

УДК 621.311.25:621.039:661.654

**Давидченко Д.В.**

Одесский национальный политехнический университет

**Беглов К.В.**

Одесский национальный политехнический университет

**Чмелев Е.И.**

Южноукраинская АЭС

## ИССЛЕДОВАНИЕ КАСКАДНОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ ЭНЕРГОБЛОКА АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

*В статье рассматривается реализация автоматизированной системы регулирования мощности энергоблока атомной электростанции с реактором ВВЭР-1000. Предложена каскадная схема регулирования, которая позволяет учесть нелинейные свойства как самой реакторной установки, так и канала управления при борном регулировании.*

**Ключевые слова:** энергоблок АЭС, маневрирование, мощность, борное регулирование, система регулирования, каскадный регулятор.

**Постановка проблемы.** В плане действий на 2016 год Кабинет Министров Украины запланировал до 31 декабря ввести маневрирование энергоблоками атомных станций для суточного регулирования мощности объединенной энергосистемы. В настоящее время мощность энергоблоков с реакторами ВВЭР-1000 регулируется с помощью органов регулирования системы управления и защиты ядерного реактора (далее – ОРСУЗ). Однако последние исследования показывают, что с точки зрения надежной эксплуатации ТВЭЛов лучшим методом регулирования является изменение концентрации жидкого поглотителя в теплоносителе первого контура. Однако пока система автоматического регулирования мощности энергоблока, с помощью которой можно провести суточное маневрирование мощностью, не реализована.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В ряде работ были показаны результаты исследований энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 [1, с. 2956; 2, с. 22] с точки зрения влияния изменения концентрации жидкого поглотителя на его мощность. В качестве поглотителя используется раствор борной кислоты. Показано, например, что с точки зрения управления реактор по каналу «расход борной кислоты – концентрация борной кислоты» является нелинейным объектом.

Нелинейность состоит в том, что статические и динамические свойства существенно отличаются друг от друга при изменении направления воздействия, т. е. при вводе борной кислоты и при её выводе [3, с. 18].

Другой фактор, который необходимо учитывать при маневре мощностью – это йодная яма. Йодная яма, или ксеноновое отравление – состояние ядерного реактора после снижения его мощности, характеризующееся накоплением короткоживущего изотопа ксенона  $^{135}\text{Xe}$ , с периодом полураспада 9,14 часа, образующегося в результате радиоактивного распада изотопа йода  $^{135}\text{I}$ . Этот процесс приводит к временному появлению значительной отрицательной реактивности, что, в свою очередь, делает невозможным вывод реактора на проектную мощность в течение определённого периода.

С другой стороны, отравление ксеноном  $^{135}\text{Xe}$  позволяет уменьшить мощность реактора «мягко», не нанося управляющее воздействие с помощью ОРСУЗ и, соответственно, не деформируя поле энерговыделения в активной зоне. В работе [4, с. 104] была предложена так называемая «комбинированно-компромиссная программа регулирования». Эта программа регулирования основана на том факте, что длительность йодной ямы определяется периодом полураспада  $^{135}\text{Xe}$

и позволяет уменьшать мощность реактора во время ночного минимума нагрузки.

Таким образом, если наносить управляющее воздействие по определённому закону, то можно добиться дополнительного снижения мощности за счет отравлением ксеноном. График изменения электрической мощности показан на рисунке 1.

**Постановка задания.** Целью работы является синтез регулятора мощности энергоблока, учитывающего физические свойства реактора, а именно такое явление, как «йодная яма».

**Изложение основного материала исследования.** После проведённых исследований энергоблока АЭС были выработаны следующие требования к АСР мощности.

Во-первых, для реализации комбинированно-компромиссной программы регулирования мощностью энергоблока на ОР СУЗ должен воздействовать регулятор аксиального офсета. Мощность должна поддерживаться с помощью регулятора концентрации борной кислоты [5, с. 51].

Во-вторых, было определено, что для получения эффекта «йодной ямы» концентрация борной кислоты должна оставаться постоянной во время сниженного значения мощности. То есть регулятор не должен реагировать на изменение мощности.

В-третьих, при возврате энергоблока на максимальную мощность концентрация борной кислоты должна отличаться от начального значения, которое было перед манёвром, для компенсации

изменений концентрации  $^{135}\text{Xe}$ , вызванных манёвром.

И в-четвёртых, регулятор должен учитывать нелинейные свойства объекта регулирования.

Таким образом, в процессе синтеза АСР мощности энергоблока с изменением концентрации жидкого поглотителя были рассмотрены несколько схем АСР. Принята к реализации каскадная схема регулирования, показанная на рисунке 2. Моделирование проводилось в среде Simulink пакета MatLab.

На рисунке приняты следующие обозначения:

Power Unit – субблок, описывающий модель энергоблока АЭС;

NeutronContr – регулятор нейтронной мощности реактора;

AxOff\_Contr – регулятор аксиального офсета;

Stab Controller – стабилизирующий регулятор концентрации борной кислоты;

Correction Controller – корректирующий регулятор мощности энергоблока;

Prog\_Contr – программный регулятор;

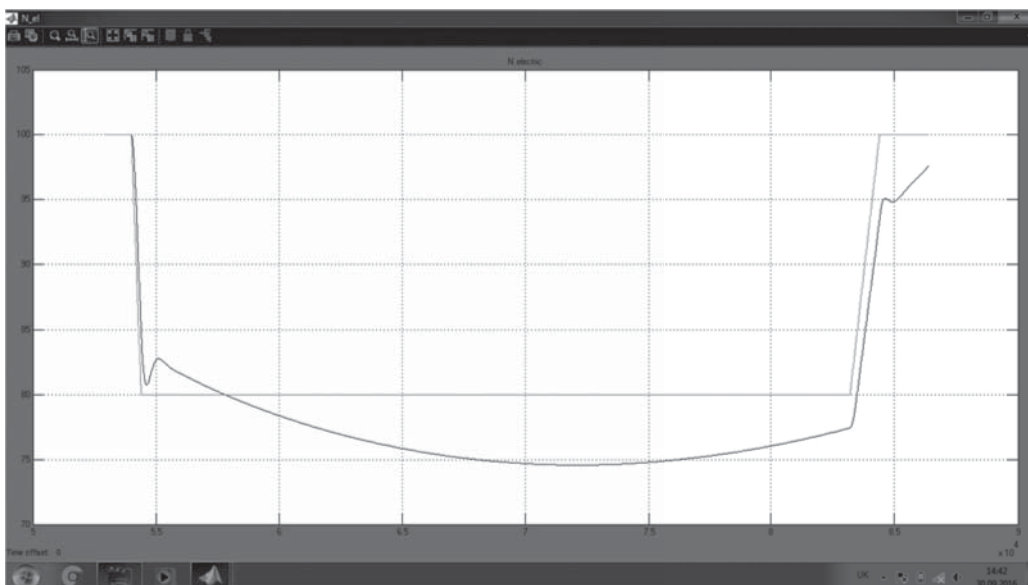
Z\_N – задатчик регулятора нейтронной мощности;

Z\_AO – задатчик регулятора аксиального офсета;

Z\_Bor – задатчик регулятора концентрации борной кислоты;

From File – программа изменения мощности энергоблока;

SUZ – начальное положение ОР СУЗ;



**Рис. 1.** График изменения электрической мощности по заданной программе 1 – задание на изменение мощности; 2 – изменение электрической мощности энергоблока

Progr – номер програми регулювання:  
 1 – підтримання середньої температури теплоносія, 2 – підтримання температури теплоносія на вході в реактор; 3 – підтримання тиску пара перед турбиною.

Блоки з правого краю рисунка служать для вивода графіків.

В даній статті розглядається робота каскадної системи регулювання, в склад якої входять регулятор концентрації борної кислоти Stab Controller і регулятор потужності енергоблоку Correction Controller.

Стабілізуючий регулятор представляє собою стандартний регулятор, що працює по

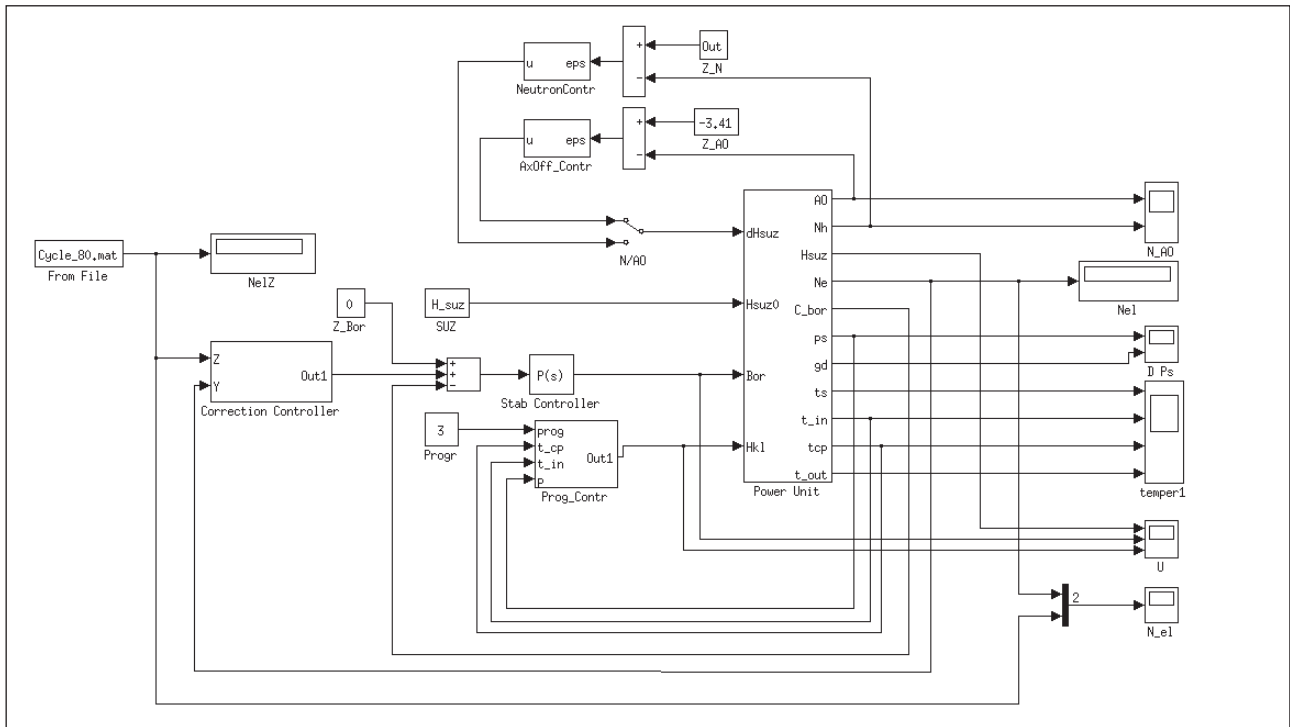


Рис. 2. Схема моделювання АСР потужності енергоблоку по комбіновано-компромісній програмі

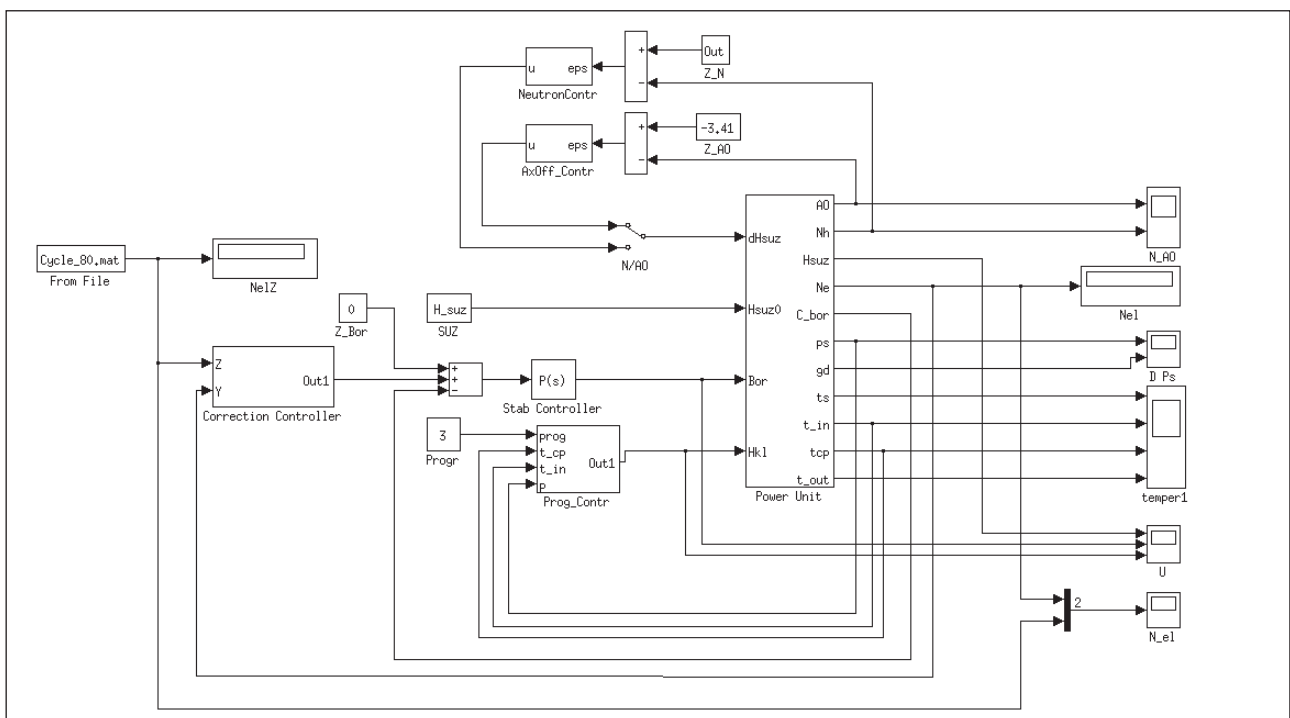


Рис. 3. Структурна схема коректуючого регулятора потужності енергоблоку

ПИ-закону. А корректирующий регулятор имеет структуру, представленную на рисунке 3.

Данный регулятор имеет следующие особенности. Во-первых, используется два регулятора Корр\_Р и Корр\_РІ. Первый работает при снижении мощности и реализует П-закон регулирования, второй работает при её увеличении и реализует ПИ-закон. Это необходимо для выполнения второго и третьего требований к АСР мощности. При П-законе имеется статическая ошибка регулирования, которая и позволяет добиться снижения мощности нанесением минимального управляющего воздействия с последующим снижением за счет отравления реактора. ПИ-закон позволяет вывести энергоблок на заданную (номинальную) мощность уже без статической ошибки.

Второй особенностью корректирующего регулятора является схема выбора регулятора. Сигнал по заданию электрической мощности дифференцируется и сравнивается с нулём. Если значение меньше нуля, т. е. задание уменьшается, включается первый регулятор и понижение мощности происходит по П закону. Если дифференцируемый сигнал меньше нуля, в работу включается

ПИ регулятор, который работает при повышении мощности. Триггер нужен для фиксации состояния переключателя регуляторов.

Третьей особенностью корректирующего регулятора является охват обоих внутренних регуляторов локальной обратной связью как по управляющему воздействию, вырабатываемому самим регулятором, так и по управляющему воздействию, подающемуся на общий выход корректирующего регулятора. Такая схема была предложена в [6, с. 212] и позволяет реализовать безударное переключение регуляторов.

После синтеза АСР было проведена серия модельных экспериментов по манёвру мощностью. А именно проводилось снижение электрической мощности реактора со 100% до 90%, 85% и 80%, выдержка на сниженной мощности в течение 8 часов и подъем до 100%. Графики изменения мощности показаны на рисунке 4.

На рисунке приняты следующие обозначения:

- 1 – Изменение мощности при задании 90%;
- 2 – Задание на изменение мощности до 90%;
- 3 – Изменение мощности при задании 85%;
- 4 – Задание на изменение мощности до 85%;

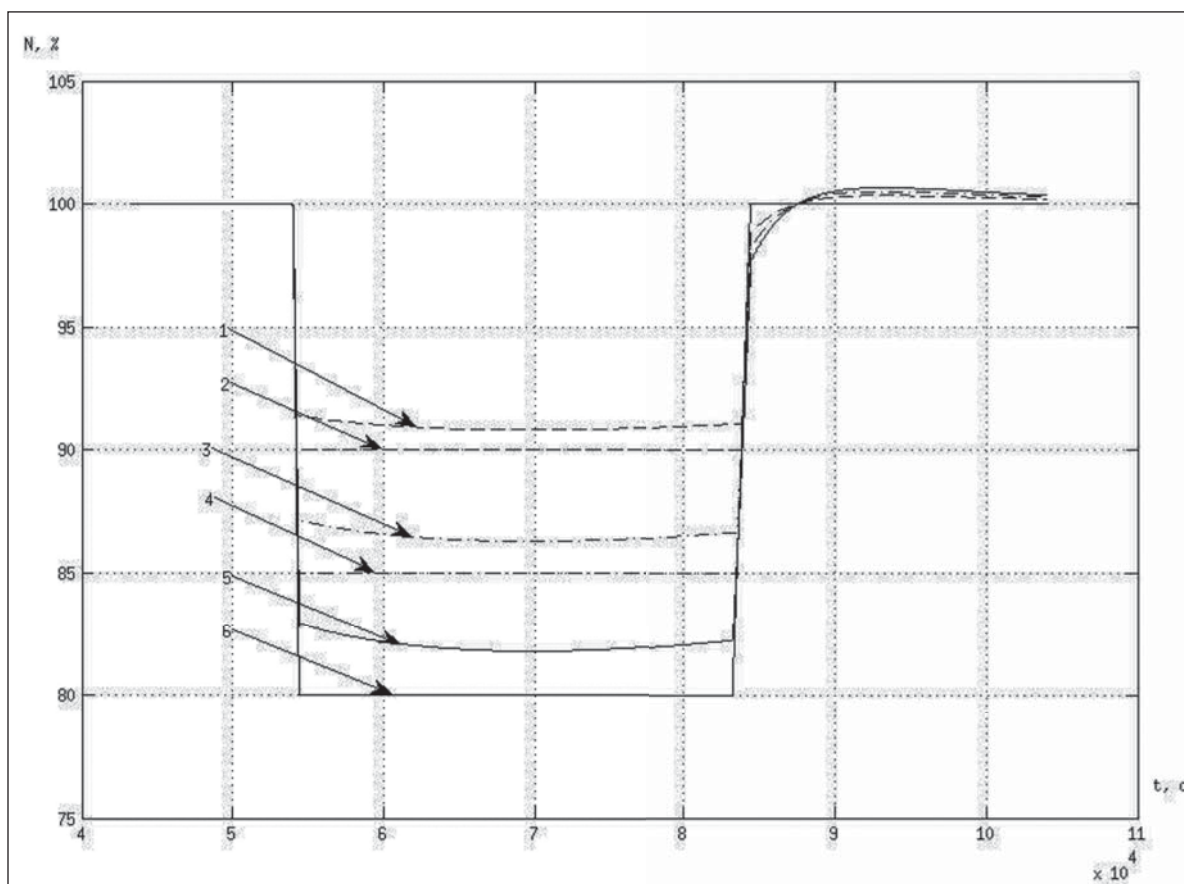


Рис. 4. График изменения мощности энергоблока

- 5 – Изменение мощности при задании 80%;
- 6 – Задание на изменение мощности до 80%.

Как видно из рисунка, электрическая мощность снижалась на величину меньшую, чем было задание регулятору. Этот недостаток достаточно легко устраним соответствующей настройкой корректирующего регулятора.

Большой интерес представляет величина уменьшения мощности от отравления  $^{135}\text{Xe}$ . Из приведённых рисунков видно, что величина йодной ямы различна при различных уровнях снижения мощности. И составляет  $\Delta N=1,78\%$ ,  $\Delta N=1,27\%$ ,  $\Delta N=0,80\%$  при снижении мощности до 80, 85 и 90% соответственно. Этот факт хорошо согласуется с теорией физики ядерных реакторов [7]. Однако величина йодной ямы зависит не только от мощности, но и от других технологических параметров. Поэтому необходимо провести дополнительные исследования и определить зависимость между величиной задания и достигаемым значением мощности.

**Выводы.** В качестве выводов по работе, можно отметить следующее: для обеспечения работы энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-

1000 в маневренном режиме необходимо использовать каскадную схему управления мощностью. При этом внутренний контур регулятора должен поддерживать концентрацию борной кислоты в теплоносителе первого контура АЭС, компенсируя внутренние возмущения на активную зону реактора. Внешний контур регулятора должен поддерживать заданное значение электрической мощности энергоблока и изменять его в соответствии с требованиями диспетчера энергосистемы.

Существующие классические законы регулирования (П, ПИ, ПИД) не обеспечивают требуемой точности поддержания электрической мощности энергоблока. Этот факт можно объяснить нелинейными свойствами объекта управления, а именно таким понятием как «йодная яма».

Для обеспечения заданных требований к качеству переходного процесса регулирования мощности энергоблока АЭС необходимо провести дополнительные исследования и рассмотреть другие законы формирования управляющего воздействия. Например, адаптивные или нечеткие алгоритмы управления.

#### Список литературы:

1. Pelykh S.N., Maksimov M.V. Cladding rupture life control methods for a power-cycling WVER-1000 nuclear unit. Nuclear Engineering and Design. 2011. Vol. 241. № 8. P. 2956 – 2963.
2. Медведєв Р.Б., Сангінова О.В. Оптимальне керування процесом зміни концентрації борної кислоти у теплоносії першого контуру АЕС з ВВЕР-1000. Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». 2002. № 2 (22). С. 22
3. Волошкіна О.О., Бєглов К.В., Плахотнюк О.А. Дослідження регулятора концентрації рідкого поглинача енергоблоку АЕС. Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. 2015. Т. 7. № 4. С. 18–24.
4. Maksimov M. V., Beglov K. V., Tsiselskaya T. A. A model of a power unit with WVER-1000 as an object of power control. Works of the Odessa Polytechnic University. 2012. Rel. 1(38). P. 104 – 106.
5. Tsiselskaya T. O., Kovtun A. V. An automated boron management system for WVER-1000 nuclear reactors. Праці Одеського політехнічного університету. 2015. Вип. 1 (45). P. 51 – 57.
6. Батяшов С.В., Громаков Е.И. Безударное переключение режимов с ручного на автоматический на примере САР уровня парового котла. Современная техника и технологии: сборник трудов XIX международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. (Томск, 15–19 апреля 2013 г.). Томск: ТПУ, 2013. С. 212 – 213.
7. Дементьев Б.А. Кинетика и регулирование ядерных реакторов: учебн. пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1986. 272 с.

## ДОСЛІДЖЕННЯ КАСКАДНОЇ АВТОМАТИЗОВНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ПОТУЖНОСТЮ ЕНЕРГОБЛОКУ АТОМНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

*Відповідно до енергетичної стратегії Кабінету Міністрів України енергоблоку атомних електростанцій необхідно перевести у маневрений режим. Однак системи автоматичного регулювання потужністю реактора, що експлуатуються на тепер, не здатні забезпечити задану якість перехідних процесів при зміні потужності енергоблоку. У статті розглядається реалізація автоматизованої системи регулювання потужності енергоблоку атомної електростанції з реактором ВВЕР-1000. Запропоновано каскадну схему регулювання, яка дозволяє врахувати нелінійні властивості як самої реакторної установки, так й каналу управління при борному регулюванні. Тим самим домогтися прийнятної якості підтримки потужності енергоблоку при забезпеченні вимог щодо безпечної експлуатації реакторної установки.*

**Ключові слова:** енергоблок АЕС, маневрування, потужність, борне регулювання, система регулювання, каскадний регулятор.

**RESEARCH OF THE CASCADE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM  
OF THE NUCLEAR POWER PLANT POWER**

*In accordance with the energy strategy of the Cabinet of Ministers of Ukraine, the power units of nuclear power plants must be converted to a maneuverable regime. However, the systems used for automatic control of reactor power are not capable of providing a given quality of transient processes when the power unit's power is changed. The article deals with the implementation of an automated power regulation system for a power unit of a nuclear power plant with a VVER-1000 reactor. A cascade scheme is proposed that consider the non-linear properties of both the reactor plant itself and the control channel for boron control. Thus, to achieve an acceptable quality of maintaining the unit's power while ensuring the requirements for the safe operation of the reactor equipment.*

**Key words:** nuclear power unit, maneuvering, power, boron control, control system, cascade controller.