

УДК 64.011.56
DOI: 10.18799/29495407/2025/1/83
Шифр специальности ВАК: 2.3.3, 2.3.7

Разработка библиотеки математической модели кинетики ядерного реактора на языке программирования PYTHON

А.Г. Горюнов, Д.Д. Качанов✉, К.Д. Качанов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉ danil3@tpu.ru

Аннотация. Изучаются актуальные проблемы эффективного управления ядерными реакторами с применением современных методов. Основное внимание уделяется созданию модели точечной кинетики реактора, которая учитывает нелинейные факторы и работает достаточно быстро. Для создания модели используется язык программирования Python, предоставляющий доступ к множеству библиотек и инструментов моделирования. Описываются основные способы моделирования ядерных реакторов, включая метод Монте-Карло, диффузионное приближение и кинетическое моделирование, а также принцип работы динамической модели реактора. Созданная библиотека на Python объединяет статическую и динамическую составляющие для определения параметров реактора и их изменений во времени. Представлены результаты моделирования, демонстрирующие поведение реактора при внезапных изменениях реактивности с учётом обратной связи. Разработанная модель имеет открытый исходный код, что позволяет учёным и инженерам использовать её для анализа, оптимизации и управления ядерными реакторами, способствуя развитию технологий и распространению знаний в этой области.

Ключевые слова: моделирование, кинетика реактора, алгоритм управления, библиотеки Python

Для цитирования: Горюнов А.Г., Качанов Д.Д., Качанов К.Д. Разработка библиотеки математической модели кинетики ядерного реактора на языке программирования PYTHON // Известия Томского политехнического университета. Промышленная кибернетика. – 2025. – Т. 3. – № 1. – С. 13–20. DOI: 10.18799/29495407/2025/1/83

UDC 64.011.56
DOI: 10.18799/29495407/2025/1/83

Development of a PYTHON library for a mathematical model of nuclear reactor kinetics

A.G. Goryunov, D.D. Kachanov✉, K.D. Kachanov

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉ danil3@tpu.ru

Abstract. This study addresses pressing issues in the efficient control of nuclear reactors using modern methods. The primary focus is on developing a point kinetics model of a reactor that accounts for nonlinear factors while ensuring computational efficiency. The Python programming language is used for model development, offering access to a wide range of libraries and simulation tools. The research outlines the principal methods of nuclear reactor modeling, including the Monte Carlo method, diffusion approximation, and kinetics modeling, as well as the principles underlying the dynamic reactor model. The developed Python library integrates both static and dynamic components to determine reactor parameters and their temporal variations. Simulation results are presented, showcasing reactor behavior during sudden reactivity changes while considering feedback effects. The developed model is open-source, enabling scientists and engineers to use it for analyzing, optimizing, and managing nuclear reactors, thereby contributing to technological advancements and knowledge dissemination in this field.

Keywords: modeling, reactor kinetics, control algorithm, Python libraries

For citation: Goryunov A.G., Kachanov D.D., Kachanov K.D. Development of a PYTHON library for a mathematical model of nuclear reactor kinetics. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Industrial Cybernetics*, 2025. vol. 3, no. 1, pp. 13–20. DOI: 10.18799/29495407/2025/1/83

Введение

Современные технологические процессы требуют точного и эффективного управления, особенно при работе со сложными многомерными объектами. Одним из ключевых направлений в теории автоматического регулирования является метод управления с прогнозированием (Model Predictive Control), который позволяет учитывать динамику системы и ограничения в реальном времени. Этот подход становится всё более востребованным благодаря своей способности оптимизировать работу сложных систем, таких как насосы, двигатели и другие промышленные установки.

Введение MPC в управление технологическими процессами не только расширяет возможности адаптации регулятора к изменяющимся условиям, но и обеспечивает высокую точность регулирования процесса за счёт использования математических моделей прогнозирования. В отличие от традиционных методов, MPC позволяет эффективно справляться с ограничениями системы, что делает его незаменимым инструментом в современных автоматизированных системах управления.

Описание работы

Установка ВВЭР-1000 представляет собой ядерный реактор с замкнутой системой циркуляции, в которую входят контур компенсации давления и система аварийного охлаждения реакторной установки [1]. Основной контур включает сам реактор

и четыре петли, каждая из которых оснащена горизонтальным парогенератором и насосом для обеспечения циркуляции. Тепло, выделяемое в активной зоне, отводится посредством циркуляции охлаждающей жидкости, которая, проходя через насосы, передаётся к парогенераторам через трубопроводы. В парогенераторах теплообмен осуществляется с жидкостью вторичного контура, после чего охлаждённый теплоноситель возвращается в реактор благодаря насосам. Сухой насыщенный пар, образующийся во вторичном контуре, поступает в турбину, где преобразуется в электроэнергию.

Структура первого контура энергоблока АЭС состоит:

- из реакторной установки;
- парогенераторов в количестве 4 штук;
- главного циркуляционного трубопровода;
- компенсатора давления.

На рис. 1 показана структурная схема первого контура АЭС.

Ядерные реакторы – это сложные системы. Для моделирования их работы нужно учесть много параметров [2]. Существуют различные методы моделирования технологического процесса, например, метод Монте-Карло, метод конечных автоматов, аппроксимация диффузионного приближения, термогидравлическое моделирование и кинетическое моделирование [3].

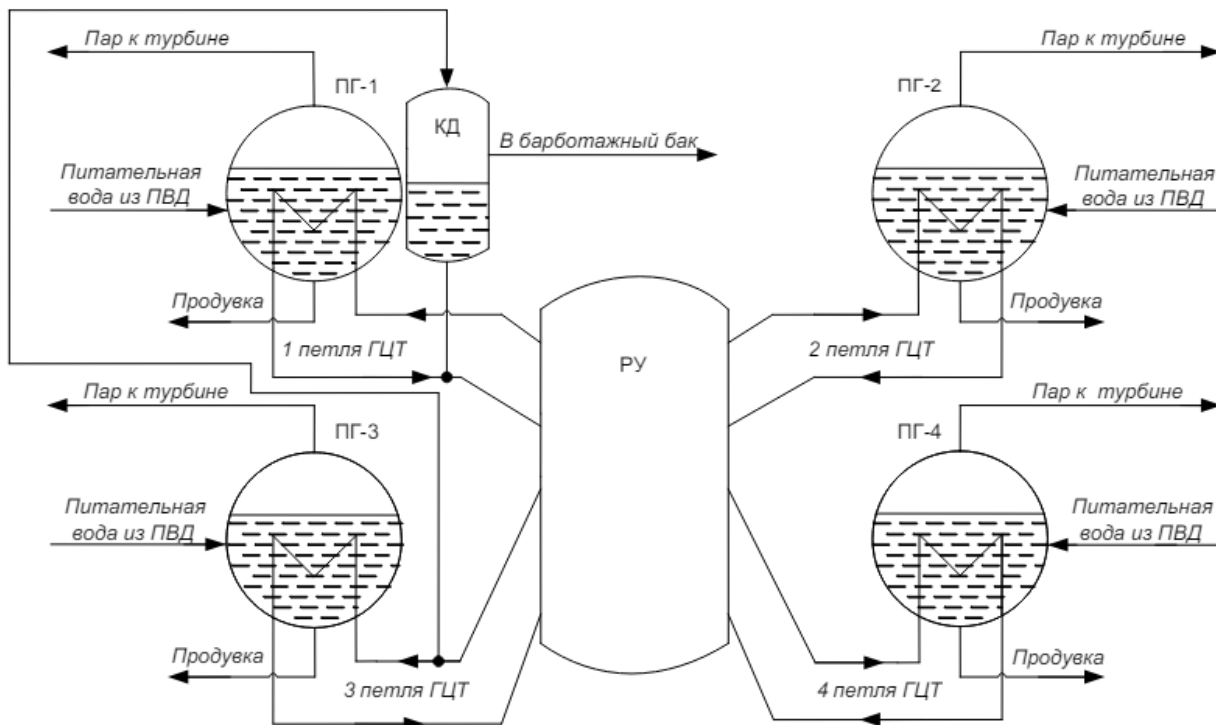


Рис. 1. Структурная схема первого контура энергоблока АЭС

Fig. 1. Structural diagram of the first circuit of the NPP power unit

Методы, активно используемые в процессе моделирования ядерных реакторов [4]:

1. Метод Монте-Карло: основан на воссоздании динамики поведения частиц внутри ядерного реактора с использованием вероятностных функций и статистических принципов.
2. Метод конечных автоматов: декомпозиция геометрии реактора на мелкие сегменты для упрощения решения сложных математических задач, особенно при аналитическом вычислении уравнений, описывающих распространение нейтронов и тепловые процессы в реакторе.
3. Аппроксимация диффузионного приближения: использование уравнений диффузии для приближенного описания поведения нейтронов внутри реактора.
4. Термогидравлическое моделирование: моделирование тепловых потоков, теплообмена и гидродинамических процессов внутри реактора для оценки его тепловых и гидравлических характеристик.
5. Кинетическое моделирование: оценка динамического поведения реактора во времени, изучение его реакции на изменение внешних параметров (мощность, воздействие управляющих стержней) и анализ безопасности.

Поскольку работа направлена на изучение динамики реактора при изменении внешних параметров и его кинетической составляющей [5], будем использовать кинетическое моделирование.

Для исследования моделей, описанных выше, используются различные программные среды, в том числе MatLab, Python и т. д.

В настоящей работе моделирование выполняется в среде Python. Выбор обусловлен тем, что в его арсенале имеется множество специфических библиотек, которые позволяют упростить процесс моделирования. Кроме того, все известные библиотеки и среды программирования языка являются бесплатными, что исключает возможность нарушения авторских прав.

Первым шагом в этом направлении является обучение компьютера пониманию процессов, про-

исходящих внутри реактора. На данный момент существует множество программ для расчета реакторов, тем не менее интегрировать их непосредственно в систему безопасности реактора не представлялось возможным либо из-за их сложности, либо из-за того, что они устарели. Следовательно, основная идея заключается в создании модели реактора, которую можно легко интегрировать в систему управления реактором.

Условно такую модель реактора можно разделить на два компонента. Статическая модель, которая вычисляет нейтронно-физические параметры реактора в определенный момент времени, и динамическая модель, которая вычисляет изменение параметров реактора с течением времени при введении в реактор возмущения. Для разработки такой модели предлагается следующее: пренебречь нейтронно-физическими параметрами реактора и создать модель, основанную на аналитическом представлении динамики реактора, в которой фактические параметры реакторной системы выбираются путем селекции [4].

Алгоритм работает следующим образом:

- 1) исходные данные: начальные условия и текущее состояние реактора;
- 2) вычисление функций, таких как теплоёмкость и теплопроводность, на основе начальных условий [6];
- 3) использование предварительно заданных констант (геометрические параметры, нейтронно-физические свойства) и вычисленных функций для решения системы дифференциальных уравнений с использованием библиотеки SciPy;
- 4) передача полученных значений в графическую библиотеку matplotlib для отображения результатов на графиках.

На рис. 2 показана графическая схема алгоритма работы модели.

Результаты работы модели реактора, созданной с использованием языка программирования Python, приведены ниже.

На рис. 3 показаны результаты при мгновенном скачке реактивности.

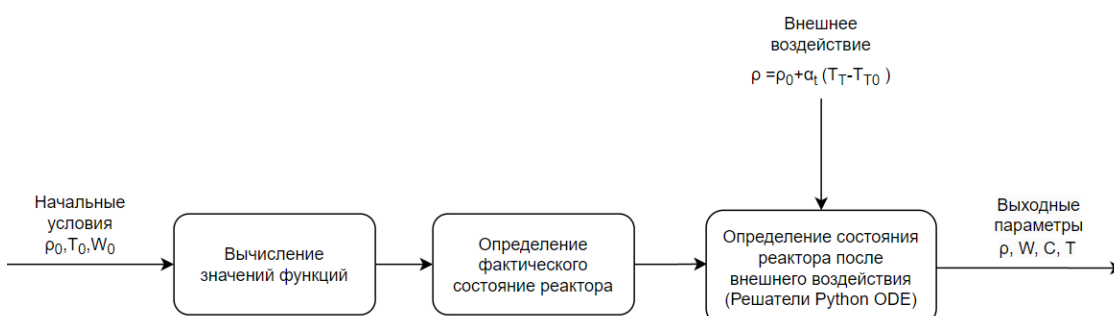


Рис. 2. Схема алгоритма работы модели

Fig. 2. Flowchart of the model operation algorithm

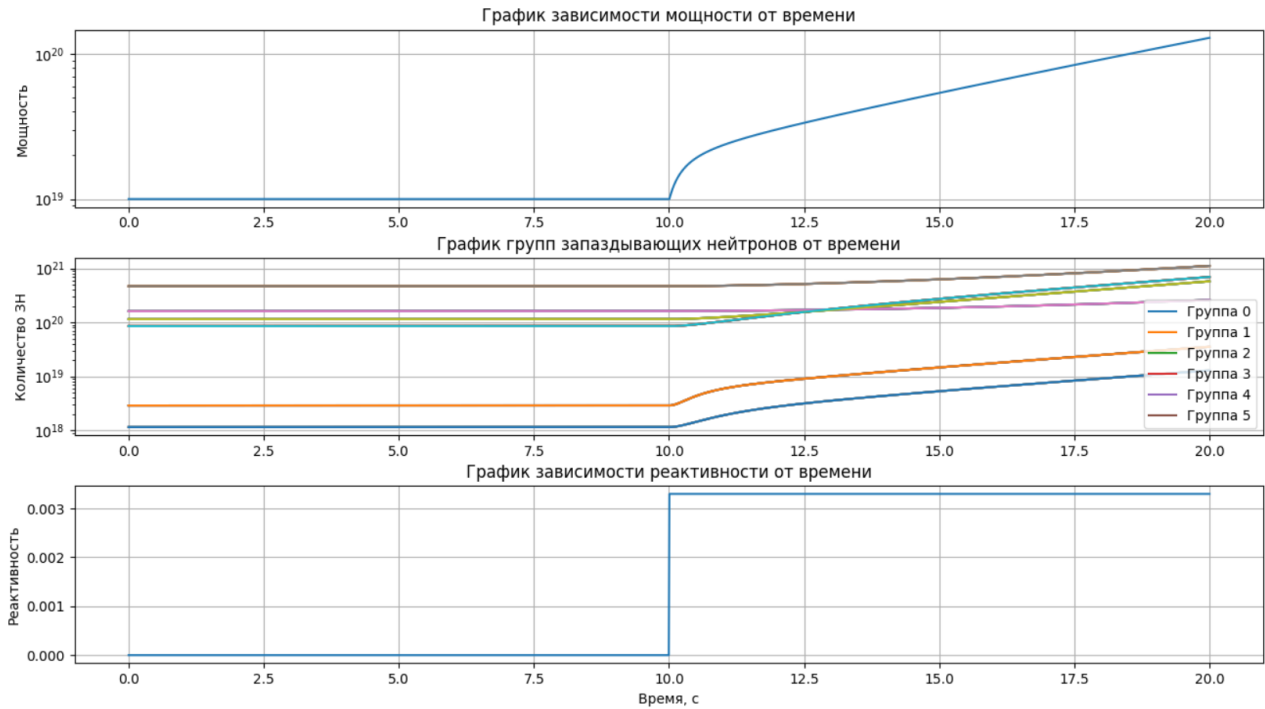


Рис. 3. Результаты работы модели при мгновенном скачке реактивности
Fig. 3. Model results for an instantaneous reactivity jump

Проведём сравнительный анализ результатов, полученных при моделировании, с результатами известных аналогов. За эталон возьмем модель, разработанную в программе SimInTech [7, 8].

На рис. 4 представлены результаты сравнения. Результаты, полученные за 20 секунд моделирования, представлены в табл. 1 [9].



Рис. 4. Сравнение с эталонной моделью
Fig. 4. Comparison with the reference model

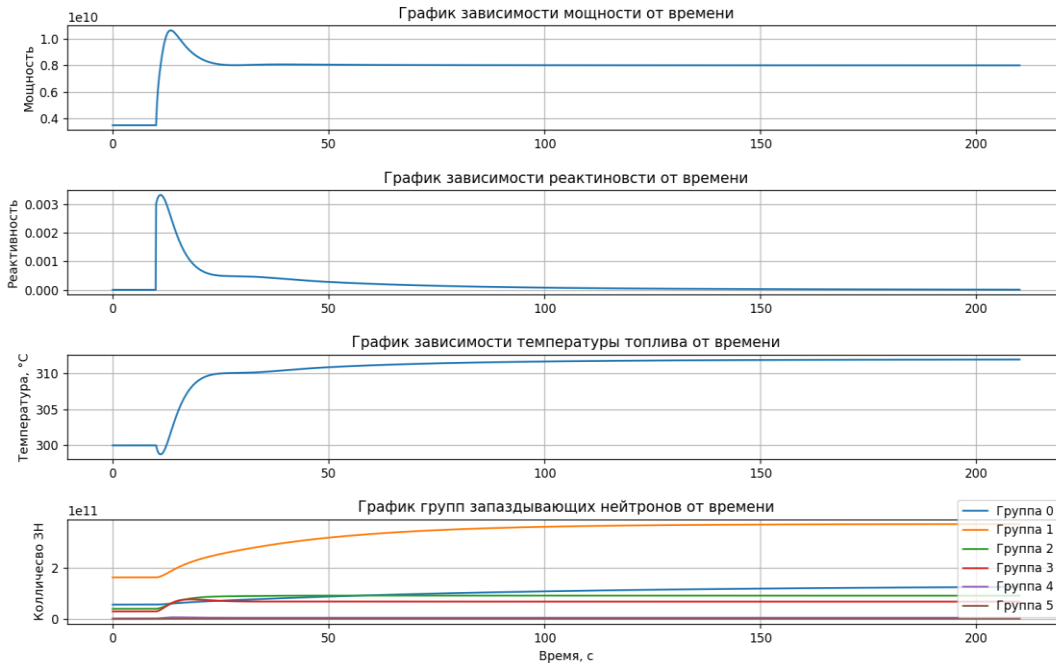


Рис. 5. Результаты работы модели при мгновенном скачке реактивности с обратной связью
Fig. 5. Model results for an instantaneous reactivity jump with feedback

Таблица 1. Результаты моделирования

Table 1. Simulation results

Время Time	Python	SimInTech	Относительная погрешность Relative error
0–9	1	1	0
10	1	1	0
11	2,4	2,3	4,3
12	3	2,9	3,4
13	3,7	3,5	5,4
14	4,5	4,2	5,1
15	5,3	5,1	3,9
16	6,3	6	5
17	7,5	7,2	4,2
18	8,8	8,5	3,5
19	10,3	10	3
20	12,2	11,8	3,4

Исходя из полученных данных можно сделать вывод, что модели схожи. Относительная погрешность полученных результатов составляет 3,13 %. Сравнительный анализ модели, разработанной в среде программирования Python, и эталонной модели, разработанной в среде SimInTech, показывает их полное качественное совпадение.

На рис. 5 показаны результаты при мгновенном скачке реактивности с обратной связью.

Управление с использованием прогнозирующих моделей

MPC – это современный метод автоматического контроля технологических процессов. Его главное достоинство – способность предсказывать поведение параметров системы на определённый период в

будущем. Это позволяет быстро корректировать расчёты на каждом этапе с помощью отрицательной обратной связи [10].

Этот подход особенно эффективен при управлении сложными многомерными объектами, такими как насосы или двигатели, а также для оптимизации процессов с учётом ограничений на входные и выходные параметры. Основа работы MPC – минимизация целевой функции, которая вычисляется в режиме реального времени и зависит от характеристик управляемого объекта.

Традиционно для управления системами используются ПИД-регуляторы или компенсаторы опережения. Они предназначены для подавления помех, снижения чувствительности к шумам и учёта неопределённостей модели, обычно в частотной области. Однако такие контроллеры не всегда учитывают ограничения, связанные с безопасностью, физическими характеристиками или производительностью системы. В результате для обеспечения надёжной работы системы часто требуется дополнительное время для достижения целевого значения, что может снизить её эффективность [10].

В отличие от традиционных подходов, MPC обеспечивает оптимальное управление благодаря прогнозированию поведения объекта и динамической корректировке управления на каждом этапе. Применение этого метода позволяет учитывать ограничения системы и достигать минимизации целевой функции в режиме реального времени, что значительно улучшает качество управления и производительность системы.

Сравнительный анализ моделей

На рис. 6, 7 видны различия в поведении реактивности и мощности для трех методов управления: Рунге–Кутта, MPC и релейного регулятора.

Реактивность в методе Рунге–Кутта изменяется плавно, но стабилизация до нуля занимает больше времени, что указывает на небольшое перерегулирование и медленную реакцию метода на изменения условий.

MPC демонстрирует быстрое достижение установившегося значения реактивности со средним изменением реактивности 0,0137 % в секунду, что подтверждает высокую точность управления.

Реактивность при релейном регуляторе характеризуется дискретным поведением с колебаниями вокруг целевого значения, процент срабатываний реле составляет 1,12 %, что указывает на низкую активность переключений, но такие колебания могут быть недостатком.

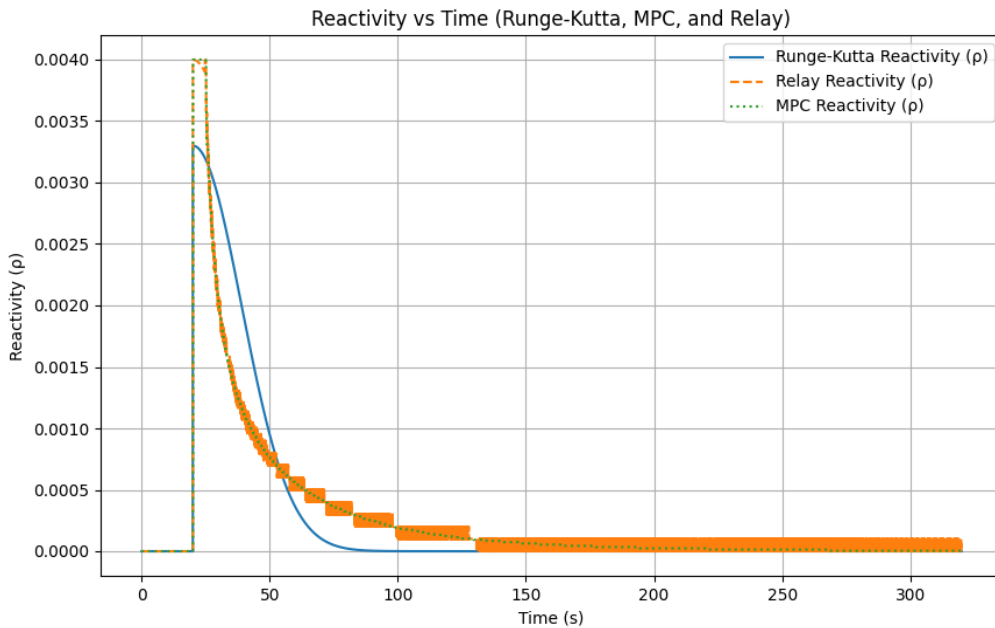


Рис. 6. Результаты изменения реактивности трех моделей
Fig. 6. Reactivity changes in three models

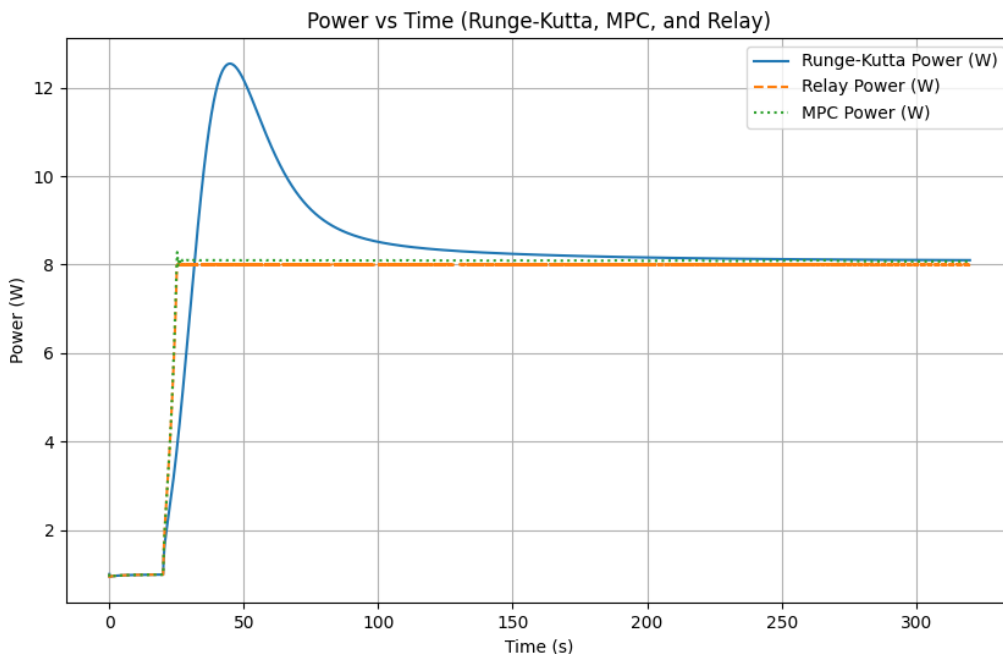


Рис. 7. Результаты изменения мощности трех моделей
Fig. 7. Power changes in three models

Что касается мощности, метод Рунге–Кутта показывает небольшой пик на начальном этапе, который затем постепенно стабилизируется из-за инерции метода и отсутствия адаптивного регулирования.

MPC обеспечивает более быстрое стабилизирование мощности на целевом уровне, подтверждая эффективность предиктивного управления.

Релейный регулятор также стабилизирует мощность, но из-за дискретного характера метода возможны мелкие колебания.

Результаты замера расстояния движения приводов показаны в табл. 2.

Таблица 2. Подсчёт общего расстояния
Table 2. Calculation of the total distance

Регулятор Regulator	Расстояние, усл. ед. Distance, conv. units
MPC/PMМ	0,0009
Релейный регулятор Relay regulator	0,0080

На основе результатов из табл. 2 можно сделать вывод: приводы релейного регулятора прошли большее расстояние. Это указывает на то, что релейный регулятор чаще вносил коррективы в реактивность, что может привести к износу приводов в реальной системе.

Метод управления с прогнозированием практически не вносил изменений в реактивность, что говорит о его стабильной и оптимизированной работе. Это может снизить износ приводов, но, возможно, потребует более сложной настройки для достижения нужных характеристик.

В табл. 3 представлена сравнительная оценка качества переходных процессов для трех различных методов управления: MPC, релейного регулятора и метода Рунге–Кутта. Основными критериями оценки являются перерегулирование и время регулирования [11].

На основе результатов из табл. 3 можно сделать вывод: релейный регулятор демонстрирует наилучшие показатели с минимальным перерегулированием и самым коротким временем регулиро-

вания, обеспечивая высокую точность и быстродействие. Метод MPC показывает сбалансированные характеристики: перерегулирование и время, что делает его эффективным выбором при необходимости компромисса между точностью и скоростью. В свою очередь, метод Рунге–Кутта характеризуется значительным перерегулированием и самым длительным временем регулирования, что ограничивает его применение в динамических системах.

Таблица 3. Оценка качества переходных процессов
Table 3. Assessment of transient process quality

Регулятор Regulator	Перерегулирование Overshoot, %	Время регулирования, с Regulation time, s
MPC/PMМ	1,25	28
Релейный регулятор Relay regulator	0,05	26
Рунге–Кутта Runge–Kutta	52,5	233

Таким образом, релейный регулятор является наиболее эффективным в обеспечении стабильности системы, тогда как MPC предлагает оптимальный баланс характеристик.

Заключение

В заключение можно сказать, что MPC является наиболее эффективным методом управления, который обеспечивает быстрое достижение целевых значений мощности и реактивности, минимальные отклонения от заданных параметров и высокую предсказуемость системы. Метод Рунге–Кутта подходит для моделирования и анализа, но менее эффективен для оперативного регулирования из-за инерции и длительного времени стабилизации. Релейный регулятор показывает простое, но не оптимальное управление, которое может быть полезно в системах с низкими требованиями к точности. Рекомендуется использовать MPC для управления реактором, так как он лучше адаптируется к изменениям и обеспечивает соблюдение строгих требований безопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Машкович В.П., Кудрявцева А.В. ВВЭР-1000: физические основы эксплуатации, ядерное топливо, безопасность – М.: Столица, 2013. – 494 с.
2. Математическое моделирование процесса экстракции урана как объекта управления / А.Г. Горюнов, В.Ф. Дядик, С.Н. Ливенцов, Ю.А. Чурсин, А.А. Лысенко. – Томск: ТПУ, 2008. – 153 с.
3. Карначук В.И., Горюнов А.Г. Системы автоматического управления и защиты реактора ВВЭР-1000. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – 91 с.
4. Демченко В.А. Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС. – Одесса: Астропринт, 2001. – 308 с.
5. Казанский Ю.А., Лебедев А.Б. Кинетика ядерных реакторов. – Обнинск: ИАТЭ, 2003. – 96 с.
6. Хан Р., Хамид Т., Бахтияр С. Коэффициенты реактивности обратной связи и их связь // Ядерная техника и дизайн. – 2007. – Т. 237. – № 9. – С. 972–977.

7. Программный комплекс для исследования динамики и проектирования технических систем / О.С. Козлов, Д.Е. Кондаков, Л.М. Скворцов, К.А. Тимофеев, В.В. Ходаковский // Информационные технологии. – 2005. – № 9. – С. 20–25. EDN: YNIUBD
8. Регеда В.В., Регеда О.Н. Программирование в SimInTech. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2023. – 76 с.
9. Горюнов А.Г., Курганов В.В., Качанов Д.Д. Разработка модели реактора как объекта управления на языке программирования Python // Научно-технический вестник Поволжья. – 2024. – № 3. – С. 39–42. EDN: YRXQNY
10. Borrelli F., Bemporad A., Morari M. Predictive control for linear and hybrid systems. – Cambridge: Cambridge University Press, 2017. – 440 p.
11. Дядик В.Ф., Байдали С.А., Криницын Н.С. Оценки Теория автоматического управления: учебное пособие – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 196 с.

Информация об авторах

Алексей Германович Горюнов, доктор технических наук, профессор отделения ядерно-топливного цикла Инженерной школы ядерных технологий, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; alex1479@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2685-2557>

Данил Денисович Качанов, студент отделения ядерно-топливного цикла Инженерной школы ядерных технологий, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, danil3@tpu.ru

Кирилл Денисович Качанов, студент отделения ядерно-топливного цикла Инженерной школы ядерных технологий, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, kirill2@tpu.ru

Поступила в редакцию: 24.12.2024

Поступила после рецензирования: 20.02.2025

Принята к публикации: 20.03.2025

REFERENCES

1. Mashkovich V.P., Kudryavtseva A.V. *WWER-1000: physical principles of operation, nuclear fuel, safety*. Moscow, Stolitsa Publ., 2013. 494 p. (In Russ.)
2. Goryunov A.G., Dyadik V.F., Liventsov S.N., Chursin Yu.A., Lysenok A.A. *Mathematical modeling of the uranium extraction process as a control object*. Tomsk, TPU Publ. house, 2008. 153 p. (In Russ.)
3. Karnachuk V.I., Goryunov A.G. *Automatic control and protection systems of the WWER-1000 reactor*. Tomsk, TPU Publ. House, 2004. 91 p. (In Russ.)
4. Demchenko V.A. *Automation and modeling of technological processes of NPPs and TPPs*. Odessa, Astroprint Publ., 2001. 308 p. (In Russ.)
5. Kazansky Yu.A., Lebedev A.B. *Kinetics of nuclear reactors*. Obninsk, IATE Publ., 2003. 96 p. (In Russ.)
6. Khan R., Hamid T., Bakhtiar S. Feedback reactivity coefficients and their relationships. *Nuclear Engineering and Design*, 2007, vol. 237, no. 9, pp. 972–977. (In Russ.)
7. Kozlov O.S., Kondakov D.E., Skvortsov L.M., Timofeev K.A., Khodakovskiy V.V. Software package for studying the dynamics and designing technical systems. *Information technologies*, 2005, no. 9, pp. 20–25. (In Russ.) EDN: YNIUBD
8. Regeda V.V., Regeda O.N. *Programming in SimInTech*. Penza, PSU Publ. house, 2023. 76 p. (In Russ.)
9. Goryunov A.G., Kurganov V.V., Kachanov D.D. Development of a reactor model as a control object in the Python programming language. *Scientific and Technical Volga region Bulletin*, 2024, no. 3, pp. 39–42. (In Russ.) EDN: YRXQNY
10. Borrelli F., Bemporad A., Morari M. *Predictive control for linear and hybrid systems*. Cambridge, Cambridge University Press, 2017. 440 p.
11. Dyadik V.F., Baidali S.A., Krinitsyn N.S. *Assessments of automatic control theory*. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2011. 196 p. (In Russ.)

Information about the authors

Aleksei G. Goryunov, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; alex1479@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2685-2557>

Danil D. Kachanov, Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; danil3@tpu.ru

Kirill D. Kachanov, Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; kirill2@tpu.ru

Received: 24.12.2024

Revised: 20.02.2025

Accepted: 20.03.2025