

## УПРАВЛЕНИЕ КОМПЕНСАТОРОМ ДАВЛЕНИЯ ПЕРВОГО КОНТУРА ВВЭР-1000 НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА ПРОГНОЗИРУЮЩИХ МОДЕЛЕЙ

НАЗАРМАМатов Шавкатжон Мамасоли угли  
аспирант

ТАЛОКОНСКИЙ Андрей Олегович  
кандидат технических наук, доцент

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
г. Москва, Россия

*Компенсатор давления играет ключевую роль в атомных энергетических установках, обеспечивая стабильность и безопасность реактора. Регулятор с прогнозированием – это алгоритм управления с обратной связью, использующий модель для оценки будущих результатов процесса и оперативной оптимизации контроля. В статье описана модель регулятора с предсказанием для контроля компенсатора давления ВВЭР-1000.*

**Ключевые слова:** компенсатор давления, алгоритм прогнозирующей модели, горизонт прогнозирования, горизонт управления.

**О**писание компенсатора давления. Компенсатор давления первого контура ВВЭР-1000 является важной частью системы охлаждения реактора и предназначен для компенсации изменений давления в первом контуре. Как правило, компенсатор давления устанавливается на верхней части отводящего трубопровода первого контура и состоит из двух основных компонентов: бака и внутренней трубы. Бак компенсатора давления заполнен водой и соединен с первым контуром через внутреннюю трубу, которая расширяется на верхнем конце и имеет клапан для сброса излишнего давления. Когда давление в первом контуре возрастает, вода вытесняется из бака во внутреннюю трубу, что компенсирует увеличение давления. Когда давление в первом контуре снижается, вода возвращается из внутренней трубы в бак компенсатора давления. Это позволяет поддерживать стабильный уровень давления в первом контуре и предотвращать возможные аварийные ситуации [1].

Управление компенсатором давления в I контуре ВВЭР-1000 является критически важным аспектом безопасности и надежности работы реактора. Компенсатор давления отвечает за поддержание равновесия между давлением в первом контуре реактора и давлением во втором контуре, который используется для производства пара и генерации

электроэнергии. Если давление в первом контуре ВВЭР-1000 становится слишком высоким, это может привести к перегреву топлива и разрушению оболочек топливных элементов, что может привести к утечкам радиоактивных материалов и потенциальной аварии. Если давление в первом контуре ВВЭР-1000 снижается ниже нормального уровня, это может привести к остановке насосов, отвечающих за циркуляцию охлаждающей жидкости, что также может привести к аварии. Управление компенсатором давления в I контуре ВВЭР-1000 осуществляется автоматически и вручную оператором в зависимости от изменений рабочих параметров реактора. Регулярное обслуживание и техническое обслуживание компенсатора давления являются обязательными для обеспечения надежной работы реактора и предотвращения возможных аварий [1; 2].

**Экспериментальная математическая модель КД.** В математическом описании КД по давлению и уровню воды, которое было приведено выше, единственным входным воздействием является средняя температура теплоносителя первого контура. Однако в реальной энергетической установке возмущающими воздействиями на давление являются изменение реактивности реактора и расход пара на турбину. Аналитический вывод уравнений динамики по указанным каналам довольно гро-

моздок, поэтому для описания динамических свойств КД при возмущении реактивностью либо расходом пара используются экспериментальные кривые разгона КД для энергоблока с ВВЭР-1000. Такие динамические свойства КД являются нелинейными.

Для описания нелинейных свойств в структурном моделировании с использованием типовых звеньев можно использовать приближенный подход, основанный на инерционных звеньях первого порядка и звене чистого запаздывания, как это показано на рисунке 1.

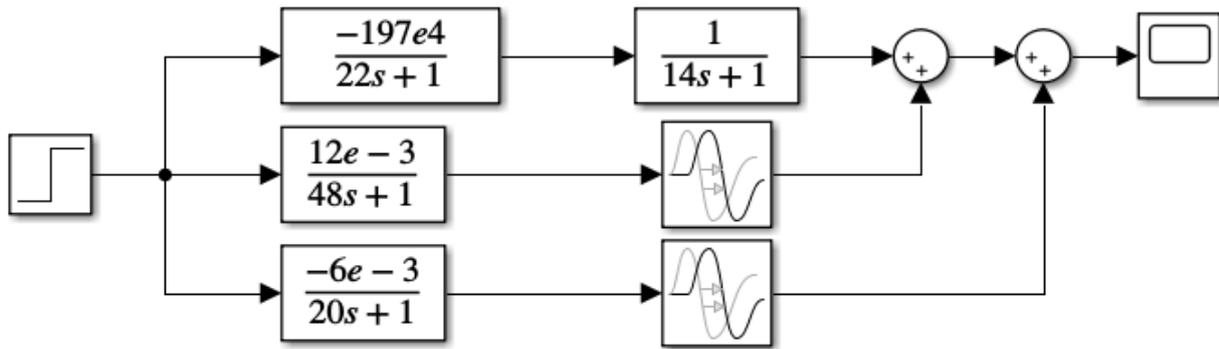


Рисунок 1. Структурная схема модели КД по расход пара

**Алгоритм прогнозирующей модели.** Алгоритм прогнозирующей модели (МРС) – это метод управления динамическими системами, который основан на прогнозировании поведения системы в будущем на основе математической модели [3]. МРС (Model predictive Controller) широко используется в различных областях, включая ядерные и тепловые процессы [4; 5]. МРС (Model predictive Controller) применяется для оперативной оптимизации процесса в режиме реального времени. Для этого используется математическая модель установки, которая позволяет предсказать будущее поведение системы на определенном горизонте управления. Также учитывается стоимость управляющего воздействия, что позволяет определить оптимальный входной сигнал для системы управления. Это позволяет МРС принимать решения в реальном времени относительно наилучшего управления процессом [6].

Основная идея МРС заключается в том, что контроллер использует модель системы, которую необходимо управлять, для прогнозирования поведения системы в будущем на некоторый горизонт прогнозирования. Затем, на основе прогноза, контроллер определяет оптимальное управляющее воздействие, которое приведет систему в желаемое состояние с учетом ограничений на управляющие

воздействия и переменные состояния [7]. Одним из преимуществ МРС является возможность учета динамических и статических ограничений на управляющие воздействия и переменные состояния системы, что позволяет достичь оптимального управления при наличии сложных ограничений. Кроме того, МРС может быть настроен на оптимизацию различных критериев оптимальности, таких как минимизация энергопотребления, максимизация производительности или соблюдение заданных ограничений [8; 9].

В рамках МРС существует несколько понятий, которые связаны с управлением системой:

Sample time – это интервал времени между последовательными обновлениями состояния системы. Это может быть равным интервалу времени между измерениями, с которыми поступают данные от датчиков системы. Sample time определяет, как часто обновляется состояние системы и как часто принимается управляющее воздействие.

Prediction horizon – это горизонт предсказания, который определяет, на сколько шагов вперед предсказывается будущее поведение системы. В рамках МРС предсказание будущего поведения системы основывается на текущем состоянии системы и на модели системы. Prediction horizon определяет, насколько далеко в будущее система будет предсказываться.

Control horizon – это горизонт управления, который определяет, на какой горизонте предсказания будут приниматься решения об управлении системой. Control horizon может быть меньше, равным или больше, чем prediction horizon. Если control horizon меньше, чем prediction horizon, то это означает, что на каждом шаге управления принимается решение только на определенный период времени, а затем производится повторное вычисление управляющего воздействия на основе обновленной информации о системе. Если control horizon больше, чем prediction horizon, то это означает, что управление принимается на более длительный период времени, чем предсказание будущего поведения системы.

**Моделирование и результаты.** Для создания новой модели в Simulink был написан код в редакторе MATLAB и затем перенесен в MPCtool. MPCtool используется для генерации математической модели, которая может быть использована в моделировании в Simulink [9; 10].

Для достижения наилучшего отклика было проведено постепенное изменение параметров настройки MPC, в частности горизонта управления и горизонта прогнозирования. На первом этапе моделирования было установлено время выборки равным 1 секунде, горизонт управления составил 2, а горизонт прогнозирования – 10. Графики, полученные в результате, представлены на рисунке 2.

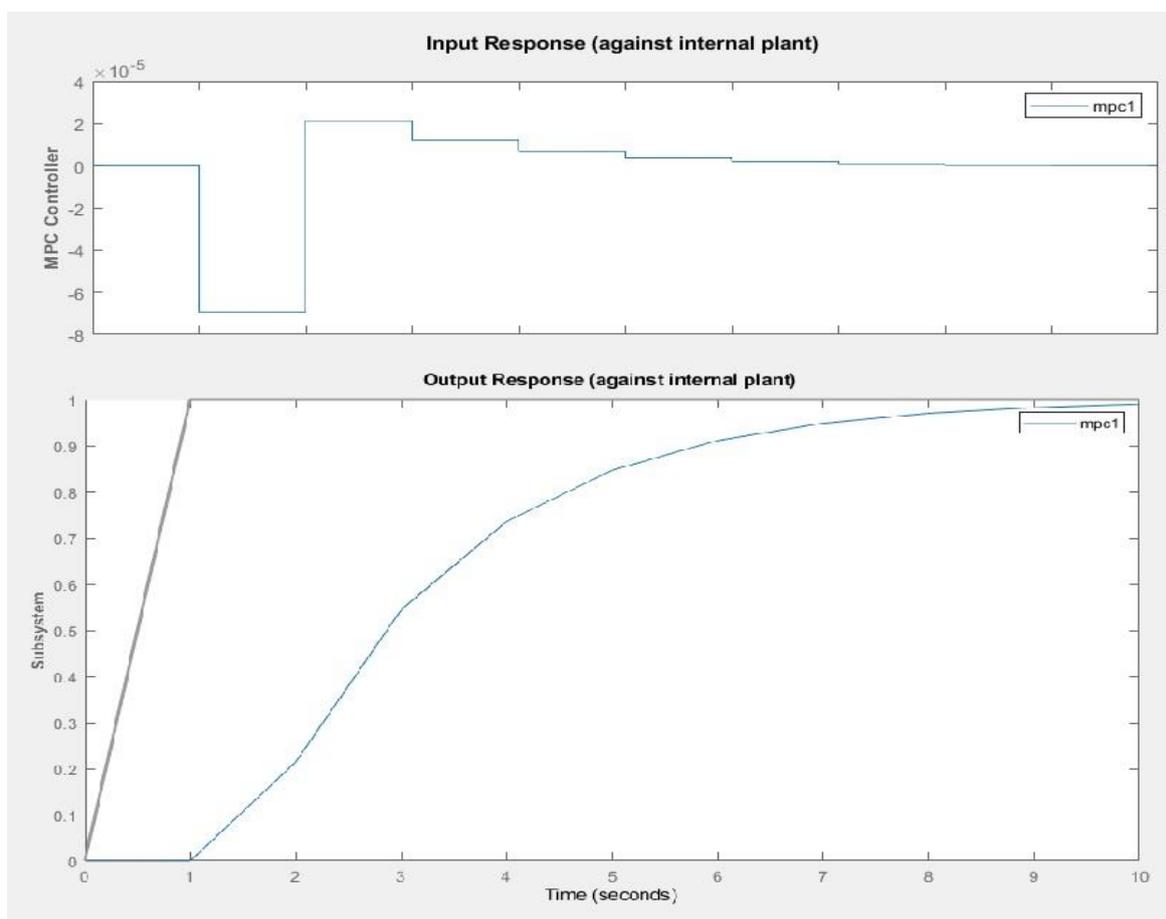
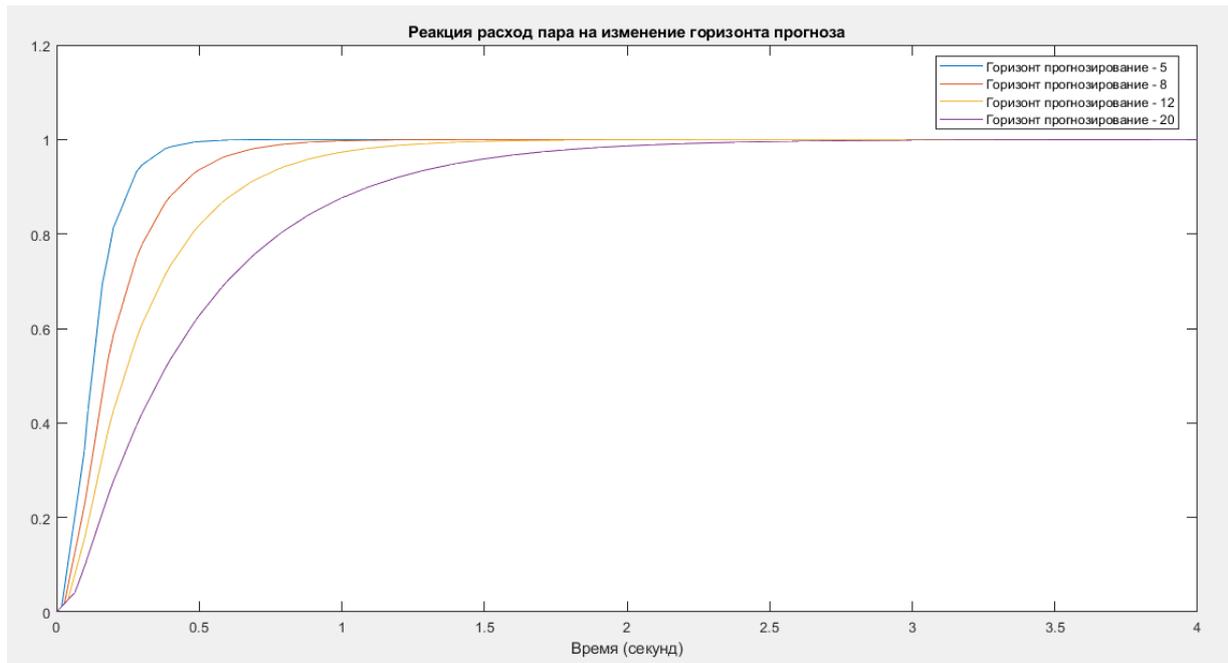


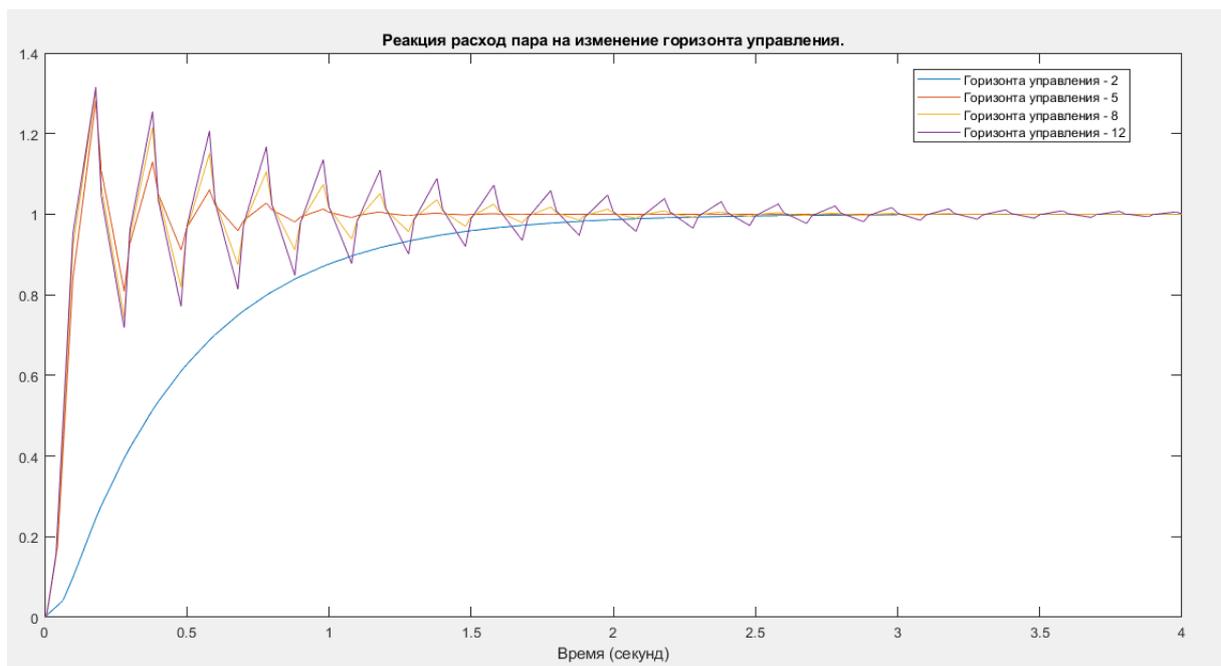
Рисунок 2. MPCtool в результатах моделирования MATLAB

Возможно ускорить отклик модели системы управления путем настройки значения горизонта предсказания. В рамках проведенного эксперимента были протестированы

различные значения контрольного и прогнозистического горизонтов, а полученные результаты представлены на графиках, изображенных на рисунках 3 и 4.



**Рисунок 3. Реакция расход пара на изменение горизонта управления**



**Рисунок 4. Реакция расход пара на изменение горизонта прогноза**

Для тестирования различных значений горизонта прогнозирования  $P$  фиксируется значение контрольного горизонта, после чего

меняется значение горизонта прогнозирования. В таблице 1 приведены тестируемые значения.

Таблица 1

**ИЗМЕНЕНИЕ ГОРИЗОНТА УПРАВЛЕНИЯ**

Горизонт прогнозирования	Горизонт управления
5 шагов	2 шага
8 шагов	2 шага
12 шагов	2 шага
20 шагов	2 шага

Для тестирования различных значений контрольного горизонта  $M$  были проведены эксперименты, при которых горизонт прогнозирования оставался неизменным. Ре-

зультаты этих экспериментов, то есть проверенные значения для контрольного горизонта, представлены в таблице 2.

Таблица 2

**КОНТРОЛЬ ИЗМЕНЕНИЯ ГОРИЗОНТА**

Горизонт прогнозирования	Горизонт управления
20 шагов	2 шагов
20 шагов	5 шагов
20 шагов	8 шагов
20 шагов	12 шагов

Если система управления обладает более быстрым откликом, то можно изменить значения горизонта прогнозирования и горизонта управления, рассмотрев несколько различных параметров, как показано на рисунках 3 и 4. Таким образом, можно получить оптимальные траектории управления, соответствующие горизонту прогнозирования, равному 5, и горизонту управления, равному 2.

достигает хороших результатов с точки зрения принятого критерия качества регулирования, за исключением начального этапа управления. Настройка алгоритма через изменение значений горизонта управления и прогнозирования приводит к более плавному, но медленному отклику. Управление прогностической моделью показывает многообещающие результаты во многих областях применения, таких как тепловые и ядерные процессы.

Применяемый прогностический контроль

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Выговский С. Б., [и др.]*. Физические и конструкционные особенности ядерных энергетических установок с ВВЭР. – Москва: НИЯУ МИФИ, 2011. – 376 с.
2. *Лаидани З. и др.* Контроль температуры и уровня воды в тепловых и ядерных установках с помощью регулятора с предсказанием // Вестник Национального исследовательского ядерного университета МИФИ. – 2021. – Т. 10. – № 1. – С. 55-62.
3. *Тявалов А.А., Дубченко Я.А.* Особенности управления технологическими параметрами системы компенсации давления АЭС с реактором ВВЭР-1000 // Глобальная ядерная безопасность. – 2014. – № 2(11). – С. 98-103.
4. *De Keyser, Robin*. Model based predictive control for linear systems. Control Systems, Robotics and AutomatioN-Volume XI: Advanced Control Systems. V. 2009. P. 24.
5. *Ke H., Yuan J.* Multi-model predictive control method for nuclear steam generator water level, Energ. Convers. Manage. 2008. V. 49. P. 1167-1174.
6. *Kvasnica, Michal, Martin Herceg, Luboš Čirka, and Miroslav Fikar*. Model predictive control of a CSTR: A hybrid modeling approach. Chemical papers. 2010. V. 64. No 3. P. 301-309.

7. Morari, Manfred, Jay H. Lee. Model predictive control: past, present and future. Computers & Chemical Engineering. 1999. V. 23. No 4-5. P. 667-682.
8. Pinheiro, Carla IC, Lester S. Kershenbaum. Model predictive control of reactor temperature in a CSTR pilotplant operating at an unstable steady-state. Computers & Chemical Engineering. 1999. V. 23. P. 859-862.
9. Shah, Gaurang, Sebastian Engell. Tuning MPC for desired closed-loop performance for MIMO systems. In Proceedings of the 2011 American Control Conference. IEEE, 2011. P. 4404-4409.
10. Taemiriosgouee, Ahmad. Investigation of Model Predictive Control (MPC) for Steam Generator Level Control in Nuclear Power Plants. Engineering, 2016.

## **PRESSURE COMPENSATOR CONTROL OF THE PRIMARY CIRCUIT IN VVER-1000 BASED ON PREDICTIVE MODELING ALGORITHM**

**NAZARMAMATOV Shavkatjon Mamasoli ugli**

Postgraduate Student

**TALOKONSKY Andrey Olgovich**

Candidate of Sciences in Technology, Associate Professor

National Research Nuclear University «MEPhI»

Moscow, Russia

---

*The pressure compensator plays a crucial role in nuclear power plants, ensuring reactor stability and safety. A model predictive controller is a feedback control algorithm that uses a model to estimate future process outcomes and performs real-time control optimization. This article describes a model predictive control scheme for the VVER-1000 pressure compensator.*

**Keywords:** pressure compensator, predictive model algorithm, prediction horizon, control horizon

---

## **ИСТОРИЧЕСКИЕ НАУКИ**

### **ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ РОССИЙСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ТОРГОВЛИ В XVII ВЕКЕ**

**ШУКЮРОВА Гумру Захир кызы**

ассистент кафедры философии, биоэтики, истории и социологии

ФГБОУ ВО «Астраханский государственный медицинский университет Минздрава России»

г. Астрахань, Россия

---

*В статье рассматривается процесс развития российской промышленности и торговли на протяжении XVII в. Особое внимание в статье уделено влиянию промышленного развития на внутреннюю и внешнюю торговлю российского государства.*

**Ключевые слова:** промышленность, капитал, производство, ремесло, мануфактура, торговля.

---