

УДК 681.151

Саць Е.Ф.

Одесский национальный политехнический университет

Саць Т.А.

Одесский национальный политехнический университет

Максимов М.В.

Одесский национальный политехнический университет

СОПОСТАВЛЕНИЕ ПОСТОЯННЫХ РЕГУЛИРОВАНИЯ В РЕГУЛЯТОРЕ МОЩНОСТИ РЕАКТОРА ПРИ ПРОГРАММЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ С ПОСТОЯННОЙ СРЕДНЕЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ПЕРВОМ КОНТУРЕ И ПОСТОЯННОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА ВХОДЕ В АКЗ РЕАКТОРА ПО АКСИАЛЬНОМУ ОФСЕТУ

В статье рассмотрено две программы регулирования мощности реактора, а именно, постоянная средней температуры и постоянная входа реактора. Предоставлены принципиальные схемы программ регулирования. Разработаны усовершенствованные схемы регулирования. Разработана имитационная модель реактора ВВЭР-1000. Произведено сопоставление двух программ регулирования по аксиальному офсету при 48 часах работы реактора в режиме маневрирования мощностью со 100% до 85%.

Ключевые слова: программы регулирования, мощность реактора, ВВЭР-1000, система автоматического регулирования, имитационная модель, аксиальный офсет.

Постановка проблемы. Периодическое перераспределение энерговыделения по высоте АКЗ реактора под действием ксеноновых колебаний является одной из основных проблем обеспечения безопасной эксплуатации и устойчивости АКЗ реактора энергоблока с ВВЭР-1000 в существующих стационарных АСР. В связи с этим главной задачей для обеспечения устойчивости реактора ВВЭР-1000 в маневренном режиме является поддержание стабильного поведения поля энерговыделения либо его аксиального офсета.

Анализ последних исследований и публикаций. Авторами (Т.В. Фощ, М.В. Максимов, М.В. Никольский) была написана статья 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. Были описаны автоматизированные системы регулирования мощностью энергоблока с реактором ВВЭР-1000 для эксплуатации в маневренном режиме, а также смоделированы и приведены графики изменения аксиального офсета реактора [1].

Постановка задания. Сравнить две программы регулирования реактора ВВЭР-1000 по аксиальному офсету и выбрать наиболее лучшую программу для высокой надежности и безопасности энергоблока, которые зависят от устойчивости реактора при переходе с одного уровня мощности на другой.

Изложение основного материала исследования. В работе рассматривается аксиальный офсет, две программы регулирования энергоблока ВВЭР-1000, в частности программа регулирования с постоянной средней температурой и с постоянной температурой входа в реактор.

Изменение распределения энерговыделения в аксиальном, радиальном и азимутальном направлениях может быть вызвано ксеноновыми колебаниями. Аксиальные колебания описываются с помощью аксиального офсета – АО, радиальные и азимутальные колебания – с помощью величины относительной мощности энерговыделения в *i*-ой ячейке АКЗ. АО определяют как:

$$AO = \frac{Q_1 - Q_2}{Q} \quad (1)$$

где Q_1, Q_2 – мощность нижней и верхней половин АКЗ, $Q = Q_1 + Q_2$.

Отклонение данной величины от ее равновесного значения, соответствующего равновесному

распределению ^{135}Xe , могут быть представлены в виде:

$$A(t) = A(t_0)\exp(\alpha t)\cos(\nu t), \quad (2)$$

Где $\nu = \pi/2T$, T – период свободных ксеноновых колебаний, $\tau = t - t_0$, t_0 – момент достижения первого экстремума.

После фиксации экстремумов A_0, A_1, \dots, A_i в соответствующие моменты времени t_0, t_1, \dots, t_i и считая, что при достижении экстремума $|\cos(\nu t)| = 1$, можно получить:

$$\alpha_i = \frac{1}{\tau_i} \ln \left| \frac{A_i}{A_0} \right|, \tau_i = t_{i-1} - t_0, T_i = 2(t_{i-1} - t_i), \quad (3)$$

Для получения индекса стабильности α и периода свободных колебаний T , усредняют величины α_i и T_i , где если $\alpha < 0$, то реактор устойчив (колебания затухают), а при $\alpha \geq 0$ – реактор неустойчив (колебания не затухают). Маневрирование мощностью энергоблока происходит по статическим программам регулирования. Такие программы показывают зависимость технологических параметров энергоблока от мощности в установившихся режимах. Далее будет рассматриваться, как изменятся технологические параметры и АО в известных статических программах регулирования в маневренном режиме.

На рис. 1 показана схема регулирования мощности энергоблока, реализующая программу регулирования с постоянной средней температурой теплоносителя в АКЗ реактора [2].

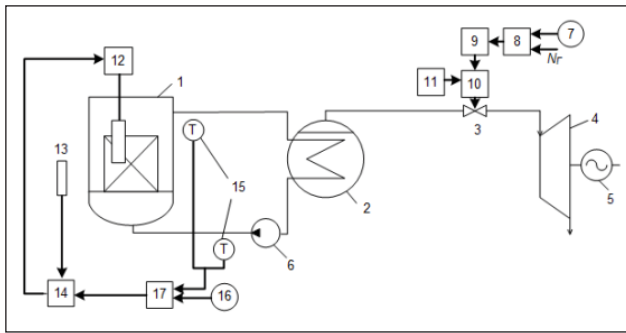


Рис. 1. Принципиальная схема регулирования энергоблоков с реактором ВВЭР-1000, реализующая программу регулирования с постоянной средней температурой теплоносителя в АКЗ реактора

На рис. 2 изображены: 1 – реактор; 2 – парогенератор; 3 – регулирующие клапаны 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 мощно-

сти реактора; 15 – датчики температуры теплоносителя первого контура; 16 – задатчик средней температуры теплоносителя первого контура; 17 – регулятор средней температуры теплоносителя первого контура.

Программа регулирования с постоянной средней температурой теплоносителя в первом контуре ($T_{SR} = \text{const}$). В этой программе регулирования (рис. 2) при переходе с одного уровня мощности на другой ТЭР и МЭР возникают в верхней и нижней половинах реактора, что связано с изменением t_{VX} и t_{VUX} . При снижении уровня мощности t_{VUX} уменьшается, поэтому ТЭР в верхней половине реактора будет иметь положительный знак, а t_{VX} увеличивается, и ТЭР в нижней половине реактора будет иметь отрицательный знак. Так как мощность снижается, МЭР будет иметь положительный знак. Следовательно, произойдет неодинаковое изменение энерговыделения по высоте АКЗ реактора, которое будет усилено при возвращении прежнего уровня мощности, что приведет к возникновению ксеноновых колебаний. Так как все ОР СУЗ имеют одинаковую эффективность, их воздействие на энерговыделение в верхней половине реактора не сможет ликвидировать ксеноновые колебания – одновременно невозможно воздействовать ОР СУЗ на нижнюю часть реактора без воздействия на верхнюю из-за конструктивных особенностей. Таким образом, существенным недостатком этой программы регулирования являются нестабильность и не управляемость аксиальным офсетом, а следовательно, и нахождение реактора в неустойчивом состоянии во время и после изменения уровня мощности.

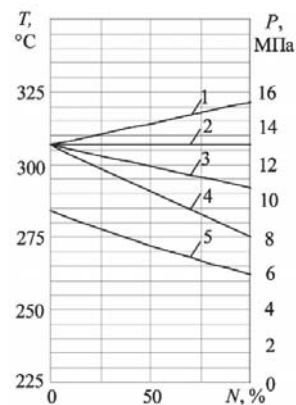


Рис. 2. Характеристика энергоблока ВВЭР 1000 при постоянной средней температуре:

- 1 – температура теплоносителя на выходе из АКЗ, t_{VUX} ;
- 2 – средняя температура теплоносителя в АКЗ, t_{SR} ;
- 3 – температура теплоносителя на входе в АКЗ, t_{VX} ;
- 4 – температура насыщенного пара во втором контуре, t_s ;
- 5 – давление пара во втором контуре, P_1

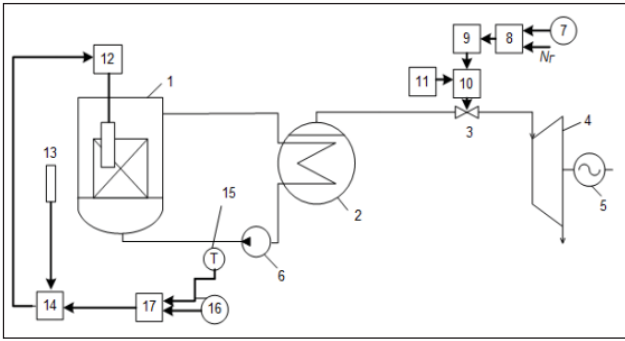


Рис. 3. Принципиальна схема АСР потужністю енергоблоку з реактором ВВЕР-1000, функціонуюча по програмі регулювання з постійною температурою теплоносія на входу в АКЗ реактора

На рис. 5 зображені: 1 – реактор; 2 – парогенератор; 3 – регулюючі клапани турбіни; 4 – турбіна; 5 – генератор; 6 – головний циркуляційний насос; 7 – датчик електричної потужності генератора; 8 – регулятор потужності енергоблоку; 9 – механізм управління турбиною; 10 – сервомотор; 11 – регулятор частоти вращения турбіни; 12 – приводи регулюючих стержней; 13 – іонізаційна камера; 14 – регулятор нейтронної потужності реактора; 15 – датчик температури теплоносія на входу в АКЗ реактора; 16 – датчик температури теплоносія на входу в АКЗ реактора; 17 – регулятор температури теплоносія на входу в АКЗ реактора.

Програма регулювання з постійною температурою теплоносія на входу в АКЗ реактора ($t_{vX} = const$). В цій програмі регулювання при переході з одного рівня потужності на другий температурний і потужний ефекти реактивності виникають тільки в верхній половині реактора. Це пов'язано з зміною середньої температури теплоносія (t_{SR}), температури теплоносія на виході (t_{vUX}) і постійністю температури теплоносія на входу в АКЗ реактора. Причому при зменшенні потужності значення t_{vUX} і t_{SR} зменшуються (рис. 4), температурний і потужний ефект реактивності буде мати позитивний знак. Таким образом, енерговиділення верхньої половини реактора буде більше нижньої половини. Таке зміння енерговиділення легко компенсується зміною положення регулюючої групи ОР СУЗ. К достоїнствам цієї програми регулювання можна віднести те, що з-за підтримки постійного значення t_{vX} в нижній половині АКЗ реактора відсутнє змінення температурного ефекта реактивності, а значить, нижня половина АКЗ залишається

устойчивой на всем протяжении маневра мощностью, возникновение ксеноновых колебаний, вызванное изменением тепловой эффективности реактивности отсутствует, изменение энерговыделения в верхней половине АКЗ реактора компенсируются регулирующей группой ОР СУЗ, а следовательно, обеспечиваются постоянство и управляемость аксиальным офсетом и устойчивое состояние реактора.

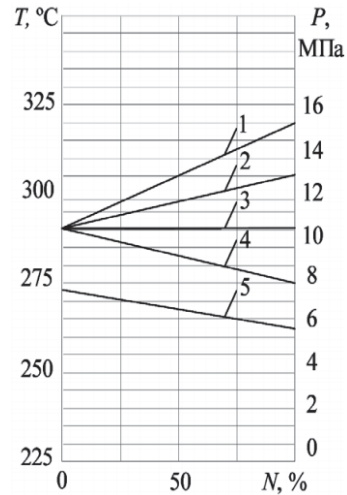


Рис. 4. Характеристика енергоблоку ВВЕР 1000 при постійній температурі теплоносія на входу в АКЗ реактора:

- 1 – температура теплоносія на виході з АКЗ, t_{vUX} ;
- 2 – середня температура теплоносія в АКЗ, t_{SR} ;
- 3 – температура теплоносія на входу в АКЗ, t_{vX} ;
- 4 – температура насиченого пара во второму контурі, t_s ;
- 5 – тиск пара во второму контурі, P_1

В пакеті Simulink, в середі Matlab, була розроблена імітаційна модель роботи реактора ВВЕР-1000 з навантаженням 85%.

В ході роботи, були розроблені удосконалені принципіальні схеми для реалізації програми регулювання з постійною середньою температурою теплоносія в АКЗ реактора і з постійною температурою теплоносія на входу в АКЗ реактора.

При моделюванні удосконалених принципіальних схем АСР були отримані наступні графіки змінення АО в режимі маневру потужністю со 100% до 85% за 48 годин роботи реактора.

Ісходя з отриманих результатів, можна зробити висновок, що аксиальний офсет за 48 годин роботи реактора в режимі маневрування потужністю со 100% до 85% і назад на всьому проміжку часу змінюється в незначительному діапазоні.

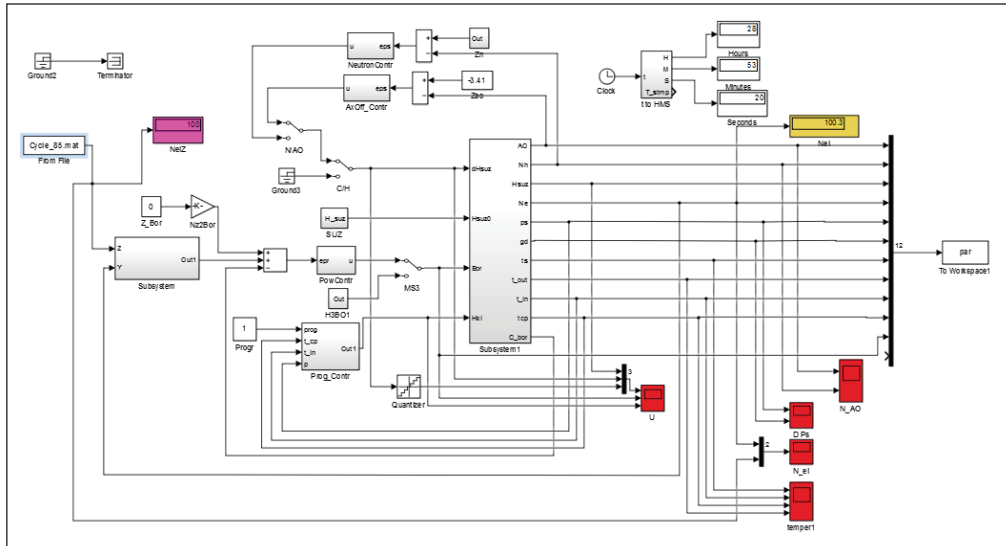


Рис. 5. Имитационная модель реактора ВВЭР-1000

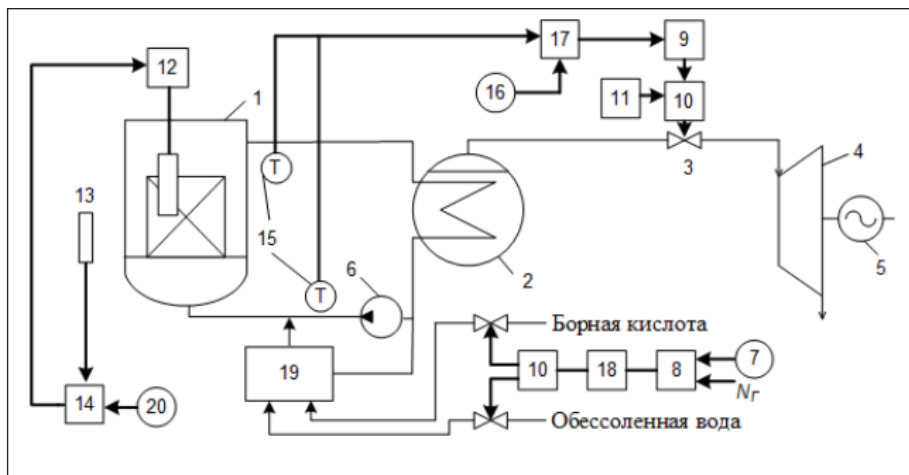


Рис. 6. Усовершенствованная принципиальная схема регулирования энергоблока с реактором ВВЭР-1000, реализующая программу регулирования с постоянной средней температурой теплоносителя в АКЗ реактора

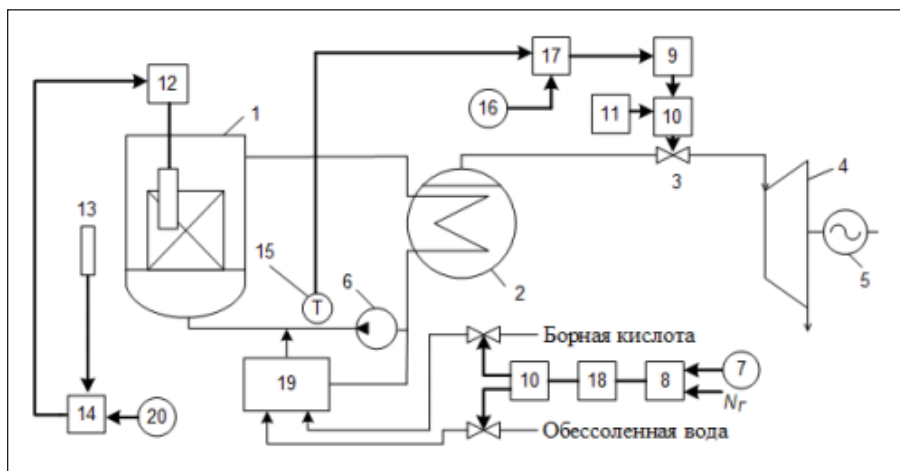


Рис. 7. Усовершенствованная принципиальная схема АСР мощностью энергоблока с реактором ВВЭР-1000, функционирующая по программе регулирования с постоянной температурой теплоносителя на входе в АКЗ реактора

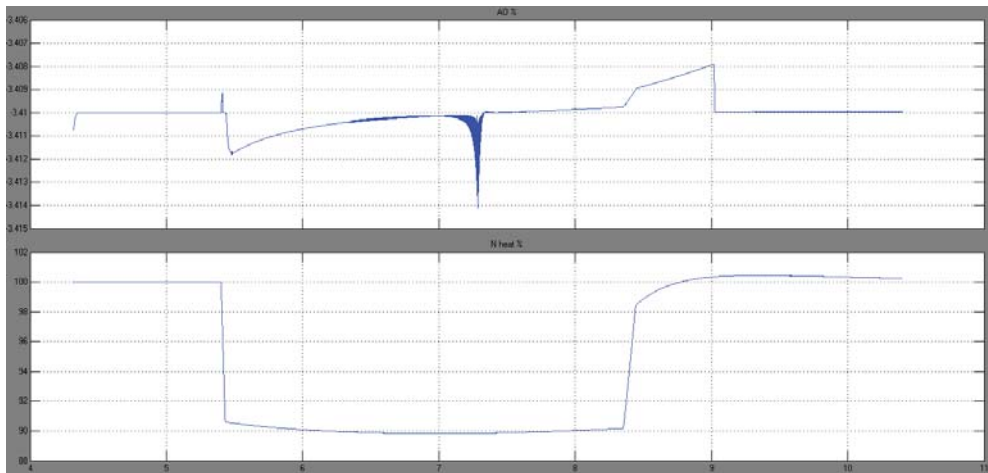


Рис. 8. График изменения АО за 48 часов работы реактора, функционирующий по усовершенствованной программе регулирования с постоянной средней температурой теплоносителя в 1-ом контуре

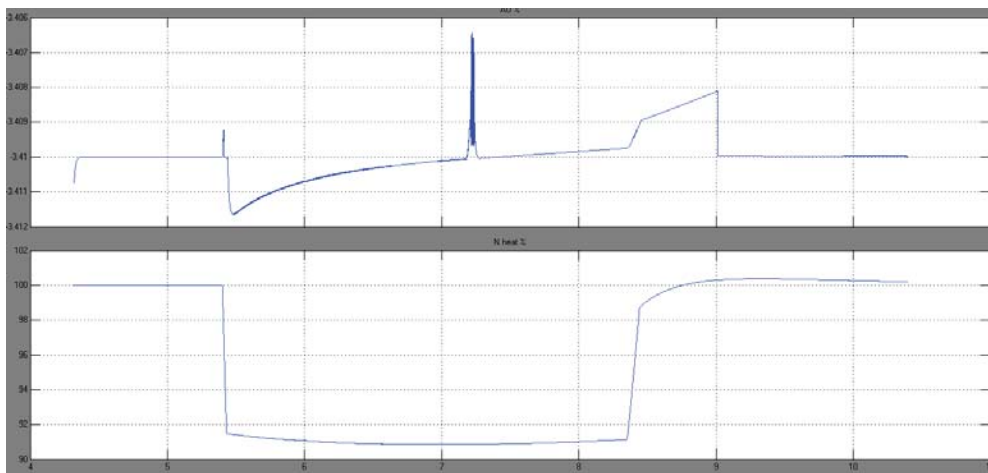


Рис. 9. График изменения АО за 48 часов работы реактора, функционирующий по усовершенствованной программе регулирования с постоянной температурой теплоносителя на входе в АКЗ реактора

Выводы. В ходе сопоставления двух программ регулирования (программа регулирования с постоянной средней температурой теплоносителя в первом контуре и постоянной температурой теплоносителя на входе в АКЗ реактора) по аксиальному офсету было определено, что за 48

часов работы реактора в режиме маневрирования мощностью со 100% до 85% и обратно на всем промежутке времени изменяется в незначительном диапазоне. Данные программы регулирования имеют право быть использованы на АЭС с реактором ВВЭР-1000.

Список литературы:

1. Фощ Т.В., Максимов М.В., Никольский М.В. Анализ влияния методов управления мощностью энергоблока с водо-водяным реактором на аксиальный офсет. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2014. № 2. С. 19–27.
2. Иванов В.А. Эксплуатация АЭС: Учебник для вузов, Санкт-Петербург, 1994. 384 с.
3. Демченко В.А. Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС, Одесса, 2001. 308 с.
4. Пельх С.Н. Способ стабилизации аксиального распределения нейтронного поля при маневрировании мощностью ВВЭР-1000. Ядерная и радиационная безопасность. 2011. № 1. С. 27–32.

ПОРІВНЯННЯ ПОСТІЙНИХ РЕГУЛЮВАННЯ В РЕГУЛЯТОРІ ПОТУЖНОСТІ РЕАКТОРА ПРИ ПРОГРАМІ РЕГУЛЮВАННЯ З ПОСТІЙНОЮ СЕРЕДНЬОЮ ТЕМПЕРАТУРОЮ ТЕПЛОНОСІЯ В ПЕРШОМУ КОНТУРІ І ПОСТІЙНОЮ ТЕМПЕРАТУРОЮ ТЕПЛОНОСІЯ НА ВХОДІ В АКЗ РЕАКТОРА, ПО АКСІАЛЬНОМУ ОФСЕТУ

У статті розглянуто дві програми реактора, зокрема постійна середньої температури і постійна входу реактора. Представлено принципові схеми регулювання. Розроблено вдосконалені схеми регулювання. Розроблено імітаційну модель реактора ВВЕР-1000. Здійснено порівняння двох програм регулювання по аксіальному офсету при 48 годинах роботи реактора в режимі маневрування потужністю від 100% до 85%

Ключові слова: програми регулювання, потужність реактора, ВВЕР-1000 система автоматичного регулювання, імітаційна модель, аксіальний офсет.

COMPARISON OF PERMANENT REGULATION IN POWER CONTROL OF THE REACTOR, WHEN THE CONTROL PROGRAM WITH A CONSTANT AVERAGE COOLANT TEMPERATURE IN PRIMARY CIRCUIT AND CONSTANT TEMPERATURE OF THE COOLANT AT THE ENTRANCE TO THE ANTICORROSION REACTOR FOR AXIAL OFFSET

The article considers two programs of reactor power control, namely, the constant of average temperature and the constant of reactor inlet. The basic schemes of control programs are presented. Improved control schemes have been developed. A simulation model of the WWER-1000 reactor is developed. The comparison of two programs of regulation on axial offset, at 48 hours of operation of the reactor in the mode of maneuvering with power from 100% to 85% is made.

Key words: control programs, reactor power, WWER-1000, automatic control system, simulation model, axial offset.