пари, рівняння частоти обертання ротора з використанням змінної потужності турбіни побудовано модель парової турбіни К-1000-60/1500-2.

4. Удосконалено методи аналізу математичних моделей динамічних систем з використанням матричних методів інтегрування систем диференціальних рівнянь – методу матричної експоненти та її інтегралу для інтегрування лінійних систем, системні методи першого, другого і третього ступенів для інтегрування нелінійних систем, що забезпечує підвищення точності та надійності побудови перехідних процесів в порівнянні з іншими методами. Виконано аналіз перехідних процесів в нелінійних зосередженій та вертикально розподіленій моделях реактора ВВЕР-1000 серії В-320, моделі парогенератора ПГВ-1000 та парової турбіни К-1000-60/1500-2. Для вертикально розподіленої моделі реактора обчислено аксіальний офсет.

5. Узагальнено моделі інформаційно-управляючих систем для ідентифікації параметрів інформаційних управляючих систем, а також для оптимізації параметрів регуляторів. Побудовано моделі інформаційних управляючих систем енергоблоку АЕС – нейтронної потужності ядерного реактора, рівня води в парогенераторі, частоти обертання ротора парової турбіни, усього енергоблоку для підтримки нейтронної потужності реактора та підтримки тиску в головному паровому колекторі у вигляді систем диференціальних рівнянь, що включають

вектори змінних стану, змінних та постійних параметрів, зовнішніх дій, що включені до блоку моделей систем інформаційної технології.

6. Розроблено критерії та методи ідентифікації динамічних систем, сформовано векторна цільова функція ідентифікації, розроблено метод її обчислення та для її оптимізації реалізовано методи безумовної оптимізації скалярних функцій з переважанням операції порівняння. Побудовано загальні математичні моделі систем управління з ПІ регуляторами для ідентифікації параметрів об'єктів управління. Розв'язано задачу ідентифікації параметрів моделі системи управління рівнем води в парогенераторі ПГВ-1000 за експериментальними даними. За результатами налагоджувальних випробувань систем управління другого контуру енергоблоків АЕС з реакторами ВВЕР-1000 проведено ідентифікація параметрів для деаераторів, конденсаторів, головних парових колекторів, колекторів власних потреб, турбоживильних насосів, сепараторів пароперегрівачів, підігрівачів низького і високого тиску. Виконано аналіз ступеня стійкості та меж області стійкості для цих систем управління, що дозволило обґрунтувати їх стійкість.

7. Розроблено методи обчислення прямих показників якості динамічних систем та покращених інтегральних квадратичних оцінок, задачі оптимізації параметрів динамічних систем зведено до оптимізації векторних цільових функцій, що враховують вимоги реалізації системи, її стійкості, покращення показників якості. Для оптимізації векторних цільових функцій наведено методи оптимізації з одновимірним пошуком. З використанням інформаційної технології оптимізації управління складними динамічними системами на основі моделей інформаційних управляючих систем ядерного реактора ВВЕР-1000 серії В-320, парогенератора ПГВ-1000, парової турбіни К-1000-60/1500-2, систем другого контуру енергоблоку, всього енергоблоку АЕС з реактором ВВЕР-1000 в нормальних умовах експлуатації з частковим зниженням навантаження виконано оптимізація параметрів регуляторів за прямими показниками якості.

8. Наведене техніко-економічне обґрунтування отриманих результатів використання інформаційної технології оптимізації управління складними динамічними системами підтверджує, що вона має суттєві технічні переваги, а її використання дозволяє зменшити витрати часових, апаратних, програмних та людських ресурсів при розробці та вдосконаленні складних динамічних систем за рахунок підвищення рівня автоматизації цих процесів.

9. Виконано впровадження результатів дисертаційного дослідження в організаціях, які займаються дослідженням та управлінням складними динамічними системами, зокрема, ТОВ «НВП Моноліт Енерго» (м. Харків), АТ «ТУР-БОАТОМ» (м. Харків) та Інститут іоносфери НАН і МОН України (м. Харків); а також у навчальний процес кафедр радіоелектроніки та системного аналізу і інформаційно-аналітичних технологій НТУ «ХП».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Никулина Е. Н. Многокритериальный синтез систем управления реакторной установки путем минимизации интегральных квадратичных оценок /

Е. Н. Никулина, В. П. Северин // Ядерна та радіаційна безпека. – 2009. – Том 12. – Вып. 2. – С. 3-12.

Здобувачем розроблено математичне та інформаційне забезпечення для багатокритеріального синтезу систем управління реакторною установкою.

2. Никулина Е. Н. Математическое моделирование систем автоматического регулирования тепловой мощности реактора / Е. Н. Никулина // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології). – Харків: НТУ «ХПІ», 2009. – № 4. – С. 131-136.

3. Никулина Е. Н. Математические модели систем автоматического управления производительностью парогенератора / Е. Н. Никулина // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (серія: Автоматика та приладобудування). – Харків: НТУ «ХПІ», 2010. – № 23 – С. 71-79.

4. Никулина Е. Н. Многокритериальный синтез нечетких систем автоматического управления генетическими алгоритмами / Е. Н. Никулина, Х. С. М. Джафари, В. П. Северин // Техн. електродинаміка. Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність», 2010. – Ч. II. – С. 149-154.

Здобувач розробила інформаційне та програмне забезпечення для багатокритеріального синтезу систем управління генетичними алгоритмами.

5. Никулина Е. Н. Модель для параметрического синтеза электронной части следящего привода / Е. Н. Никулина, В. П. Северин, М. В. Реуцкая // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології). – Харків: НТУ «ХПІ», 2013. – № 2 (976). – С. 7-12.

Здобувач розробила інформаційне та програмне забезпечення для параметричного синтезу електронної частини слідкуючого приводу турбіни.

6. Никулина Е. Н. Модификация генетических алгоритмов для оптимизации векторных целевых функций / Е. Н. Никулина, В. П. Северин, Т. Е. Николаенко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології). – Харків: НТУ «ХПІ», 2013. – № 3 (977). – С. 9-14.

Здобувачем модифіковані генетичні алгоритми та розроблено програмне забезпечення для оптимізації векторних цільових функцій.

7. Никулина Е. Н. Многоцелевая оптимизация систем управления паровой турбиной К-1000-60/1500 на основе векторной целевой функции / Е. Н. Никулина, В. П. Северин, К. Б. Годлевская // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (серія: Енергетичні та теплоенергетичні процеси й устаткування). – Харків: НТУ «ХПІ», 2013. – № 13 (987). – С. 24-29.

Здобувач виконала багатоцільову оптимізацію систем управління паровою турбіною К-1000-60/1500 на основі векторної цільової функції.

8. Никулина Е. Н. Многоцелевой синтез нелинейных систем управления паровой турбиной АЭС по прямым показателям качества / Е. Н. Никулина, В. П. Северин, В. Ф. Чернай, К. Б. Годлевская // Энергосбережение. Энергетика.

Энергоаудит. Специальный выпуск. – Том 2. – 2013. – № 8 (114). – С. 134-140.

Здобувачем розроблено інформаційне забезпечення для оптимізації систем управління паровою турбіною з використанням нелінійної моделі турбіни.

9. Никулина Е. Н. Синтез оптимальных систем автоматического управления энергоблока АЭС в нормальных режимах эксплуатации / Е. Н. Никулина, В. П. Северин // Ядерна та радіаційна безпека. – 2013. – Вип. 3 (59). – С. 62-68.

Здобувач розробила та дослідила інформаційну технологію для синтезу систем управління енергоблоку АЕС в нормальних режимах експлуатації.

10. Нікуліна О. М. Математичне та програмне забезпечення для моделювання одноступеневого генератора імпульсів напруги / В. П. Северин, О. М. Нікуліна, М. І. Ахтирцев // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (серія: Радіофізика та іоносфера). – Харків: НТУ «ХПІ», 2013. – № 33 (1066). – С. 19-24.

Здобувачем розроблено математичне та програмне забезпечення для аналізу динамічних процесів в нелінійних системах матричними методами.

11. Нікуліна О. М. Аналіз електронних фільтрів Баттерворта чисельними методами / В. П. Северин, О. М. Нікуліна, В. С. Буряковський // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології). – Харків: НТУ «ХПІ», 2014. – № 55 (1097). – С. 19-24.

Здобувач розробила програмне забезпечення для аналізу лінійних динамічних систем з використанням методу матричної експоненти.

12. Никулина Е. Н. Проблема маневренности энергоблока АЭС и развитие моделей его систем управления / В. П. Северин, Е. Н. Никулина, Д. А. Лютенко, Е. Ю. Бобух // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології). – Харків: НТУ «ХПІ», 2014. – № 61 (1103). – С. 24-29.

Здобувачем розвинуті динамічні моделі автоматизації управління енергоблоком АЕС для дослідження проблеми маневреності енергоблоку.

13. Никулина Е. Н. Многокритериальный синтез систем управления энергоблока АЭС с использованием лаборатории методов оптимизации OPTLAB / В. П. Северин, Е. Н. Никулина, Д. А. Лютенко, Е. Ю. Бобух // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування). – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – № 15 (1124). – С. 106-111.

Здобувач створила інформаційну технологію синтезу складних динамічних систем на прикладі енергоблоку АЕС на основі методів оптимізації.

14. Нікуліна О. М. Математичне та програмне забезпечення для імітаційного моделювання багатоступневих генераторів імпульсів напруги / В. П. Северин, О. М. Нікуліна, М. І. Ахтирцев // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (серія: Радіофізика та іоносфера). – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – № 37 (1146). – С. 30-35.

Здобувачем розвинуто інформаційне та програмне забезпечення для аналізу складних нелінійних динамічних систем матричними методами.

15. Никулина Е. Н. Нелинейные модели переходных режимов паровых

турбин АЭС для оптимизации процессов управления / В. П. Северин, Е. Н. Никулина, И. Х. Чеченова // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування). – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 8 (1180). – С. 65-71.

Здобувач розробила нелінійні моделі для автоматизації управління паровими турбінами АЕС і виконала оптимізацію параметрів регуляторів.

16. Никулина Е. Н. Идентификация параметров системы управления производительностью парогенератора энергоблока АЭС / В. П. Северин, Е. Н. Никулина, Н. В. Трубочанова // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (серія: Автоматика та приладобудування). – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 15 (1187). – С. 38-44.

Здобувачем розроблені математичні та інформаційна моделі систем управління продуктивністю парогенератора для ідентифікації параметрів.

17. Nikulina E. N. Development of the controller for the quadcopter Finken in simulation environment Vrep / V. P. Severin, E. N. Nikulina, V. S. Buriakovskiy // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології). – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 37 (1209). – С. 9-12.

Здобувачеві належать динамічна модель автоматизації управління квадрокоптером для розробки регулятора.

18. Никулина Е. Н. Модель паровой турбины К-1000-60/1500-2 для исследования процессов управления / В. П. Северин, Е. Н. Никулина, А. С. Шевцов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування). – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – № 8 (1230). – С. 57-62.

Здобувачем побудована нелінійна математична модель у просторі станів для автоматизації процесів управління паровою турбіною.

19. Никулина Е. Н. Моделирование переходных режимов ядерного реактора ВВЭР-1000 с учетом борного регулирования / Е. Н. Никулина, В. П. Северин, Д. А. Лукинова // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології). – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – № 51 (1272). – С. 8-13.

Здобувач побудувала нелінійну математичну модель у просторі станів для автоматизації процесів борного управління ядерним реактором.

20. Никулина Е. Н. Имитационное моделирование процессов в реакторе ВВЭР-1000 при регулировании мощности поглощающими стержнями / В. П. Северин, Е. Н. Никулина, Д. А. Лукинова // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології). – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – № 55 (1276). – С. 3-7.

Здобувачем розроблено нелінійну математичну модель у просторі станів для автоматизації процесів управління стержнями реактора ВВЭР-1000.

21. Никулина Е. Н. Математические модели для исследования переходных режимов ядерного реактора ВВЭР-1000 серии В-320 / Е. Н. Никулина, В. П. Северин, Д. А. Лукинова // Ядерна та радіаційна безпека. – 2018. –

Вип. 1 (77). – С. 18-23.

Здобувач удосконалила нелінійні математичні моделі у просторі станів для автоматизації та дослідження процесів управління реактором ВВЕР-1000.

22. Nikulina E. N. Optimization of direct quality indexes of automatic control systems of steam generator productivity / E. N. Nikulina, V. P. Severyn, N. V. Kotsiuba // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології). – Харків: НТУ «ХПІ», 2018. – № 21 (1297). – С. 8-13.

Здобувачем розроблена інформаційна технологія оптимізації системи управління продуктивністю парогенератора за прямими показниками якості.

23. Никулина Е. Н. Программирование и изучение методов оптимизации в компьютерной математической системе MATLAB / Е. Н. Никулина, В. П. Северин // Труды IV Всероссийской научной конференции «Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB». – Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет», 2009. – С. 612-634.

Здобувач розробила архітектуру комплексу програм моделей та методів оптимізації.

24. Никулина Е. Н. Расчет параметров модели нейтронной кинетики ядерного реактора ВВЭР-1000 / Е. Н. Никулина, А. Ю. Поливода // Актуальні проблеми фізики та їх інформаційне забезпечення. Тези доповідей X регіональної наукової студентської конференції. – Харків: НТУ «ХПІ», 2010. – С. 39-41.

Здобувачеві належить нелінійна модель нейтронної кінетики для автоматизації управління реактором.

25. Никулина Е. Н. Оптимизация параметров регуляторов для систем автоматического управления производительностью парогенератора / Е. Н. Никулина // Матеріали XVII Міжнародної конференції з автоматичного управління «Автоматика-2010». Тези доповідей. Том 1. – Харків: ХНУРЕ, 2010. – С. 260-261.

26. Нікуліна О. М. Векторна оптимізація показників якості нелінійних систем керування енергоблоків АЕС / В. П. Северин, О. М. Нікуліна // Матеріали XIX Міжнародної конференції з автоматичного управління «Автоматика-2012». – Київ: НУХТ, 2012. – С. 255-256.

Здобувач використала інформаційну технологію оптимізації для удосконалення систем управління енергоблоку АЕС на основі нелінійних моделей.

27. Никулина Е. Н. Модификация генетических алгоритмов для многоцелевого параметрического синтеза систем автоматического управления / В. П. Северин, Е. Н. Никулина // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXI міжнародної науково-практичної конференції, Ч. I. – Харків: НТУ «ХПІ», 2013. – С. 21.

Здобувачем модифіковані генетичні алгоритми для параметричного синтезу оптимальних моделей автоматизації управління складними системами.

28. Никулина Е. Н. Багатоцільовий синтез нелінійних систем керування енергоблоків АЕС генетичними алгоритмами / В. П. Северин, Е. Н. Никулина // Матеріали XX Міжнародної конференції з автоматичного управління «Автоматика-2013». – Миколаїв: НУК, 2013. – С. 193-194.

Здобувач виконала багатоцільовий синтез параметрів нелінійних систем керування енергоблоку АЕС генетичними алгоритмами.

29. Никулина Е. Н. Моделирование и синтез систем управления энергоблоком АЭС с ВВЭР-1000 в основных режимах эксплуатации / Е. Н. Никулина, В. П. Северин // Материалы V Международной научно-технической конференции «Информационные и управляющие системы АЭС: аспекты безопасности». – Харків. – 2013. – С. 151-162.

Здобувачем проведено моделювання процесів управління енергоблоком АЕС з реактором ВВЕР-1000 і синтезовані оптимальні регулятори.

30. Никулина Е. Н. Синтез оптимальных систем автоматического управления энергоблока АЭС в нормальных режимах эксплуатации / Е. Н. Никулина, В. П. Северин // Материалы V Международной научно-технической конференции «Информационные и управляющие системы АЭС: аспекты безопасности». – Харків. – 2013. – С. 81-90.

Здобувач виконала параметричний синтез оптимальних систем управління енергоблоку АЕС в нормальних режимах експлуатації.

31. Никулина Е. Н. Программирование методов оптимизации для их изучения и исследования / Е. Н. Никулина, В. П. Северин // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXII міжнародної науково-практичної конференції, Ч. I. – Харків: НТУ «ХПІ», 2014 – С. 20.

Здобувачем запропонована структура інформаційної технології оптимізації для створення автоматизованих систем управління.

32. Никулина Е. Н. Компьютерная лаборатория для исследования методов безусловной, условной, глобальной и многокритериальной оптимизации / В. П. Северин, Е. Н. Никулина, Д. А. Лютенко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXII міжнародної науково-практичної конференції, Ч. I. – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – С. 19.

Здобувач розробила принципи лабораторії для дослідження різних методів оптимізації та відповідне інформаційне і програмне забезпечення.

33. Никулина Е. Н. Лаборатория моделей и методов анализа и синтеза систем автоматического управления / Е. Н. Никулина // Матеріали XXII Міжнародної конференції з автоматичного управління «Автоматика-2015». – Одеса: ТЕС, 2015. – С. 73-74.

34. Нікуліна О. М. Модель системи автоматичного управління для маневрування потужністю реактора ВВЕР-1000 / В. П. Северин, О. М. Нікуліна, Д. А. Лютенко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXIV міжнародної науково-практичної конференції, Ч. I. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – С. 35.

Здобувачем удосконалена модель системи автоматичного управління реактором ВВЕР-1000 для маневрування потужністю.

35. Никулина Е. Н. Анализ и синтез систем управления энергоблока АЭС для маневренных режимов эксплуатации / В. П. Северин, Е. Н. Никулина, Д. А. Лютенко // Матеріали XXIII міжнародної конференції з автоматичного управління «Автоматика-2016». – Суми: СумДУ, 2016. – С. 63-64.

Здобувач дослідила інформаційну технологію для аналізу та синтезу си-

стем управління енергоблоку АЕС для маневрених режимів експлуатації.

36. Нікуліна О. М. Математичні моделі систем управління парогенератором енергоблоку АЕС / О. М. Нікуліна, В. П. Северин, Н. В. Трубчанова // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXV міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2017, Ч. I. – Харків: НТУ «ХП», 2017. – С. 31.

Здобувачем отримані математичні моделі систем управління парогенератором енергоблоку АЕС.

37. Никулина Е. Н. Многокритериальный синтез систем управления энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000 для эксплуатации в маневренных режимах / В. П. Северин, Е. Н. Никулина, Д. А. Лукинова // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXV міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2017, Ч. I. – Харків: НТУ «ХП», 2017. – С. 40.

Здобувач виконала багатокритеріальний синтез оптимальних систем управління енергоблоку АЕС для експлуатації в маневрених режимах.

38. Нікуліна О. М. Нелінійні моделі парових турбін АЕС для маневрених режимів експлуатації / В. П. Северин, О. М. Нікуліна, О. С. Шевцов // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXV міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2017, Ч. I. – Харків: НТУ «ХП», 2017. – С. 41.

Здобувачем запропоновані нелінійні моделі парових турбін АЕС для дослідження маневрених режимів експлуатації при зміні навантаження.

39. Никулина Е. Н. Оптимизация показателей качества систем автоматического управления ядерным реактором ВВЭР-1000 / Д. А. Лукинова, В. П. Северин, Е. Н. Никулина // Матеріали XXIV Міжнародної конференції з автоматичного управління «Автоматика-2017». – Київ: НУБіП України, 2017. – С. 84-85.

Здобувач дослідила інформаційну технологію оптимізації управління динамічних систем для покращення якості керування реактором ВВЭР-1000.

40. Никулина Е. Н. Моделирование паровых турбин АЭС как объектов управления в маневренных режимах эксплуатации / В. П. Северин, Е. Н. Никулина, А. С. Шевцов // Матеріали XXIV Міжнародної конференції з автоматичного управління «Автоматика-2017». – Київ: НУБіП України, 2017. – С. 108-109.

Здобувачем проведено імітаційне моделювання парових турбін як об'єктів управління в маневрених режимах матричними методами.

41. Никулина Е. Н. Многозонная модель реактора ВВЭР-1000 для синтеза систем управления энергоблока АЭС в маневренных режимах эксплуатации / В. П. Северин, Е. Н. Никулина, Д. А. Лукинова // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXVI міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2018, Ч. I. – Харків: НТУ «ХП», 2018. – С. 33.

Здобувач розробила нелінійну вертикально розподілену модель реактора для синтезу оптимальних систем управління в маневрених режимах.

42. Никулина Е. Н. Моделирование процессов управления ядерным реактором ВВЭР-1000 для обеспечения маневренности энергоблока / Д. А. Лукинова, В. П. Северин, Е. Н. Никулина // Матеріали XXV Міжнародної конференції з автоматичного управління «Автоматика-2018». – Львів: Львівська політехніка, 2018. – С. 39-40.

Здобувачем проведено імітаційне моделювання процесів управління ядерним реактором для забезпечення маневреності енергоблоку.

43. Никулина Е. Н. Идентификация и анализ устойчивости контуров автоматического регулирования энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР-1000 / Е. Н. Никулина, В. П. Северин, Н. В. Коцюба // Матеріали XXV Міжнародної конференції з автоматичного управління «Автоматика-2018». – Львів: Львівська політехніка, 2018. – С. 54-55.

Здобувач розробила критерій оцінювання якості моделей динамічних систем та виконала ідентифікацію параметрів за даними експериментів.

44. Никулина Е. Н. Оптимизация систем автоматического управления паровой турбины К-1000-60/1500-2 по прямым показателям качества / В. П. Северин, Е. Н. Никулина, А. С. Шевцов // Матеріали XXV Міжнародної конференції з автоматичного управління «Автоматика-2018». – Львів: Львівська політехніка, 2018. – С. 52-53.

Здобувачем проведена оптимізація параметрів інформаційної управляючої системи парової турбіни К-1000-60/1500-2 за прямими показниками якості.

45. Нікуліна О. М. Структура інформаційної технології оптимізації управління складними динамічними системами / Д. А. Лукінова, В. П. Северин, О. М. Нікуліна // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXVII міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2019, Ч. I. – Харків: НТУ «ХП», 2019. – С. 31.

Здобувач удосконалила структуру інформаційної технології оптимізації управління складними динамічними системами на основі аналізу її елементів.

46. Нікуліна О. М. Модуль представлення інформації для технології оптимізації систем автоматичного управління / О. М. Нікуліна, В. П. Северин, Н. В. Коцюба // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXVII міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2019, Ч. I. – Харків: НТУ «ХП», 2019. – С. 36.

Здобувачем розроблено модуль представлення інформації у вигляді таблиць та графіків для технології оптимізації систем управління.

47. Нікуліна О. М. Блок методів оптимізації для інформаційної технології управління складними динамічними системами / В. П. Северин, О. М. Нікуліна, Шевцов О. С. // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXVII міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2019, Ч. I. – Харків: НТУ «ХП», 2019. – С. 41.

Здобувач розширила структуру та модулі блоку методів оптимізації для інформаційної технології управління складними динамічними системами.

48. Никулина Е. Н. Оптимальный синтез перспективных систем управления реакторной установки ВВЭР-1000 в нормальных режимах эксплуатации / Е. Н. Никулина, В. П. Северин // Проблемы обеспечения безопасности инфор-

мационных и управляющих систем АЭС: сборник научных трудов / под. ред. М. А. Ястребенецкого. – Одесса: Астропринт. – 2010. – С. 179-192.

Здобувачем розроблено моделі та інформаційна технологія для синтезу системи автоматичного управління реакторної установки ВВЕР-1000.

49. Никулина Е. Н. Синтез систем управления генетическими алгоритмами на основе интегральных квадратичных оценок / Е. Н. Никулина, В. П. Северин, А. В. Бондаренко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології). – Харків: НТУ «ХПІ», 2013. – № 3 (977). – С. 15-20.

Здобувач розробила метод синтезу систем управління з покращеними інтегральними квадратичними оцінками і генетичними алгоритмами.

50. Никулина Е. Н. Оптимизация прямых показателей качества систем автоматического управления генетическими алгоритмами / Е. Н. Никулина, В. П. Северин, К. А. Тарасенко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології). – Харків: НТУ «ХПІ», 2013. – № 3 (977). – С. 21-26.

Здобувачем розроблено програмне забезпечення для оптимізації прямих показників якості систем управління генетичними алгоритмами.

АНОТАЦІЇ

Никуліна Олена Миколаївна. Методи, моделі та інформаційна технологія оптимізації управління складними динамічними системами (на прикладі енергоблоку АЕС). – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – інформаційні технології. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, Харків, 2019 р.

Дисертацію присвячено розробці й обґрунтуванню методів, моделей та інформаційної технології оптимізації управління складними динамічними системами та їх дослідження для на прикладі енергоблоку АЕС.

Проведено аналіз сучасних інформаційних технологій управління складними динамічними системами. Розроблено наукові та методологічні основи створення та застосування інформаційної технології для управління складними динамічними системами. Запропоновано загальні моделі динамічних систем з відносними змінними стану, на основі яких побудовано нелінійні математичні моделі для об'єктів управління енергоблоку АЕС як складних динамічних систем. Удосконалено методи аналізу математичних моделей складних динамічних систем та виконано аналіз процесів в нелінійних моделях основних елементів енергоблоку АЕС. Узагальнено моделі інформаційно-управляючих систем для ідентифікації параметрів систем, а також для оптимізації параметрів регуляторів. Розроблено критерії оцінювання якості математичних моделей складних динамічних систем та виконано ідентифікацію параметрів моделей за експериментальними процесами в елементах енергоблоку АЕС. Розроблено інформаційну технологію оптимізації управління складними динамічними системами та

приведено приклади її використання для оптимізації інформаційних управляючих систем енергоблоку АЕС. Результати досліджень дозволяють підвищити якість проектування систем управління складними динамічними об'єктами, підвищити ступінь наукової обґрунтованості технічних проектів з удосконалення систем управління енергоблоків АЕС.

Ключові слова: інформаційна технологія, складна динамічна система, інформаційно-управляюча система, моделювання, метод оптимізації, ідентифікація, критерій якості, енергоблок АЕС.

Никулина Елена Николаевна. Методы, модели и информационная технология оптимизации управления сложными динамическими системами (на примере энергоблока АЭС). – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.06 – информационные технологии. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» Министерства образования и науки Украины, Харьков, 2019 г.

Диссертация посвящена разработке и обоснованию методов, моделей и информационной технологии оптимизации управления сложными динамическими системами и их исследованию на примере информационно-управляющих систем энергоблока АЭС.

Проведен анализ современных информационных технологий управления сложными динамическими системами. Разработаны научные и методологические основы создания и применения информационной технологии и информационных систем для управления сложными динамическими системами. Предложены общие модели динамических систем с относительными переменными состояния, на основании которых построены нелинейные математические модели для объектов управления энергоблока АЭС как сложных динамических систем. Усовершенствованы методы анализа математических моделей сложных динамических систем и выполнен анализ процессов в нелинейных моделях основных элементов энергоблока АЭС. Обобщены модели информационно-управляющих систем для идентификации параметров систем, а также для оптимизации параметров регуляторов. Разработаны критерии оценки качества математических моделей сложных динамических систем и выполнена идентификация параметров моделей по экспериментальным процессам в элементах энергоблока АЭС. Разработана информационная технология оптимизации управления сложными динамическими системами и приведены примеры использования ее для оптимизации информационных управляющих систем энергоблока АЭС. Результаты исследований позволяют повысить качество проектирования систем управления сложными динамическими объектами, повысить степень научной обоснованности технических проектов по совершенствованию систем управления энергоблоков АЭС.

Ключевые слова: информационная технология, сложная динамическая система, информационно-управляющая система, моделирование, метод оптимизации, идентификация, критерий качества, энергоблок АЭС.

Nikulina Olena Mykolajivna. Methods, models and information technology for optimization the control of complex dynamic systems (exemplified by a nuclear power unit). – As manuscript.

Thesis for scientific degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.13.06 – Information Technologies. – National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Ministry of education and science of Ukraine, Kharkiv, 2019.

The dissertation is devoted to the development and justification of methods, models and information technology for optimizing control of complex dynamic systems and their study using the example of information and control systems of a nuclear power unit.

The research analyzes modern information technologies of control and optimization with the purpose of their use for optimization of processes of complex dynamic systems control. As an example of a complex dynamic system the NPP unit with the WWER-1000 nuclear reactor is considered. The thesis analyzes methods of process modeling in complex dynamic systems and information control systems, quality indicators of information and control systems and possibilities of their application to the processes of control of complex dynamic systems, existing approaches and methods of synthesis of information control systems, computational optimization methods and possibilities of their use for optimization of quality indicators of information and control systems.

The scientific and methodological foundations of creation and application of information technology for control of complex dynamic systems are developed which includes six basic functional elements, namely a block of systems models, a module of methods of integration, a block of calculation of criteria of quality of systems, a block of methods of optimization, a block of presentation of information and a module of data structures with the formation of data structures of tasks and processes of optimization and a functional model of process of optimization of control of complex dynamic systems that allows filing data structures with the ability to continue the process of optimizing the complex dynamic system and presenting the results in text and graphical forms.

General models of dynamic systems with relative state changes are proposed, on the basis of which nonlinear mathematical models for the control units of NPP units as complex dynamic systems are constructed. Based on the neutron kinetics of the reactor, gradual heat dissipation, thermal processes in the fuel, shells and coolant, changes in xenon and boron concentrations, concentrated and vertically distributed models of the WWER-1000 nuclear reactor have been developed. According to the equations of heat transfer, material and thermal balance of steam generation, circulation, the main steam collector, the drive of steam turbine valve and the actuator of regulating feed valve, the model of PGV-1000 steam generator has been built. The K-1000-60/1500-2 steam turbine model is built based on the pressure equations in constant volumes of a steam turbine which include steam flow, the rotor speed equation using the turbine variable power. Methods of analysis of mathematical models of dynamic systems are improved with the use of matrix methods of integration of systems of differential equations that is the method of the matrix exponent and its integral for integration of linear systems, system methods of the first, second and third degrees

for integration of nonlinear systems, which ensures the improvement of accuracy processes compared to other methods. The analysis of transients in nonlinear concentrated and vertically distributed models of the WWER-1000 reactor, the model of the PGV-1000 steam generator and the K-1000-60/1500-2 steam turbine has been made. For the vertically distributed reactor model, the axial offset is calculated.

Models of information control systems for identification of parameters of information control systems and for optimization of parameters of regulators have been generalized. The thesis develops models of information control systems of NPP unit, namely the models of Neutron power of nuclear reactor, the model of water level in steam generator, the model of rotation speed of steam turbine rotor, the model of a whole power unit to maintain neural power of the reactor and to maintain the pressure in the main steam collector in the form of differential equations, systems of differential equations, variable and permanent parameters, external actions included in the block of models of systems of information technology.

Criteria and methods for the identification of dynamic systems have been developed, a vector target identification function has been formed, a method for its calculation has been developed, and methods for unconditional optimization of scalar functions with the restart of the comparison operation have been implemented for its optimization. Mathematical models of control systems with PI regulators to identify the parameters of control objects have been generalized. The task of identifying the parameters of the model of the water level control system in the PGV-1000 steam generator according to the experimental data has been done. The thesis carries out the identification of parameters for deaerators, condensers, main steam collectors, auxiliary collectors, turbo-feed pumps, separators of superheaters, low and high heaters according to the results of adjustment tests of control systems of the second circuit of NPP units with WWER-1000 reactors. The analysis of the degree of stability and the boundaries of the area of stability for these control systems substantiates their stability. Methods of calculation of direct quality indicators of dynamic systems and improved integral quadratic estimations are developed, problems of optimization of parameters of dynamic systems are reduced to optimization of vector target functions that take into account the requirements of implementation of the system, its stability, improvement of quality indicators. One-way search optimization methods are provided to optimize vector target functions. Using information technology to optimize the control of complex dynamic systems based on models of information control systems of the WWER-1000 nuclear reactor, the PGV-1000 steam generator, the K-1000-60/1500-2 steam turbine, the systems of the second circuit of the power unit, the entire NPP unit with the WWER-1000 reactor under normal operating conditions with partial load reduction, the parameters of the regulators have been optimized according to the direct quality indicators.

Keywords: information technology, complex dynamic system, information and control system, modeling, optimization method, identification, quality index, nuclear power unit.



Підписано до друку 04.03.2020 р.
Формат 60x84/16. Папір офсетний. Друк цифровий.
Гарнітура Times. Ум. друк. арк. 1,9.
Наклад 100 прим. Зам. №

Віддруковано в ТОВ «ДРУКАРНЯ МАДРИД»
61024, м. Харків, вул. Максиміліанівська, 11
Тел.: (057) 756-53-25
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
Серія ДК, № 4399 от 27.08.2012 р.
www.madrid.in.ua e-mail: info@madrid.in.ua