

**2 АВТОМАТИЧНІ ТА АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ
ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ**

УДК 621.039.56

**УПРАВЛЕНИЕ АКСИАЛЬНЫМ ОФСЕТОМ ЯДЕРНОГО
РЕАКТОРА ПРИ МАНЕВРИРОВАНИИ МОЩНОСТЬЮ****Максимов М. В.¹, Беглов К.В.¹, Каназирский Н. Ф.¹**¹ Одесский национальный политехнический университет, г. Одесса

Copyright © 2014 by author and the journal "Automation technological and business - processes".

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>ONAF
Open AccessDOI: [10.15673/2312-3125](https://doi.org/10.15673/2312-3125).**Аннотация**

Высокая надежность и безопасность энергоблока – основные требования, которые предъявляются при эксплуатации энергоблока в маневренном режиме. Залогом надежной и безопасной эксплуатации энергоблока является устойчивость реактора при возмущениях как во время работы на постоянном уровне нагрузки, так и в маневренном режиме. Количественной мерой устойчивости реактора является аксиальный офсет (АО) — технологическая характеристика равномерности энерговыделения, поэтому мерой эффективности эксплуатации энергоблока с ВВЭР-1000 является минимизация отклонения АО. Исследовано влияние автоматизированных систем регулирования мощностью энергоблока в маневренном режиме на аксиальный офсет. Рассмотрена компромиссно-комбинированная программа регулирования мощностью реактора, которая предполагает удержание значения АО постоянным при переводе энергоблока с одного уровня мощности на другой.

Abstract

High reliability and security of power unit are basic requirements in the maneuvering mode operation of the power unit. Guarantee of safe and reliable operation of power unit is the reactor stability in case of disturbances in steady load and maneuvering load. A quantitative measure of the reactor stability is an axial offset (AO) which is uniformity technological characteristic of energy release, therefore efficiency measure of WWER-1000 operation is to minimize the deviation of the AO. Influence on axial offset of the automated control systems by capacity of the power unit in the maneuverable mode is investigated. The compromise-combined control program of power unit is considered, which maintains constant AO value in case of switching the power unit from one power level to another.

Ключевые слова

Управление аксиальным офсетом, ксеноновые колебания, программа регулирования, активная зона реактора, маневренный режим.

Введение

В настоящее время доля выработки электроэнергии на АЭС Украины составляет более 50% при суммарной установленной мощности АЭС 13,8 ГВт. Согласно Энергетической стратегии Украины на период до 2030 года установленная мощность АЭС должна составить 25 ГВт [1].

Эксплуатируемые в настоящее время в Украине энергоблоки АЭС изначально проектировались для работы в базовой части графика электрической нагрузки. Увеличение доли выработки электроэнергии на АЭС привело к необходимости переноса работы АЭС из базовой части графика электрической нагрузки в полупиковую. Таким



2 АВТОМАТИЧНІ ТА АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

образом, работа блоков АЭС с ВВЭР в маневренном режиме стала актуальной задачей для энергосистемы Украины.

Однако, при попытках эксплуатировать энергоблоки с ВВЭР в маневренном режиме возник ряд технических проблем. Основной из которых стала проблема обеспечения устойчивости реактора. Одним из условий безопасной эксплуатации энергоблока является равномерность энерговыделения в активной зоне. Количественной мерой равномерности энерговыделения по высоте активной зоны реактора является интегральный параметр - аксиальный офсет (АО). Исходя из этого, одной из наиболее важных задач стало поддержание АО, что является залогом устойчивости реактора, надежной и безопасной работы оборудования и условий работы топлива и оболочек тепловыделяющих сборок как в стационарном режиме, так и во время маневрирования мощностью [2].

Цель работы.

Усовершенствование автоматизированной системы регулирования мощности энергоблока АЭС, с целью поддержания аксиального офсета ядерного реактора регламентных пределах при эксплуатации энергоблока в маневренных режимах.

Изложение основного материала.

При работе энергоблока на постоянном уровне мощности программа регулирования не играет важной роли. Однако в маневренных режимах выбор программы регулирования может оказать существенное влияние на эксплуатационные характеристики энергоблока и работу его оборудования в дальнейшем.

Как было указано, количественной мерой равномерности энерговыделения по высоте активной зоны реактора является аксиальный офсет (АО). Величина АО определяется как разница энерговыделения верхней и нижней частей активной зоны (АЗ) реактора, отнесенная к общему энерговыделению [3].

Согласно регламенту эксплуатации реакторной установки, АО должен поддерживаться в установленном регламентом диапазоне в зависимости от текущего уровня мощности (рис. 1).

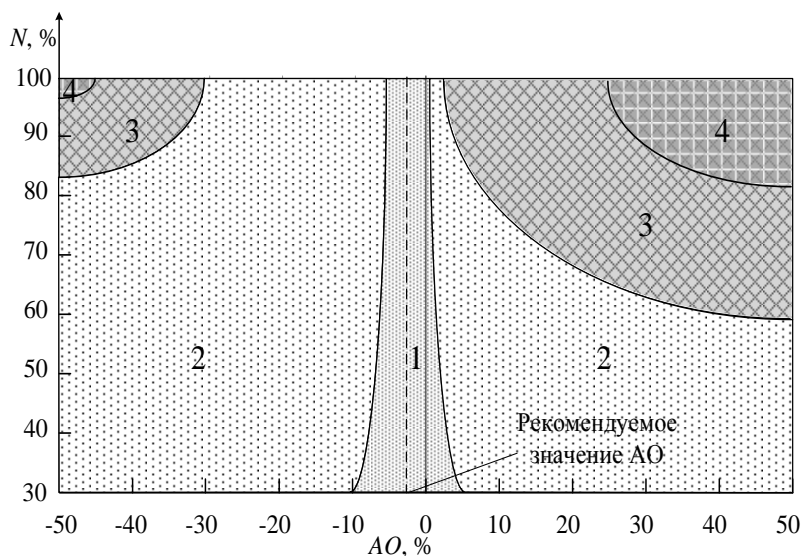


Рис. 1 – Регламентные области значений АО в зависимости от уровня мощности реактора:

- 1 – рекомендованная область; 2 – допустимая область;
- 3 – не рекомендованная область; 4 – запрещенная область

Выход значения АО за пределы рекомендованной области может привести к неравномерности нейтронного потока и возникновению аксиальных ксеноновых колебаний, появление которых негативно скажется на времени стабилизации реактора и работе оборудования 1-го контура. При определенных условиях неравномерность нейтронного потока в АЗ реактора может привести к предаварийным или аварийным ситуациям. Поэтому для эффективной эксплуатации энергоблока необходимо минимизировать отклонения АО.

Для исследования реакторной установки, как объекта управления АО, была использована десятизонная модель реактора, которая позволяет качественно проследить изменение АО при различных возмущающих



2 АВТОМАТИЧНІ ТА АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

воздействиях [4]. Используя указанную модель, было проведено моделирование существующей и предлагаемой систем регулирования мощности энергоблока.

В настоящее время регулирование мощности энергоблока с реакторами ВВЭР осуществляется с помощью автоматического регулятора мощности реактора (АРМ) и регулятора турбины (РТ). Регулятор мощности реактора обеспечивает следующие режимы работы:

- режим астатического поддержания теплотехнического параметра (давления пара перед турбиной) воздействием на реактор (Т);
- режим астатического поддержания нейтронной мощности (Н);
- режим поддержания теплотехнического параметра по компромиссной программе воздействием на реактор (К);
- стерегущий режим поддержания теплотехнического параметра воздействием на реактор (С).

Наиболее часто применяемым является режим К. На рисунке 2 показана модель АСР мощности энергоблока АЭС реализующая работу АРМ по компромиссной программе.

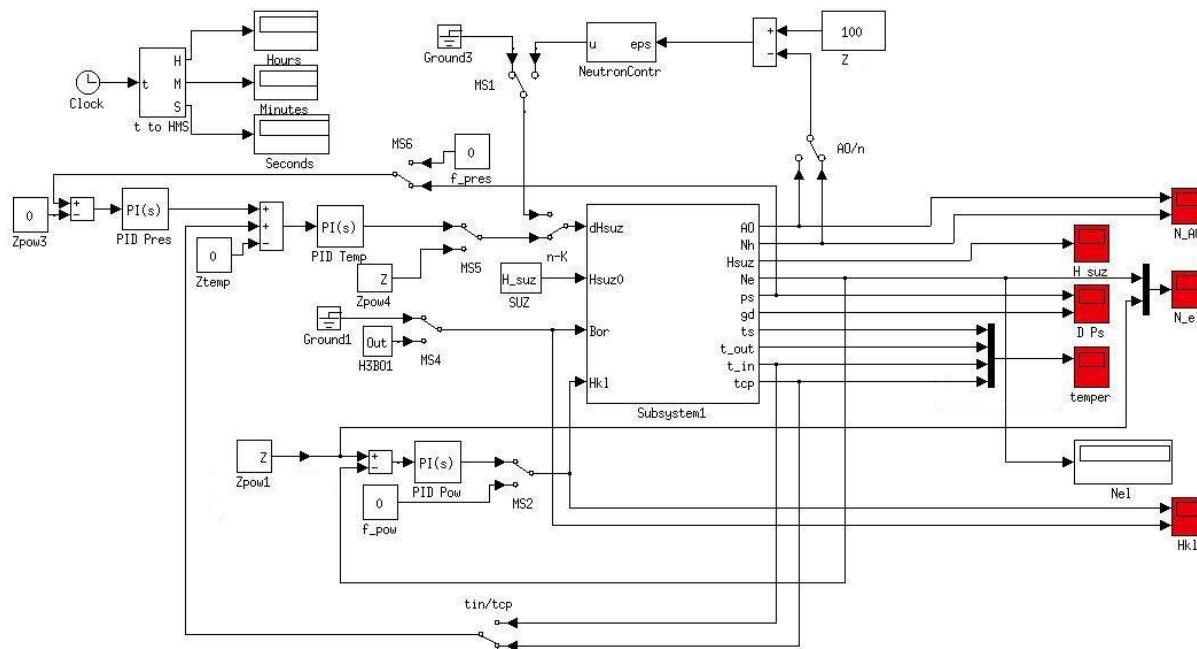


Рис. 2 – Имитационная модель АСР мощности энергоблока АЭС по компромиссной программе регулирования

Регулятор реактора АРМ PID_Temp измеряет и стабилизирует среднюю температуру теплоносителя 1-го контура воздействием на приводы регулирующих стержней. Изменение давления пара во 2-м контуре воспринимается корректирующим регулятором давления PID_Press, который изменяет задание регулятору средней температуры теплоносителя.

С изменением t_{cp} восстанавливается давление 2-го контура. Таким образом, с уменьшением мощности энергоблока (через регулятор мощности турбины) до определенного ее значения давление пара перед турбиной сохраняется постоянным и заданным, а средняя температура теплоносителя 1-го контура возрастает. Дальнейшее повышение мощности энергоблока, приводящее к снижению давления пара, не приводит из-за наличия ограничения к изменению задания и соответственно средней температуры 1-го контура. Так реализуется 2-й участок программы регулирования, на котором $t_{cp} = \text{const}$, а давление перед турбиной уменьшается. Описанная АСР - каскадная.

На рисунках 3, 4, 5, 6 показаны графики изменения технологических параметров энергоблока при маневре мощностью на -20 %.



**2 АВТОМАТИЧНІ ТА АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ
ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ**

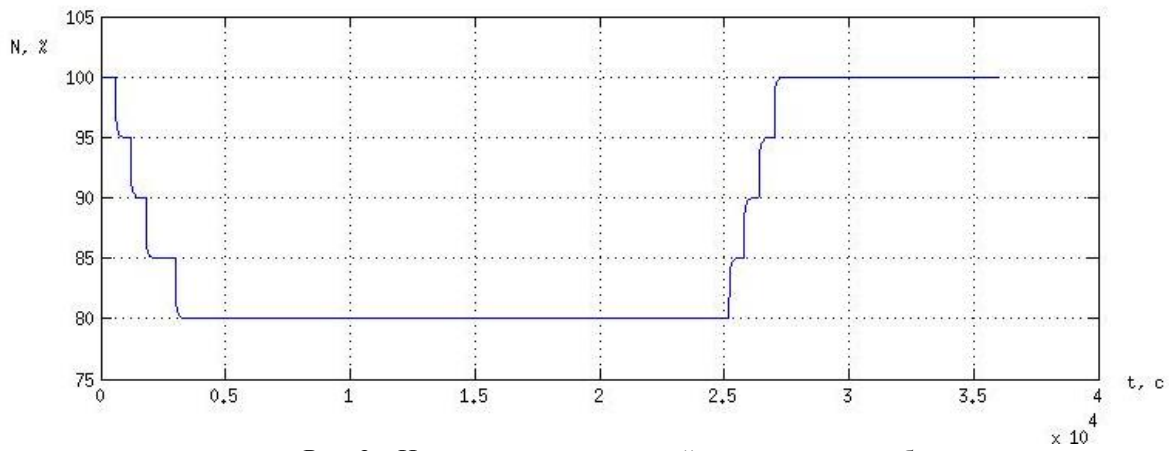


Рис. 3 – Изменение электрической мощности энергоблока

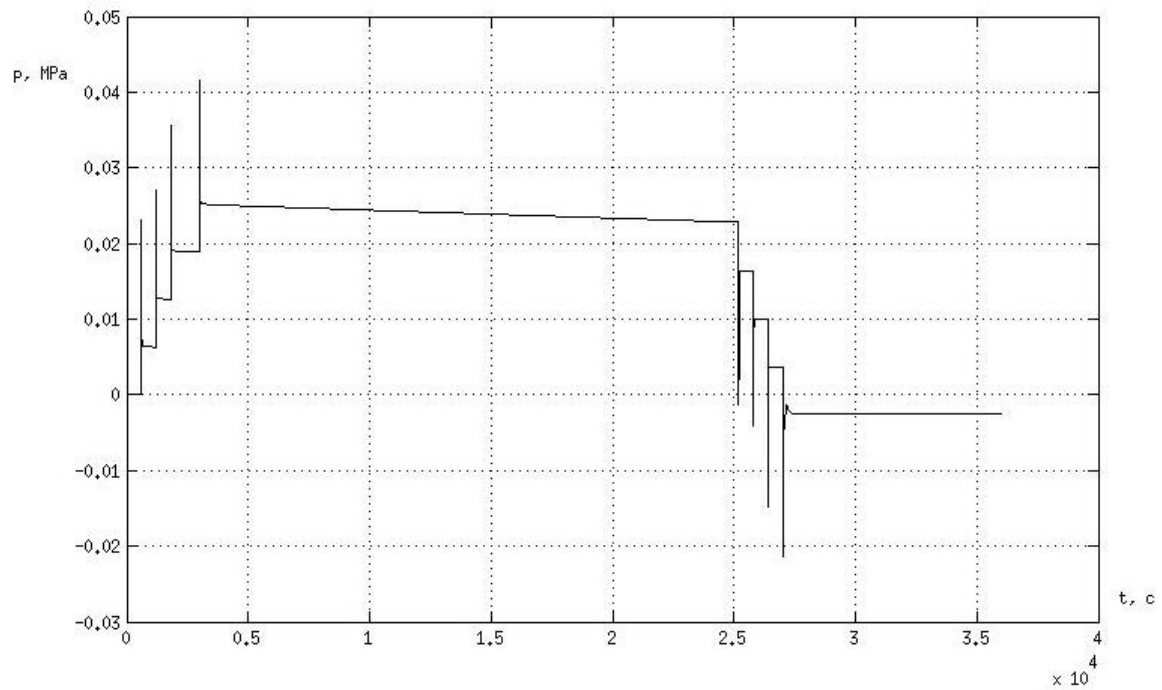


Рис. 4 – Изменение давления пара в перед турбиной

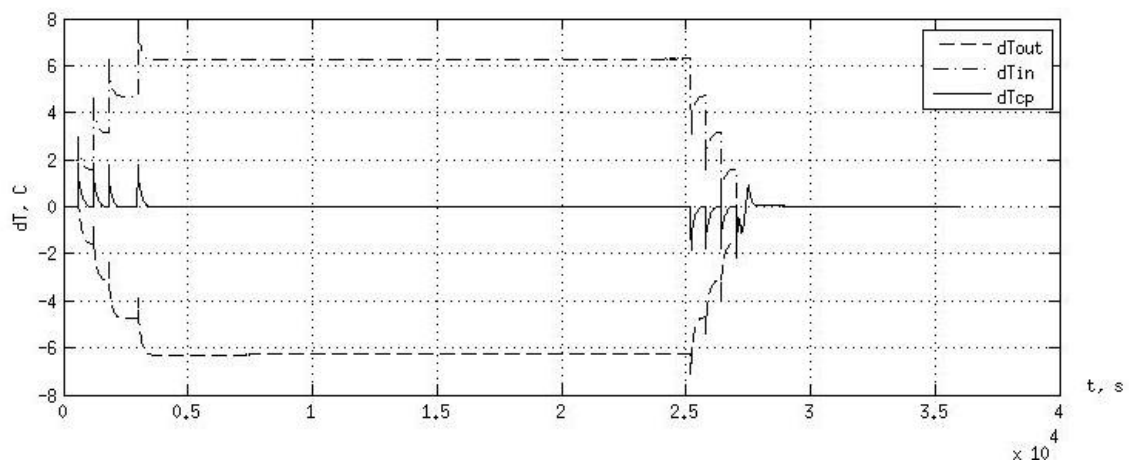


Рис. 5 – Изменение температур теплоносителя первого контура



2 АВТОМАТИЧНІ ТА АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

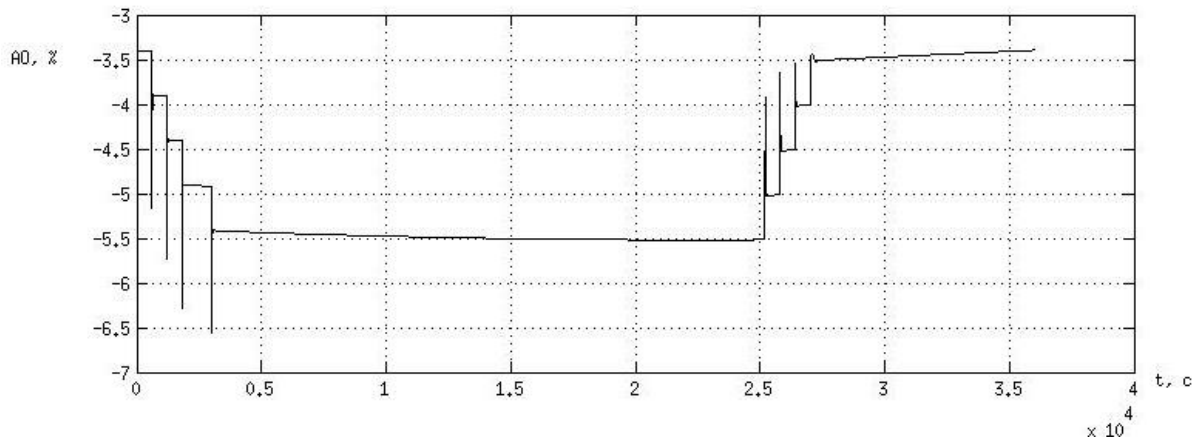


Рис. 6 – Изменение аксиального офсета

Как видно из рисунков 4 и 5, отклонения давления пара и температур теплоносителя первого контура соответствуют регламентным значениям. Отклонения аксиального офсета, в то же время, хотя и находятся в зоне допустимых значений, всё же достаточно велики.

Очевидно, что в действующей АСР мощности энергоблока управляющее воздействие для стабилизации аксиального офсета отсутствует. Поэтому предлагается изменить структуру АСР.

Исследование АСР аксиального офсета.

Во-первых, предлагается стабилизировать не среднюю температуру теплоносителя, а температуру теплоносителя на входе в реактор. Это позволит ликвидировать одно из возмущающих воздействий на активную зону реактора. Во-вторых, предлагается мощность реакторной установки изменять с помощью изменения концентрации жидкого поглотителя в теплоносителе первого контура (борное регулирование). Тогда, в-третьих, это позволит стабилизировать АО с помощью ОРСУЗ. В свою очередь температуру на входе в реактор предлагается стабилизировать путем воздействия на регулирующий клапан на главном паропроводе, изменяя давление пара и как следствие температуру насыщения t_s .

Модель АРМ с регулированием температуры перед входом в реактор аналогична представленной на рисунке 2. Отличие состоит в том, что переключатель t_{in}/t_{cp} переведён в положение t_{in} .

Проведя эксперимент с изменением задания мощности энергоблока, были получены следующие графики изменения тех же технологических переменных, которые рассматривались ранее.

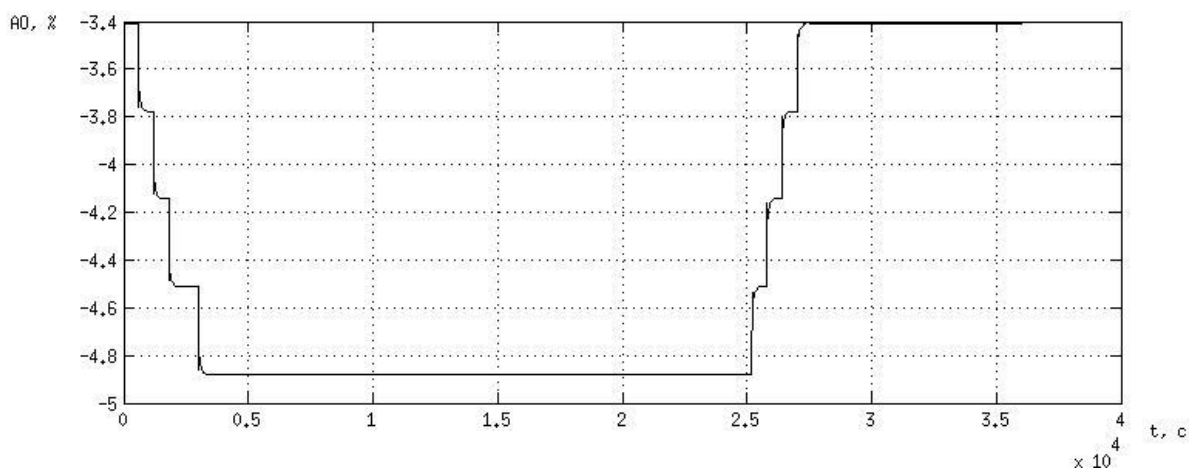


Рис. 8 – График изменения АО реактора функционирующий по программе регулирования с постоянной температурой теплоносителя на входе в АЗ реактора.

Как видно из рис. 8, АО в момент маневра мощности энергоблока также изменяется. Хотя его отклонения уже практически не имеют динамических забросов.



2 АВТОМАТИЧНІ ТА АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

Поэтому рассмотрим моделирование АРМ, в котором мощность изменяется путём изменения концентрации жидкого поглотителя в теплоносителе первого контура. Схема усовершенствованной АСР показана на рисунке 9.

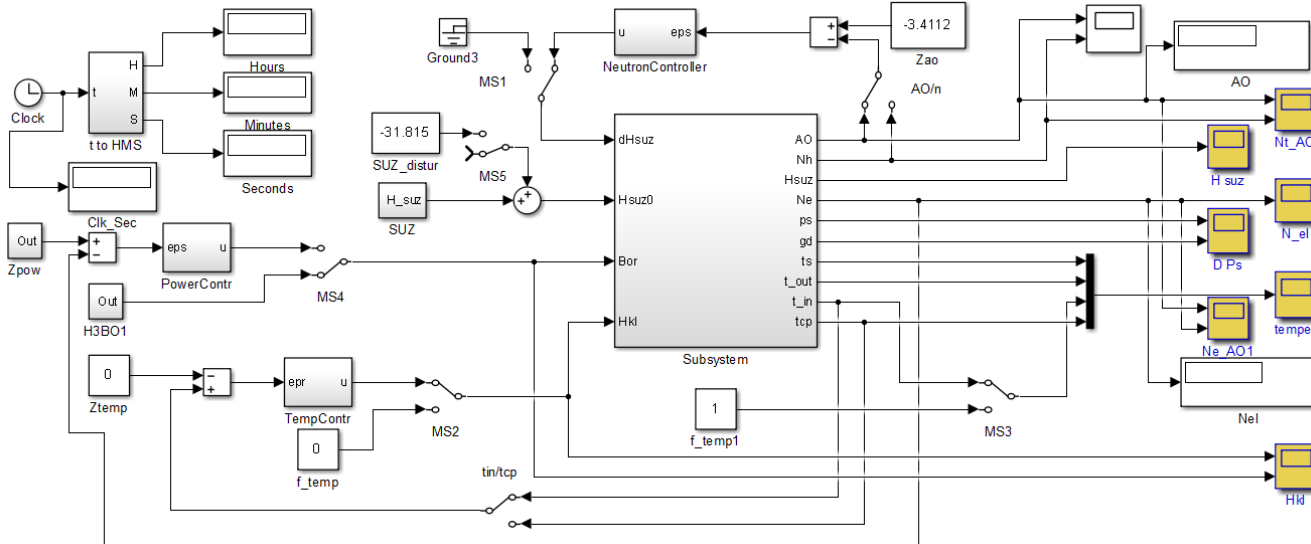


Рис. 9 – Имитационная модель усовершенствованной АСР мощности энергоблока АЭС по программам регулирования с постоянной температурой теплоносителя на входе в АЗ или постоянной средней температурой теплоносителя.

По программе регулирования с постоянной средней температурой теплоносителя в 1-ом контуре маневрирование мощностью осуществляется при помощи ввода жидкого поглотителя нейтронов, борной кислоты, в первом контуре. График изменения электрической мощности показан на рисунке 3.

Результат регулирования аксиального офсета по усовершенствованной программе регулирования с постоянной средней температурой теплоносителя в АЗ реактора при маневрировании мощностью представлен на рис. 10.

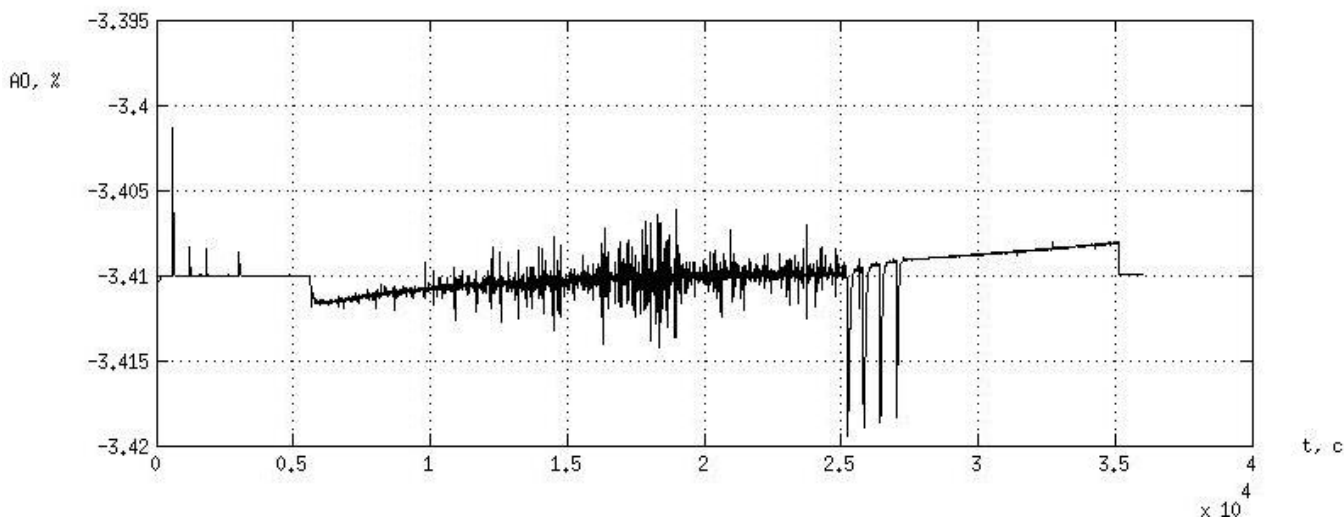


Рис. 10 – Переходный процесс регулирования аксиального офсета, АРМ функционирует по усовершенствованной программе регулирования.

Отклонения остальных технологических параметров, а именно: давления пара перед турбиной, температур теплоносителя первого контура и положение органов СУЗ, показаны на рисунках 11, 12, 13, соответственно.



**2 АВТОМАТИЧНІ ТА АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ
ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ**

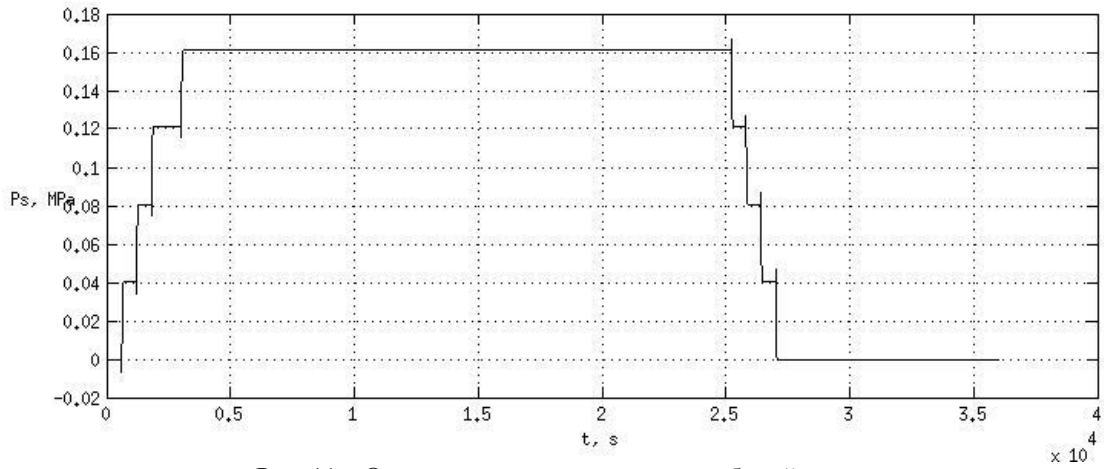


Рис. 11 – Отклонение давления перед турбиной,
АРМ функционирует по усовершенствованной программе регулирования.

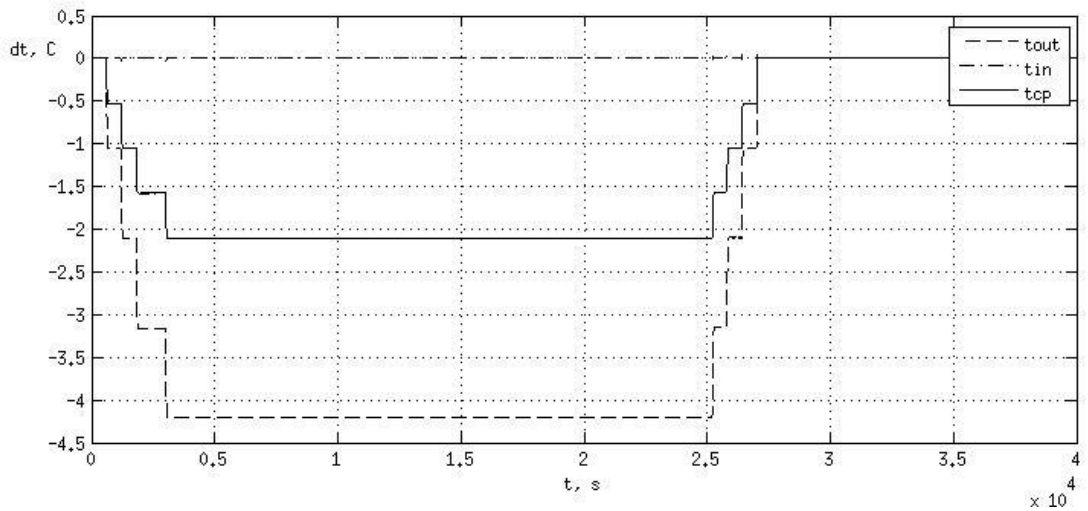


Рис. 12 – Отклонение температур теплоносителя,
АРМ функционирует по усовершенствованной программе регулирования.

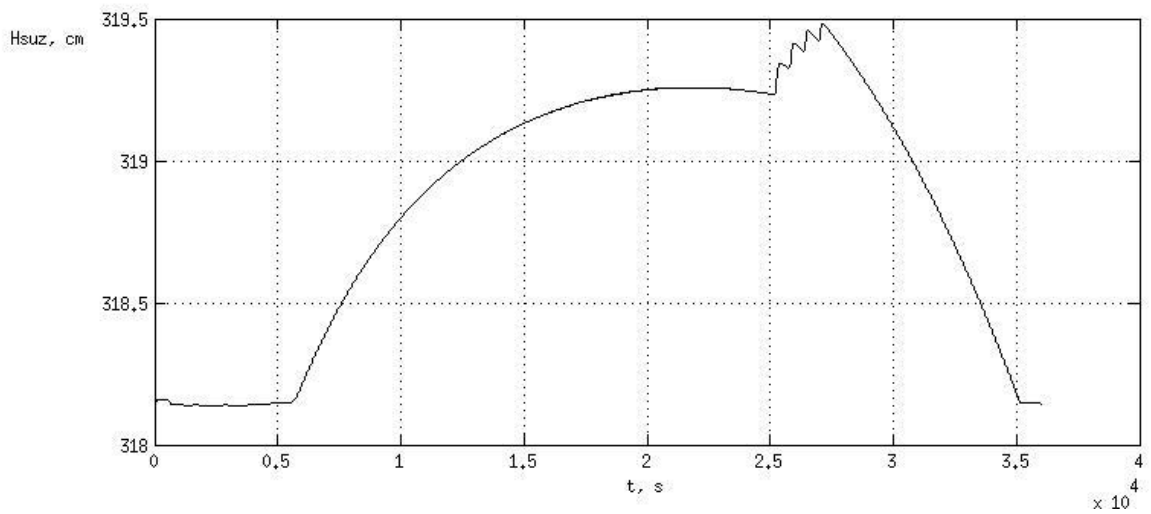


Рис. 13 – Положение органов СУЗ,
АРМ функционирует по усовершенствованной программе регулирования.



2 АВТОМАТИЧНІ ТА АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

Из представленных графиков видно, что при работе АРМ по усовершенствованной давление пара перед турбиной отклоняется на большую величину, чем при работе по традиционной программе в режиме К. Однако при номинальном давлении пара в 6 МПа отклонение в 0,16 МПа составляет 2,67 %, что является допустимым.

Отклонения температур теплоносителя первого контура оказались даже меньше, чем при работе по стандартной программе, 4 °С вместо 6 °С.

Отклонения органов СУЗ также находятся в пределах допустимых отклонений.

Приведенные графики показывают, что при регулировании мощности энергоблока по усовершенствованной программе с поддержанием постоянной температуры теплоносителя на входе в реактор качество регулирования выше, чем при регулировании по традиционным программам.

Выводы: В результате анализа энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000 как объекта управления было показано, что одной из наиболее важных проблем, возникающих при эксплуатации энергоблока, является проблема поддержания равномерного распределения энерговыделения в АЗ реактора в аксиальном направлении как залога устойчивости реактора. Проанализировав традиционные статические программы регулирования энергоблоков с реакторами ВВЭР-1000, было показано, что АО нестабилен и может привести к снижению устойчивости и надежности реактора. Значение АО при программе регулирования с постоянной средней температурой при маневрировании мощностью реактора достигает -6,5 %, а при программе с постоянной температурой теплоносителя на входе в АЗ реактора -4,9 %. Предложен новый алгоритм функционирования автоматического регулятора мощности, в котором применяется три новых контура управления. Основным является контур регулирования мощности энергоблока путем ввода в АЗ жидкий поглотитель. Во втором регулятор поддерживает постоянную температуру теплоносителя на входе в АЗ, а в третьем – поддерживает величину аксиального офсета. Таким образом удалось стабилизировать энерговыделение в АЗ реактора при маневрировании мощностью. Смоделировав усовершенствованные АСР, можно утверждать, что они позволяют в достаточной мере поддерживать постоянную величину АО, рекомендуемое значение которой -3.4%.

Литература

1. Энергетична стратегія України на період до 2030 року, схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 15 березня 2006 р. № 145;
2. Pelykh, S. N. Cladding rupture life control methods for a power-cycling WVER-1000 nuclear unit [Text] / S. N. Pelykh, M. V. Maksimov // Nuclear Engineering and Design. – 2011. – Vol. 241, No. 8. – P. 2956–2963;
3. Maksimov, M. V. Principles of controlling fuel-element cladding lifetime in variable WVER-1000 loading regimes [Text] / S. N. Pelykh, M. V. Maksimov, R.L.Gontar // Atomic Energy – 2012. – Is. 4(112). – P. 241–249;
4. Maksimov, M. V. A model of a power unit with VVER-1000 as an object of power control [Text] / M. V. Maksimov, K. V. Beglov, T. A. Tsiselskaya // works of the Odessa Polytechnic University. — Odessa, 2012. — Rel. 1(38). — P. 99-106;
5. Цисельская Т. А. Усовершенствованная АСР энергоблоком реактора / О. Б. Максимова, Т. А. Цисельская // тез. доп. 10-та між нар. наук. – практ. конф. по атом. Энергетиці, Севастополь, 2 – 7 жовт. 2012 р. – Севастополь, 2002. – С. 33 – 40.

References

1. Enerhetychna stratehiya Ukrayiny na period do 2030 roku, skhvalena rozporyadzhennyam Kabinetu Ministriv Ukrayiny vid 15 bereznya 2006 r. № 145. [Energy Strategy of Ukraine for the period up to 2030 approved by the order of Cabinet council of Ukraine of March 15, 2006 No. 145.];
2. Pelykh, S. N. Cladding rupture life control methods for a power-cycling WVER-1000 nuclear unit [Text] / S. N. Pelykh, M. V. Maksimov // Nuclear Engineering and Design. – 2011. – Vol. 241, No. 8. – P. 2956–2963;
3. Maksimov, M. V. Principles of controlling fuel-element cladding lifetime in variable WVER-1000 loading regimes [Text] / S. N. Pelykh, M. V. Maksimov, R.L.Gontar // Atomic Energy – 2012. – Is. 4(112). – P. 241–249;
4. Maksimov, M. V. A model of a power unit with VVER-1000 as an object of power control [Text] / M. V. Maksimov, K. V. Beglov, T. A. Tsiselskaya // works of the Odessa Polytechnic University. — Odessa, 2012. — Rel. 1(38). — P. 99-106;
5. Tsisel'skaya, T.A. Usovershenstvovannaya ASR energoblokom reaktora [Advanced RSA of a reactor power unit] / O.B. Maksimova, T.A. Tsisel'skaya // Sbornik tezisov dokladov 10-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii po atomnoy energetike "Bezopasnost', effektivnost', resurs" [Abstracts of the 10th International Scientific and Practical Conference on Nuclear Energy "Safety, efficiency, resource"].- Sevastopol'. -pp. 33 - 40.