

УДК 621.311.25:621.039:661.654

**Киселёва Н.И.**

Одесский национальный политехнический университет

**Погребной Я.С.**

Одесский национальный политехнический университет

**Беглов К.В.**

Одесский национальный политехнический университет

## РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ ЭНЕРГОБЛОКА АЭС С ВВЭР-1000 В РЕЖИМЕ Н

*Энергоблоки АЭС с реакторами ВВЭР-1000, которые эксплуатируются на четырех АЭС, являются самыми мощными на территории Украины. В связи с тем, что существует несоответствие между выработкой и потреблением электрической энергии в энергосистеме страны в течение суток, а также в связи с тем, что суммарная доля установок, предназначенных для регулирования суточного графика нагрузки энергосистемы очень мала, становится актуальной адаптация действующих энергоблоков к новым специфическим условиям работы путем создания автоматизированной системы регулирования (АСР) мощности энергоблока, которая позволит эксплуатировать энергоблоки АЭС в маневренных режимах.*

**Ключевые слова:** регулятор, программа регулирования, мощность, энергоблок, аксиальный офсет.

**Постановка проблемы.** Сегодня все украинские АЭС с ВВЭР-1000 эксплуатируются в режиме стабилизации мощности энергоблока на заданном уровне, хотя оборудование первого контура рассчитано на эксплуатацию в режиме маневрирования мощностью. Это прежде всего связано с тем, что в настоящее время маневрирование мощностью реакторной установки (РУ) осуществляется операторами в ручном режиме и только по требованию диспетчеров энергосистемы. Выполнение маневра операторами РУ в ручном режиме очень опасно, так как при управлении необходимо одновременно контролировать изменение многих нейтронно-физических и технологических параметров, что приводит к необходимости учитывать влияние человеческого фактора на безопасность АЭС.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Авторы Т.В. Фощ, М.В. Максимов, М.В. Никольский написали статью на тему: «Анализ влияния методов управления мощностью энергоблока с водо-водяным реактором на аксиальный офсет». Статья посвящена анализу влияния методов управления мощностью энергоблока с ВВЭР-1000 в маневренном режиме на количественную меру устойчивости, а именно на величину аксиального офсета [3, с. 19–27].

**Цель работы.** Целью работы является разработка автоматизированной системы регулирования мощности энергоблока с постоянной средней температурой

теплоносителя, которая позволит эксплуатировать энергоблок в маневренных режимах суточного цикла для поддержания баланса мощности в энергосистеме Украины, исследовать свойства реактора ВВЭР-1000 как объекта управления с точки зрения присущих ему внутренних возмущений и влияния их на аксиальный офсет в маневренных режимах.

**Основная часть.** Энергоблок с реактором ВВЭР-1000 – самостоятельная часть атомной электростанции, которая представляет собой технологический комплекс для производства электроэнергии путем использования энергии, выделяемой при контролируемой ядерной реакции. Энергоблок работает на энергосистему с большим количеством потребителей электроэнергии.

Динамические процессы в генераторе практически безынерционные, поэтому электрическая мощность, отдаваемая в энергосистему, равна механической энергии на роторе турбины. Основная задача регулирования энергосистемы заключается в том, чтобы производить выработку электроэнергии в точном соответствии с непрерывно меняющимся потреблением.

Энергоблок с реактором ВВЭР-1000 имеет два контура.

Первый контур – радиоактивный. Теплота в реакторе выделяется за счет цепной реакции деления ядерного топлива под действием тепловых нейтронов.

Теплоносителем первого контура является вода под высоким давлением с растворенной в ней борной кислотой. В результате цепной реакции деления ядер урана-235 в ТВЭЛах реактора ВВЭР-1000 выделяется теплота. При прохождении теплоносителя через активную зону реактора происходит его нагревание за счет теплоотдачи от оболочек ТВЭЛов. Из реактора теплоноситель поступает в ПГ (рисунок 1.1).

Второй контур – нерадиоактивен. В ПГ теплоноситель через поверхность теплообмена отдаёт полученную в реакторе теплоту питательной воде парогенератора, которая находится под давлением 6 МПа. Охлажденный в ПГ теплоноситель с помощью ГЦН возвращается обратно в реактор.

Для управления и защиты ядерного реактора используют регулирующие стержни, которые можно перемещать по всей высоте активной зоны. При глубоком введении цепная реакция становится невозможной, поскольку нейтроны сильно поглощаются и выводятся из зоны реакции. Это происходит потому, что стержни выполнены из материала, который имеет высокую степень поглощения нейтронов.

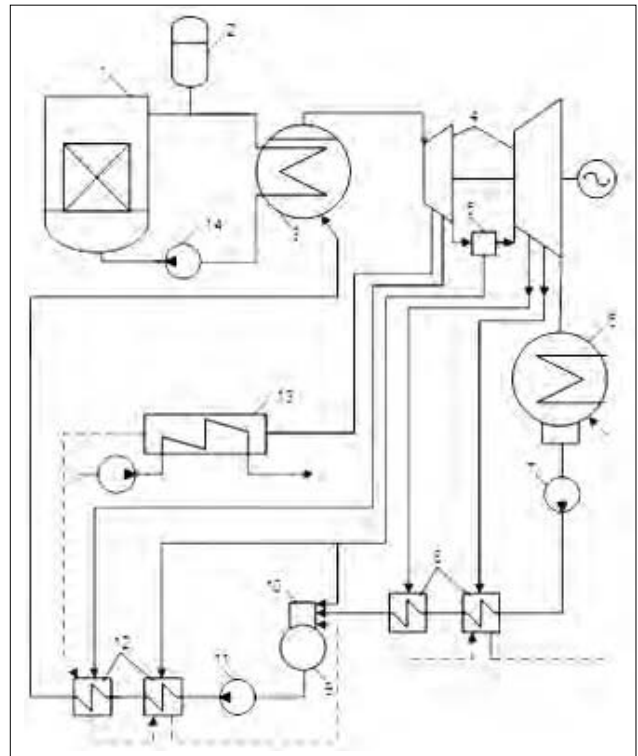
На рисунке 1.1 изображена упрощённая тепловая схема АЭС с реактором ВВЭР-1000.

Сделав анализ известных программ, для реализации регулирования мощности энергоблока была выбрана комбинированная программа. Поскольку энергоблок работает в номинальном режиме, его мощность поддерживается в диапазоне 80–100% от номинала.

При больших нагрузках комбинированная программа поддерживает постоянной среднюю температуру теплоносителя первого контура, при этом давление пара во втором контуре в случае значительных отклонений находится в допустимых рамках.

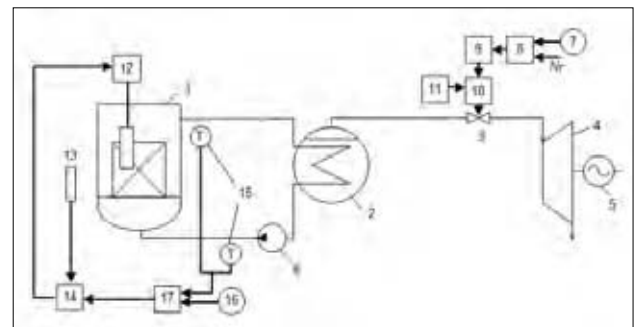
Персонал энергоблока для увеличения/уменьшения мощности с помощью датчика 7 изменяет заданное значение и при этом регулятор мощности энергоблока 8 в зависимости от сигнала рассогласования формирует управляющую команду, которая передаётся механизму управления турбиной 9. Механизм управления турбиной 9 с помощью сервомотора 10 открывает/закрывает регулирующий клапан 3 турбины 4. Таким образом, электрическая мощность генератора будет меняться до тех пор, пока сигнал рассогласования не будет равен нулю.

Схема регулирования мощности энергоблока с ВВЭР-1000 по комбинированной программе при больших нагрузках изображена на рисунке 1.2.



**Рис. 1.1. Упрощённая тепловая схема энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000:**

- 1 – реактор; 2 – компенсатор объема;
- 3 – парогенератор; 4 – паровая турбина;
- 5 – турбинный сепаратор; 6 – конденсатор;
- 7 – конденсаторный насос; 8 – подогреватели низкого давления;
- 9 – деаэрационный бак; 10 – деаэрационная колонка;
- 11 – питательный насос; 12 – подогреватели высокого давления;
- 13 – сетевой подогреватель;
- 14 – циркуляционный насос



**Рис. 1.2. Принципиальная схема регулирования мощности энергоблока с реактором ВВЭР-1000, которая реализует комбинированную программу регулирования при больших нагрузках:**

- 1 – реактор; 2 – парогенератор; 3 – регулирующий клапан турбины; 4 – турбина; 5 – генератор;
- 6 – главный циркуляционный насос; 7 – датчик электрической мощности генератора; 8 – регулятор мощности энергоблока;
- 9 – механизм управления турбиной; 10 – сервомотор; 11 – регулятор частоты вращения турбины;
- 12 – приводы регулирующих стержней; 13 – ионизационная камера; 14 – регулятор нейтронной мощности реактора;
- 15 – датчики температуры теплоносителя первого контура; 16 – датчик средней температуры теплоносителя первого контура;
- 17 – регулятор средней температуры теплоносителя первого контура

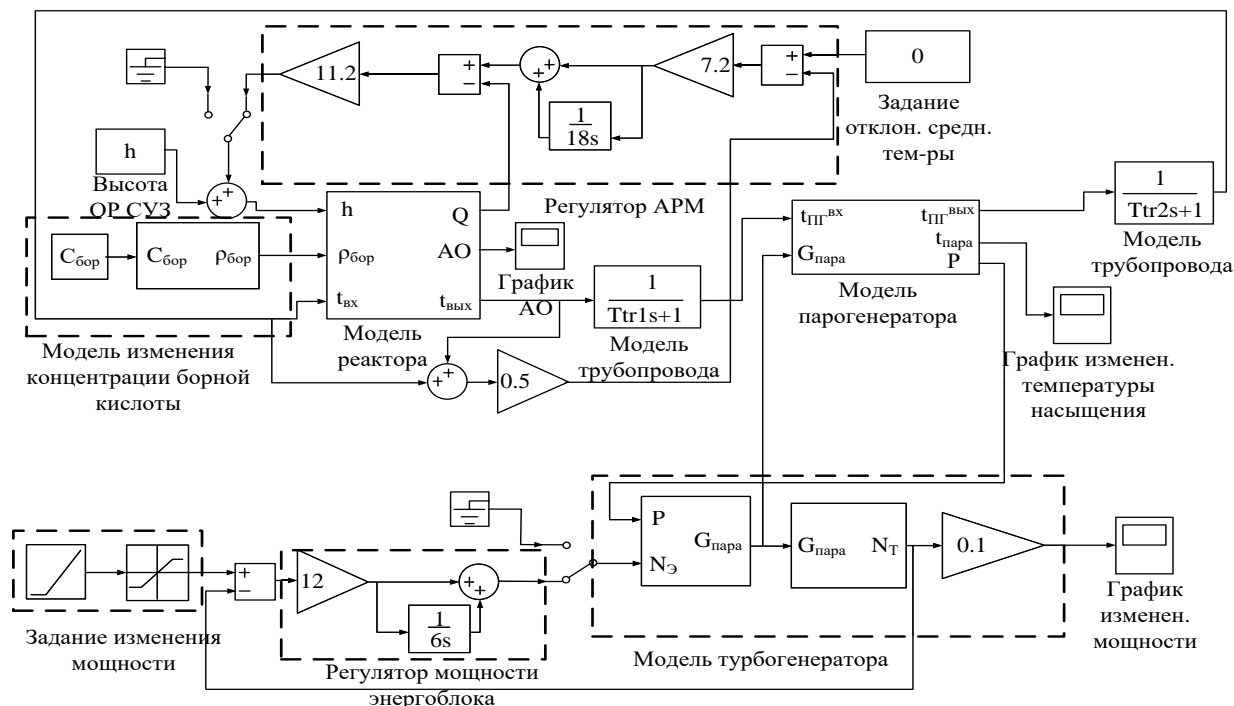


Рис. 1.3. Моделирование автоматизированной системы регулирования мощности энергоблока

При открытии/закрытии регулирующего клапана турбины давление пара перед турбиной и в парогенераторе 2 уменьшится/увеличится, что, соответственно, приведёт к уменьшению/увеличению давления пара и температуры насыщения в парогенераторе, то есть количество тепла, отводимого вторым контуром, увеличится/уменьшится. Ранее описанные процессы приведут к тому, что температура теплоносителя первого контура на выходе из парогенератора уменьшится/увеличится. Вместе с ней уменьшится/увеличится и средняя температура теплоносителя.

Регулирование нейтронной мощности осуществляется с помощью автоматического регулятора мощности (АРМ). АРМ состоит из регулятора средней температуры теплоносителя первого контура 17 и регулятора нейтронной мощности 14. С помощью задатчика 16 и датчиков 15 средней температуры первого контура формируется сигнал рассогласования, тем самым регулятор средней температуры теплоносителя первого контура вырабатывает корректирующий сигнал на регулятор нейтронной мощности. Далее регулятор нейтронной мощности изменяет положение регулирующих стержней 12, что приводит к поддержанию постоянного значения средней температуры теплоносителя первого контура.

Регулирующее устройство АРМ-5С является частью системы регулирования мощности энер-

гоблока ВВЭР-1000 и предназначен для поддержания мощности реактора в соответствии с мощностью турбогенератора или стабилизации мощности реактора на заданном уровне.

Принцип работы АРМ-5С основан на непрерывном сравнении значений текущего регулируемого параметра (нейтронная мощность реактора, давление пара в главном паровом коллекторе второго контура) со значениями параметра, записанными в регуляторе и являющимися для него заданием. АРМ-5С воздействует на ОР СУЗ рабочей группы, приводя изменившийся параметр регулирования к заданному значению.

Устройство АРМ-5С обеспечивает следующие режимы работы:

- режим астатического поддержания нейтронной мощности (режим «Н»);
- режим астатического поддержания теплотехнического параметра воздействием на ОР СУЗ (режим «Т»);
- стерегающий режим поддержания теплотехнического параметра воздействием на ОР СУЗ (режим «С»).

Для выполнения основных функций в комплект АРМ-5С входят два регулятора: РРН и РРТ, каждый из которых состоит из трех независимых каналов. Для повышения надежности и помехоустойчивости выходной сигнал каждого регулятора формируется по мажоритарному принципу «2 из 3»,

т.е. воздействие от регулятора передается на ОР СУЗ только в том случае, если по крайней мере два канала из трех выдадут сигнал на перемещение ОР СУЗ в данном направлении. АСР мощности энергоблока АЭС с ВВЭР-1000, алгоритм управления которой реализует программу регулирования с постоянной средней температурой теплоносителя в АКЗ реактора в среде моделирования Simulink пакета Matlab, представлена на рисунке 1.3.

**Выводы.** Основной физической особенностью ВВЭР-1000, из которой вытекают несколько других, является тесная решётка ТВЭЛов, необходимость использования которой является неизбеж-

ной из-за нейтронно-физических свойств воды. В сочетании с хорошими теплофизическими свойствами воды это обеспечивает компактность активной зоны и высокие значения объёмного энерговыделения. Исходя из этого были исследованы свойства реактора ВВЭР-1000 как объекта управления с точки зрения присущих ему внутренних возмущений и влияния их на аксиальный офсет, разработана система регулирования мощности энергоблока с постоянной средней температурой теплоносителя, которая позволяет эксплуатировать энергоблок в маневренных режимах суточного цикла.

#### Список литературы:

1. Беркович В.М., Горохов В.Ф., Татарников В.П. О возможности регулирования мощности энергосистемы с помощью атомных электростанций. Теплоэнергетика. 1974. № 6. С. 16–19.
2. Максимов М.В. Метод оценки эффективности алгоритма маневра мощностью энергоблока с реакторами ВВЭР-1000. Известия вузов. Ядерная энергетика. 2008. № 4. С. 128–139.
3. Фощ Т.В. Анализ влияния методов управления мощностью энергоблока с водо-водяным реактором на аксиальный офсет / Т.В. Фощ, М.В. Максимов, М.В. Никольский. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2014. № 2(8). С. 19–27.
4. Современные технологии управления: в 2 т. монография / под общ. ред. С.В. Куприенко; Sworld. Одесса: Куприенко С.В., 2012. 179 с.
5. Медведев 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. № 2 (22). С. 22.
6. Аниканов С.С., Дунаев В.Г., Митин В.И. Управление энергораспределением ВВЭР-1000 в маневренном режиме. Атомная энергия. 1993. Т. 75, № 1. С. 3–8.
7. Коренной А.А., Титов С.Н., Литус В.А., Неделин О.В. Управление аксиальным распределением поля энерговыделения в активной зоне ВВЭР-1000 при переходных процессах. Атомная энергия. 1998. Т. 88, № 4. С. 252–257.
8. Филимонов П.Е., Аверьянова С.П. Поддержание равновесного офсета – эффективный способ подавления ксеноновых колебаний в ВВЭР-1000. Атомная энергия. 2001. Т. 90, № 3. С. 231–233.

#### РОЗРОБКА АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ЕНЕРГОБЛОКА АЕС ІЗ ВВЕР-1000 У РЕЖИМІ Н

*Енергоблоки АЕС з реакторами ВВЕР-1000, які експлуатуються на чотирьох АЕС, є найпотужнішими на території України. У зв'язку з тим, що існує суттєва невідповідність між виробленням і споживанням електричної енергії в енергосистемі країни протягом доби, а також у зв'язку з тим, що сумарна частка установок, призначених для регулювання добового графіка навантаження енергосистеми дуже мала, стає актуальною адаптація діючих енергоблоків до нових специфічних умов роботи шляхом створення автоматизованої системи регулювання (АСР) потужності енергоблока, яка дасть змогу експлуатувати енергоблоки АЕС у маневрених режимах.*

**Ключові слова:** регулятор, програма регулювання, потужність, енергоблок, аксиальний офсет.

#### DEVELOPMENT OF AUTOMATIC SYSTEM FOR REGULATING THE POWER OF THE POWER UNIT OF THE WWER-1000 NPP IN THE MODE N

*The power units of NPPs with WWER-1000 reactors, which are operated at four NPPs, are the most powerful in Ukraine. Due to the fact that there is a significant discrepancy between the generation and consumption of electrical energy in the country's power system during the day, and also due to the fact that the total share of plants designed to regulate the daily load curve of the power system is very small, the adaptation of existing power units to new specific working conditions by creating an automated control system (ASR) of the power unit, which will allow to operate the NPP power units in maneuverable power plants benches.*

**Key words:** controller, control program, power, power unit, aksial offset.