

УДК 681.151

Саць Т.А.

Одесский национальный политехнический университет

Саць Е.Ф.

Одесский национальный политехнический университет

СОПОСТАВЛЕНИЕ ПОСТОЯННЫХ РЕГУЛИРОВАНИЯ В РЕГУЛЯТОРЕ МОЩНОСТИ РЕАКТОРА ПРИ ПРОГРАММЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ С ПОСТОЯННЫМ ДАВЛЕНИЕМ ВО ВТОРОМ КОНТУРЕ И ПОСТОЯННОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА ВХОДЕ В АКЗ РЕАКТОРА ПО АКСИАЛЬНОМУ ОФСЕТУ

В статье рассмотрено две программы регулирования мощности реактора, в частности программу с постоянным давлением во втором контуре и постоянную температуры входа в реактор. Приведены принципиальные схемы программ регулирования. Разработаны усовершенствованные схемы регулирования. Разработана имитационная модель реактора ВВЭР-1000. Произведено сопоставление двух программ регулирования по аксиальному офсету при 36 часах работы реактора в режиме маневрирования со 100% до 80%.

Ключевые слова: программа регулирования, мощность реактора, ВВЭР-1000, АКЗ, 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 при маневрировании ректора со 100%

до 80%. 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 вопрос о аксиальном офсете, две программы регулирования реактора ВВЭР-1000 (программа регулирования с постоянным давлением во втором контуре 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 $|\cos(v\tau)| = 1$, 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 изменяются технологические параметры и АО в известных статических программах регулирования в маневренном режиме.

На рис. 1 приведена принципиальная схема регулирования энергоблоков с реактором ВВЭР-1000, реализующая программу регулирования с постоянным давлением во втором контуре p_2 [2].

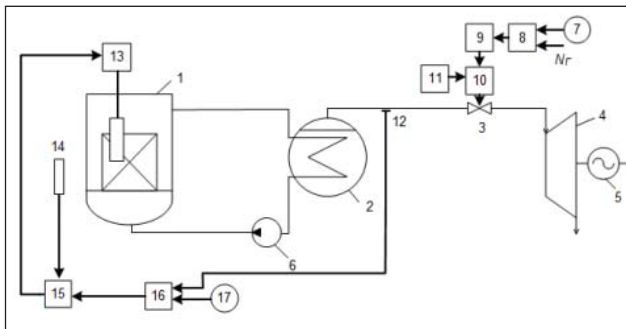


Рис. 1. Принципиальная схема регулирования энергоблоков с реактором ВВЭР-1000, реализующая программу регулирования с постоянным давлением во втором контуре p_2

На рис. 3 изображены: 1 – реактор; 2 – парогенератор; 3 – регулирующие клапаны турбины; 4 – турбина; 5 – генератор; 6 – главный циркуляционный насос; 7 – задатчик электрической мощности генератора; 8 – регулятор мощности энергоблока; 9 – механизм управления турбиной; 10 – сервомотор; 11 – регулятор частоты вращения турбины; 12 – первичный измерительный преобразователь давления пара во втором контуре; 13 – приводы регулирующих стержней; 14 – ионизационная камера; 15 – регулятор нейтронной мощности реактора; 16 – регулятор давления пара во втором контуре; 17 – датчик давления пара во втором контуре.

Программа регулирования с постоянным давлением пара второго контура ($p_2 = const$). В этой программе регулирования (см. рис. 2) уменьшаются значения t_{vX} , t_{SR} и t_{vUX} . Таким образом, ТЭР по

высоте всей АКЗ реактора имеет положительный знак, но в верхней половине реактора этот эффект реактивности проявляется сильнее, чем в нижней, из-за большей разницы изменения температуры теплоносителя. МЭР также имеет положительный знак. Таким образом, энерговыделение в верхней половине реактора будет больше энерговыделения в нижней половине. Для компенсации ТЭР необходимо циклическое воздействие на регулируемую группу ОР СУЗ, что может привести к колебаниям величины АО и последующей возможной потере устойчивости. Кроме того, температурные напряжения в оболочках твэлов повышены из-за большего количества перемещений ОР СУЗ во время проведения маневра мощностью. При эксплуатации энергоблоков с реактором ВВЭР-1000 в основном применяется программа регулирования с $p_2 = const$. Это связано с тем, что энергоблоки преимущественно эксплуатируются в базовом режиме.

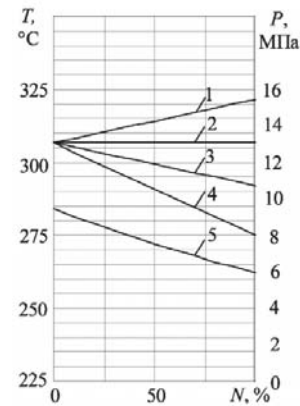


Рис. 2. Характеристика энергоблока ВВЭР-1000 при постоянном давлении во втором контуре:

- 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_2

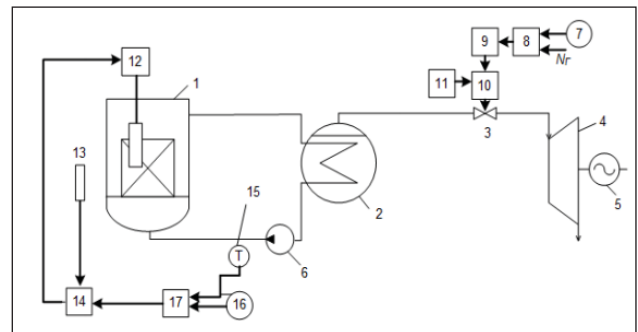


Рис. 3. Принципиальная схема АСР мощностью энергоблока с реактором ВВЭР-1000, функционирующая по программе регулирования с постоянной температурой теплоносителя на входе в АКЗ реактора

На рис. 3 изображены: 1 – реактор; 2 – парогенератор; 3 – регулирующие клапаны турбины; 4 – турбина; 5 – генератор; 6 – главный циркуляционный насос; 7 – задатчик 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 – датчик температуры теплоносителя на входе в АКЗ реактора; 16 – датчик температуры теплоносителя на входе в АКЗ реактора; 17 – регулятор температуры теплоносителя на входе в АКЗ реактора [2].

Программа регулирования с постоянной температурой теплоносителя на входе в АКЗ реактора ($t_{VX} = const$). В этой программе регулирования при переходе с одного уровня мощности на другой температурный и мощностной эффекты реактивности возникают только в верхней половине реактора. Это связано с изменением средней температуры теплоносителя (t_{SR}), температуры теплоносителя на выходе (t_{VUX}) и постоянством температуры теплоносителя на входе в АКЗ реактора. Причем при уменьшении мощности значения t_{VUX} и t_{SR} уменьшаются (рис. 4), температурный и мощностной эффект реактивности будет иметь положительный знак. Таким образом, энерговыделение верхней половины реактора будет больше нижней половины. Такое изменение энерговыделения легко компенсируется изменением положения регулирующей группы ОР СУЗ. К достоинствам этой программы регулирования можно отнести то, что из-за поддержания постоянного значения t_{VX} в нижней половине АКЗ

реактора отсутствует изменение температурного эффекта реактивности, а значит, нижняя половина АКЗ остается 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.

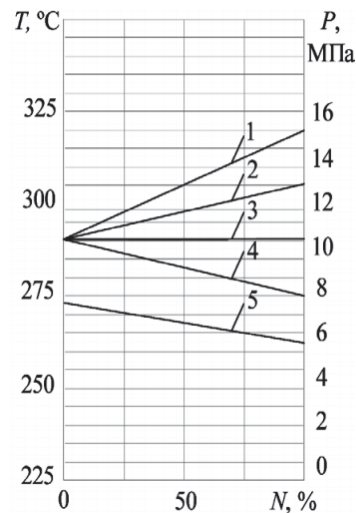


Рис. 4. Характеристика энергоблока ВВЭР 1000 при постоянной температуре теплоносителя на входе в АКЗ реактора:

- 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_{II}

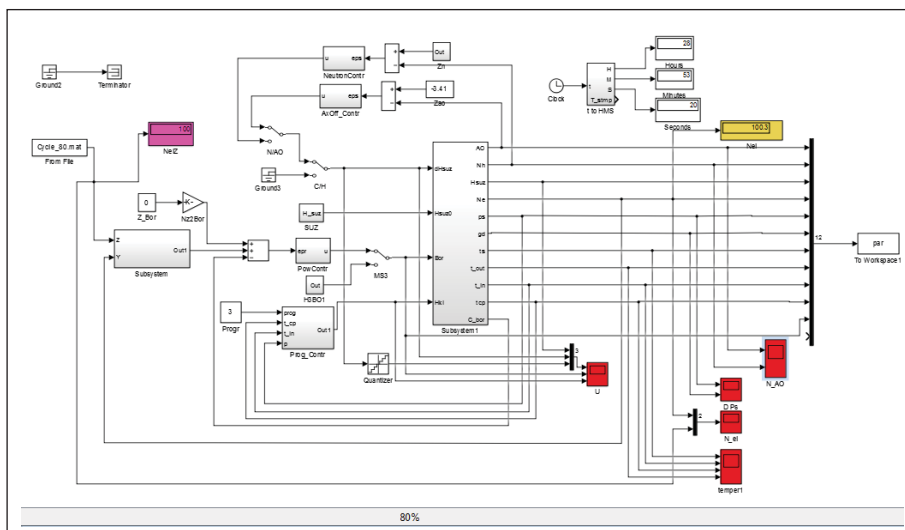


Рис. 5. Имитационная модель реактора ВВЭР-1000

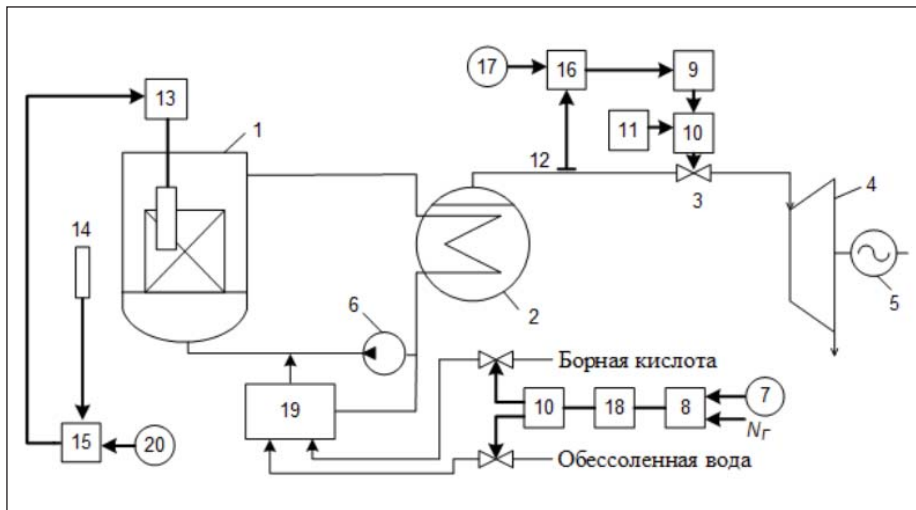


Рис. 6. Усовершенствованная принципиальная схема регулирования энергоблоков с реактором ВВЭР-1000, реализующая программу регулирования с постоянным давлением во втором контуре p_1

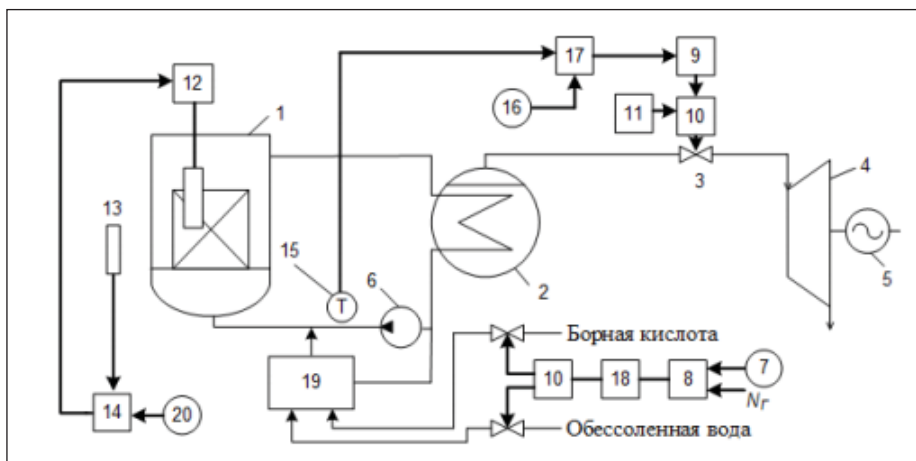


Рис. 7. Усовершенствованная принципиальная схема АСР мощностью энергоблока с реактором ВВЭР-1000, функционирующая по программе регулирования с постоянной температурой теплоносителя на входе в АКЗ реактора

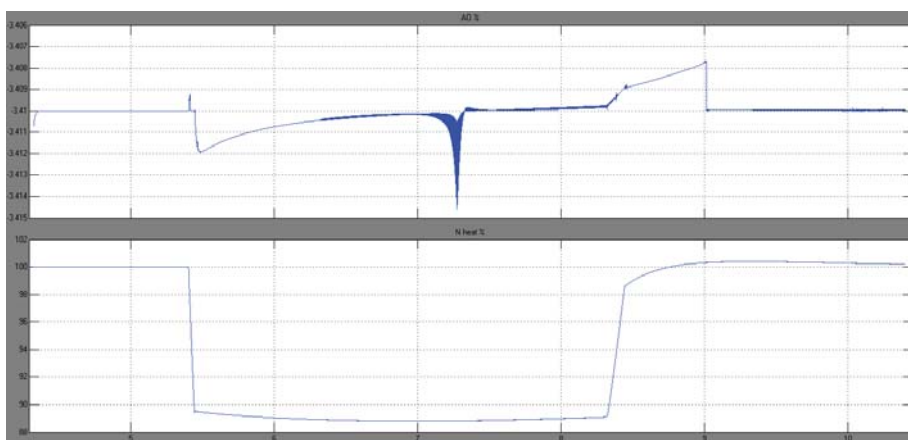


Рис. 8. График изменения АО за 36 часов работы реактора, функционирующий по усовершенствованной программе регулирования с постоянным давлением во втором контуре

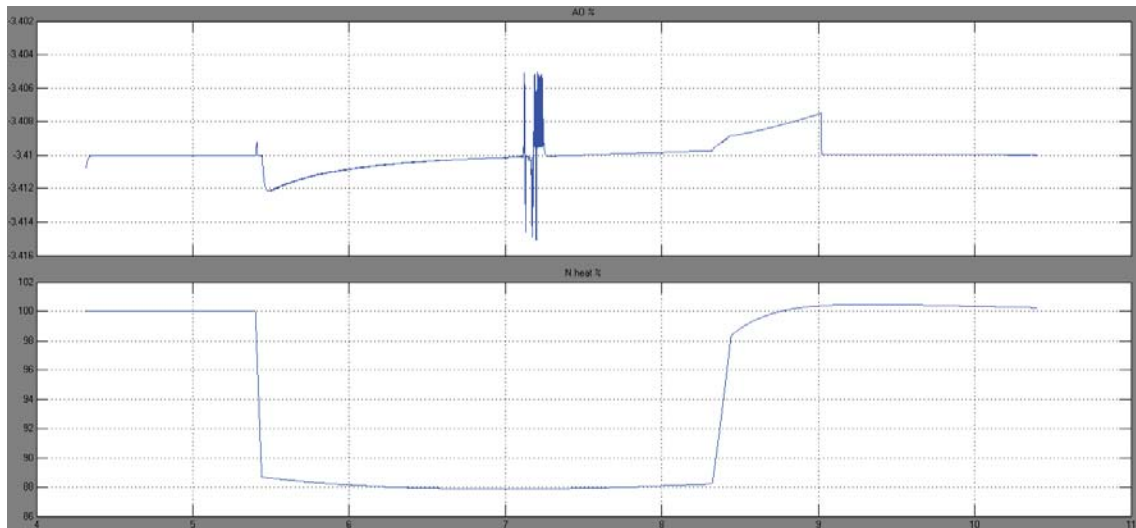


Рис. 9. График изменения АО за 36 часов работы реактора, функционирующий по усовершенствованной программе регулирования с постоянной температурой теплоносителя на входе в АКЗ реактора

В среде Matlab, в пакете Simulink, была разработана имитационная модель работы реактора ВВЭР-1000 с нагрузкой 80% (рис. 5).

В ходе исследовательской работы, были разработаны и приведены (рис. 6,7) усовершенствованные принципиальные схемы для реализации двух выбранных программ регулирования (постоянного давления во втором контуре реактора, постоянная температура теплоносителя на входе в реактор).

При моделировании усовершенствованных принципиальных схем АСР были получены следующие графики изменения АО в режиме маневра мощностью со 100% до 80% за 36 часов работы реактора ВВЭР-1000.

Исходя из полученных графиков, можно сделать вывод, что аксиальный офсет за 36 часов

работы ректора в режиме маневрирования мощностью реактора ВВЭР-1000, со 100% до 80% и обратно на всем промежутке времени изменяется в незначительном диапазоне.

Вывод. В ходе сопоставления двух программ регулирования реактора ВВЭР-1000 по аксиальному офсету было определено, что за 36 часов работы реактора в режиме маневрирования со 100% до 80% и обратно на всем промежутке времени изменяется в незначительном диапазоне. Вследствие чего программа регулирования с постоянным давлением во втором контуре и программа регулирования с постоянной температурой теплоносителя на входе в АКЗ реактора, обеспечивают безопасную эксплуатацию энергоблока и могут использоваться 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 г. 384 с.
3. Демченко В.А. Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС, Одесса, 2001 г. 308 с.
4. Пелых С.Н. Способ стабилизации аксиального распределения нейтронного поля при маневрировании мощностью ВВЭР-1000. Ядерная и радиационная безопасность. 2011. №1. С. 27-32.
5. Бундюк А. М. Методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Компьютерные системы анализа эффективности в энергетике», Одесса, 2005 г. 174 с.

ПОРІВНЯННЯ ПОСТІЙНИХ РЕГУЛЮВАННЯ В РЕГУЛЯТОРІ ПОТУЖНОСТІ РЕАКТОРА ПРИ ПРОГРАМІ РЕГУЛЮВАННЯ З ПОСТІЙНИМ ТИСКОМ В ДРУГОМУ КОНТУРІ Й ПОСТІЙНОЮ ТЕМПЕРАТУРОЮ ТЕПЛОНОСІЯ НА ВХОДІ В АКЗ РЕАКТОРА ПО АКсіАЛЬНОМУ ОФСЕТУ

У статті розглянуто дві програми регулювання потужності реактора, зокрема програма з постійним тиском у другому контурі й постійна температура входу в реактор. Наведено принципові схеми програм регулювання. Розроблено вдосконалені схеми регулювання. Розроблено імітаційну модель реактора ВВЕР-1000. Здійснено порівняння двох програм регулювання за аксіальним офсетом при 36 годинах роботи реактора в режимі маневрування зі 100% до 80%.

Ключові слова: програма регулювання, потужності реактора ВВЕР-1000, АКЗ, система автоматичного регулювання, імітаційна модель, аксіальний офсет.

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

The article considers two programs of reactor power control, a program with a constant pressure in the second circuit and a constant temperature of the reactor inlet. The basic schemes of control programs are given. Improved control schemes have been developed. A simulation model of the WWER-1000 reactor is developed. The comparison of two programs of regulation on the axial offset, at 36 hours of operation of the reactor in the maneuvering mode from 100% to 80% is made.

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