Вестник Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», 2025, т. 14, № 2, с. 157 – 162

https://doi.org/10.26583/vestnik.2025.2.7

Оригинальная статья / *Original paper*

УДК 681.516.33

Алгоритм автоматического управления нейтронными параметрами и теплотехническим оборудованием реакторной установки со свинцовым теплоносителем в пусковых режимах

© 2025 г. С. В. Епифанов, А. О. Толоконский

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, 115409, Россия

По мере развития уровня автоматизации ядерных реакторов, постепенно автоматические регуляторы от уровня поддержания отдельных параметров перешли к групповому и затем к функционально-групповому управлению. Алгоритмы управления современных реакторных установок используют функционально-групповое управление, позволяющее вместо прямых команд формировать команды общеблочного уровня. На данный момент ведется проектирование и строительство новой реакторной установки со свинцовым теплоносителем. Для отработки алгоритмов нормальной эксплуатации и алгоритмов безопасности был создан стенд моделирования, позволяющий установить на него разработанные модели реакторной установки (технологический объект управления), модели аппаратуры, технологического оборудования и объединить их в единой среде взаимодействия. В данной статье рассматривается возможность применения и реализации алгоритма управления новой реакторной установкой со свинцовым теплоносителем, которая дополняет штатные алгоритмы системы управления и защиты (СУЗ) по нейтронным и технологическим параметрам. Для этого на стенде моделирования была инсталлирована подготовленная заранее модель реакторной установки (РУ) и модели аппаратуры СУЗ. Модели объекта управления и СУЗ были дополнены интерфейсом обмена и алгоритмом, позволяющим управлять режимами работы технологического оборудования на предпусковой и пусковой стадиях работы РУ. В результате был разработан алгоритм, позволяющий исключить непосредственное воздействие оператора РУ на технологические операции при нормальной эксплуатации с возможностью перехода в ручной режим при появлении условий, запрещающих дальнейшее выполнение операций.

Ключевые слова: реакторная установка, автоматическое регулирование, подкритический уровень, оборудование, пуск.

Введение

В современном мире основное строительство энергоблоков атомных электростанций ведется с ядерными энергетическими реакторными установками водо-водяного типа. В Российской Федерации такими установками являются реакторы поколения 3+ типа ВВЭР [1], технология разработки и изготовления которых достаточно хорошо отработана [2], но все равно требует целевой финальной проработки для каждого энергоблока. На данный момент есть понимание, что для оптимального использования всех запасов уранового топлива необходимо вовлекать в оборот природный или обедненный уран-238 [3]. Так как для деления этого изотопа требуются нейтроны с энергией более 1 МэВ, принято решение о разработке и строительстве реакторов со спектром нейтронов, в основном находящихся в нужном диапазоне энергий (реакторов на быстрых нейтронах), и проработаны вопросы двухкомпонентной энергетики [4].

✉ С.В. Епифанов: serpiph@yandex.ru

Поступила в редакцию: 23.02.2025
После доработки: 11.03.2025
Принята к публикации: 25.03.2025

EDN JJQHKT

В России в настоящее время успешно работают реакторы с натриевым теплоносителем (БН-600, БН-800), но для более безопасной работы, а также для реализации возможности маневрирования мощностью реактора ведется строительство реакторной установки поколения 4 со свинцовым теплоносителем (БРЕСТ-ОД-300) [5 – 7]. При работе на энергетическом уровне для данной реакторной установки разработаны схемы автоматического и ручного управления, включающие поддержание параметров всей реакторной установки, как нейтронных, так и теплотехнических. Для повышения уровня автоматизации реакторов со свинцовым теплоносителем предложен дополнительный уровень исполнения алгоритмов на этапе пуска, включающий не только поддержание заданных параметров работы, но и управление режимами оборудования, включая подготовку и пуск агрегатов энергоблока [8].

Материалы и методы

В качестве технологического объекта управления (ТОУ) выбрана реакторная установка со свинцовым теплоносителем средней мощности. В разработанной математической компьютерной модели установки на базе расчетных алгоритмов FACT-BR [9] реализованы следующие подмодели:

– активная зона реакторной установки;

– первый контур со свинцовым теплоносителем и главными циркуляционными насосными агрегатами (ГЦНА) и парогенераторами;

– второй контур с упрощенной моделью турбогенератора и основным технологическим оборудованием (клапаны, задвижки, насосы).

Для управления сервоприводами стержней-поглотителей в активной зоне и технологическим оборудованием первого и второго контура в модели предусмотрены точки управления и контроля, позволяющие изменять работу элементов и имитировать показания датчиков контроля.

Модель ТОУ запускается совместно с моделями системы управления и защиты для замыкания контура управления. Совместная работа моделей ТОУ и СУЗ выполняется в среде обмена данными КРОСС [10], позволяющая обеспечить передачу и диагностику исполняемых моделей в реальном времени.

Результаты

Для создания автоматического управления состоянием технологического оборудования было решено разработать внешний модуль управления, взаимодействующий с рабочими моделями ТОУ и СУЗ, чтобы уменьшить объём изменений основных схем управления и исключить этап верификации существующих алгоритмов.

В штатные модели были добавлены дополнительные интерфейсы, дополнившие штатные алгоритмы возможностью автоматического включения, отключения или установки различных режимов технологического оборудования. После изменения конфигурации интерфейсов обмена распределенная база данных реального времени была расширена новыми переменными и добавлена передача новых данных между компьютерными узлами, на которых исполняются компьютерные модели. Общая схема взаимодействия алгоритмов между собой представлена на рис. 1.

На следующем этапе подготовлены алгоритмы передачи команд в рабочие модели ТОУ и СУЗ и получения данных из моделей для анализа, с использованием среды РБДРВ. Данные алгоритмы позволяют контролировать состояние оборудования с учетом различных временных задержек при прохождении команд и интервалов времени, необходимых для достижения ожидаемого состояния в моделях.

После подготовки необходимых алгоритмических блоков разработан алгоритм, описывающий требуемые при выводе реактора в критическое состояние операции по управлению оборудованием. Данный алгоритм дополнен командами управления штатными автоматическими регуляторами, имеющимися в модели системы управления и защиты. В полученном алгоритме учтены необходимости в выполнении промежуточных этапов, при которых работа штатных автоматических алгоритмов приостанавливается, выполняются переключении на оборудовании с контролем выполнения операций. После подтверждения успешного выполнения операций дается команды на продолжение работы штатных автоматических регуляторов.

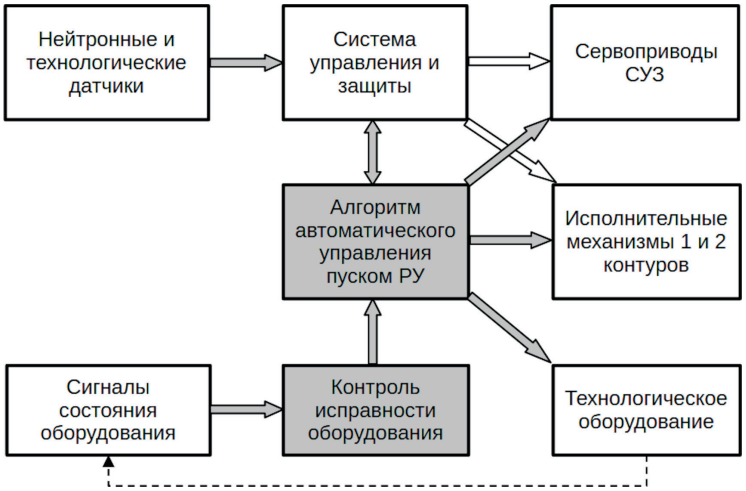

Рис. 1. Общая схема взаимодействия моделей штатных регуляторов, модели РУ и алгоритма управления пуском РУ. Используемые сигналы и разработанные алгоритмы выделены серым цветом

Разработанный алгоритм проверен в различных режимах:

– штатное выполнение всех операций по выводу реакторной установки на уровень 1 % от номинального уровня мощности;

– несанкционированное изменение режимов работы оборудования путем подачи ручных команд на изменение их режимов работы;

– ручное частичное включение оборудование с последующим включением разработанного автоматического алгоритма в работу.

В процессе выполненных проверок замечаний в работе алгоритмов не обнаружено. Пример работы алгоритма при подъеме мощности РУ приведен на рис. 2.

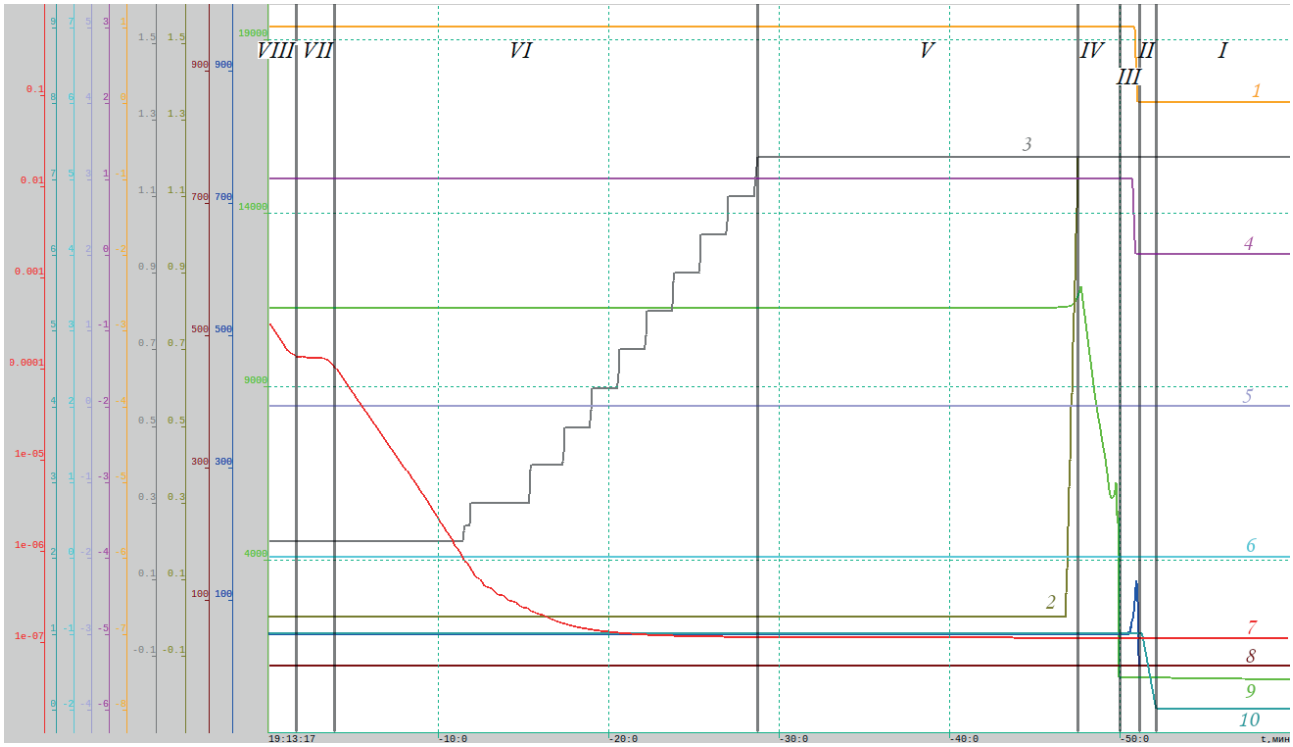

Рис. 2. Пример работы модели автоматического управления технологическим оборудованием: *1* – степень открытия ОЗПВ1 петли 1; *2* – положение стержня 1АЗ; *3* – положение стержня 1 КР; *4* – степень открытия ОЗПВ2 петли 1; *5* – положение РПК 1ПГ петли 1; *6* – положение РПК 2ПГ петли 1; *7* – нейтронная мощность РУ; *8* – расход через ПЭН1; *9* – расход через ГЦНА; *10* – положение клапана рециркуляции

На рисунке указаны следующие этапы:
I – проверка состояния аппаратуры;
II – открытие клапана рециркуляции питательной воды;
III – включение насосов циркуляции второго контура;
IV – включение насосов первого контура;
V – взвод системы АЗ и проверка готовности оборудования к началу подъема мощности;
VI – включение пускового регулятора;
VII – выход на промежуточный уровень и проверка оборудования;
VIII – включение пускового регулятора.

Заключение

В настоящей работе получена модель автоматического управления технологическим оборудованием реакторной установки со свинцовым теплоносителем. Данная модель дополнила штатные алгоритмы поддержания уровня нейтронной мощности реактора и режимов работы технологического оборудования возможностью изменения режимов работы по заданному алгоритму и контролем параметров оборудования в процессе его управления. В ходе испытаний разработанный алгоритм показал устойчивую работу.

Финансирование

Авторы заявляют об отсутствии источников финансирования.

Конфликт интересов

Конфликт интересов отсутствует.

Вклад авторов

Епифанов С.В. – анализ нормативной базы, постановка эксперимента; выполнение экспериментальных работ, обработка результатов; проведение численных расчетов; разработка математической модели; выполнение измерений, анализ экспериментальных данных, выявление закономерностей, подбор литературных источников, редактирование текста статьи; первичная обработка результатов исследования, выявление закономерностей, проведение расчетов и подготовка заключения; подготовка текста статьи; участие в проведении исследования и обсуждении результатов.

Толоконский А.О. – формулировка идеи и целей исследования, постановка задачи, выбор методов исследования; разработка концепции исследования, разработка методик измерения; первичная обработка результатов исследования, выявление закономерностей, проведение расчетов и подготовка заключения; участие в проведении исследования и обсуждении результатов.

Список литературы

1. *Альмасри Х.Ф.* Оценка качества регулирования и оптимизация настроек автоматического регулятора мощности реактора ВВЭР-1000 // Глобальная ядерная безопасность, 2016. № 4(21). С. 61–68.

2. *Salman A.E., Kandil M.M., Ateya A.A.E., Roman M.R.* Control of the VVER-1000 core power using optimized T-S fuzzy controller based on nonlinear point kinetic model // Progress in Nuclear Energy, 2025. V. 180. P. 105560. DOI: https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2024.105560.

3. *Шаповаленко В.В.* Реализация замкнутого ядерного топливного цикла в России // Энергетические установки и технологии, 2022. Т. 8. № 1. С. 38–42.

4. *Андрианов А.А., Купцов И.С., Осипова Т.А. и др.* Оптимизационные модели двухкомпонентной ядерной энергетики с тепловыми и быстрыми реакторами в замкнутом ядерном топливном цикле // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2018. № 3. С. 100–112. DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2018.3.09.

5. *Адамов Е.О., Каплиенко А.В., Орлов В.В. и др.* Быстрый реактор со свинцовым теплоносителем БРЕСТ: от концепции к реализации технологии // Атомная энергия, 2020. Т. 129. № 4. С. 185–194.

6. *Драгунов Ю.Г., Лемехов В.В., Моисеев А.В., Смирнов В.С.* Реактор на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем (БРЕСТ) // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2015. № 3. С. 97–103.

7. *Прец А.А., Сапар А.Д.* Возможность реализации замкнутого ядерного топливного цикла на основе РУ БРЕСТ-ОД-300 // Инновации в технологиях и образовании: сборник статей участников XI Международной научно-практической конференции, Белово, 27–28 апреля 2018 г. Белово: КГТУ им. Т.Ф. Горбачева, 2018. Ч. 1. С. 214–216.

8. *Епифанов С.В., Колибас Г.В., Толоконский А.О.* Особенности автоматического регулятора мощности РУ со свинцовым теплоносителем // Физико-технические интеллектуальные системы (ФТИС-2023): Сборник тезисов II Научно-практической конференции, Москва, 07–09 февраля 2023 г. Тамбов: Юлис, 2023. С. 23.

9. *Баловнев А.В., Кузнецов П.Б., Жирнов А.П.* FACT-BR. Патент РФ № 2021611743. 2021.

10. *Кораблев А.В., Трифонов А.А., Санарин Д.Б. и др.* Программный комплекс распределенных средств сетевой обработки «КРОСС» (ПК «КРОСС»). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021681282. РФ, 2021.

Vestnik Natsional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta «MIFI», 2025, vol. 14, no. 2, pp. 157–162

Algorithm for automatic control of neutron parameters and nuclear power plant equipment of a nuclear power plant with lead coolant in start-up modes

S. V. Epifanov ✉, A. O. Tolokonskiy

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia
✉ ruserpiph@yandex.ru

Received February 23, 2025; revised March 11, 2025; accepted March 25, 2025

As the level of automation of nuclear reactors developed, gradually automatic regulators changed from the level of maintaining individual parameters to group and then to functional-group control. Control algorithms of modern nuclear power plants use functional-group control, which allows to send commands of the common unit level instead of direct commands. Nowadays, design and construction of a new nuclear power plant with lead coolant is underway. To work out the normal operation algorithms and safety algorithms, a simulation system was created that allows installing the developed models of the nuclear power plant (process control object), models of equipment, process equipment on it and combining them in a single interaction environment. This article considers the possibility of using and implementing the control algorithm of a new nuclear power plant with lead coolant, which complements the standard algorithms of the control and protection system for neutron and technological parameters. For this purpose, a pre-prepared model of the reactor plant and models of the CPS equipment were installed on the simulation stand. The models of the control object and the CPS were supplemented with an exchange interface and an algorithm that allows controlling the operating modes of the process equipment at the pre-start and start-up stages of the RP. The result was a developed algorithm that eliminates the direct impact of the RP operator on technological operations during normal operation with the possibility of switching to manual mode when conditions appear that prohibit further operations.

Keywords: nuclear reactor, automatic control, subcritical level, equipment, start-up.

References

1. *Almasri H.F.* Ocenka kachestva regulirovaniya i optimizaciya nastroek avtomaticheskogo regulyatora moshchnosti reaktora VVER-1000. [Quality Assessment of Regulation and Optimization of the Power Automatic Regulator Settings of PWR-1000 Reactor]. Global Nuclear safety, 2016. Iss. 4(21). Pp. 61–68 (in Russian).

2. *Salman A.E., Kandil M.M., Ateya A.A.E., Roman M.R.* Control of the VVER-1000 core power using optimized T-S fuzzy controller based on nonlinear point kinetic model. Progress in Nuclear Energy, 2025. Vol. 180. P. 105560. DOI: DOI: https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2024.105560.

3. *Shapovalenko V.V.* Realizaciya zamknutogo yadernogo toplivnogo cikla v Rossii [Implementation of the closed nuclear fuel cycle in Russia]. Energeticheskie ustanovki i tekhnologii, 2022. Vol. 8. Iss 1. Pp. 38–42 (in Russian).

4. *Andrianov A.A., Kuptsov I.S., Osipova T.A. [et al.].* Optimizacionnye modeli dvuhkomponentnoj yadernoj energetiki s teplovymi i bystrymi reaktorami v zamknutom yadernom toplivnom cikle [Optimization models of two-component nuclear power with thermal and fast reactors in a closed nuclear fuel cycle]. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Yadernaya energetika, 2018. Iss. 3. Pp. 100–112. DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2018.3.09 (in Russian).

5. *Adamov E.O., Kaplienko A.V., Orlov V.V. [et al.].* Bystryj reaktor so svincovym teplonositelem BREST: ot koncepcii k realizacii tekhnologii [Fast reactor with lead coolant BREST: from Concept to Technology Implementation]. Atomnaya energiya, 2020. Vol. 129. Iss. 4. Pp. 185–194 (in Russian).

6. *Dragunov Yu.G., Lemekhov V.V., Moiseev A.V., Smirnov V.S.* [Fast neutron reactor with lead coolant (BREST)]. Problemy mashinostroeniya i avtomatizacii, 2015. No. 3. Pp. 97–103 (in Russian).

7. *Peretz A.A., Canap A.D.* [The possibility of implementing a closed nuclear fuel cycle based on BREST-OD-300]. Innovacii v tekhnologiyah i obrazovanii: sbornik statej uchastnikov XI mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii, Belovo, 27–28 aprelya 2018 goda. [Collection of articles by participants of the XI International Scientific and Practical Conference «Innovations in technology and education». Belovo, April 28–29, 2018]. Belovo, KGTU im. T.F. Gorbacheva Publ., 2018. part 1. Pp. 214–216 (in Russian).

8. *Epifanov S.V., Kolibas G.V., Tolokonsky A.O.* [Features of automatic power controller of RP with lead coolant]. Fiziko-tekhnicheskie intellektual'nye sistemy (FTIS-2023): Sbornik tezisov II Nauchno-prakticheskoj konferencii. Moskva, 07–09 fevralya 2023 goda [Collection of abstracts of the II Scientific and Practical Conference «Physical and technical intellectual systems (FTIS-2023)». Moscow, February 07–09, 2023]. Tambov, Yulis Publ., 2023. Pp. 23 (in Russian).

9. *Balownev A.F., Kusnetsov P.B., Zhirnov A.P., e.a.* FACT-BR [FACT-BR]. Patent RF, no. 2021611743, 2021.

10. *Korablev A.V., Trifonov A.A., Sanarin D.B., e.a.* Programmnyj kompleks raspredelennyh sredstv setevoj obrabotki «KROSS» (PK «KROSS») [Software package of distributed network processing facilities «KROSS» (SP «KROSS»)]. Certificate RF of state registration of the computer program. No. 2021681282, 2021.