

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

НІКУЛІНА ОЛЕНА МИКОЛАЇВНА

УДК 004.9+685.9:620.9

ДИСЕРТАЦІЯ

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

Спеціальність 05.13.06 – інформаційні технології
Галузь знань 12 – інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 О. М. Нікуліна



*Ідентичність за
змістом з першим
прикладником
дисертації засвідчує*

Науковий консультант
Северин Валерій Петрович
доктор технічних наук, професор

*секретар
студентської організації
власної організації № 64.050.02
Дорофеев Ю.І.
Харків – 2019
28.11.2019.*

АНОТАЦІЯ

Нікуліна О. М. Методи, моделі та інформаційна технологія оптимізації управління складними динамічними системами (на прикладі енергоблоку АЕС). – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – інформаційні технології (12 – Інформаційні технології). – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, Харків, 2019 р.

Об’єкт дослідження – процеси управління складними динамічними системами.

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

Докторська дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, що містить розв’язання важливої 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.

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.

Проведено аналіз сучасних інформаційних технологій управління та оп-

тимізації 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 інформаційних управляючих систем, показники якості інформаційно-управляючих систем і можливості їх застосування до процесів управління складними динамічними системами, існуючі підходи та методи синтезу інформаційно-управляючих систем, розглянуті обчислювальні методи оптимізації та можливості їх використання для оптимізації показників якості інформаційно-управляючих систем.

Другий розділ присвячений розробці елементів інформаційної технології оптимізації управління складними динамічними системами.

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 представлення інформації та модуль структур даних з формуванням структур даних задач та процесів оптимізації та функціональну модель процесу оптимізації управління складними динамічними системами, що дозволяє записувати структури даних в файл з можливістю продовження процесу оптимізації складної динамічної системи та представлення його результатів в текстовій та графічній формах.

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

Запропоновані 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, зміні 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 побудована 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 побудована модель парової турбіни К-1000-60/1500-2.

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.

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 зосередженої та вертикально розподіленої 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.

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

Узагальнені моделі інформаційно-управляючих систем для ідентифікації параметрів інформаційних управляючих систем, а також для оптимізації параметрів регуляторів. Побудовані моделі інформаційних управляючих систем енергоблоку АЕС – нейтронної потужності ядерного реактора, рівня води в па-

рогенераторі, частоти обертання ротора парової турбіни, усього енергоблоку для підтримки нейронної 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.

Шостий розділ присвячений узагальненню моделей інформаційно-управляючих систем для ідентифікації її параметрів та використанню інформаційної технології для ідентифікації параметрів динамічних систем на прикладі інформаційно-управляючої системи парогенератора ПГВ-1000 та інформаційно-управляючих систем інших елементів другого контуру енергоблоку АЕС.

Розроблені критерії та методи ідентифікації динамічних систем, сформована векторна цільова функція ідентифікації, розроблений метод її обчислення та для її оптимізації реалізовані методи безумовної оптимізації скалярних функцій з переваженням операції порівняння. Побудовані загальні математичні моделі систем управління з ПІ регуляторами для ідентифікації параметрів об'єктів управління. Розв'язана задача 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 проведена ідентифікація параметрів для деаераторів, конденсаторів, головних парових колекторів, колекторів власних потреб, турбоживильних насосів, сепараторів пароперегрівачів, підігрівачів низького і високого тиску. Аналіз ступеня стійкості та меж області стійкості для цих систем управління обґрунтовує їх стійкість.

Сьомий розділ присвячений узагальненню обчислення критеріїв якості інформаційно-управляючих систем – прямих показників якості і покращених інтегральних оцінок, формуванні на їх основі векторних цільових функцій та методів їх оптимізації, а також прикладам використання інформаційної технології оптимізації управління складними динамічними системами..

Розроблені методи обчислення прямих показників якості динамічних систем та покращених інтегральних квадратичних оцінок, задачі оптимізації пара-

метрів динамічних систем зведені до оптимізації векторних цільових функцій, що враховують вимоги реалізації системи, її стійкості, покращення показників якості. Для оптимізації векторних цільових функцій наведені 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 виконана оптимізація параметрів регуляторів за прямими показниками якості.

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.

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

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати 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.

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 «ХП», 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 «ХП», 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.

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 «ХП», 2013. – № 2 (976). – С. 7-12.

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 «ХП», 2013. – № 3 (977). – С. 9-14.

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 «ХП», 2013. – № 13 (987). – С. 24-29.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

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.

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.

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.

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 «ХП», 2013. – С. 21.

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.

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.

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.

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 «ХП», 2014 – С. 20.

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 «ХП», 2015. – С. 19.

33. Никулина Е. Н. Лаборатория моделей и методов анализа и синтеза систем автоматического управления / Е. Н. Никулина // Матеріали XXII Міжна-

родної 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 «ХП», 2016. – С. 35.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

45. Нікуліна О. М. Структура інформаційної технології оптимізації управління складними динамічними системами / Д. А. Лукинова, 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 «ХПІ», 2019. – С. 31.

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 «ХПІ», 2019. – С. 36.

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 «ХПІ», 2019. – С. 41.

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

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.

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.

ABSTRACT

Nikulina O. M. Methods, models and information technology for optimizing the control of complex dynamic systems (exemplified by a nuclear power unit). – Qualifying scientific work as a manuscript.

Thesis for scientific degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.13.06 “Information Technologies” (12 – Information Technologies). – National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Ministry of education and science of Ukraine, Kharkiv, 2019.

The object of research is the processes of control of complex dynamic systems.

The subject of research is the methods, models and information technology of optimization of control of complex dynamic systems.

The doctoral dissertation is a completed research work which contains the solution of an important scientific and applied problem of development of methods, models and information technology of optimization of control of complex dynamic systems characterized by high order of models and a large number of parameters and nonlinearities on the basis of combining program blocks of systems models and optimization methods, system criteria, information on dynamic and optimization processes, modules of integration methods and data structures as an example of optimizing the control of NPPs with WWER-1000.

The introduction validates the relevance of the subject of the dissertation, formulates the purpose and objectives of the research, outlines the scientific novelty and practical value of the results obtained, the personal contribution of the applicant to the development of the subject of the dissertation. The data of the implementation of the results of the dissertation research, their validation and publications are provided.

The first section contains the analysis of the problems of information technology control of complex dynamic systems, substantiation of the direction of research.

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 second section is devoted to the development of information technology elements of optimization of control of complex dynamic 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.

The third section summarizes the principles of dynamic systems modeling and develops specific models of dynamic systems for information technology control optimization, using the example of a B-320 series WWER-1000 reactor.

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 of the B-320 series 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.

The fourth section is devoted to the generalization of methods of analysis of complex dynamic systems and analysis of processes in WWER-1000 reactor of B-320 series, PGV-1000 steam generator, K-1000-60 / 1500-2 steam turbine on the basis of nonlinear mathematical models of these objects of control.

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 of the B-320 series, 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.

In the fifth section models of information control systems for complex dynamic objects are developed, for example, information control systems of a power unit with WWER-1000 reactor.

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.

The sixth section is devoted to the generalization of models of information

control systems for identification of their parameters and use of information technology for identification of parameters of dynamic systems exemplified by information control system of the PGV-1000 steam generator and information control systems of other elements of the second circuit of the NPP unit.

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.

The seventh section is devoted to the generalization of the quality criteria for information control systems, namely, direct quality indicators and improved integral estimates, the formation of vector target functions and methods of their optimization based on them, as well as examples of use of information technology to optimize the control of complex dynamic systems.

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 sys-

tems of the WWER-1000 nuclear reactor of the B-320 series, 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.

The above feasibility study of the obtained results of the use of information technology optimization control of complex dynamic systems confirms that it has significant technical advantages, and its use allows reducing the time, hardware, software and human resources in the development and improvement of complex dynamic systems by increasing the level of automation of these processes.

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

LIST OF APPLICANT PUBLICATIONS

Scientific papers, in which the main results of the dissertation are published:

1. Nikulina E. N. Mnogokriterialnyj sintez sistem upravlenija reaktornoj ustanovki putem minimizatsii integralnyh kvadraticnyh otsenok / E. N. Nikulina, V. P. Severin // *Jaderna ta radiatsijna bezpeka*. – 2009. – Tom 12. – Vyp. 2. – S. 3-12.

2. Nikulina E. N. Matematicheskoje modelirovanije sistem avtomaticheskogo regulirovanija teplovoj moschnosti reaktora / E. N. Nikulina // *Visnik Nacionalnogo tehničnogo universitetu «Harkivskij politehničnij institut»* (seriya: Sistemnij analiz, upravlinnja ta informacijni tehnologii). – Harkiv: NTU «HPI», 2009. – № 4. – S. 131-136.

3. Nikulina E. N. Matematichesksje modeli sistem avtomaticheskogo upravlenija proizvoditelnostju parogeneratora / E. N. Nikulina // *Visnik Nacionalnogo tehničnogo universitetu «Harkivskij politehničnij institut»* (seriya: Avtomatika ta prykladobuduvannja). – Harkiv: NTU «HPI», 2010. – № 23 – S. 71-79.

4. Nikulina E. N. Mnogokriterialnyj sintez nechetkih sistem avtomaticheskogo upravlenija geneticheskimi algoritmami / E. N. Nikulina, H. S. M. Dzhafari,

V. P. Severin // Tehn. elektrodinamika. Tematychnyj vypusk «Sylova elektronika ta energoefektyvnist», 2010. – Ch. II. – S. 149-154.

5. Nikulina E. N. Model dlja parametriceskogo sinteza elektonnoj chasti sledjaschego privoda / E. N. Nikulina, V. P. Severin, M. V. Reutskaja // Visnik Nacionalnogo tehničnogo universitetu «Harkivskij politehničnij institut» (seriya: Sistemnij analiz, upravlinnja ta informacijni tehnologii). – Harkiv: NTU «HPI», 2013. – № 2 (976). – S. 7-12.

6. Nikulina E. N. Modifikatsija geneticeskih algoritmov dlja optimizatsii vektornyh tselevyh funktsij / E. N. Nikulina, V. P. Severin, T. E. Nikolaenko // Visnik Nacionalnogo tehničnogo universitetu «Harkivskij politehničnij institut» (seriya: Sistemnij analiz, upravlinnja ta informacijni tehnologii). – Harkiv: NTU «HPI», 2013. – № 3 (977). – S. 9-14.

7. Nikulina E. N. Mnogotselevaja optimizatsija sistem upravlennja parovoj turbinoj K-1000-60/1500 na osnove vektornoj tselevoj funktsii / E. N. Nikulina, V. P. Severin, K. B. Godlevskaja // Visnik Nacionalnogo tehničnogo universitetu «Harkivskij politehničnij institut» (seriya: Energetychni ta teploenergetychni protsesy j ustatkuvannja). – Harkiv: NTU «HPI», 2013. – № 13 (987). – S. 24-29.

8. Nikulina E. N. Mnogotselevoj sintez nelinejnyh sistem upravlennja parovoj turbinoj AES po prjamym pokazateljam kachestva / E. N. Nikulina, V. P. Severin, V. F. Chernaj, K. V. Godlevskaja // Energoberehenije. Energetika. Energoaudit. Spetsialnyj vypusk. – Tom 2. – 2013. – № 8 (114). – S. 134-140.

9. Nikulina E. N. Sintez optimalnyh sistem avtomaticeskogo upravlennja energobloka AES v normalnyh reghimah ekspluatatsii / E. N. Nikulina, V. P. Severin // Jaderna ta radiatsijna bezpeka. – 2013. – Vyp. 3 (59). – S. 62-68.

10. Nikulina O. M. Matematyčne ta programne zabezpechennja dlja modeljuvannja odnostupenevogo generatora impulsiv naprugi / V. P. Severyn, O. M. Nikulina, M. I. Ahtyrtsev // Visnik Nacionalnogo tehničnogo universitetu «Harkivskij politehničnij institut» (seriya: Radiofizika ta ionosfera). – Harkiv: NTU «HPI», 2013. – № 33 (1066). – S. 19-24.

11. Nikulina O. M. Analiz elektronnyh filtriv Battervorta chyselnymy

metodamy / V. P. Severyn, O. M. Nikulina, V. S. Burjakovskyj // Visnik Nacionalnogo tehničnogo universitetu «Harkivskij politehničnij institut» (seriya: Sistemnij analiz, upravlinnja ta informacijni tehnologii). – Harkiv: NTU «HPI», 2014. – № 55 (1097). – S. 19-24.

12. Nikulina E. N. Problema manevrenosti energobloka AES I razvitije modelej jego sistem upravljenja / V. P. Severin, E. N. Nikulina, D. A. Ljutenko, E. Ju. Bobuh // Visnik Nacionalnogo tehničnogo universitetu «Harkivskij politehničnij institut» (seriya: Sistemnij analiz, upravlinnja ta informacijni tehnologii). – Harkiv: NTU «HPI», 2014. – № 61 (1103). – S. 24-29.

13. Nikulina E. N. Mnogokriterialnyj sintez sistem upravljenja energobloka AES s ispolzovanijem laboratorii metodov optimizatsii OPTLAB / V. P. Severin, E. N. Nikulina, D. A. Ljutenko, E. Ju. Bobuh // Visnik Nacionalnogo tehničnogo universitetu «Harkivskij politehničnij institut» (seriya: Energetyčni ta teploenergetyčni protsesy j ustakuvannja). – Harkiv: NTU «HPI», 2015. – № 15 (1124). – S. 106-111.

14. Nikulina O. M. Matematyčne ta programne zabezpečennja dlja imitatsijnogo modeljuvannja bagatostupenevogo generatora impulsiv naprugy / V. P. Severyn, O. M. Nikulina, M. I. Ahtyrtsev // Visnik Nacionalnogo tehničnogo universitetu «Harkivskij politehničnij institut» (seriya: Radiofizika ta ionosfera). – Harkiv: NTU «HPI», 2015. – № 37 (1146). – S. 30-35.

15. Nikulina E. N. Nelinejnye modeli perehodnyh reghimov parovyh turbin AES dlja optimizatsija protsessov upravljenja / V. P. Severin, E. N. Nikulina, I. H. Chechenova // Visnik Nacionalnogo tehničnogo universitetu «Harkivskij politehničnij institut» (seriya: Energetyčni ta teploenergetyčni protsesy j ustakuvannja). – Harkiv: NTU «HPI», 2016. – № 8 (1180). – S. 65-71.

16. Nikulina E. N. Sdentifikatsija parametrov sistemy upravljenja proizvoditelnostju parogeneratora energobloka AES / V. P. Severin, E. N. Nikulina, N. V. Trubchanova // Visnik Nacionalnogo tehničnogo universitetu «Harkivskij politehničnij institut» (seriya: Avtomatika ta pryladobuduvannja). – Harkiv: NTU «HPI», 2016. – № 15 (1187). – S. 38-44.

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 // Visnik Nacionalnogo tehničnogo universitetu «Harkivskij politehničnij institut» (seriya: Sistemnij analiz, upravlinnya ta informacijni tehnologiji). – Harkiv: NTU «HPI», 2016. – № 37 (1209). – S. 9-12.

18. Nikulina E. N. Model parovoj turbiny K-1000-60/1500-2 dlja issledovanija protsessov upravljenja / V. P. Severin, E. N. Nikulina, A. S. Shevtsov // Visnik Nacionalnogo tehničnogo universitetu «Harkivskij politehničnij institut» (seriya: Energetyčni ta teploenergetyčni protsesy j ustatkuvannja). – Harkiv: NTU «HPI», 2017. – № 8 (1230). – S. 57-62.

19. Nikulina E. N. Modelirovanije perehodnyh reghimov jadernogo reaktora VVER-1000 s uchetom bornogo regulirovanija / E. N. Nikulina, V. P. Severin, D. A. Lukinova // Visnik Nacionalnogo tehničnogo universitetu «Harkivskij politehničnij institut» (seriya: Sistemnij analiz, upravlinnya ta informacijni tehnologiji). – Harkiv: NTU «HPI», 2017. – № 51 (1272). – S. 8-13.

20. Nikulina E. N. Imitatsionnoje modelirovanije protsessov v reaktore VVER-1000 pri regulirovaniimoschnosti poglaschajuschimi sterghnjami / V. P. Severin, E. N. Nikulina, D. A. Lukinova // Visnik Nacionalnogo tehničnogo universitetu «Harkivskij politehničnij institut» (seriya: Sistemnij analiz, upravlinnya ta informacijni tehnologiji). – Harkiv: NTU «HPI», 2017. – № 55 (1276). – S. 3-7.

21. Nikulina E. N. Matematicheskije modeli dlja issledovanija perehodnyh reghimov jadernogo reaktora VVER-1000 serii V-320 / E. N. Nikulina, V. P. Severin, D. A. Lukinova // Jaderna ta radiatsijna bezpeka. – 2018. – Vyp. 1 (77). – S. 18-23.

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 // Visnik Nacionalnogo tehničnogo universitetu «Harkivskij politehničnij institut» (seriya: Sistemnij analiz, upravlinnya ta informacijni tehnologiji). – Harkiv: NTU «HPI», 2018. – № 21 (1297). – S. 8-13.

Published works of approbatory character:

23. Nikulina E. N. Programirovanije i izuchenije metodov optimizatsii v kompjuternoj matematičeskoj sisteme MATLAB / E. N. Nikulina, V. P. Severin // Trudy IV Vserossijskoj nauchnoj konferentsii «Proektirovanije inženernyh i nauchnyh priloghenij v srede MATLAB». – Astrahan: Izdatelskij dom «Astrahanskij universitet», 2009. – S. 612-634.

24. Nikulina E. N. Raschet parametrov modeli nejtronnoj kinetiki jadernogo reaktora VVER-1000 / E. N. Nikulina, A. Ju. Polivoda // Aktualni problemy fizyky ta jih informatsijne zabezpečennja. Tezy dopovidij X regionalnoji naukovoji studentckoji konferentsiji. – Harkiv: NTU «HPI», 2010. – S. 39-41.

25. Nikulina E. N. Optimizatsija parametrov reguljatorov dlja sistem avtomatičeskogo upravlenija proizvoditelnostju parogeneratora / E. N. Nikulina // Materialy XVII Mighnarodnoji konferentsiji z avtomatyčnogo upravlinnja «Avtomatyka-2010». – Harkiv: XHYPE, 2010. – Tom 1. – S. 260-261.

26. Nikulina O. M. Vektorna optymizatsija pokaznykiv jakosti nelinejnyh system keruvannja energoblokov AEC / V. P. Severyn, O. M. Nikulina // Materialy XIX Mighnarodnoji konferentsiji z avtomatyčnogo upravlinnja «Avtomatyka-2012». – Kyjiv: NUHT, 2012. – S. 255-256.

27. Nikulina E. N. Modifikatsija geneticheskikh algorimov dlja mnogotselevogo parametriceskogo sinteza sistem avtomatičeskogo upravlenija / V. P. Severin, E. N. Nikulina // Informatsijni tehnologiji: nauka, tehnika, tehnologija, osvita, zdorovja: Tezy dopovidej XXI mighnarodnoji naukovo-praktyčnoji konferentsiji, Ch. I. – Harkiv: NTU «HPI», 2013. – S. 21.

28. Nikulina E. N. Bagatotsilovyj syntezy nelinejnyh system keruvannja energoblokov AES genetyčnymy algorytmamy / V. P. Severyn, E. N. Nikulina // Materialy XX Mighnarodnoji konferentsiji z avtomatyčnogo upravlinnja «Avtomatyka-2013». – Mykolajiv: NUK, 2013. – S. 193-194.

29. Nikulina E. N. Modelirovanije s sintez sistem upravlenija energoblokom AES s VVER-1000 v osnovnyh reghimah ekspluatatsii / E. N. Nikulina, V. P. Severin // Materialy V Meghdunarodnoj nauchno-tehniceskoj konferentsii «Informacionnyje i upravljajuschije sistemy AES: aspekty bezopasnosti». – Harkiv,

2013. – S. 151-162.

30. Nikulina E. N. Sintez optimalnyh sistem avtomaticheskogo upravlenija energobloka AES v normalnyh reghimah ekspluatatsii / E. N. Nikulina, V. P. Severin // Materialy V Meghdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Informatsionnyje i upravljajuschije sistemy AES: aspekty bezopasnosti». – Harkiv, 2013. – S. 81-90.

31. Nikulina E. N. Pogrammirovanije metodov optimizatsii dlja ih izuchenije I issledovanije / E. N. Nikulina, V. P. Severin // Informatsijni tehnologii: nauka, tehnika, tehnologija, osvita, zdorovja: Tezy dopovidej XXII mighnarodnoji naukovopraktyčnoji konferentsiji, Ch. I. – Harkiv: NTU «HPI», 2014 – S. 20.

32. Nikulina E. N. Kompjuternaja laboratorija dlja issledovanija metodov bezuslovnoj, uslovnoj, globalnoj i mnogokriterialnoj optimizatsii / V. P. Severin, E. N. Nikulina, D. A. Ljutenko // Informatsijni tehnologii: nauka, tehnika, tehnologija, osvita, zdorovja: Tezy dopovidej XXII mighnarodnoji naukovopraktyčnoji konferentsiji, Ch. I. – Harkiv: NTU «HPI», 2015. – S. 19.

33. Nikulina E. N. Laboratornija modelej i metodov analiza isinteza sistem avtomaticheskogo upravlenija / E. N. Nikulina // Materialy XXII Mighnarodnoji konferentsiji z avtomatychnogo upravlinnja «Avtomatyka-2015». – Odesa: TEC, 2015. – S. 73-74.

34. Nikulina O. M. Model sistemy avtomatychnogo upravlinnja dlja manevruvannja potughnistju reaktora VVER-1000 / V. P. Severin, O. M. Nikulina, D. A. Ljutenko // Informatsijni tehnologii: nauka, tehnika, tehnologija, osvita, zdorovja: Tezy dopovidej XXIV mighnarodnoji naukovopraktyčnoji konferentsiji, Ch. I. – Harkiv: NTU «HPI», 2016. – S. 35.

35. Nikulina E. N. Analiz i sintez sistem upravlenija energobloka AES dlja manevrennyh reghimov ekspluatatsii / V. P. Severin, E. N. Nikulina, D. A. Ljutenko // Materialy XXIII Mighnarodnoji konferentsiji z avtomatychnogo upravlinnja «Avtomatyka-2016». – Sumy: SumDU, 2016. – S. 63-64.

36. Nikulina O. M. Matematychni modeli system upravlinnja parogeneratorom energobloku AES / O. M. Nikulina, V. P. Severyn, N. V. Trubchanova //

Informatsijni tehnologiji: nauka, tehnika, tehnologija, osvita, zdorovja: Tezy dopovidej XXV mighnarodnoji naukovo-praktychnoji konferentsiji, Ch. I. – Harkiv: NTU «HPI», 2017. – S. 31.

37. Nikulina E. N. Mnogokriterialnyj sintez sistem upravljenja energobloka AES s reaktorom VVER-1000 dlja ekspluatatsii v manevrennyh reghimah / V. P. Severin, E. N. Nikulina, D. A. Lukinova // Informatsijni tehnologiji: nauka, tehnika, tehnologija, osvita, zdorovja: Tezy dopovidej XXV mighnarodnoji naukovo-praktychnoji konferentsiji, Ch. I. – Harkiv: NTU «HPI», 2017. – S. 40.

38. Nikulina O. M. Nelinijni modeli parovyh turbin AES dlja manevrennyh reghymiv ekspluatatsii / V. P. Severyn, O. M. Nikulina, O. S. Shevtsov // Informatsijni tehnologiji: nauka, tehnika, tehnologija, osvita, zdorovja: Tezy dopovidej XXV mighnarodnoji naukovo-praktychnoji konferentsiji, Ch. I. – Harkiv: NTU «HPI», 2017. – S. 41.

39. Nikulina E. N. Optimizatcija pokazatelej kachestva sistem avtomaticheskogo upravljenja jadernym reaktorom VVER-1000 / D. A. Lukinova, V. P. Severin, E. N. Nikulina // Materialy XXIV Mighnarodnoji konferentsiji z avtomatychnogo upravlinnja «Avtomatyka-2017». – Kujiv: NUBiP Ukrainy, 2017. – S. 84-85.

40. Nikulina E. N. Modelirovanije parovyh turbin AES kak objektov upravljenja v manevrennyh reghimah ekspluatatsii / V. P. Severin, E. N. Nikulina, A. S. Shevtsov // Materialy XXIV Mighnarodnoji konferentsiji z avtomatychnogo upravlinnja «Avtomatyka-2017». – Kujiv: NUBiP Ukrainy, 2017. – S. 108-109.

41. Nikulina E. N. Mnogozonnaja model reaktora VVER-1000 dlja sinteza sistem upravljenja energobloka AES v manevrennyh reghimah ekspluatatsii / V. P. Severin, E. N. Nikulina, D. A. Lukinova // Informatsijni tehnologiji: nauka, tehnika, tehnologija, osvita, zdorovja: Tezy dopovidej XXVI mighnarodnoji naukovo-praktychnoji konferentsiji, Ch. I. – Harkiv: NTU «HPI», 2018. – S. 33.

42. Nikulina E. N. Modelirovanije protsessov upravljenja jadernym reaktorom VVER-1000 dlja obespechenija manevrennosti energobloka / D. A. Lukinova, V. P. Severin, E. N. Nikulina // Materialy XXV Mighnarodnoji konferentsiji z

avtomatychnogo upravlinnja «Avtomatyka-2018». – Lviv: Lvovska politehnika, 2018. – S. 39-40.

43. Nikulina E. N. Identifikatsija i analiz ustojchivosti konturov avtomaticheskogo regulirovanija energoblokov AES s reaktorami VVER-1000 / E. N. Nikulina, V. P. Severin, N. V. Kotsjuba // Materialy XXV Mighnarodnoji konferentsiji z avtomatychnogo upravlinnja «Avtomatyka-2018». – Lviv: Lvovska politehnika, 2018. – S. 54-55.

44. Nikulina E. N. Optimizatcija sistem avtomaticheskogo upravljenja parovoj turbiny K-1000-60/1500-2 po prjamym pokazatelej kachestva / V. P. Severin, E. N. Nikulina, A. S. Shevtsov // Materialy XXV Mighnarodnoji konferentsiji z avtomatychnogo upravlinnja «Avtomatyka-2018». – Lviv: Lvovska politehnika, 2018. – S. 52-53.

45. Nikulina O. M. Struktura informatsijnij tehnologiji optymizatsiji upravlinnja skladnymy dynamichnymy systemamy / D. A. Lukinova, V. P. Severyn, O. M. Nikulina // Informatsijni tehnologiji: nauka, tehnika, tehnologija, osvita, zdorovja: Tezy dopovidej XXVII mighnarodnoji naukovo-praktychnoji konferentsiji, Ch. I. – Harkiv: NTU «HPI», 2019. – S. 31.

46. Nikulina O. M. Modul predstavlennja informatsiji dlja tehnologiji optimizatsiji sistem avtomatychnogo upravlinnja / O. M. Nikulina, V. P. Severyn, N. V. Kotsjuba // Informatsijni tehnologiji: nauka, tehnika, tehnologija, osvita, zdorovja: Tezy dopovidej XXVII mighnarodnoji naukovo-praktychnoji konferentsiji, Ch. I. – Harkiv: NTU «HPI», 2019. – S. 36.

47. Nikulina O. M. Blok metodiv optimizatsiji dlja informatsijinoji tehnologiji upravlinnja skladnymy dynamichnymy systemamy / V. P. Severyn, O. M. Nikulina, O. S. Shevtsov // Informatsijni tehnologiji: nauka, tehnika, tehnologija, osvita, zdorovja: Tezy dopovidej XXVII mighnarodnoji naukovo-praktychnoji konferentsiji, Ch. I. – Harkiv: NTU «HPI», 2019. – S. 41.

48. Nikulina E. N. Optimalnij sintez perspektivnyh sistem upravljenja reaktornoj ustanovki VVER-1000 v normalnyh reghimah ekspluatatsii / E. N. Nikulina, V. P. Severin // Problemy obespechenija bezopasnosti

informatsonnyh i upravljajuschih sistem AES: sbornik nauchnyh trudov / pod. red. M. A. Jastrebenetskogo. – Olessa: Astroprint – 2010. – S. 179-192.

49. Nikulina E. N. Sintez sistem upravlenija geneticheskimi algoritmami na osnove integralnyh kvadraticnyh otsenok / E. N. Nikulina, V. P. Severin, A. V. Bondarenko // Visnik Nacionalnogo tehnicnogo universitetu «Harkivskij politehnicnij institut» (seriya: Sistemnij analiz, upravlinnya ta informacijni tehnologiyi). – Harkiv: NTU «HPI», 2013. – № 3 (977). – S. 15-20.

50. Nikulina E. N. Optimizacija prjamyh pokazatelej kachestva sistem avtomaticheskogo upravlenija geneticheskimi algoritmami / E. N. Nikulina, V. P. Severin, K. A. Tarasenko // Visnik Nacionalnogo tehnicnogo universitetu «Harkivskij politehnicnij institut» (seriya: Sistemnij analiz, upravlinnya ta informacijni tehnologiyi). – Harkiv: NTU «HPI», 2013. – № 3 (977). – S. 21-26.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	6
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ОПТИМІЗАЦІЇ ТА УПРАВЛІННЯ СКЛАДНИМИ ДИНАМІЧНИМИ СИСТЕМАМИ	
1.1 Проблеми управління складними динамічними системами	19
1.2 Управління енергоблоком АЕС як складної динамічної системи	24
1.3 Інформаційні технології управління та оптимізації	28
1.4 Моделювання процесів в складних динамічних системах	32
1.5 Методи аналізу інформаційних управляючих систем	34
1.6 Критерії якості процесів управління динамічними системами	39
1.7 Синтез інформаційних управляючих систем	43
1.8 Методи оптимізації для управління динамічними системами	47
1.9 Обґрунтування мети та задач досліджень	52
РОЗДІЛ 2 СТРУКТУРА ТА ОСНОВНІ ЕЛЕМЕНТИ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОПТИМІЗАЦІЇ УПРАВЛІННЯ СКЛАДНИМИ ДИНАМІЧНИМИ СИСТЕМАМИ	
2.1 Структура інформаційної технології	56
2.2 Блок моделей систем	59
2.3 Модуль методів інтегрування	62
2.4 Блок обчислення критеріїв якості систем	64
2.5 Блок методів оптимізації	68
2.6 Загальні структури даних	75
2.7 Модуль представлення інформації розв'язання задач	80
2.8 Висновки за розділом	81
РОЗДІЛ 3 МОДЕЛІ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОПТИМІЗАЦІЇ УПРАВЛІННЯ	
3.1 Узагальнення принципів моделювання динамічних систем	85

3.2 Енергоблок АЕС як приклад складної динамічної системи	88
3.3 Нелінійна зосереджена модель ядерного реактора ВВЕР-1000	90
3.4 Нелінійна вертикально розподілена модель реактора ВВЕР-1000	96
3.5 Моделювання динамічних процесів у парогенераторі ПГВ-1000	104
3.6 Нелінійна модель парогенератора ПГВ-1000 як об'єкта управління	120
3.7 Рівняння динаміки турбіни	124
3.8 Нелінійна модель парової турбіни К-1000-60/1500-2	130
3.9 Висновки за розділом	136

РОЗДІЛ 4 АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ В ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМАХ

НА ОСНОВІ УЗАГАЛЬНЕНИХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ	141
---	-----

4.1 Узагальнення методів аналізу динамічних систем	142
4.2 Скидання навантаження реактора за зосередженою моделлю	145
4.3 Зміна аксіального офсету реактора за розподіленою моделлю	153
4.4 Скидання навантаження парогенератора	165
4.5 Зміна тиску та частоти парової турбіни	167
4.6 Висновки за розділом	171

РОЗДІЛ 5 МОДЕЛІ ІНФОРМАЦІЙНИХ УПРАВЛЯЮЧИХ СИСТЕМ

ДЛЯ СКЛАДНИХ ДИНАМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ	173
--	-----

5.1 Узагальнення моделей інформаційних управляючих систем	174
5.2 Інформаційні управляючі системи енергоблоку АЕС	176
5.3 Нелінійні моделі процесів управління реактором	177
5.4 Модель системи стабілізації рівня води в парогенераторі	180
5.5 Модель системи стабілізації частоти парової турбіни	183
5.6 Модель енергоблоку АЕС як об'єкта управління	184
5.7 Моделі інформаційних управляючих систем енергоблоку АЕС	190
5.8 Висновки за розділом	192

РОЗДІЛ 6 РЕАЛІЗАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ

ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ	195
--	-----

6.1 Моделі та методи аналізу стійкості динамічних систем	196
6.2 Критерії та методи ідентифікації динамічних систем	199

6.3	Методи оптимізації векторних функцій	201
6.4	Ідентифікація нелінійних моделей парогенератора ПГВ-1000	204
6.5	Моделі ідентифікації об'єктів другого контуру енергоблоку АЕС	212
6.6	Ідентифікація об'єктів управління за натурними експериментами	215
6.7	Методи аналізу стійкості систем другого контуру енергоблоку	238
6.8	Використання моделей для аналізу стійкості систем управління	240
6.9	Висновки за розділом	246
РОЗДІЛ 7 ПРИКЛАДИ ВИКОРИСТАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ		
ОПТИМІЗАЦІЇ УПРАВЛІННЯ СКЛАДНИМИ ДИНАМІЧНИМИ		
СИСТЕМАМИ		
7.1	Обчислення прямих показників якості	250
7.2	Обчислення покращених інтегральних квадратичних оцінок	257
7.3	Методи оптимізації з одновимірним пошуком	260
7.4	Зосереджена та розподілена системи управління реактором	261
7.5	Нелінійна система стабілізації рівня води в парогенераторі	272
7.6	Нелінійна система управління частотою турбіни	277
7.7	Лінійні системи управління другого контуру	280
7.8	Системи управління енергоблоком АЕС	291
7.9	Техніко-економічне обґрунтування отриманих результатів	296
7.10	Висновки за розділом	303
ВИСНОВКИ		
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ		
ДОДАТОК А ТЕХНІЧНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ		
ОБ'ЄКТІВ УПРАВЛІННЯ		
A.1	Значення параметрів реактора ВВЕР-1000	342
A.2	Значення параметрів парогенератора ПГВ-1000	343
A.3	Експериментальні характеристики парогенератора ПГВ-1000	345
A.4	Значення параметрів парової турбіни К-1000-60/1500-2	350
A.5	Значення параметрів енергоблоку	351

ДОДАТОК Б ДОДАТКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ З ІДЕНТИФІКАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ

УПРАВЛІННЯ	352
Б.1 Ідентифікація конденсатора	352
Б.2 Ідентифікація головного парового колектору	356
Б.3 Ідентифікація колектору внутрішніх потреб	359
Б.4 Ідентифікація турбоживильного насосу	361
Б.5 Ідентифікація підігрівача низького тиску	365
Б.6 Ідентифікація сепаратора пароперегрівача	368
Б.7 Ідентифікація підігрівача високого тиску	371
ДОДАТОК В ПРОЦЕСИ ОПТИМІЗАЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНО-УПРАВЛЯЮЧИХ СИСТЕМ ЕНЕРГОБЛОКУ	374
В.1 Зосереджена модель реактора з управлінням стрижнями	374
В.2 Зосереджена модель реактора з управлінням бором	375
В.3 Розподілена модель реактора з управлінням стрижнями	376
В.4 Розподілена модель реактора з управлінням бором	377
В.5 Нелінійна модель парогенератора зі стабілізацією рівня води	379
В.6 Нелінійна модель турбіни зі стабілізацією частоти	380
В.7 Модель деаератора зі стабілізацією рівня	383
ДОДАТОК Г МАТЕРІАЛИ ПО ВПРОВАДЖЕННЮ РЕЗУЛЬТАТІВ	385
ДОДАТОК Г СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА	394