

**Добаріна О.В.**

Одеський національний політехнічний університет

**Беглов К.В.**

Одеський національний політехнічний університет

## АВТОМАТИЧНА СИСТЕМА РЕГУЛЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ЕНЕРГОБЛОКА АЕС

У статті розроблено систему регулювання потужності енергоблока з підтримки теплотехнічного параметра за компромісною програмою, який дасть змогу експлуатувати енергоблок у маневрених режимах добового циклу, математичну модель регулювання потужності за компромісною програмою. Українські енергоблоки АЕС працюють на енергосистемі з великою кількістю споживачів електроенергії. Споживання електроенергії досить стрибкоподібне, це пов'язане з різними потребами її використання, яке залежить від сезону, дня тижня, а також часу доби. Ситуація на енергоринку України така, що енергоблоки АЕС починають залучати для тижневого і добового маневрування. Енергоблоки з ВВЕР-1000 проектувалися для роботи тільки в базовому режимі, тому питання маневрування енергоблоками на тепер є гострим, а вирішення такої задачі неоднозначне. Будь-яка циклічність навантаження обладнання підсилює ефект зносу, насамперед це відбивається на тепловиділяючих елементах. Відомо, що для регулювання потужності енергоблока є три основні програми регулювання та їх модифікації. Підтримка технологічних параметрів відповідно до кожної з програм по-різному впливає на знос обладнання енергоблока. Вибір програми регулювання залежить від багатьох факторів, але завжди зміна програми регулювання проводиться після зупинки енергоблока, аналізу, профілактики і, якщо це необхідно, ремонту. Однак були проведені дослідження, які показали, що можливі ситуації, коли виникає необхідність перейти з однієї програми регулювання на іншу, і це можна зробити без зупинки енергоблока. Тому виникла необхідність синтезу та аналізу автоматизованої системи регулювання потужності енергоблока АЕС, що дає змогу підтримувати характерний технологічний параметр, який вибирається залежно від застосовуваної програми регулювання без зупинки енергоблока.

**Ключові слова:** АЕС, енергоблок, програма регулювання, потужність, аксіальний офсет.

**Постановка проблеми.** У багатьох роботах, присвячених проблемі покриття змінної частини графіків навантажень [1, с. 16–19; 2, с. 128–139], вказується, що підвищення частки атомних електростанцій (далі – АЕС) у загальній встановленій потужності вимагає підвищеної маневреності енергообладнання АЕС, тобто роботи енергоблоків АЕС у змінному режимі. У [3, с. 56–59] був запропонований новий алгоритм підтримки технологічних параметрів енергоблока. Для реалізації запропонованого алгоритму в АСУТП енергоблока була розроблена математична модель [4, с. 108–122], за допомогою якої досліджувалися властивості енергоблока за різних програм регулювання. Для реалізації зазначеного алгоритму був застосований новий регулятор потужності енергоблока. Таким чином, стаття присвячена дослідженню властивостей регулятора потужності.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Вплив концентрації борної кислоти, а точніше атомів бору  $^{10}\text{B}$  на енерговиділення в актив-

ній зоні реактора ВВЕР-1000 досліджувався в низці робіт.

Так, у роботі [5, с. 29–56] показано, що використання борної кислоти для управління потужністю реакторної установки дає змогу значно збільшити час експлуатації тепловиділяючих елементів, підвищуючи економічність експлуатації АЕС без зниження показників безпеки.

У роботі [6, с. 18] наведені результати дослідження системи автоматичного регулювання концентрації борної кислоти в теплоносії першого контуру АЕС. Показана принципова можливість застосування стандартного ПІ-закону регулювання для керування нелінійним об'єктом.

Робота [7, с. 134–140] присвячена дослідженню регулятора потужності з рідким поглиначем для енергоблока АЕС з ВВЕР-1000. Показано, що у разі регулювання потужності реактора зміною концентрації борної кислоти реактор без регулятора є стійким на всіх рівнях потужності. Стійкість забезпечується регулятором аксіального офсету.

**Постановка завдання.** Мета статті – вивчення автоматизованої системи регулювання потужності енергоблока з підтримки теплотехнічного параметра за компромісною програмою, який дасть змогу експлуатувати енергоблок у маневрених режимах добового циклу для підтримки балансу потужності в енергосистемі України.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Основним завданням регулювання паросилової установки є підтримка рівності між кількістю виробленої і споживаної енергії. Невідповідність між виробленою енергією в реакторі і споживаною в турбіні проявляється (для двоконтурної АЕС) зі зміною тиску і температури теплоносія в 1-му контурі і тиску (температури) насиченої пари в 2-му контурі. Запорукою надійної та безпечної експлуатації енергоблока є стійкість реактора у разі збурень як під час роботи на постійному рівні навантаження, так і в маневреному режимі. Кількісною мірою стійкості реактора є аксіальний офсет (АО) – технологічна характеристика рівномірності енерговиділення, тому мірою ефективності експлуатації енергоблока з ВВЕР-1000 є

мінімізація відхилення АО. Вона реалізує компромісну програму. Регулятор реактора АРМ вимірює і стабілізує середню температуру теплоносія 1-го контуру впливом на приводи регулюючих стрижнів. Зміна тиску пара в 2-му контурі сприймається коригуючим регулятором тиску  $P_p$ , який через нелінійний елемент (обмежувач) змінює завдання регулятору середньої температури теплоносія. Зі зміною  $t_{cp}$  відновлюється тиск 2-го контуру. Зі збільшенням потужності енергоблока (через регулятор потужності турбіни) до певного її значення тиск пари перед турбіною зберігається постійним і заданим, а середня температура теплоносія 1-го контуру зростає. Подальше підвищення потужності енергоблока, що призводить до зниження тиску пари, не приводить через наявність обмеження до зміни завдання і відповідно до середньої температури 1-го контуру. Так реалізується друга частина програми регулювання, на якій  $t_{cp} = \text{const}$ , а тиск перед турбіною зменшується.

Компромісна програма передбачена для реалізації в енергоблоці з ВВЕР-1000. За такої програми  $t_s = \text{const}$ , а за більших – за програмою  $t_{cp} = \text{const}$ . Величина потужності для переходу з однієї програми на іншу визначається величиною гранично допустимого тиску в ПГ і частотою очікуваних знижень навантаження. Поблизу номінальної потужності 1-й контур працює за оптимальною програмою.

Математична модель системи регулювання. Під час розробки і дослідження систем автоматичного управління ядерними енергетичними установками (ЯЕУ) користуються математичним моделюванням. Для сучасних 2-контурних ЯЕУ з реактором типу ВВЕР математична модель (ММ), що враховує всі складні динамічні процеси, описується системою багатьох нелінійних диференціальних рівнянь. Рішення і дослідження такої системи утруднено. Водночас для деяких інженерних і навчальних задач можливе використання спрощених ММ, які забезпечують достатню точність. У такому проекті ставиться задача розробки спрощеної ММ ЯЕУ з реакторами типу ВВЕР з дослідженням таких ММ на ЕОМ. Вже була побудована структурна схема моделі АСР у прикладному пакеті Simulink, підставимо знайдені настройки регулятора і

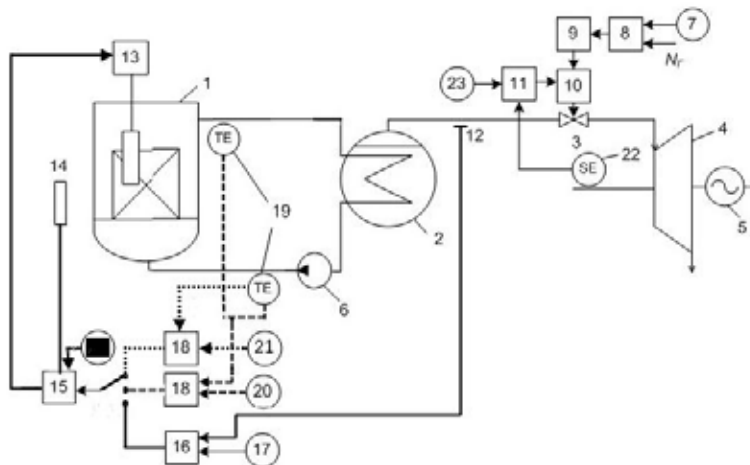


Рис. 1. Удосконалена принципова схема АСР енергоблока з реактором ВВЕР-1000

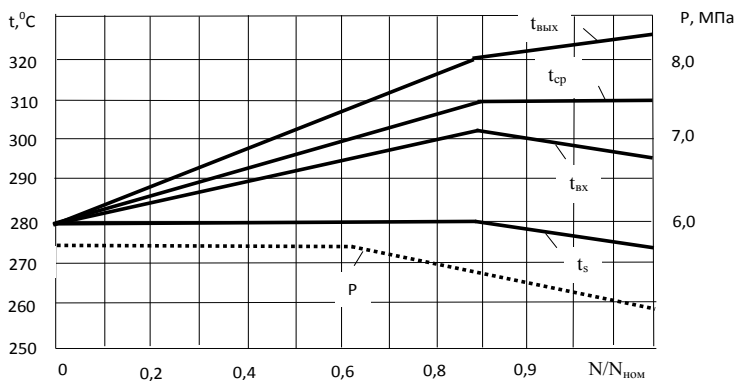


Рис. 2. Компромісна програма схеми регулювання потужності енергоблока в режимі «К»

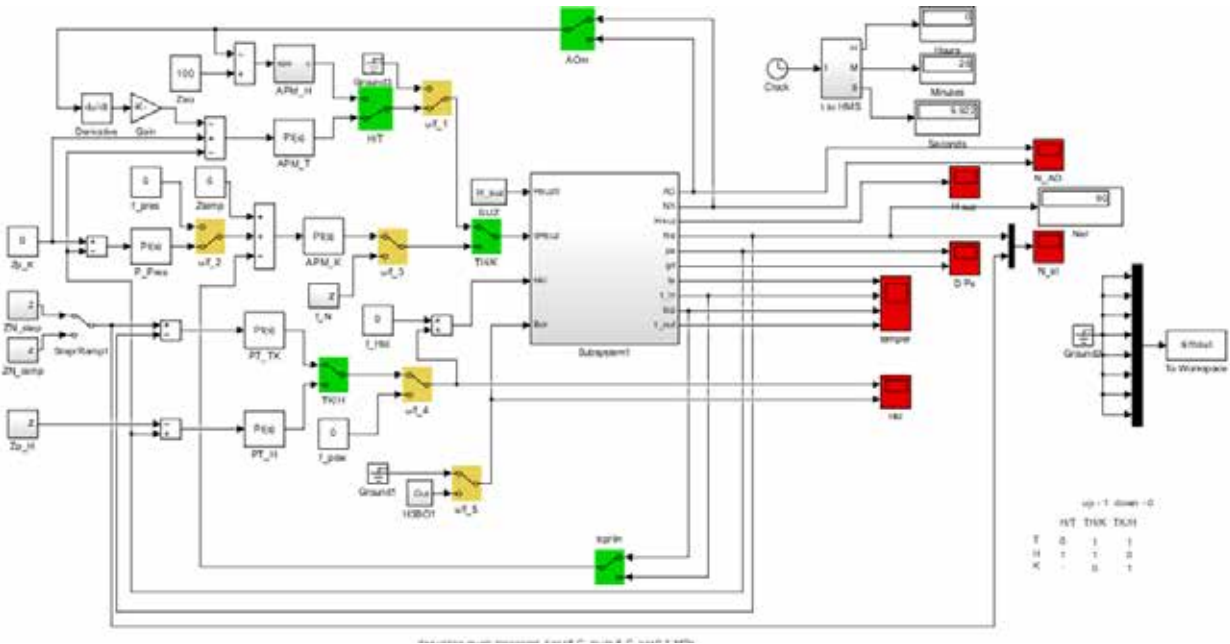


Рис. 3. Структурна схема ММ у середовищі Simulink

скоректуємо їх для отримання необхідних перехідних процесів. У разі вибору статичних програм регулювання враховують техніко-економічні показники, а також тривалість роботи енергоблоку на знижених рівнях потужності. Найбільшого поширення набули програми з постійним тиском пари в 2-у контурі ( $P=\text{const}$ ), з постійною середньою температурою теплоносія в 1-у контурі ( $t_{cp}=\text{const}$ ) і компромісні програми.

На рисунку 4 показано перехідний процес регулювання у разі маневрування потужністю енергоблоком, а саме зниження потужності зі 100% до 85% з подальшим поверненням на повну потужність. При цьому у разі зниження потужності відбувається перемикання програм регулювання з  $p=\text{const}$  на  $t_{cp}=\text{const}$ . З графіка видно, що потужність відхилення становить 4,9%. Відхилення АО від номінального не вийшло за допустимі межі.

На рисунку 5 показано перехідний процес регулювання у разі маневрування потужністю енергоблоком, а саме зниження потужності зі 100% до 85% з подальшим поверненням на повну потужність. При цьому у разі зниження потужності відбувається перемикання програм регулювання з  $t_{cp}=\text{const}$  на  $p=\text{const}$ . З графіка видно, що потужність відхилення становить 1.1%. Відхилення АО від номінального не вийшло за допустимі межі.

На рисунку 6 показано перехідний процес регулювання у разі маневрування потужністю енергоблоком, а саме зниження потужності зі 100% до 85% з подальшим поверненням на повну потужність. При цьому у разі зниження потужності від-

бувається перемикання програм регулювання з  $t_{cp}=\text{const}$  на  $t_{vx}=\text{const}$ . З графіка видно, що потужність відхилення становить 1.6%. Відхилення АО від номінального не вийшло за допустимі межі.

На рисунку 7 показано перехідний процес регулювання у разі маневрування потужністю енергоблоком, а саме зниження потужності зі 100% до 85% з подальшим поверненням на повну потужність. При цьому у разі зниження потужності

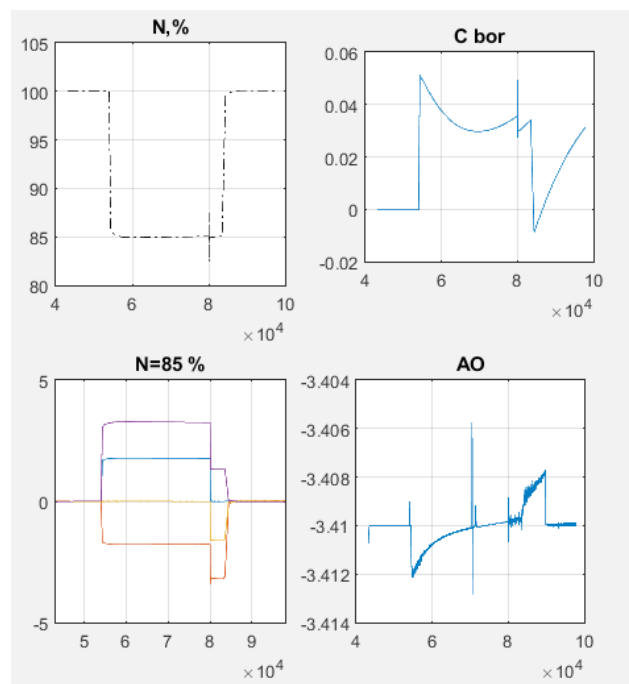


Рис. 4. Перехідний процес регулювання при  $p=\text{const}$  перехід на  $t_{cp}=\text{const}$

відбувається перемикання програм регулювання з  $t_{вх}=\text{const}$  на  $p=\text{const}$ . З графіка видно, що потужність відхилення становить 2.9%. Відхилення АО від номінального не вийшло за допустимі межі.

На рисунку 8 показано перехідний процес регулювання у разі маневрування потужністю

енергоблоком, а саме зниження потужності зі 100% до 85% з подальшим поверненням на повну потужність. При цьому у разі зниження потужності відбувається перемикання програм регулювання з  $p=\text{const}$  на  $t_{вх}=\text{const}$ . З графіка видно, що потужність відхилення становить 1.5%.

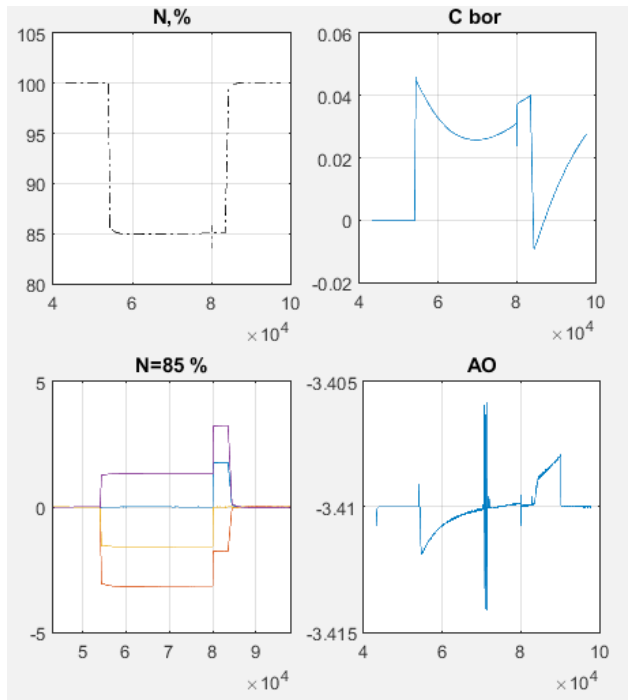


Рис. 5. Перехідний процес регулювання при  $t_{ср}=\text{const}$  перехід на  $p=\text{const}$

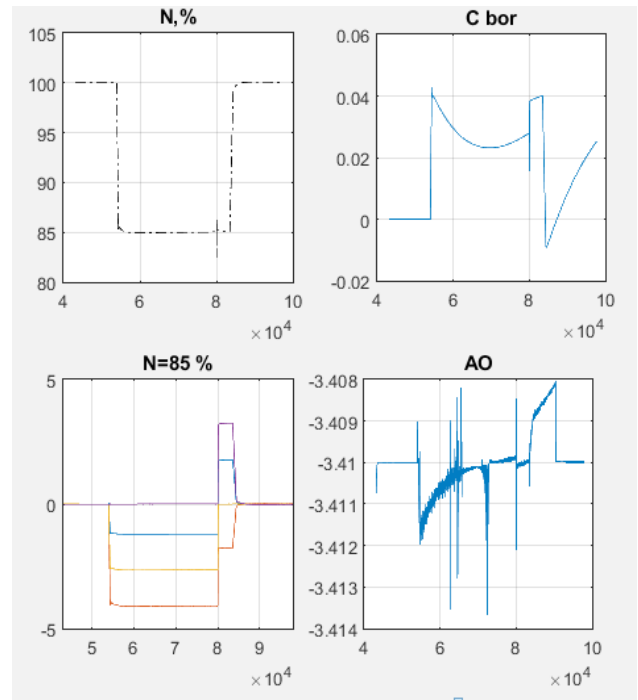


Рис. 7. Перехідний процес регулювання при  $t_{вх}=\text{const}$  перехід на  $p=\text{const}$

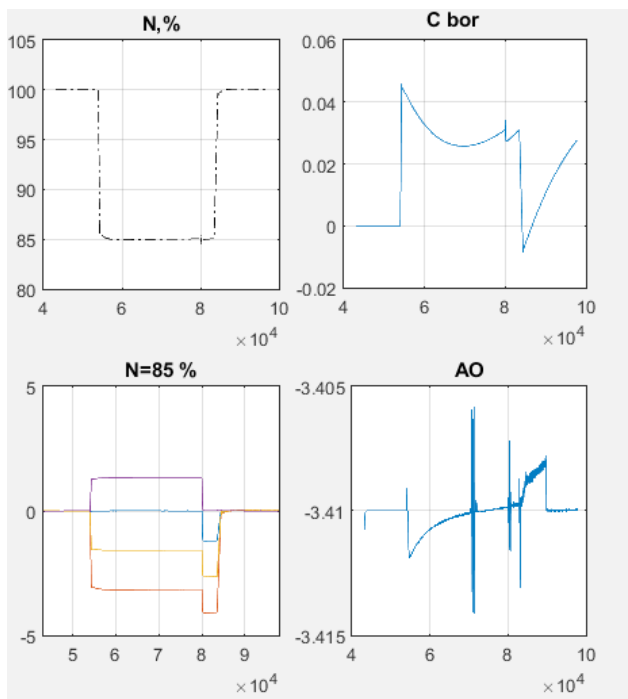


Рис. 6. Перехідний процес регулювання при  $t_{ср}=\text{const}$  перехід на  $t_{вх}=\text{const}$

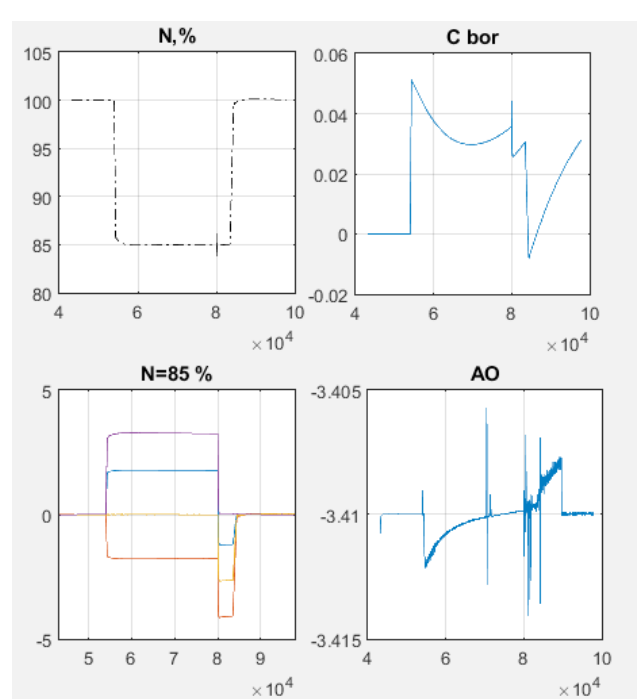


Рис. 8. Перехідний процес регулювання при  $p=\text{const}$  перехід на  $t_{вх}=\text{const}$

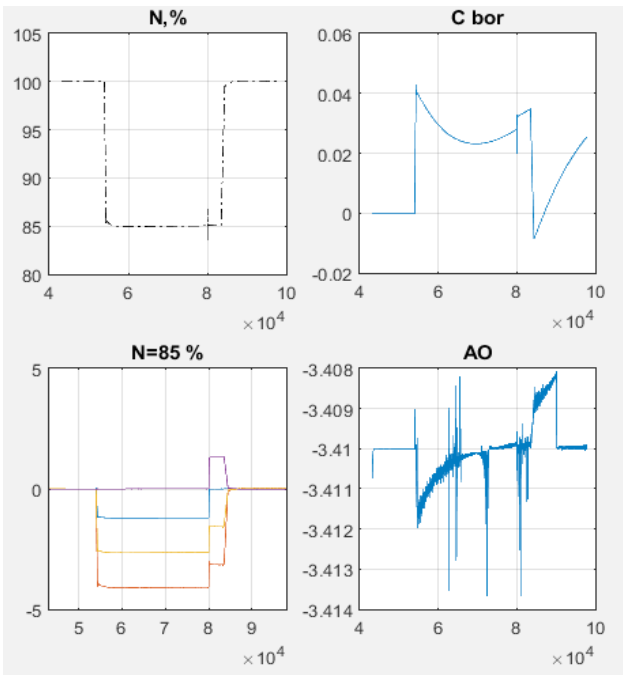


Рис. 9. Перехідний процес регулювання при  $t_{вх}=\text{const}$  перехід на  $t_{ср}=\text{const}$

Відхилення АО від номінального не вийшло за допустимі межі.

На рисунку 9 показано перехідний процес регулювання у разі маневрування потужністю енергоблоком, а саме зниження потужності зі 100% до 85% з подальшим поверненням на повну потужність. При цьому у разі зниження потужності відбувається перемикання програм регулювання з  $t_{вх}=\text{const}$  на  $t_{ср}=\text{const}$ . З графіка видно, що потужність відхилення становить 2%. Відхилення АО від номінального не вийшло за допустимі межі.

Порівняння відхилень ОР СУЗ показує, що величина переміщення практично однакова для різних програм регулювання.

На основі вищевикладеного можна зробити висновок, що перемикання між програмами регулювання не є однаково ефективним з точки зору якості перехідного процесу. Для зручності подаль-

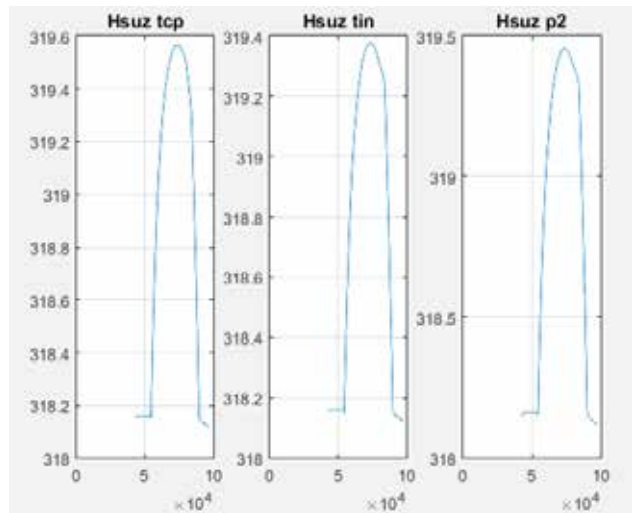


Рис. 10. Перехідний процес регулювання  $H_{сuz}$

шого аналізу алгоритму перемикання зведемо відхилення потужності в одну таблицю.

Таблиця 1

Відхилення потужності	
$p_{ср} \rightarrow t_{ср}$	4.9%
$t_{ср} \rightarrow p_{ср}$	1.1%
$t_{ср} \rightarrow t_{вх}$	1.6%
$t_{вх} \rightarrow p_{ср}$	2.9%
$p_{ср} \rightarrow t_{вх}$	1.5%
$t_{вх} \rightarrow t_{ср}$	2%

**Висновки.** У роботі розглянутий технологічний процес регулювання потужності енергоблоку з порівнянням процесів регулювання у разі переключення між різними програмами. З'ясовано, що з точки зору якості підтримання потужності переключення не є еквівалентним, а саме: перехід з програми регулювання  $p_{ср}=\text{const}$  на  $t_{ср}=\text{const}$  супроводжується відхиленням потужності на 5%. Зворотне переключення супроводжується відхиленням потужності на 1.1%. Тому для розробки алгоритму регулювання енергоблоку необхідно враховувати якість регулювання та обирати найкращий алгоритм переключення.

#### Список літератури:

1. Беркович В.М., Горохов В.Ф., Татарніков В.П. Про можливість регулювання потужності енергосистеми за допомогою атомних електростанцій. *Теплоенергетика*. Вип. 6. 19 с.
2. Максимов М.В. Метод оцінки ефективності алгоритму маневру потужністю енергоблоку з реакторами ВВЕР-1000. *Вісті вузів. Серія «Ядерна енергетика»*, 2008. Вип. 4. С. 128–139.
3. Баскаков В.Є. Алгоритм експлуатації енергоблоку з ВВЕР у підтримці добового балансу потужності енергосистеми. *Праці Одеського політехнічного університету*, 2007. Вип. 2(28). С. 56–59.
4. Сучасні технології управління : монографія: в 2 т. / під заг. ред. С.В. Купрієнко; Sworld. Одеса : Купрієнко С.В., 2012. 179 с.
5. Медведєв Р.Б., Сангінова О.В. Оптимальне керування процесом зміни концентрації борної кислоти в теплоносії першого контуру АЕС з ВВЕР-1000. *Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*, 2002. Вип. 2(22) С. 29–56.

6. Волошкіна О.О., Беглов К.В., Плахотнюк О.А. Дослідження регулятора концентрації рідкого поглинача енергоблока АЕС. *Автоматизація технологічних і бізнес-процесів*, 2015. Т. 7. Вип. 4. С. 18–24.

7. Кисельова Н.І., Погрібний Я.С., Беглов К.В. Дослідження регулятора потужності з рідким поглиначем для енергоблока АЕС з ВВЕР-1000. *Вчені записки «Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського»*. Серія «Технічні науки», 2018. Вип. 29(68). Ч. 1. № 3. С. 134–140.

#### **АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ ЭНЕРГОБЛОКА АЭС**

*Украинские энергоблоки АЭС работают на энергосистему с большим количеством потребителей электроэнергии. Потребление электроэнергии довольно скачкообразно, это связано с различными потребностями её использования, которое зависит от сезона, дня недели, а также времени суток. Энергоблоки с ВВЭР-1000 проектировались для работы только в базовом режиме, поэтому вопрос маневрирования энергоблоками на сегодняшний день является острым, а решение такой задачи неоднозначно. Выбор программы регулирования зависит от многих факторов, но всегда изменение программы регулирования производится после остановки энергоблока, анализа, профилактики и, если это необходимо, ремонта. Однако были проведены исследования, которые показали, что возможны ситуации, когда возникает необходимость перейти с одной программы регулирования на другую, и это можно сделать без остановки энергоблока. Поэтому возникла необходимость синтеза и анализа автоматизированной системы регулирования мощности энергоблока АЭС, позволяющей поддерживать характерный технологический параметр, который выбирается в зависимости от применяемой программы регулирования без остановки энергоблока.*

**Ключевые слова:** АЭС, энергоблок, програма регулювання, потужність, аксиальний оффсет.

#### **AUTOMATIC POWER CONTROL SYSTEM OF NPP POWER UNIT**

*Ukrainian nuclear power units operate on a power system with a large number of electricity consumers. Electricity consumption is quite abrupt, this is due to the different needs of its use, which depends on the season, day of the week, as well as the time of day. Power units with VVER-1000 were designed for operation only in the basic mode, so the issue of maneuvering power units today is acute, and the solution of such a problem is ambiguous. The choice of a control program depends on many factors, but always a change in the control program is made after the power unit is stopped, analyzed, prevented and, if necessary, repaired. However, studies have been conducted that have shown that there may be situations where there is a need to move from one regulatory program to another and this can be done without stopping the power unit. Therefore, it became necessary to synthesize and analyze an automated system for regulating the power of the NPP unit, which allows to maintain the characteristic technological parameter, which is selected depending on the applied control program without stopping the power unit.*

**Key words:** NPP, power unit, control program, power, axial offset.