

Міністерство освіти і науки України
Одеський національний політехнічний університет

Одреховська Євгенія Олександрівна



УДК 621.039.56(043.3/.5)

ОПТИМІЗАЦІЯ ПЕРЕМІКАННЯ СТАТИЧНИХ ПРОГРАМ
РЕГУЛЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ЯЕУ З ВВЕР-1000
В ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Спеціальність 05.13.07 – автоматизація процесів керування

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса – 2017

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Робота виконана в Одеському національному політехнічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник

доктор технічних наук,
старший науковий співробітник
Пелих Сергій Миколайович,
Одеський національний політехнічний
університет,
професор кафедри автоматизації
теплоенергетичних процесів

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Волков Віктор Едуардович,
Одеська національна академія харчових
технологій,
директор навчально-наукового інституту
механіки, автоматизації та робототехніки
імені П. М. Платонова

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

Захист відбудеться «28» вересня 2017 р. о 13³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.052.01 при Одеському національному політехнічному університеті за адресою: ауд. 400-А, пр. Шевченка, 1, м. Одеса, 65044.

З дисертацією можна ознайомитись в науково-технічній бібліотеці ОНПУ за адресою: пр. Шевченка, 1, м. Одеса, 65044.

Автореферат розісланий «23» серпня 2017 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



О. Є. Колесніков

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Враховуючи сьогоденне положення України на світовому енергоринку, експлуатація атомних електростанцій (АЕС) залишається одним з важливих засобів забезпечення електроенергією нашої держави. Під час експлуатації ядерної енергетичної установки (ЯЕУ) в стаціонарному стані на неї діє багато внутрішніх збурень. Кількість зовнішніх збурень збільшується за умови експлуатації ЯЕУ в режимі добового циклу навантаження, що призводить до зміни значень технологічних параметрів та стану обладнання, яке відповідає за безпечну експлуатацію.

Сучасні автоматизовані системи управління технологічними процесами (АСУ ТП) АЕС дозволяють не тільки виконувати задачі управління, використовуючи статичну програму регулювання потужності за принципом зворотного зв'язку, але й за рахунок накопиченої інформації про стан обладнання, прогнозувати можливі стани ЯЕУ при врахуванні різних збурень. Розвиток теорії оптимального керування та технічний рівень АСУ ТП дозволяють підвищити ефективність керування ЯЕУ не тільки зміною параметрів в добовому циклі маневрування потужністю, а й зміною структури технічних засобів автоматизації, що здатні реалізувати ту чи іншу статичну програму регулювання потужності, які в поточний час нівелюють впливи внутрішніх та зовнішніх збурень, дозволяючи експлуатувати ЯЕУ з забезпеченням регламентного рівня безпеки без зменшення критеріїв ефективності.

На даний час можливості технічних засобів АСУ ТП використовуються не в повному обсязі, тому для зменшення впливу збурень на енергетичне обладнання ЯЕУ необхідно розробити методи керування, які дозволять перемикає між собою статичні програми регулювання потужності, коли ЯЕУ знаходиться на будь-якому рівні потужності, що і визначає актуальність даної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційне дослідження виконане в ОНПУ відповідно до завдання держбюджетної НДР МОН України за темою «Удосконалення теоретичних та експериментальних методів дослідження перехідних процесів в енергетичних установках за рахунок структурної оптимізації моделей і технічних систем» (№ ДР 0115U000411) при особистій участі здобувача в якості співвиконавця.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є підвищення конкурентоспроможності експлуатації ЯЕУ в енергетичній системі за рахунок пошуку оптимального режиму перемикає статичних програм регулювання при експлуатації на будь-яких рівнях потужності.

Для досягнення мети поставлені такі задачі:

– дослідити показники ефективності та безпеки експлуатації ЯЕУ з ВВЕР-1000 в перехідних режимах як об'єкта керування з врахуванням внутрішніх збурень;

– розробити об'єктно-орієнтовану модель автоматизованої системи керування перемикає статичних програм регулювання потужності;

– вдосконалити багатозонну математичну модель реактора типу ВВЕР-1000 як об'єкта керування, яка враховує поділ ядер ^{235}U та ^{239}Pu , а також розраховує глибину вигорання палива та пошкодження паливної оболонки;

– синтезувати і обґрунтувати критерії та цільову функцію оптимізації процесу перемикання статичних програм регулювання потужності;

– розв'язати завдання оптимізації перемикання статичних програм регулювання потужності за рахунок пошуку оптимальної програми регулювання в залежності від збурень та поточного стану енергетичного обладнання.

Об'єкт дослідження: енергоблок АЕС з ВВЕР-1000 в перехідних режимах нормальної експлуатації.

Предмет дослідження: система автоматизованого управління потужністю енергоблоку АЕС у перехідних режимах.

Методи дослідження. Для дослідження показників ефективності та безпеки експлуатації ВВЕР-1000 в перехідних режимах як об'єкта керування з точки зору внутрішніх збурень використовувались наукове узагальнення й систематизація. При розробці імітаційної моделі автоматизованої системи керування перемиканням статичних програм регулювання потужності використовувались теоретичні основи об'єктно-орієнтованого аналізу та рівнянь матеріального балансу, чисельні методи розв'язку диференціальних рівнянь та теорія автоматичного керування. Для вдосконалення багатозонної математичної моделі реактора ВВЕР-1000 як об'єкта керування, яка враховує поділ ядер ^{235}U та ^{239}Pu , глибину вигорання палива та пошкодження паливної оболонки використані методи імітаційного моделювання в середовищі моделювання та методи енергетичного варіанту теорії повзучості. Для обґрунтування критеріїв, які ввійдуть до складу цільової функції та для створення такої цільової функції проведено синтез параметрів згідно з критеріями безпеки палива та створено цільову функцію оптимізації. Для мінімізації цільової функції використані методи оптимізації.

Наукова новизна:

– вперше запропоновано імітаційну модель автоматизованої системи керування потужністю, яка заснована на перемиканні статичних програм регулювання за логічною структурою об'єктно-орієнтованого підходу, третім етапом якого є створення технологічних методів експлуатації енергетичного обладнання замість традиційних діаграм переходів даних дій, що дозволяє сформулювати зміну поточної моделі програми регулювання при потужності об'єкта керування в діапазоні від 80 до 100 %;

– отримала подальший розвиток багатозонна математична модель реактора з розподіленими параметрами, яка на відміну від відомих враховує поділ ядер ^{235}U та ^{239}Pu , включає ідентифіковану модель керуючого впливу, а саме перемикання статичних програм регулювання, що дозволяє контролювати зміну технологічних параметрів об'єкта керування та розрахувати аксіальний офсет як кількісну міру сталості реактора, глибину вигорання палива, як міру

ефективності експлуатації та пошкодження оболонок твєлів, як міру безпеки експлуатації;

– вперше запропоновано цільову функцію оптимізаційної задачі, що об'єднує в собі показники ефективності та безпеки експлуатації, які залежать від глибини вигорання палива, пошкодження оболонок твєлів, аксіального офсету, що дозволяє в одному виразі поєднати критерії з різними метриками для знаходження оптимального рішення;

– вперше вирішено задачу оптимізації перемикання статичних програм регулювання потужності за рахунок мінімізації цільової функції, яка дозволяє безударно перемикати енергетичне обладнання в заданому діапазоні зміни навантаження за допомогою введення додаткових зворотних зв'язків між перемикачем статичних програм та їх регуляторами, що дає можливість мінімізувати поточні зовнішні та внутрішні збурення.

Практичне значення отриманих результатів полягає у:

– використанні розробленої багатозонної моделі активної зони (а.з.) реактора й моделі енергоблоку як об'єкта керування в цілому, яка на відміну від відомих враховує поділ ядер ^{235}U та ^{239}Pu для проведення різних експериментів і моделювання типових енергетичних установок;

– використанні вдосконаленої математичної моделі автоматизованої системи керування потужністю для перемикання статичних програм регулювання за логічною структурою об'єктно-орієнтованого підходу;

– можливості переведення енергоблоку з реактором ВВЕР-1000 у режим добового маневрування для підтримки балансу в енергосистемі України, завдяки вдосконаленій автоматизованій системі керування потужністю енергоблоку протягом місяця кожного року кампанії.

Результати дисертаційного дослідження впроваджені в тематику Державного підприємства Національна атомна енергогенеруюча компанія (ДП НАЕК) «Енергоатом» і використовуються при підготовці бакалаврів та магістрів за напрямом «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» на кафедрі автоматизації теплоенергетичних процесів Одеського національного політехнічного університету в навчальних курсах «Оптимізація параметрів АСУ», «Оптимізація проектів систем автоматизації», «Оптимізація структури об'єкта управління».

Особистий внесок здобувача. Всі наукові результати, наведені в дисертації, отримані автором самостійно. У наведених публікаціях здобувачем зроблено наступне: в [1] – запропоновано метод визначення маси пароводяної суміші у водо-водяному енергетичному реакторі; в [2, 3, 9] – запропоновано вдосконалену автоматизовану систему управління зміною потужності енергоблоку з ВВЕР-1000, яка працює за компромісно-комбінованою програмою регулювання потужності впродовж доби й передбачає утримання значення аксіального офсету постійним; в [4, 5, 13] – запропоновано автоматизовану систему управління потужністю ЯЕУ з ВВЕР-1000, оснований на підході об'єктно-орієнтованого аналізу, який дозволить знайти оптимальне рішення з перемикання статичних програм регулювання потужності; в

[6, 7, 12] – запропоновано цільову функцію оптимізації, яка дозволить знайти статичну програму регулювання, оптимальну на заданому рівні потужності ЯЕУ; в [8, 14] – запропоновано оптимальний режим експлуатації ЯЕУ з ВВЕР-1000 при перемиканні статичних програм регулювання потужності в діапазоні 80 – 100 %; в [10] – проведено аналіз стосовно впливу зміни потужності ЯЕУ з ВВЕР-1000 на властивості ядерного палива; в [11] – досліджено ефективність роботи ЯЕУ з ВВЕР-1000 на різних рівнях потужності та за різними статичними програмами регулювання потужності; в [15] – наведено основні результати дослідження.

Апробація результатів дисертації. Основні положення й результати дисертаційного дослідження доповідалися, обговорювалися й одержали схвалення на: VII Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології і автоматизація – 2014» (Одеса, 2014), Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне й технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними й технологічними комплексами» (Київ, 2014), I Всеукраїнській науково-технічній конференції «Автоматизація, контроль та управління: пошук ідей та рішень (АКУ–2015)» (Красноармійськ, 2015), XXII Міжнародній конференції з автоматичного управління «Автоматика 2015» (Одеса, 2015), III Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених, аспірантів та студентів (АКІТ–2016) «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2016» (Київ, 2016), IX Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології і автоматизація – 2016» (Одеса, 2016), XXIV Щорічній науковій конференції інституту ядерних досліджень НАН України (Київ, 2017).

Публікації. Результати наукових досліджень опубліковані в 15 друкованих працях, з них 8 – у спеціалізованих наукових виданнях (2 публікації – у міжнародній наукометричній базі SCOPUS), 7 тез доповідей міжнародних, національних, регіональних конференцій, 1 патент України на винахід, 1 патент Росії на винахід.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел з 97 найменувань й 2 додатків. Загальний обсяг роботи становить 161 сторінку. До роботи також входять 32 рисунка й 21 таблиця.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

В анотації наведено стислий зміст кожного розділу та загальний висновок дисертаційної роботи.

У вступі обґрунтовано актуальність роботи та її зв'язок з науково-дослідними програмами. Сформульовано мету і основні задачі дослідження. Визначено наукову новизну та практичну цінність одержаних результатів.

У першому розділі (*Аналіз конкурентоспроможності ЯЕУ в об'єднаній енергосистемі України*) виконано аналіз методів оптимізації енергетичних систем. Теоретичні дослідження задач оптимізації проводили Ф. А. Серант, В. Г. Томілов, А. В. Сафронов, С. В. Зиков та інші. Нейромережевими технологіями в оптимізації енергосистем займався Савченко Н. А. Осипов М. І.

провів аналіз схемних рішень і оптимізацію параметрів комбінованих установок з високотемпературними паливними елементами і газовими турбінами.

Показано, що розв'язання задач оптимізації енергетичних систем може полягати, наприклад, в мінімізації капітальних та експлуатаційних витрат, в забезпеченні захисту навколишнього середовища, в надійності й невисокій вартості ремонту, в зменшенні втрат електроенергії. Це робить доцільним вибір критеріїв, які б об'єднували в собі ефективну та надійну експлуатацію.

В результаті аналізу критеріїв безпеки ядерного палива, які розглядали Т. Miyashita, Y. Tsukuda, M. Billone, вирішено використати в якості контрольованих параметрів такі змінні: AO – аксіальний офсет, B – глибина вигорання палива, ω – параметр пошкодження паливної оболонки. Враховуючи дані параметри експлуатації ЯЕУ з ВВЕР-1000 для дослідження того, як вони взаємодіють між собою і впливають на інші параметри, використаний об'єктно-орієнтований аналіз всієї системи.

У другому розділі (*Об'єктно-орієнтований аналіз АСУ ТП АЕС*) розроблено об'єктно-орієнтовану модель автоматизованої системи керування перемиканням статичних програм регулювання потужності для можливості здійснення перемикання між статичними програмами регулювання потужності. На основі аналізу предметної області створено інформаційну модель об'єкта управління, до складу якої входить обладнання першого та другого контурів, технічні засоби нижнього рівня та система управління верхнього рівня. Розроблено модель станів реактора (рис. 1), отриману на базі поняття «реактивність системи», яка визначає можливу зміну потужності та стабільності ЯЕУ, та модель станів системи управління (рис. 2). Зміна станів реактора залежить від внутрішніх та зовнішніх збурень, які, в свою чергу, змінюють реактивність системи. Система управління компенсує зміну реактивності реактора для того, аби він залишався в стабільному стані на різних рівнях потужності.

Так, початковий стан для ЯЕУ є «Робота на 100 % потужності». По закінченню 16 годин спрацьовує сигнал таймера і починається процес зниження потужності $EvTo80$ з регламентною швидкістю. Якщо перехідний процес завершено, то система переходить в новий стаціонарний стан «Робота на 80 % потужності». Якщо ж процес не завершено, то в стані розрахунку цільової функції визначається необхідність перемикання обладнання $EvSelect$, або триває робота на поточній конфігурації $EvContinue$. В обох випадках система повертається в стан очікування завершення перехідного процесу і цикл повторюється. Після перемикання програми регулювання і по закінченню 8 годин починається збільшення потужності ЯЕУ $EvTo100$. Після завершення технологічного процесу настає стан «Робота на 100 % потужності».

Третій етап структури об'єктно-орієнтованого підходу передбачає розробку діаграм переходів даних дій, але в даній роботі зроблено їх заміну на технологічні методи, тобто на послідовність операцій для безударного переходу від одного значення технологічного параметру до іншого.

На рис. 3 наведено принципову схему регулювання потужності ЯЕУ з ВВЕР-1000, до складу якої входять три статичні програми регулювання потужності, між якими можливо здійснювати перемикання.

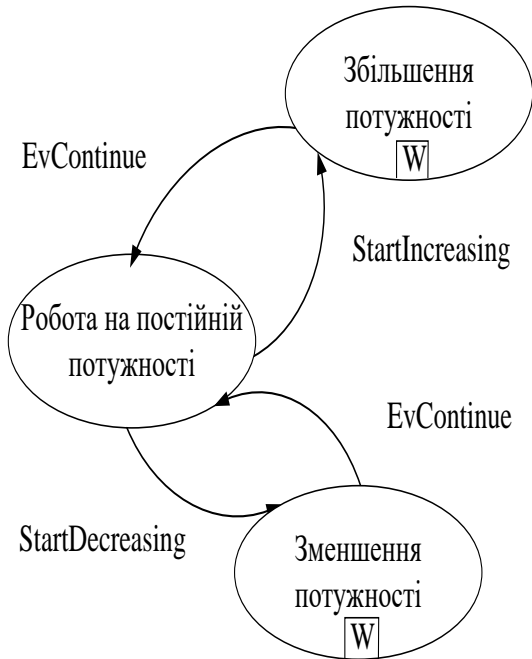


Рисунок 1 – Модель станів реактора

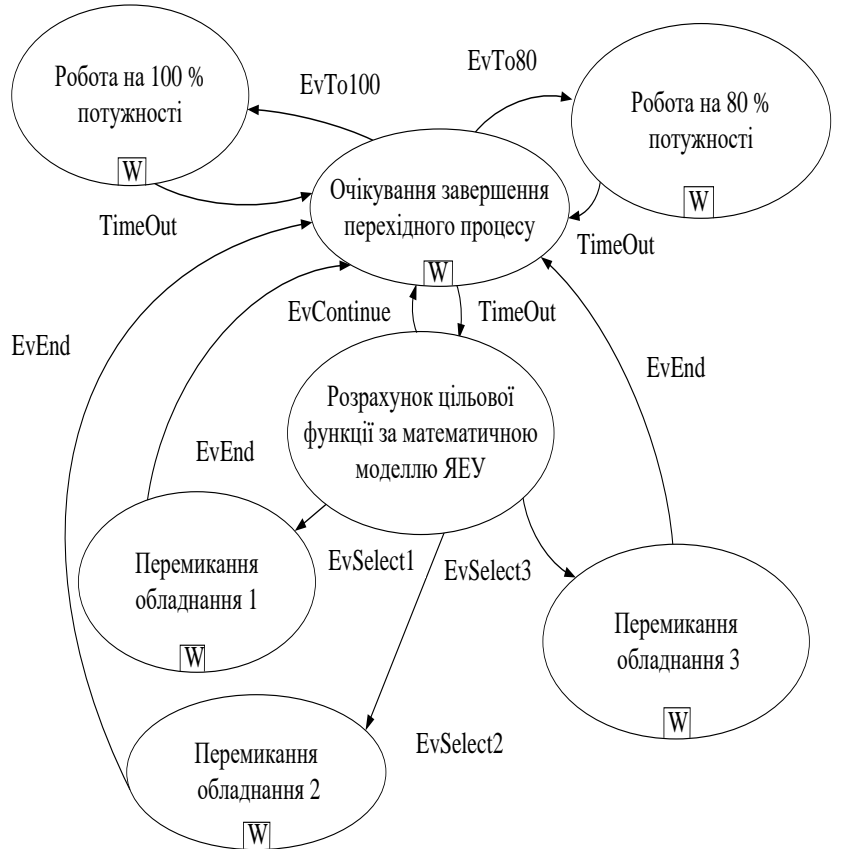


Рисунок 2 – Модель станів системи управління

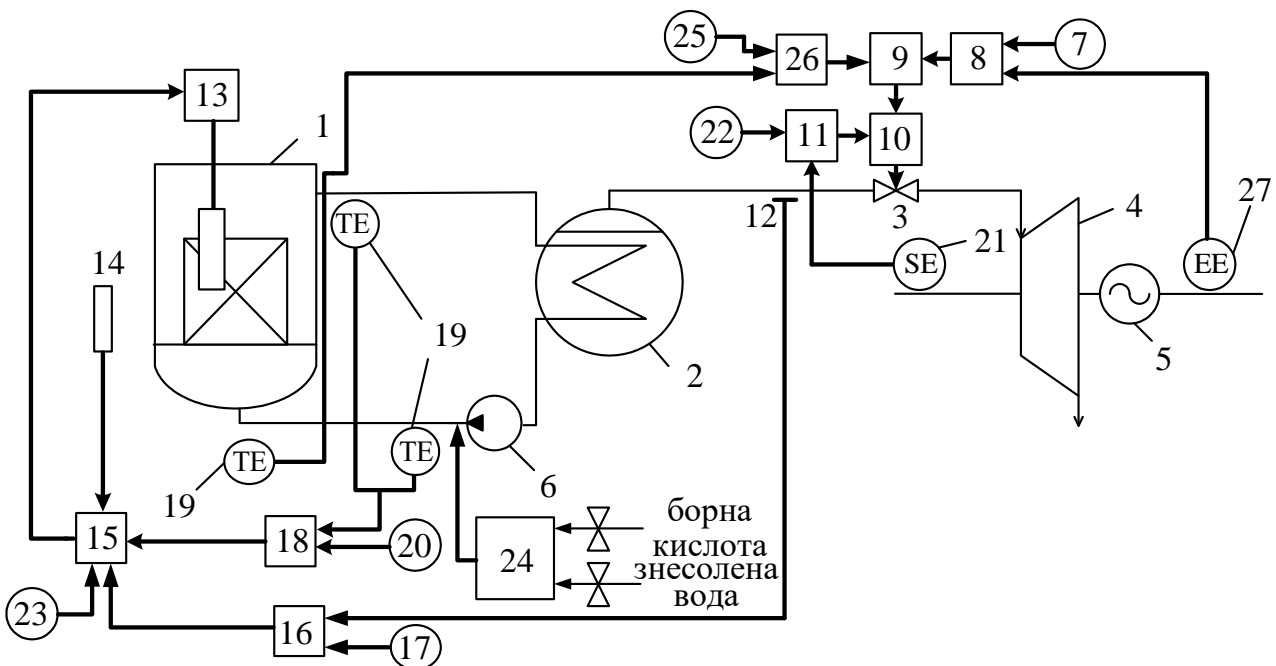


Рисунок 3 – Принципова схема регулювання потужності ЯЕУ з ВВЕР-1000 в перехідному режимі експлуатації за трьома статичними програмами

В табл. 1 наведено стан обладнання, яке належить до тієї чи іншої статичної програми, де знак «+» показує, що одиниця обладнання ввімкнена.

Таблиця 1 – Стан обладнання рис. 3

№ обладнання	$T_{сер=const}$	$P_2=const$	$T_{вх=const}$
1	в робочому стані		
2			
3	+	+	+
4	в робочому стані		
5			
6			
7	+	+	-
8	+	+	-
9	+	+	+
10	+	-	+
11	+	-	-
12	-	+	-
13	+	+	+
14	-	-	+
15	+	+	+
16	-	+	-
17	-	+	-
18	+	-	-
19	+	-	+
20	+	-	-
21	+	-	-
22	+	-	-
23	-	-	+
24	-	-	+
25	-	-	+
26	-	-	+
27	+	+	+

Метод зміни (збільшення/зменшення) потужності ЯЕУ за програмою $T_{сер} = const$ наступний:

Крок 1: Змінити задане значення електричної потужності генератора 5 в задавачі 7 на нове.

Крок 2: Подати керуючий сигнал від регулятора потужності 8 енергоблоку на механізм управління турбіною (МУТ) 9 і сервомотор 10, які приведуть в дію (відкриють/закриють) клапан 3 турбіни 4.

Крок 3: Виміряти температуру теплоносія 1-го контуру 19 на виході з парогенератора (ПГ) 2 і середню температуру теплоносія.

Крок 4: Порівняти задане значення середньої температури теплоносія першого контуру 20 з вимірним 19.

Крок 5: Подати коригувальний сигнал на регулятор нейтронної потужності 15 від регулятора середньої температури теплоносія 1-го контуру 18.

Крок 6: Змінити становище регулюючих стрижнів 13 для вирівнювання середньої температури теплоносія 19.

Метод зміни (збільшення/зменшення) потужності ЯЕУ за програмою $T_{вх} = const$:

Крок 1: Додати до теплоносія 1-го контуру необхідну кількість борної кислоти 24 для зміни потужності енергоблоку, в половину меншої від необхідного для конкретних поточних ефективних діб. Одночасно зниження потужності енергоблоку до необхідного значення відбувається за рахунок отруєння реактора йодом і ксеноном.

Крок 2: Порівняти задане значення середньої температури теплоносія першого контуру в 20 з фактичним 19.

Крок 3: Сформувані керуючий вплив на МУТ 9 і сервомотор 10, які приведуть в дію (відкриють/закриють) клапан 3 турбіни 4.

Крок 4: Порівняти задане 23 і фактичне 14 значення аксіального офсету в регуляторі нейтронної потужності 15 реактора 1.

Крок 5: Сформувані керуючий вплив на приводи органів регулювання системи управління та захисту (ОР СУЗ) 13.

Метод зміни (збільшення/зменшення) потужності ЯЕУ за програмою $P_2 = const$:

Крок 1: Змінити задане значення електричної потужності генератора 5 в задавачі 7 на нове.

Крок 2: Подати керуючий сигнал від регулятора потужності 8 енергоблоку на МУТ 9 і сервомотор 10, які приведуть в дію (відкриють/закриють) клапан 3 турбіни 4.

Крок 3: Виміряти тиск пари 12 в другому контурі.

Крок 4: Порівняти виміряне значення тиску пари в 2-му контурі 12 з заданим в 17 у регуляторі тиску пари в 2-му контурі 16.

Крок 5: Сформувати коригувальний сигнал від регулятора тиску пари 16 на регулятор нейтронної потужності 15.

Крок 6: Порівняти фактичне значення нейтронної потужності з іонізаційних камер 14 із завданням від регулятора тиску пари 16 у регуляторі нейтронної потужності 15.

Крок 7: Сформувати керуючий вплив на приводи регулюючих стрижнів регулюючої групи ОР СУЗ 13.

Таким чином, результатом дослідження другого розділу є запропонована імітаційна модель автоматизованої системи керування потужністю АСУ, заснована на можливості перемикання статичних програм регулювання. В основу імітаційної моделі АСУ покладено логічну структуру об'єктно-орієнтованого аналізу. Для проведення третього етапу об'єктно-орієнтованого аналізу, а саме створення діаграм переходів даних дій, запропоновано використовувати технологічні методи експлуатації енергетичного обладнання, що дало можливість формувати перемикання поточної програми регулювання при зміні потужності об'єкта керування.

У третьому розділі (Вдосконалена математична модель реактора) виконано вдосконалення математичної моделі ректора типу ВВЕР-1000, яка, на відміну від існуючої, враховує поділ ядер не тільки ^{235}U , а й ^{239}Pu . Реактор є багатозонним з розподіленими параметрами, модель якого враховує керуючий вплив від зміни статичних програм регулювання, яка дозволила контролювати коливання технологічних параметрів об'єкта керування та розрахувати аксіальний офсет як кількісну міру сталості реактора, глибину вигорання палива, як міру ефективності експлуатації та пошкодження оболонок твелів, як міру безпеки експлуатації.

Відома математична модель Z має загальний вигляд:

$$Z = \begin{cases} n(\tau) = f_n(\rho(\tau), \beta_{ef}, \beta_j, l, \lambda_j, C_j(\tau)); \\ Q_i(\tau) = f_Q(\varepsilon_n^M, \varepsilon_p^M, \varepsilon_n^N, \varepsilon_p^N, \nu, V_t, \Sigma_f^5, E_f^5, q_{\Pi}(\tau)); \\ Q_{\Pi}(\tau) = f_{Q_{\Pi}}(Cp_{\Pi}, m_{\Pi}, \alpha, F, t_{\Pi}, t_{cep}); \\ \rho_{Xe}(\tau) = f_{\rho_{Xe}}(\sigma_a^{Xe}, \sigma_a^5, N_5, N_{Xe i}(\tau), \Theta); \\ \rho_T(\tau) = f_{\rho_T}(a_T); \rho_N(\tau) = f(a_N); \\ \rho_{ОРСУЗ}(\tau) = f_{\rho_{ОРСУЗ}}(a_i, h_{СУЗ}, h_0); \\ \rho_{БОР}(\tau) = f_{\rho_{БОР}}(\alpha_{бор}, C_{бор}); \\ ПГ = f_{ПГ}(M_{ЖВ}, G_{ЖВ}, G_{\Pi}, D_{\Gamma}, V_{\Pi}, Q_T, t_{ПГ}^{BX}(\tau), P(\tau)); \\ ТГ = f_{ТГ}(G_{\Pi 1}, G_{\Pi 2}, G_{\Pi 3}, N_{Г0}, N_T(\tau)); \\ ТП = f_{ТП}(t_{ПГ}^{BX}(\tau), t_{ПГ}^{ВНХ}(\tau), t_1^{BX}(\tau), t_{10}^{ВНХ}(\tau), T_{TR1}, T_{TR2}). \end{cases} \quad (1)$$

Тут $n(\tau)$ – густина потоку нейтронів i -ї зони, $1/\text{см}^2 \cdot \text{с}$; $\rho(\tau)$ – реактивність; β_{ef} – сумарна частка нейтронів, які запізналися; β_j – частка нейтронів j -ї групи, які запізналися; l – середній час життя покоління миттєвих нейтронів, с; λ_j – постійна радіоактивного розпаду попередників j -ї групи, с^{-1} ; j – номер групи нейтронів, які запізналися, $j=1\dots 6$; $C_j(\tau)$ – ефективна концентрація ядер-попередників нейтронів j -ї групи, які запізналися, $1/\text{см}^2 \cdot \text{с}$; $Q_i(\tau)$ – енерговиділення i -ї зони а.з. реактора; $\varepsilon_{\text{л}}^{\text{м}}, \varepsilon_{\text{р}}^{\text{м}}$ – частка миттєвого локального та розсіяного тепловиділення відповідно; $\varepsilon_{\text{л}}^{\text{п}}, \varepsilon_{\text{р}}^{\text{п}}$ – частка поступового локального та розсіяного тепловиділення відповідно; ν – швидкість нейтронів відносно ядер, $\text{см}/\text{с}$; V_t – об'єм палива в а.з., см^3 ; Σ_f^5 – макроскопічний перетин ділення палива, см^{-1} ; E_f^5 – енергія ділення одного ядра, яка перетворюється в теплову енергію, Дж; $q_{\text{п}}(\tau)$ – відносна потужність поступового тепловиділення, в частках Q_i ; $C_{p_{\text{п}}}$ – питома теплоємність палива, Дж/кг·К; $m_{\text{п}}$ – маса палива, кг; α – коефіцієнт теплопередачі від поверхні твелів до теплоносія, Вт/м²·К; F – площа поверхні твелів, яка передає тепло, м²; $t_i^{\text{п}}(\tau)$ – температура палива i -ї зони, °С; $t_i^{\text{ср}}(\tau)$ – середня температура теплоносія i -ї зони, °С; $\sigma_a^{\text{Xe}}, \sigma_a^5$ – мікроскопічний перетин поглинання теплових нейтронів атомами ¹³⁵Xe та ²³⁵U відповідно, см²; $N_5, N_{\text{Xe}_i}(\tau)$ – концентрація атомів ²³⁵U та ¹³⁵Xe відповідно, см⁻³; Θ – коефіцієнт використання теплових нейтронів в неотруєному реакторі; a_T – температурний коефіцієнт реактивності, 1/°С; α_N – коефіцієнт реактивності потужності, 1/МВт; a_i – коефіцієнт нахилу характеристики, 1/см; $h_{\text{СУЗ}}$ – висота занурення регулюючої групи ОР СУЗ в а.з. реактора, см; h_0 – початок i -ї зони від низу а.з., см; $\alpha_{\text{бор}}$ – коефіцієнт реактивності борної кислоти, 1/г/кг; $C_{\text{бор}}$ – концентрація борної кислоти, г/кг; $M_{\text{ЖВ}}(\tau)$ – маса живильної води в ПГ, кг; $G_{\text{ЖВ}}(\tau)$ – витрата живильної води, кг/с; $G_{\text{п}}(\tau)$ – витрата пари, кг/с; $D_{\Gamma}(\tau)$ – кількість пари, яка генерується, кг; $V_{\text{п}}$ – об'єм пари в парогенераторі, м³; Q_T – кількість теплоти, яка передається з 1-го контуру в 2-й, МВт; $P(\tau)$ – тиск насиченої пари, МПа; $G_{\text{п1}}$ – витрата пари на початку турбогенератора, кг/с; $G_{\text{п2}}$ – поточне значення витрати пари в турбогенераторі, кг/с; $G_{\text{п3}}$ – витрата пари в кінці турбогенератора, кг/с; $N_{\Gamma 0}$ – потужність генератора в номінальному режимі, МВт; $N_T(\tau)$ – потужність турбіни, МВт; $t_{\text{п}}^{\text{вх}}(\tau)$ та $t_{\text{п}}^{\text{вих}}(\tau)$ – температура теплоносія 1-го контуру на вході та виході парогенератора, відповідно; $t_1^{\text{вх}}(\tau)$ и $t_{10}^{\text{вих}}(\tau)$ – температура теплоносія 1-го контуру на вході та виході а.з. реактора, відповідно; T_{TR1} и T_{TR2} – постійні часу, що залежать від швидкості теплоносія 1-го контуру і довжини трубопроводу від реактора до парогенератора в обидві сторони, відповідно.

До моделі керуючого впливу належать електрична потужність турбогенератора, яка змінюється за рахунок пересування органів регулювання системи управління й захисту $\rho_{\text{ОР СУЗ}}$ та через зміну концентрації борної кислоти в теплоносії першого контуру $C_{\text{бор}}$.

Існуюча математична модель ректора Z доповнена складовими, що дало змогу записати її у вдосконаленому вигляді M :

$$M = f(Z; Q_{2,i}; B; \omega; \text{АО}), \quad (2)$$

в якому $Q_{2,i}(\tau)$ – енерговиділення, отримане від ділення ^{239}Pu ; B – глибина вигорання палива, МВт·доба/кг; ω – параметр пошкодження оболонки твелу; АО – величина аксіального офсету, %.

Енерговиділення в а.з. реактора визначається як

$$Q_i(\tau) = Q_{1,i}(\tau) + Q_{2,i}(\tau), \quad Q(\tau) = \sum_{i=1}^{10} Q_i(\tau), \quad (3)$$

де $Q_{1,i}(\tau)$ – енерговиділення, отримане від ділення, ^{235}U .

Енерговиділення, отримане від ділення ^{239}Pu для i -ї зони а.з. реактора, визначається за рівнянням

$$Q_{2,i}(\tau) = ((\epsilon_{\text{л}}^{\text{м}} + \epsilon_{\text{р}}^{\text{м}}) + (\epsilon_{\text{л}}^{\text{п}} + \epsilon_{\text{р}}^{\text{п}}) \cdot q_{\text{п}}(\tau)) \cdot n_i(\tau) \cdot \nu \cdot V_t \cdot \Sigma_f^9 \cdot E_f^9, \quad (4)$$

де Σ_f^9 – макроскопічний перетин ділення ^{239}Pu , см^{-1} ; E_f^9 – енергія ділення одного ядра ^{239}Pu , яка перетворюється в теплову енергію, Дж.

Параметр пошкодження паливної оболонки – це відношення поточної питомої енергії розсіювання до граничної, при якій настає руйнування оболонки:

$$\omega(\tau) = A(\tau) / A_0, \quad (5)$$

де $A(\tau), A_0$ – це питома енергія розсіювання в момент часу τ і при руйнуванні оболонки, відповідно. Пропонується поточну питому енергію розсіювання визначати як

$$A(\tau) = \int_0^{\tau} \sigma_e \cdot p_e \cdot dt, \quad (6)$$

де p_e – швидкість еквівалентної деформації повзучості, с^{-1} ; $\sigma_e(\tau)$ – еквівалентне напруження, Па.

Глибина вигорання палива в одній тепловиділяючій збірці (ТВЗ) визначається як

$$B_{i,j}(\tau) = \frac{1}{m} \int_0^{\tau} Q_{i,j}(t) \cdot dt, \quad (7)$$

де $Q_{i,j}$ – теплова потужність i -го аксіального сегменту середнього твелу j -ої ТВЗ, Вт; m – маса палива в аксіальному сегменті середнього твелу ТВЗ, кг.

Величина АО визначається як відношення різниці енерговиділення між верхньою та нижньою половинами а.з. реактора до їх суми:

$$Q_l(\tau) = \sum_{i=1}^5 Q_i(\tau), Q_h(\tau) = \sum_{i=6}^{10} Q_i(\tau), AO = \frac{Q_h(\tau) - Q_l(\tau)}{Q_h(\tau) + Q_l(\tau)} \cdot 100\%, \quad (8)$$

де $Q_l(\tau)$ – енерговиділення нижньої половини а.з. реактора, МВт; $Q_h(\tau)$ – енерговиділення верхньої половини а.з. реактора, МВт.

Експлуатація ЯЕУ у маневреному режимі за представленими програмами регулювання потужності з різною історією навантаження дасть різні результати, які порівнюються між собою.

Задля цього сформуємо цільову функцію $J = f(B, \omega, AO)$, яка залежить від трьох критеріїв: глибини вигорання палива B , граничне значення якої становить 47 МВт·діб/кг урану, пошкодження паливної оболонки ω , граничне значення якого становить 0,3 та аксіального офсету AO , рекомендований діапазон коливання якого становить $[-5; 2.5]$ для 100 %, $[-5; 4]$ для 80 %.

Нижче наведені параметри кожного з критеріїв:

$$B = B(t_{\text{ТН}}^{\text{ВХ}}; n; \tau_{\text{експ}}); \omega = \omega(t_{\text{ТН}}^{\text{ВХ}}; n; \tau_{\text{експ}}); AO = AO(t_{\text{ТН}}^{\text{ВХ}}; n), \quad (9)$$

де $t_{\text{ТН}}^{\text{ВХ}}$ – температура теплоносія на вході в а.з., °С; n – густина нейтронів; $\tau_{\text{експ}}$ – час експлуатації, год.

Оптимізація перемикавання статичних програм регулювання потужності полягає в мінімізації функціоналу

$$J(B, \omega, AO) \rightarrow \min, \quad (10)$$

Отже, остаточно цільова функція набула вигляду

$$J = f(B(t_{\text{ТН}}^{\text{ВХ}}; n; \tau_{\text{експ}}); \omega(t_{\text{ТН}}^{\text{ВХ}}; n; \tau_{\text{експ}}); AO(t_{\text{ТН}}^{\text{ВХ}}; n)). \quad (11)$$

Проведено валідацію математичної моделі, яка розраховує цільову функцію на базі розрахункових програм «Імітатор реактору» та «Femexi», яка належить до міжнародного банку даних Агентства з ядерної енергії.

Таким чином, вдосконалена математична модель ректора ВВЕР-1000 враховує поділ ядер ^{235}U та ^{239}Pu , а також розраховує значення глибини вигорання палива та пошкодження паливної оболонки. Крім цього вона в своєму складі має ідентифіковану модель керуючого впливу, а саме зміну статичних програм регулювання. Це дало змогу сформуванню цільову функцію, до складу якої увійшли критерії ефективності та безпеки експлуатації.

У четвертому розділі (*Результати імітаційного моделювання та оптимізації*) наведено розв'язок задачі оптимізації перемикавання статичних програм регулювання потужності шляхом пошуку оптимальної програми регулювання в залежності від збурень та поточного стану енергетичного обладнання.

Реалізовано спосіб безударного перемикавання між статичними програмами регулювання потужності ЯЕУ з ВВЕР-1000, схему якого наведено на рис. 4. Додатковий зворотній зв'язок між перемикачем програм та кожним з регуляторів ліквідує помилку регулювання, коли значення регульованої величини сильно зростає. Це дало змогу одержати реакцію на перемикавання статичних програм у діапазоні дозволених відхилень.

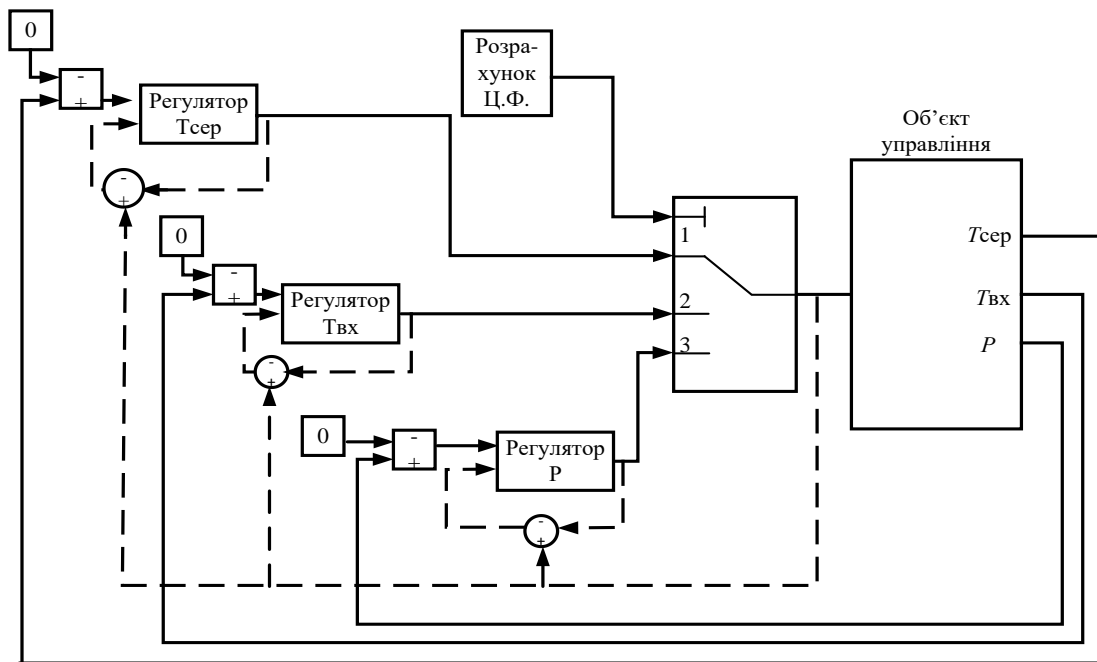


Рисунок 4 – Схема безударного перемикавання між статичними програмами регулювання потужності ЯЕУ з ВВЕР-1000

Графіки перемикань між статичними програмами та реакцію наступних технологічних параметрів на таке збурення представлено на рис. 5 – 10.

Алгоритм перемикавання статичних програм представлено на рис. 11. Основним його елементом є обчислення значення цільової функції J за кожною з програм регулювання потужності та їх порівняння для знаходження мінімального значення цільової функції. Якщо мінімальне значення J відповідає поточній програмі регулювання потужності, тоді експлуатація ЯЕУ протягом наступної доби буде відбуватися за тією ж програмою регулювання. Якщо ж мінімальне значення J буде відповідати іншій програмі регулювання, тоді потрібно буде переключити обладнання та вихід на 100 % потужності здійснити за іншою програмою регулювання.

Проведено дослідження на сталість ЯЕУ з ВВЕР-1000 за критерієм АО при добовому маневруванні потужністю в діапазоні 20 % за різними статичними програмами регулювання потужності: $T_{сер} = \text{const}$, $T_{вх} = \text{const}$, $P_2 = \text{const}$. Експеримент був наступний: ЯЕУ з ВВЕР-1000 протягом дня (16 годин) працювала на 100 % потужності, а вночі (8 годин) – на 80 %, причому потужність змінювалась згідно з регламентом. Зниження потужності N з $N_1 = 100$ % до $N_2 = 90$ % відбувалося протягом 0,5 годин за законом $-2\%/6$ хв за рахунок введення розчину борної кислоти до теплоносія 1-го контуру та занурення 10 групи ОР СУЗ до позначки 88,65 %. Потужність N з $N_2 = 90$ % до $N_3 = 80$ % знижувалася протягом 2,5 годин за законом $-0,4\%/6$ хв за рахунок отруєння а.з. та занурення 10 групи ОР СУЗ до позначки 82 %. Розчин борної кислоти витримує потужність $N = 80$ % протягом 4 годин. Збільшення потужності N з $N_3 = 80$ % до $N_1 = 100$ % відбувалося протягом 2 годин за законом $1\%/6$ хв за рахунок введення чистого дистиляту та повернення ОР СУЗ до позначки 90 %.

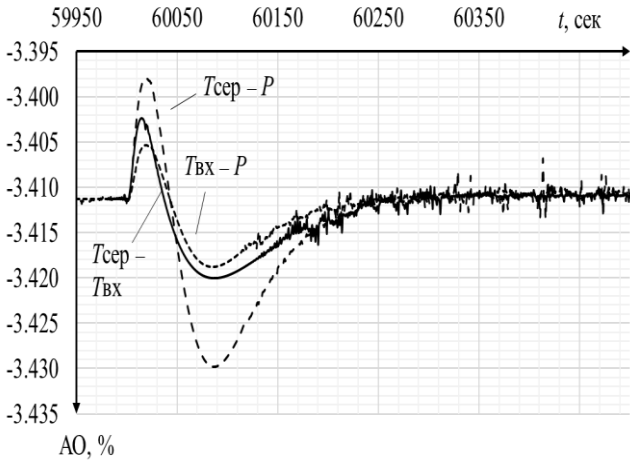


Рисунок 5 – Реакція аксіального офсету на пряме перемикання статичних програм

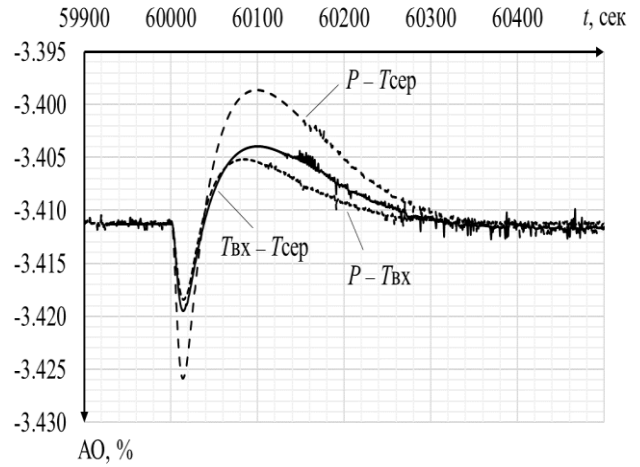


Рисунок 6 – Реакція аксіального офсету на зворотне перемикання статичних програм

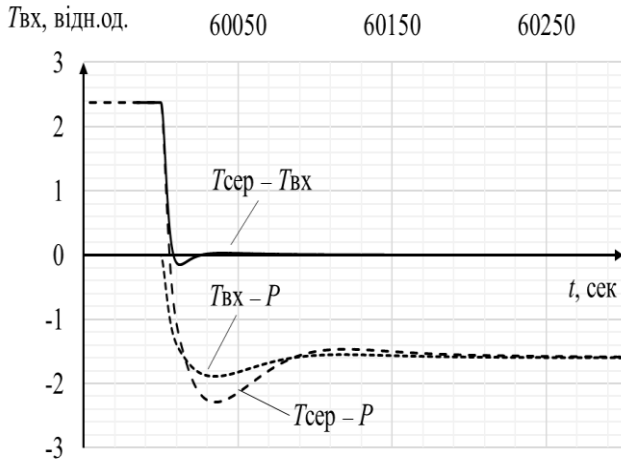


Рисунок 7 – Реакція температури теплоносія на вході в а.з. на пряме перемикання статичних програм

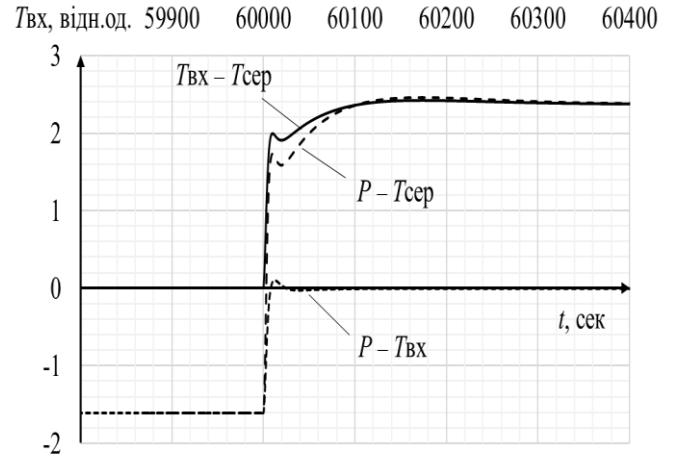


Рисунок 8 – Реакція температури теплоносія на вході в а.з. на зворотне перемикання статичних програм

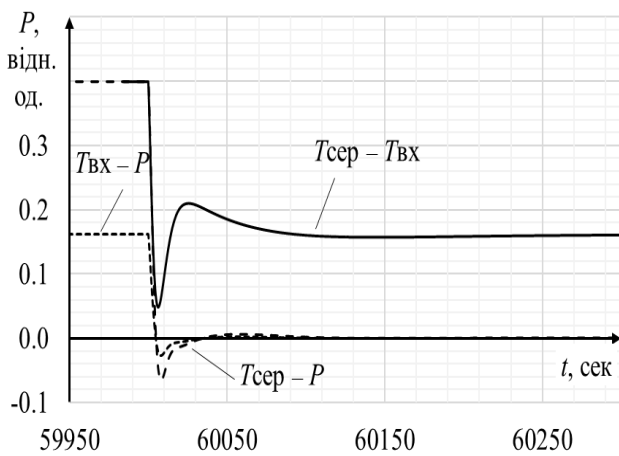


Рисунок 9 – Реакція тиску пари у другому контурі на пряме перемикання статичних програм

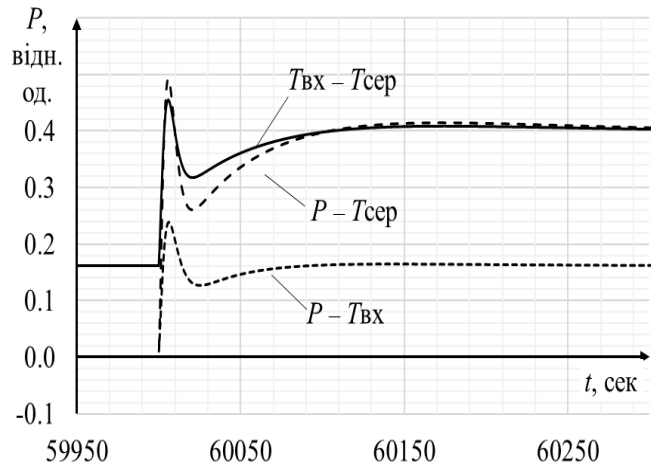


Рисунок 10 – Реакція тиску пари у другому контурі на зворотне перемикання статичних програм

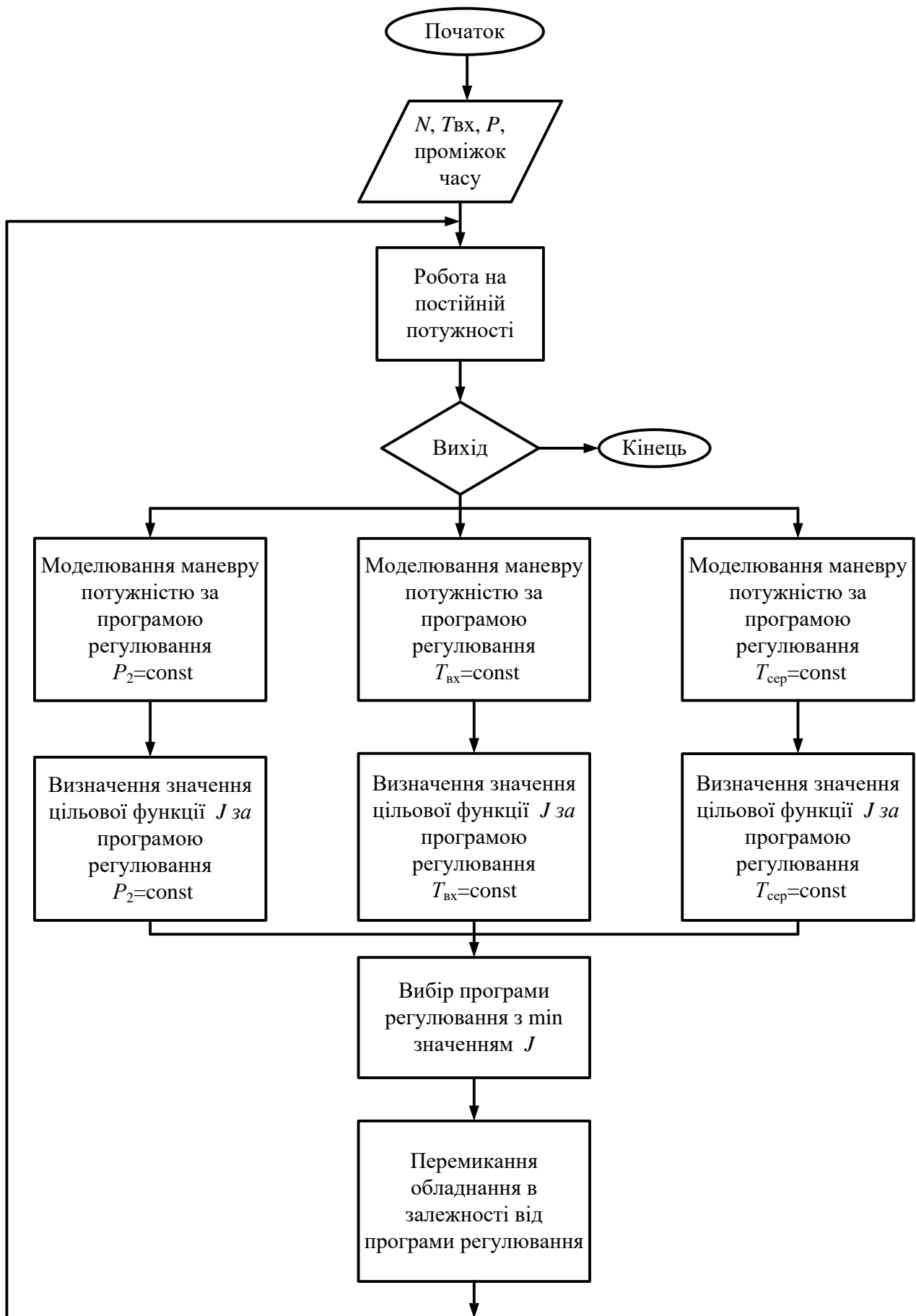


Рисунок 11 – Алгоритм перемикання програм регулювання потужності

Для визначення границь сталості АО, рекомендований діапазон якого у відсотках складає $[-5; 2.5]$ для 100 % потужності та $[-5; 4]$ – для 80 % потужності, проведено моделювання режимів навантаження ЯЕУ з ВВЕР-1000 протягом 4-х річної кампанії. Значення граничної доби, після якої реактор втрачає сталість, та значення АО наступної доби, наведено в табл. 2, де N_{var} – перехідний режим, N_{const} – стаціонарний режим.

Таблиця 2 – Дані про нестабільність АО

Режим навантаження	Гранична доба сталості АО, еф. діб.	Значення АО на наступну після граничної добу, %
1 міс N_{var} , 1 міс N_{const}	163	-7.09
15 діб N_{var} , 1.5 міс N_{const}	59	-6.23
2 міс N_{var} , 1 міс N_{const}	96	-10.28
2 міс N_{var} , 2 міс N_{const}	124	-7.99
2 міс N_{var} , 3 міс N_{const}	205	-6.68
2 міс N_{const} , 1 міс N_{var}	68	-7.03
2 міс N_{const} , 2 міс N_{var}	240	5.24

Отримано наступні результати: ЯЕУ з ВВЕР-1000 виходить з стану рівноваги, якщо змінювати перехідний та стаціонарний стани тому, що всередині а.з. відбуваються внутрішньо притаманні процеси зі своїми зворотними зв'язками.

Подальше дослідження дало такі результати. За статичною програмою $T_{сер}=\text{const}$ ЯЕУ з ВВЕР-1000 залишиться в сталому стані при 7 місяцях добових маневрів та 5 місяцях експлуатації на 100 % потужності протягом одного року 4-х річної кампанії, другий, третій та четверті роки експлуатації працювали в такому ж режимі. За статичною програмою $T_{вх}=\text{const}$ ЯЕУ з ВВЕР-1000 залишиться в сталому стані при 6 місяцях добових маневрів та 6 місяцях експлуатації в стаціонарному режимі. За статичною програмою $P_2=\text{const}$ ЯЕУ з ВВЕР-1000 залишиться в сталому стані при 1 місяці добових маневрів та 11 місяцях експлуатації на 100 % потужності.

Було розглянуто кожен рік паливної кампанії, який складався з певного часу експлуатації в перехідних режимах на початку, а при досягненні невідповідного значення АО, в подальшому до кінця паливної кампанії – в стаціонарному режимі. Отже, розв'язок завдання оптимізації перемикання статичних програм регулювання потужності за рахунок пошуку оптимальної програми отримано за наступними сценаріями історії навантаження за час 4-х річної паливної кампанії:

- 2 місяця в перехідному режимі, 10 місяців в стаціонарному (сценарій I);
- 3 місяця в перехідному режимі, 9 місяців в стаціонарному (сценарій II);
- 4 місяця в перехідному режимі, 8 місяців в стаціонарному (сценарій III);
- 5 місяців в перехідному режимі, 7 місяців в стаціонарному (сценарій IV);
- 6 місяців в перехідному режимі, 6 місяців в стаціонарному (сценарій V);

У додатках наведено документи про впровадження результатів дослідження в ДП НАЕК «Енергоатом», навчальний процес ОНПУ, а також список публікацій здобувача за темою дисертації.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота містить нові наукові положення та результати, які полягають у підвищенні конкурентоспроможності експлуатації ЯЕУ в енергетичній системі за рахунок пошуку оптимального режиму перемикання статичних програм регулювання при експлуатації на різних рівнях потужності. По дослідженню зроблено наступні висновки:

1. В результаті аналізу контрольованих параметрів критеріїв безпеки ядерного палива, яке використовується на ЯЕУ з ВВЕР-1000 в перехідних режимах як об'єктом керування, а також існуючих збурень обрано три параметри: глибину вигорання палива, як міру ефективності експлуатації, параметр пошкодження оболонок твелів, як міру безпеки експлуатації та аксіальний офсет як кількісну міру сталості процесів в а.з. реактора.

2. Запропоновано імітаційну модель автоматизованої системи керування потужністю, яка заснована на безударному перемиканні статичних програм за логічною структурою об'єктно-орієнтованого підходу, тобто за технологічними методами експлуатації енергетичного обладнання, що дозволило сформувати зміну поточної моделі програми регулювання при потужності об'єкта керування в діапазоні від 80 до 100 %, ліквідувати статичну помилку регулювання та одержати реакцію технологічних параметрів на перемикання програм у діапазоні дозволених відхилень.

3. Вдосконалено математичну модель реактора з розподіленими параметрами, яка на відміну від відомих враховує поділ ядер ^{235}U та ^{239}Pu , до складу якої входить ідентифікована модель керуючого впливу, а саме перемикання статичних програм регулювання, що дозволяє контролювати зміну технологічних параметрів об'єкта керування та розрахувати аксіальний офсет, глибину вигорання палива та пошкодження оболонок твелів. Аксіальний офсет, рекомендований діапазон якого у відсотках складає $[-5; 2.5]$ для 100 % потужності, $[-5; 4]$ – для 80 % потужності, залишиться в цих границях лише 59 – 240 ефективних діб для розглянутих варіантів навантаження реактора. Для консервативних умов максимальне значення глибини вигорання склало 88,3 МВт·діб/кг урану, а параметр пошкодження паливної оболонки досягнув значення 0,284.

4. Запропоновано цільову функцію, до складу якої входять три нормовані критерії з різними цілями: максимальне значення глибини вигорання палива, мінімальне значення пошкодження оболонки твелу та аксіального офсету. Це дало змогу поєднати в одному виразі різнонаправлені фактори та знайти оптимальне рішення.

5. Вирішено задачу оптимізації перемикання статичних програм регулювання потужності за рахунок мінімізації цільової функції, яка об'єднує в собі такі характеристики, як економічність та безпека експлуатації ЯЕУ з ВВЕР-1000. Це дозволило безударно перемикати статичні програми протягом

паливної кампанії реактора в добовому циклі зміни навантаження, мінімізуючи поточні зовнішні та внутрішні збурення. Мінімізація цільової функції полягає або в 11 перемиканнях між статичними програмами $T_{\text{сеп}}=\text{const}$, $T_{\text{вх}}=\text{const}$, $P_2=\text{const}$ протягом 1 місяця добових маневрів на початку кожного року паливної кампанії, або в 38; 65; 69; 75; 107 перемиканнях між статичними програмами $T_{\text{сеп}}=\text{const}$ та $T_{\text{вх}}=\text{const}$ протягом 4-х річної кампанії при 2; 3; 4; 5; 6 місяцях маневрів на початку кожного року, відповідно. Також, можна стверджувати про конкурентоспроможність українських АЕС серед інших джерел вироблення електричної енергії.

6. Впроваджено результати дослідження, які полягають у вдосконаленні математичної моделі автоматизованої системи керування потужністю ЯЕУ з ВВЕР-1000 для перемикання статичних програм за логічною структурою об'єктно-орієнтованого аналізу, що дало змогу експлуатувати енергоблок з реактором ВВЕР-1000 в режимі добового маневрування для підтримки балансу в енергосистемі України, в тематику ДП НАЕК «Енергоатом» та в навчальний процес кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів Одеського національного політехнічного університету.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Тодорцев, Ю.К. Оценка массы теплоносителя в реакторной установке при полной потере подпитки / Ю.К. Тодорцев, **Е.А. Кокол***, М.В. Никольский // Технологический аудит и резервы производства. – 2013. – № 1 (14). – С. 26–29. (Журнал включено до НМБД Index Copernicus, CrossRef (DOI)).

2. Maksimov, M.V. Control of the axial offset in a nuclear reactor at power maneuvering / M.V. Maksimov, N.F. Kanazirskyi, **Е.А. Кокол** // Odes'kyi Natsional'nyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi. – 2014. – Iss. 2. – P. 75–81. (Журнал включено до НМБД Index Copernicus, CrossRef (DOI)).

3. Maksimov, M.V. The method of control of Nuclear Power Plant with VVER-1000 reactor in maneuverable mode / M.V. Maksimov, T.A. Tsiselskaya, **Е.А. Кокол** // Journal of Automation and Information Sciences. – 2015. – Vol. 47. – Iss. 6. – P. 17–32. (Журнал включено до НМБД SCOPUS).

4. Плахотнюк, А.А. Усовершенствованная АСУ ТП переключения программ регулирования энергоблоком / А.А. Плахотнюк, **Е.А. Кокол**, М.В. Максимов // Автоматизация технологических и бизнес-процессов. – 2015. – Т. 7, № 3. – С. 26–33. (Журнал включено до НМБД Index Copernicus, CrossRef (DOI), РИНЦ).

5. Плахотнюк, А.А. Моделирование изменения структуры технических средств автоматизации при работе АЭС с ВВЭР-1000 в маневренном режиме // А.А. Плахотнюк, **Е.А. Кокол**, М.В. Максимов // Автоматизация технологических и бизнес-процессов. – 2015. – Т. 7, № 4. – С.64–71. (Журнал включено до НМБД Index Copernicus, CrossRef (DOI), РИНЦ).

* Кокол – дівоче прізвище Одреховської Є.О.

6. **Kokol, E.A.** Structural optimization of static power control programs for nuclear power plants with VVER-1000 / E.A. Kokol // Odes'kyi Natsional'nyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi. – 2015. – Iss. 3 (47). – P. 41–46. (Журнал включено до НМБД Index Copernicus, CrossRef (DOI)).

7. **Kokol, E.** Research on manoeuvring capabilities of a nuclear power plant when switching in-use control programmes / E. Kokol // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – Iss. 2/8 (80). – P. 4–13. (Журнал включено до НМБД Scopus, Index Copernicus, CrossRef (DOI)).

8. Pelykh, S.N. Search for the best power control program at NPP with VVER-1000 using gradient descent method / S.N. Pelykh, **E.O. Odrekhovska**, O.B. Maksymova // Automation of technological and business-process. – 2016. – Vol. 8, Iss. 3. – P. 36–40. (Журнал включено до НМБД Index Copernicus, CrossRef (DOI), РИНЦ).

Опубліковані праці апробаційного характеру:

9. Цисельская, Т.А. Исследование математической модели энергоблока по компромисно-комбинированной программе регулирования / Т.А. Цисельская, **Е.А. Кокол** // Информационные технологии и автоматизация-2014: доклады VII Междунар. науч.-практ. конф, 16–17 октября 2014 г., г. Одесса, ОНАПТ. – С. 53–54.

10. Максимов, М.В. Основы автоматизированного управления свойствами ядерного топлива / М.В. Максимов, **Е.А. Кокол** // Современные методы, информационное, программное и техническое обеспечение систем управления организационно-техническими и технологическими комплексами: междунар. науч.-техн. конф., 27 ноября 2014 г., г. Киев, НУПТ. – С. 66–67.

11. **Кокол, Е.А.** Повышение эффективности управления энергоблоком с реактором типа ВВЭР-1000 / Е.А. Кокол // Автоматизация, контроль и управление: поиск идей и решений (АКУ-2015): I Всеукр. науч.-техн. конф., 25–29 мая 2015 г., г. Красноармейск, «Донецкий национальный технический университет». – С. 368–369.

12. **Кокол, Е.А.** Оптимальное управление мощностью ВВЭР-1000 за счет целевого выбора программы регулирования / Е.А. Кокол // Автоматика 2015: XXII Междунар. конф. по автоматическому управлению, 10–11 сентября 2015 г., г. Одесса. – С. 119–120.

13. **Кокол, Е.А.** Объектно-ориентированный анализ АСУ мощностью для повышения маневренных возможностей энергоблока с ВВЭР-1000 / Е.А. Кокол // Автоматизация и компьютерно-интегрированные технологии. – 2016: III Межд. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов (АКИТ – 2016), 20–21.04.2016 г., г. Киев, НТУУ «КПИ». – С. 108–109.

14. Pelykh, S.N. Search for the optimal power control program / S.N. Pelykh, **Е.А. Odrehovska**, O.B. Maksymova // Information technologies and automation. – 2016: Proc. of IX Int. theor. and pract. conf., 11–16.10.2016, Odessa, ONAFT. – P. 31.

Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

15. **Одреховская, Е.А.** Оптимизация переключения статических программ регулирования мощности ЯЭУ с ВВЭР-1000 в переходных режимах эксплуатации / Е.А. Одреховская, Х. Чжоу, С.Н. Пелых // Тезисы докладов XXIV ежегодной науч. конф. Ин-та ядерных исследований НАН Украины 10–13 апреля 2017 г. – К.: Ин-т ядерных исследований НАН Украины, 2017. – С. 123.

16. Патент на винахід № 111549, Україна, МПК (2016) G21C 17/035 (2006.01), G01F 23/22 (2006.01). Спосіб визначення рівня теплоносія в ядерному реакторі і система для його здійснення. / М.В. Максимов, **Є.О. Кокол**; заяв. 10.02.2015; опубл. 10.05.2016, Бюл. № 9.

17. Патент на изобретение № 2602813, Россия, МПК (2016) G21C 17/035 (2006.01), G01F 23/22 (2006.01). Способ определения уровня теплоносителя в ядерном реакторе и система для его осуществления. / М.В. Максимов, **Е.А. Кокол**; заяв. 08.06.2015; опубл. 20.11.2016, Бюл. № 32.

АНОТАЦІЯ

Одреховська Є. О. Оптимізація перемикання статичних програм регулювання потужності ЯЕУ з ВВЕР-1000 в перехідних режимах експлуатації. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування. – Одеський національний політехнічний університет МОН України, Одеса, 2017.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-технічної задачі підвищення конкурентоспроможності експлуатації ЯЕУ в енергетичній системі за рахунок пошуку оптимального режиму перемикання статичних програм регулювання при експлуатації на будь-яких рівнях потужності.

Запропоновано імітаційну модель автоматизованої системи керування потужністю, яка заснована на перемиканні статичних програм регулювання за технологічними методами експлуатації енергетичного обладнання, що дозволило сформулювати зміну поточної моделі програми регулювання при потужності об'єкта керування в діапазоні від 80 до 100 %. Отримала подальший розвиток багатозонна математична модель реактора з розподіленими параметрами, яка на відміну від відомих враховує поділ ядер ^{235}U та ^{239}Pu , а також розраховує аксіальний офсет як кількісну міру сталості реактора, глибину вигоряння палива, як міру ефективності експлуатації та пошкодження оболонок твелів, як міру безпеки експлуатації.

Обґрунтована можливість безударного перемикання енергетичного обладнання в заданому діапазоні зміни навантаження за рахунок мінімізації цільової функції методами оптимізації, що забезпечує мінімізацію поточних зовнішніх та внутрішніх збурень. Це підвищує конкурентоспроможність ЯЕУ з ВВЕР-1000 на енергетичному ринку.

Ключові слова: статична програма регулювання, ЯЕУ, ВВЭР-1000, оптимізація, цільова функція, автоматизована система управління.

АННОТАЦИЯ

Одреховская Е. А. Оптимизация переключения статических программ регулирования мощности ЯЭУ с ВВЭР-1000 в переходных режимах эксплуатации. – Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 – автоматизация процессов управления. – Одесский национальный политехнический университет МОН Украины, Одесса, 2017.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научно-технической задачи повышения конкурентоспособности эксплуатации ЯЭУ в энергетической системе за счет поиска оптимального режима переключения статических программ регулирования при эксплуатации на любых уровнях мощности.

В работе предложена имитационная модель автоматизированной системы управления мощностью, которая основана на переключении статических программ регулирования по логической структуре объектно-ориентированного подхода. Построена информационная модель АСУ мощностью реакторной установки с ВВЭР-1000, модель состояний реактора и системы управления. Разработан технологический метод эксплуатации энергетического оборудования, что позволило сформировать смену текущей модели программы регулирования при мощности объекта управления в диапазоне от 80 до 100 %.

Получила дальнейшее развитие многозонная математическая модель реактора с распределёнными параметрами, которая в отличие от известных учитывает деление ядер ^{235}U и ^{239}Pu , в состав которой входит идентифицирована модель управляющего воздействия, а именно переключение статических программ регулирования, что позволило контролировать изменение технологических параметров объекта управления и рассчитать аксиальный офсет, как количественную меру устойчивости реактора, глубину выгорания топлива, как меру эффективности эксплуатации и параметр повреждения оболочек твэлов, как меру безопасности эксплуатации. Синтезировано три отдельных одноконтурных АСР мощности с помощью которых поддерживается постоянная либо температура теплоносителя на входе в а.з., либо средняя температура теплоносителя, либо давление пара во втором контуре.

Предложена целевая функция, позволяющая оптимизировать критерии эффективности работы ЯЭУ. Решена задача оптимизации переключений статических программ регулирования мощности за счет минимизации целевой функции, которая объединяет в себе такие характеристики, как экономичность и безопасность эксплуатации. Это позволило безударно переключать статические программы в течение топливной кампании реактора в суточном цикле изменения нагрузки, минимизируя текущие внешние и внутренние возмущения. Выбрав из предложенных историю нагружения ЯЭУ с ВВЭР-1000 возможно осуществить определённое количество переключений

энергетического оборудования в зависимости от текущей статической программы регулирования мощности в течение 4-х летней кампании реактора, повысив тем самым безопасность и эффективность эксплуатации. Оптимизация целевой функции заключается либо в 11 переключениях между статическими программами $T_{\text{ср}} = \text{const}$, $T_{\text{вх}} = \text{const}$, $P_2 = \text{const}$ в течение 1 месяца суточных маневров в начале каждого года топливной кампании, либо в 38; 65; 69; 75; 107 переключениях между статическими программами $T_{\text{ср}} = \text{const}$ и $T_{\text{вх}} = \text{const}$ в течение 4-х летней кампании при 2; 3, 4, 5, 6 месяцах маневров в начале каждого года, соответственно. Это позволит повысить конкурентоспособность украинских АЭС среди других источников выработки электрической энергии благодаря их маневренным возможностям и низкой себестоимости.

Ключевые слова: статическая программа регулирования, ЯЭУ, ВВЭР-1000, оптимизация, целевая функция, автоматизированная система управления.

ABSTRACT

Odrekhovska E. O. Optimization of switching of static power control programs for NPPs with VVER-1000 in transient operating modes. – Manuscript.

Dissertation for candidate of technical sciences (Ph.D.) degree by specialty 05.13.07 – automation of control processes. Odessa National Polytechnic University of Ministry of Education and Science of Ukraine, Odessa, 2017.

The dissertation is devoted to the solution of the actual scientific and technical problem of increase the competitiveness of NPP operation in the power system by searching for the optimal switching regime for static control programs during operation at any power levels.

The simulation model of the automated power control system, which is based on the switching of static control programs using technological methods of the power equipment operation, has been proposed. This allowed to form the change of the current model of the control program at the power of the control object in the range from 80 to 100 %. The multi-zone mathematical model of the reactor with distributed parameters has been further developed. It takes into account the division of ^{235}U and ^{239}Pu , and also calculates the axial offset as a quantitative measure of the reactor constancy, the fuel burn-up as a measure of the efficiency of operation and the damage of fuel element`s shell as a measure of safety operation

The possibility of shock-free switching of power equipment in a given range of load variation is substantiated by minimizing the target function by optimization methods, which provides minimization of current external and internal disturbances. This enhances the competitiveness of NPPs with VVER-1000 in the energy market.

Keywords: static power control program, nuclear power unit, VVER-1000, optimization, objective function, automated control system.

Підписано до друку 21.08.17. Формат 60x90/16.
Ум. друк. арк. 1,25. Обл.-вид. арк. 0,87. Наклад 100. Зам. №2043.

Віддруковано з готового оригінал-макету в АО БАХВА.

(свідоцтво суб'єкта видавничої справи серія ДК № 145 від 11.08.2000)
65044, Україна, м. Одеса, пр-т. Шевченка, 1, корп.5
тел./факс (+48) 777-43-50, e-mail: mail@bahva.com
www.bahva.com, www.vuzkniga.ua