

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА СИСТЕМЫ КОМПЕНСАЦИИ ДАВЛЕНИЯ АЭС

*Ю.А. Мефедова, В.Ю. Збинякова*

Задача подготовки кадров, поддержания и повышения квалификации персонала атомных станций носит непрерывный характер и включает в себя различные технические средства обучения: тренажеры, стенды, имитационные модели. Их основное назначение заключается в том, чтобы донести до обучающихся полное понимание протекающих процессов при различных режимах работы АЭС. Для этого они должны быть не только наглядны, но и позволять отслеживать внутреннюю структуру технологического объекта или процесса, проводить имитационные исследования для оценки влияния различных факторов на исследуемый процесс. В работе рассматривается имитационная модель системы компенсации давления реакторного отделения, разработанная в среде имитационного моделирования MatLab/Simulink. Отличительной чертой модели является возможность ее самостоятельной сборки и отслеживания любых необходимых сигналов при вариации входных воздействий и параметров модели.

*Ключевые слова:* имитационная модель; атомная станция; компенсатор давления; всережимный регулятор.

---

## АЭСТИН БАСЫМЫН КОМПЕНСАЦИЯЛОО СИСТЕМАСЫНА ТАЛДОО ЖҮРГҮЗҮҮ ҮЧҮН ИМИТАЦИЯЛЫК МОДЕЛДӨӨНҮ ПАЙДАЛАНУУ

*Ю.А. Мефедова, В.Ю. Збинякова*

Атомдук станциялардын кадрларын даярдоо, техникалык тейлөө жана кызматкерлердин квалификациясын жогорулатуу милдети үзгүлтүксүз мүнөзгө ээ жана ар кандай техникалык окуу каражаттарын өзүнө камтыйт: тренажерлор, такталар, имитациялык моделдер. Алардын негизги максаты студенттерге АЭСтин ар кандай иштөө режиминде жүрүп жаткан процесстер жөнүндө толук түшүнүк берүү. Бул үчүн алар көрсөтмөлүү гана болбостон, технологиялык объекттин же процесстин ички түзүмүн көзөмөлдөөгө, изилденип жаткан процессте ар кандай факторлордун таасирин баалоо үчүн имитациялык изилдөөлөрдү жүргүзүүгө мүмкүндүк бериши керек. Бул эмгекте MatLab/Simulink имитациялык моделдөө чөйрөсүндө иштелип чыккан реактордук бөлүмдүн басымын компенсациялоо системасынын имитациялык модели каралат. Моделдин айырмалоочу өзгөчөлүгү – аны өз алдынча чогултуу жана киргизүү аракеттери менен моделдин параметрлеринин өзгөрүүсүндө зарыл болгон сигналдарды көзөмөлдөө мүмкүндүгү.

*Түйүндүү сөздөр:* имитациялык модель; атомдук станция; басымдын компенсатору; бардык режимдеги жөнгө салгыч.

---

## USING SIMULATION MODELING TO ANALYZE THE PRESSURE COMPENSATION SYSTEM OF A NUCLEAR POWER PLANT

*Yu. A. Mefedova, V.Yu. Zbinyakova*

The task of training personnel, maintenance and professional development of nuclear power plant staff is continuous and includes various technical training tools: simulators, stands, simulation models. Their main purpose is to convey to students a complete understanding of the process under different operating modes of nuclear power plants. To do this, they should not only be visual, but also allow you to track the internal structure of a technological object or process, conduct simulation research to assess the influence of various factors on the process under study. In present report we focus on a simulation model of the reactor compartment pressure compensation system developed in the Matlab/Simulink simulation environment. A distinctive feature of the model is the ability to build it independently and track any necessary signals with variations in the input actions and model parameters.

*Keywords:* simulation model; nuclear power plant; pressure compensator; all-mode regulator.

Использование имитационного моделирования для исследования технических процессов позволяет в короткие сроки с минимальными финансовыми затратами получать результаты даже в тех случаях, когда проведение натурных экспериментов невозможно в силу различных факторов. При разработке подобных моделей первоначально изучается сам объект моделирования: его структура, алгоритмы функционирования, математическое описание. В статье рассмотрены этапы построения и исследования имитационной модели системы компенсации давления АЭС. В качестве программной среды для реализации модели использован программный продукт MatLab со средой визуального моделирования Simulink, стандартная библиотека которой позволяет создавать интуитивно понятную настраиваемую модель и проводить имитационные исследования.

Система компенсации давления первого контура АЭС с реактором ВВЭР-1000 выполняет ряд важнейших функций для безопасности работы станции [1]. Основным технологическим объектом данной системы, компенсирующим колебания давления в первом контуре, является компенсатор давления (КД). Он представляет собой цилиндрический сосуд высотой порядка 13,6 м и диаметром 3,5 м. Нижняя часть КД заполнена водой при температуре насыщения, верхняя – насыщенным паром. При этом водяная часть соединена с горячей ниткой циркуляционного трубопровода (рисунок 1).

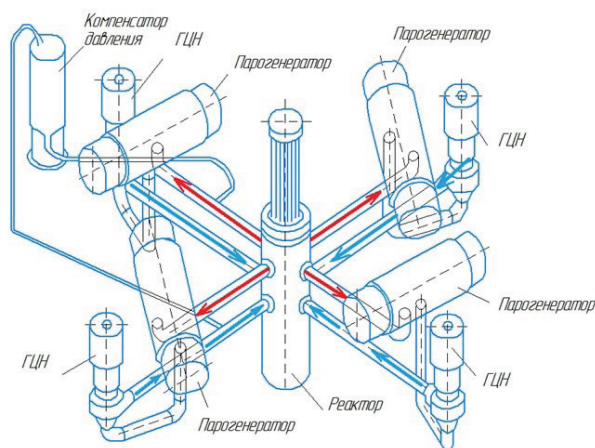


Рисунок 1 – Компенсатор давления в первом контуре АЭС

При изменении нагрузки энергоблока изменяется давление в контуре, что вызвано изменением температуры теплоносителя (воды) и как следствие изменение объема. При небольших изменениях давления в первом контуре работает принцип самокомпенсации за счет сжатия или расширения паровой подушки. При повышении температуры воды в контуре часть ее поступает в компенсатор давления, сжимает пар и давление повышается. При снижении температуры часть теплоносителя переходит из компенсатора в контур, пар расширяется и давление падает.

При больших и быстрых изменениях давления в контуре включаются механизмы поддержания состояния насыщения за счет регулировки мощности трубчатых электронагревателей, расположенных в нижней водяной части КД, впрыска холодной воды в верхнюю паровую часть КД [2]. Для аварийного снижения давления предусмотрено импульсное предохранительное устройство, сбрасывающее пар с расходом до 150 кг/с в бак-барботёр.

Система компенсации давления оснащена пятью регуляторами: всережимным регулятором давления, штатным и пусковым регуляторами уровня, регулятором расхолаживания и “тонкого” впрыска [3].

Каждый регулятор является частью системы автоматического регулирования с соответствующими исполнительными устройствами и датчиками. В работе рассматривается всережимный регулятор YPC01, используемый в большинстве эксплуатационных режимов для поддержания давления от 15445474 Па до 16279039 Па, за исключением режима разогрева и расхолаживания блока.

При повышении давления в первом контуре в компенсатор давления осуществляется впрыск теплоносителя из холодной нитки контура путем открытия двух быстродействующих вентилях YP11S01, YP12S02, что приводит к конденсации пара над уровнем теплоносителя и быстрому падению давления. Подача воды осуществляется вследствие разности давлений в холодной и горячей нитках, определяемой гидравлическим сопротивлением активной зоны.

При понижении давления в первом контуре в компенсаторе давления осуществляется включение мощных четырех групп электронагревателей YP10W01, 02, 03, 04, за счет чего в нём

Таблица 1 – Уставки срабатывания групп ТЭНов и клапанов впрыска

Тип клапана / группа ТЭНов	Включение, МПа	Отключение, МПа
Группы ТЭНов		
УР10W01 (270 кВт)	15.85	16.0
УР10W02 (270 кВт)	15.7	15.95
УР10W03 (720 кВт)	15.5	15.8
УР10W04 (1260 кВт)	15.3	15.7
Клапаны		
УР11S01	16.4	16.3
УР12S01	16.6	16.5

происходит повышение температуры воды и ее частичное испарение. В таблице 1 представлены уставки для описанных исполнительных устройств.

Входным сигналом регулятора является давление над активной зоной измеряемое двумя датчиками “Сапфир 22ДИ” УС10Р01В1 (основной) и УС20Р22В1 (резервный). Типовая схема регулирования давления с использованием все-режимного регулятора УРС01 представлена на рисунке 2 [3]. Для реализации имитационной модели разработана структурно-блочная схема системы автоматического регулирования (САР) давления с двумя каналами регулирования: “впрыск воды – давление в контуре” и “мощность нагревателей – давление в контуре” (рисунок 3).

Для разработки имитационной модели САР давления необходимо знать динамические свойства объекта по двум каналам: – мощности ТЭНов и впрыска воды. Для получения передаточных функций по данным каналам на основании физических уравнений, учитывающих как равновесный и неравновесный характер протекания процессов, разработана и исследована имитационная модель компенсатора давления в Matlab/Simulink [4, 5]. На основании аппроксимации переходных процессов получены передаточные функции в следующем виде:

$$W_{Q-P}(p) = \frac{-0.022}{4p^2 + 16p + 1}$$

$$W_{N-P}(p) = \frac{0.00035}{400p^2 + 40p + 1}$$

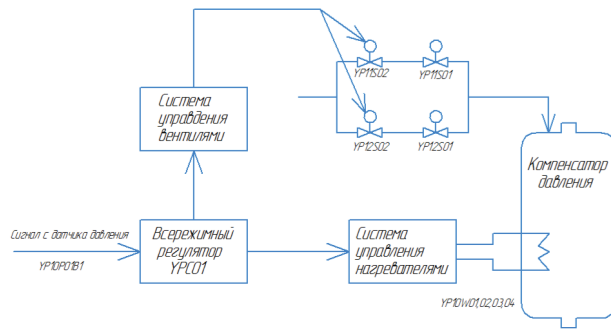


Рисунок 2 – Схема регулирования давления с все-режимным регулятором

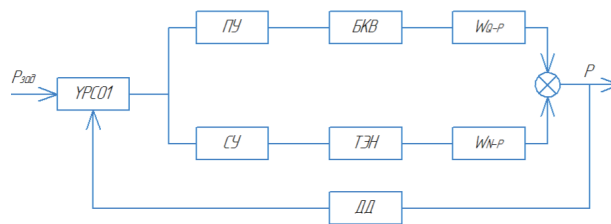


Рисунок 3 – Структурно-блочная схема САР давления с все-режимным регулятором: УРС01 – регулятор давления; ПУ – пусковые устройства; СУ – силовые устройства; БКВ – быстродействующие грубые клапаны впрыска; ТЭН – теплоэлектронагреватели;  $W_{Q-P}$  – передаточная функция объекта относительно канала “впрыск воды – давление в контуре”;  $W_{N-P}$  – передаточная функция объекта относительно канала “мощность нагревателей – давление в контуре”

Позиционный регулятор УРС01 содержит шесть каналов, которые управляют задвижками “грубого впрыска” УР11S01, УР12S02 и нагревателями. Выбор того или иного исполнительного механизма зависит от текущего давления (уставки для срабатывания представлены в таблице 1).

Имитационная модель САР давления с все-режимным регулятором представлена на рисунке 4.

В качестве возмущающего воздействия использован блок синусоидального источника, функция которого описана выражением:

$$f(t) = 0.9 \sin(0.05t) + 16$$

Данный блок имитирует возможное повышение и снижение давления в горячей нитке в виде временного гармонического сигнала. Заданное значение давления составляет 16 МПа.

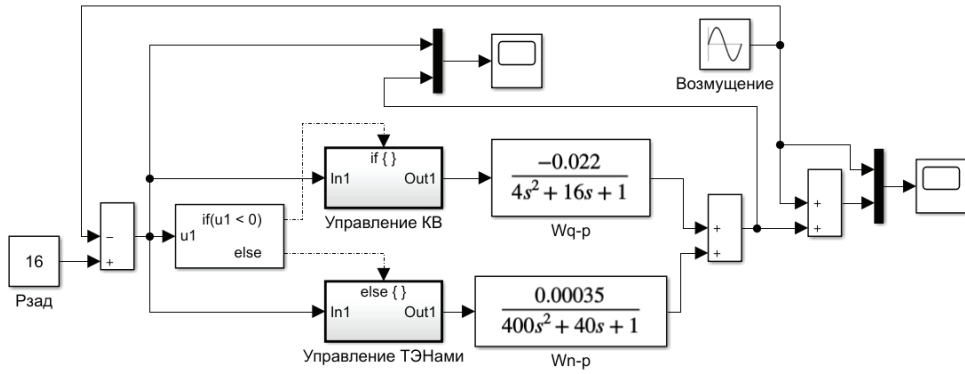


Рисунок 4 – Имитационная модель САР давления

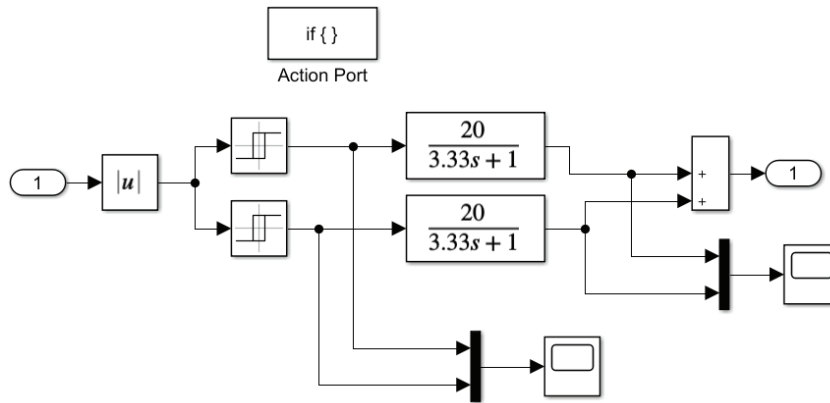


Рисунок 5 – Подсистема управления клапанами впрыска

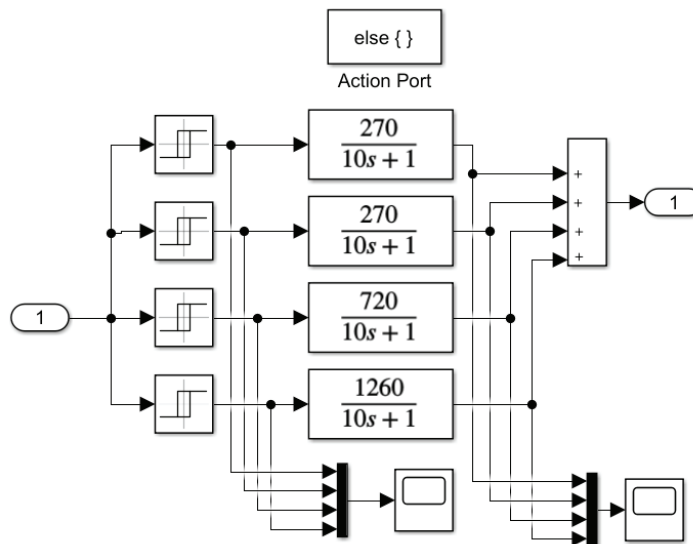


Рисунок 6 – Подсистема управления группами ТЭНов

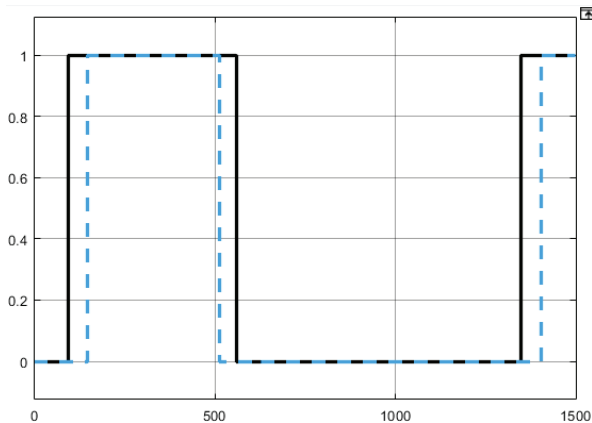


Рисунок 7 – Сигналы после релейных блоков управления клапанами

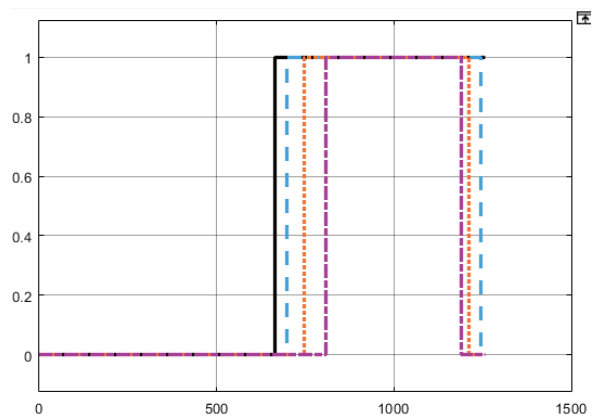


Рисунок 8 – Сигналы после блоков управления группами ТЭНов

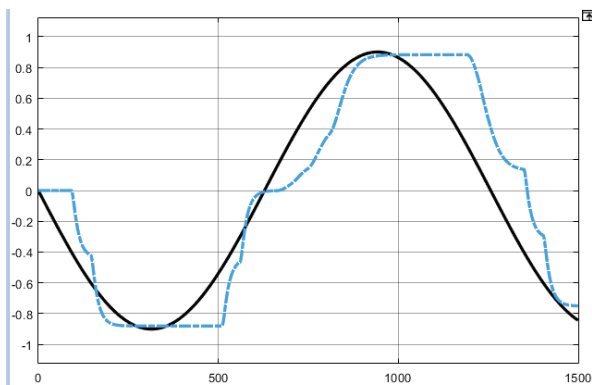


Рисунок 9 – Сигнал ошибки и его отработка системой

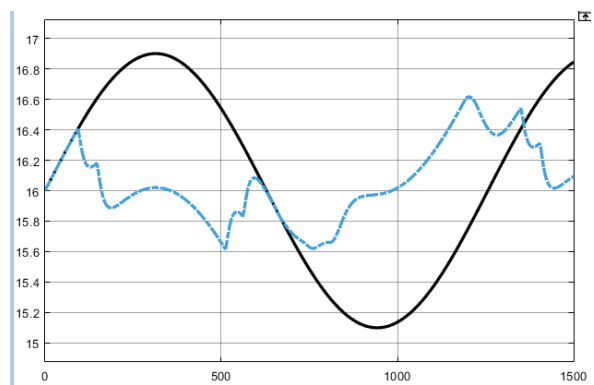


Рисунок 10 – Входное возмущение и изменение давления

Ошибка  $u_1$ , возникающая в ходе сравнения текущего значения с заданным, поступает на блок условного перехода. Если ошибка имеет отрицательный знак, что говорит о превышении текущего давления, то включается блок управления клапанами впрыска (рисунок 5). При положительной ошибке в случае снижения текущего давления работает блок управления ТЭНами (рисунок 6).

Включение и отключение каждого исполнительного механизма имитируют релейные блоки в зависимости от величины ошибки. Отрицательные значения ошибки в блоке управления клапанами меняются на положительные путем использования блока расчета модуля. Сигналы

после релейных блоков управления клапанами представлены на рисунке 7, а для регулирования с помощью групп ТЭНов – на рисунке 8.

На рисунке 9 представлен сигнал ошибки и его отработка системой компенсации давления. Инерционные свойства исполнительных механизмов и компенсатора давления определяют отставания в системе. На рисунке 10 представлено входное возмущение и изменение давления в компенсаторе.

В начальный период времени, когда давление растет до величины 16,4 МПа, рассматриваемый всережимный регулятор не работает. В этот момент работает регулятор YPC05 “тонкого впрыска”, который в модели не учтен, но он может быть добавлен путем использования

соответствующих релейных блоков в подсистеме управления клапанами. Согласно рисунку 10, регулятор реагирует на тенденцию изменения давления, включаются либо клапаны впрыска, либо ТЭНы и давление начинает стабилизироваться. Но точность и быстродействие работы системы компенсации без использования специальных корректирующих алгоритмов невысокое. Полученные результаты позволяют судить об адекватности разработанной имитационной модели и возможности ее использования для отработки различных законов регулирования.

Разработанная имитационная модель позволяет изучать структуру САР давления и математическое описание ее элементов, изменять внешнее возмущение и сигнал задания, фиксировать графики изменения давления в контуре и других параметров в ходе варьирования входных воздействий и внутренних параметров системы.

Результаты разработки имитационной модели системы компенсации с всережимным регулятором могут быть использованы для создания полной модели системы компенсации, включая штатный и пусковой регуляторы уровня в КД, регулятор расхолаживания КД и “тонкого” впрыска, в том числе для синтеза новых структур локальных систем автоматического управления.

#### **Литература**

1. Горбатов С.А. Системы компенсации давления в первом контуре АЭС с водо-водяным энергетическим реактором / С.А. Горбатов, В.И. Полуничев // Физико-техническая информатика (СРТ2020): материалы 8-ой Международной конференции, Пущино, Московская обл., 09–13 ноября 2020 года, Нижний Новгород / Автономная некоммерческая организация в области информационных технологий “Научно-исследовательский центр физико-технической информатики”. Н. Новгород, 2020. С. 204–207.
2. Демченко В.А. Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭЦ / В.А. Демченко. Одесса: Астропринт, 2001. 305 с.
3. Тямалов А.А. Особенности управления технологическими параметрами системы компенсации давления АЭС с реактором ВВЭР-1000 / А.А. Тямалов, Я.А. Дубченко // Глобальная ядерная безопасность. 2014. № 2(11). С. 98–103.
4. Мефедова Ю.А. Математическая модель компенсатора давления атомной станции / Ю.А. Мефедова, А.П. Пичиневский // Современные технологии в атомной энергетике: сб. трудов III Всероссийской научно-практической конференции: в 3 т. / Балаковский инженерно-технологический институт (филиал) Национального исследовательского ядерного университета “МИФИ”. М., 2017. С. 32–36.
5. Мефедова Ю.А. Simulink-модель компенсатора давления / Ю.А. Мефедова, А.П. Пичиневский // Актуальные проблемы и пути развития энергетики, техники и технологий: сб. трудов IV Международной научно-практической конференции. М., 2018. С. 91–94.