

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»

Высшая школа электроники и компьютерных наук
Кафедра «Электронные вычислительные машины»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой ЭВМ
_____ Д.В. Топольский
« ____ » _____ 2025 г.

Разработка системы управления электрогидравлического усилителя
мощности на основе SCADA-системы

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУРГУ-090301.2025.406 ПЗ ВКР

Руководитель работы,
к.т.н., доцент каф. ЭВМ
_____ Д.В. Топольский
« ____ » _____ 2025 г.

Автор работы,
студент группы КЭ-406
_____ А.К. Мокрецкий
« ____ » _____ 2025 г.

Нормоконтролёр,
ст. преподаватель каф. ЭВМ
_____ С.В. Сяськов
« ____ » _____ 2025 г.

Челябинск-2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»
Высшая школа электроники и компьютерных наук
Кафедра «Электронные вычислительные машины»

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой ЭВМ
_____ Д.В. Топольский
«___» _____ 2025 г.

ЗАДАНИЕ
на выпускную квалификационную работу бакалавра
студенту группы КЭ-406
Мокрецкому Александру Константиновичу
обучающемуся по направлению
09.03.01 «Информатика и вычислительная техника»

1. **Тема работы:** «Разработка системы управления электрогидравлического усилителя мощности на основе SCADA-системы» утверждена приказом по университету от «21» апреля 2025 г. № 648-13/12.
2. **Срок сдачи студентом законченной работы:** 01 июня 2025 г.
3. **Исходные данные к работе:**
 - 3.1. Платформа приложения: персональный компьютер.
 - 3.2. Операционная система: Microsoft Windows 10.
 - 3.3. SCADA-система MasterSCADA.

4. Перечень подлежащих разработке вопросов:

- 4.1. Аналитический обзор научно-технической, нормативной и методической литературы по тематике работы.
- 4.2. Разработка математической модели и расчет параметров системы управления ЭГУМ.
- 4.3. Проектирование и реализация SCADA-системы управления.
- 4.4. Проверка функционирования системы и анализ результатов.

5. Дата выдачи задания: 2 декабря 2024 г.

Руководитель работы _____ / *Д.В. Топольский* /

Студент _____ / *А.К. Мокрецкий* /

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Этап	Срок сдачи	Подпись руководителя
Аналитический обзор научно-технической, нормативной и методической литературы по тематике работы	01.03.2025	
Разработка математической модели и расчет параметров системы управления ЭГУМ	24.03.2025	
Проектирование и реализация SCADA-системы управления	07.04.2025	
Проверка функционирования системы и анализ результатов	15.05.2025	
Компоновка текста работы и сдача на нормоконтроль	24.05.2025	
Подготовка презентации и доклада	30.05.2025	

Руководитель работы _____ / *Д.В. Топольский* /

Студент _____ / *А.К. Мокрецкий* /

Аннотация

А.К. Мокрецкий. Разработка системы управления электрогидравлического усилителя мощности на основе SCADA-системы. – Челябинск: ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», ВШ ЭКН; 2025, 49 с., 7 ил., библиогр. список – 18 наим.

В данной выпускной квалификационной работе рассматривается проектирование системы управления электрогидравлическим усилителем мощности на базе SCADA-системы MasterSCADA.

Целью работы является разработка имитационной модели системы автоматического управления, обеспечивающей задание и контроль управляющего сигнала, визуализацию состояния объекта и реализацию базовых функций аварийной сигнализации.

В процессе работы выполнено исследование технической сущности ЭГУМ, рассмотрены современные средства SCADA-автоматизации, произведён выбор программных средств и построена структурная схема управления.

Создан интерфейс оператора, реализующий функции задания параметров и мониторинга состояния системы. Разработан логический алгоритм функционирования имитационной модели контроллера, управляющего виртуальным исполнительным механизмом.

Работа может быть использована как основа для дальнейшей модернизации или реального внедрения системы управления в автоматизированные гидравлические комплексы.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	8
1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СОВРЕМЕННОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ, НОРМАТИВНОЙ, МЕТОДИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, ЗАТРАГИВАЮЩЕЙ ИССЛЕДУЕМУЮ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКУЮ ПРОБЛЕМУ	10
1.1. НАЗНАЧЕНИЕ И ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ.....	10
1.2. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ И ИХ ЭВОЛЮЦИЯ	12
1.3. ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ	15
1.4. SCADA-СИСТЕМЫ В УПРАВЛЕНИИ ГИДРАВЛИЧЕСКИМИ ПРИВОДАМИ: СОВРЕМЕННЫЕ РЕШЕНИЯ	17
1.5. НОРМАТИВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ	19
1.6. МЕТОДИКИ РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИМИ УСИЛИТЕЛЯМИ МОЩНОСТИ	20
1.7. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ	22
1.8. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ	23
2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭГУМ.....	25
2.1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ	25
2.2. СТРУКТУРА МОДЕЛИ.....	26

2.3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ МОДЕЛИ.....	28
2.3.1. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЗОЛОТНИКОМ	28
2.3.2. РАСЧЕТ РАСХОДОВ ЧЕРЕЗ ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ КАНАЛЫ	29
2.3.3. РАСЧЕТ ДАВЛЕНИЯ В КАМЕРАХ.....	31
2.3.4. ЛОГИКА УПРАВЛЕНИЯ И АВАРИЙНАЯ БЛОКИРОВКА	32
2.3.5 СТАТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ.....	32
3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ SCADA-СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ.....	34
3.1. АРХИТЕКТУРА SCADA-ПРОЕКТА.....	34
3.2. РЕАЛИЗАЦИЯ ЛОГИКИ УПРАВЛЕНИЯ	35
3.3. ИНТЕРФЕЙС ОПЕРАТОРА.....	36
3.4. ОБРАБОТКА АВАРИЙНЫХ И БЛОКИРУЮЩИХ УСЛОВИЙ	38
4. ПРОВЕРКА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ	39
4.1. ЦЕЛЬ ПРОВЕРКИ МОДЕЛИ	39
4.2. МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ	40
4.3. ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ	41
4.4. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ.....	45
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	48

ВВЕДЕНИЕ

Современное машиностроение, энергетика, транспорт и другие отрасли промышленности находятся в постоянном процессе модернизации и автоматизации. Это связано как с необходимостью повышения производительности и качества продукции, так и с требованиями к надёжности, безопасности и энергоэффективности оборудования. Одним из важнейших направлений в этой области является внедрение систем автоматического управления и диспетчерского контроля, способных обеспечивать как управление процессами в реальном времени, так и сбор, хранение и анализ технологических данных.

Особую роль в таких системах играют SCADA-системы (Supervisory Control And Data Acquisition) – программные комплексы, обеспечивающие мониторинг и управление технологическими объектами через операторский интерфейс. SCADA-системы позволяют централизованно контролировать параметры оборудования, управлять исполнительными механизмами, осуществлять архивирование информации, отображать мнемосхемы и реагировать на аварийные ситуации.

Одним из объектов автоматизации, часто встречающихся в составе гидроприводов, является электрогидравлический усилитель мощности (ЭГУМ). Это устройство предназначено для преобразования слабых электрических управляющих сигналов в мощные механические воздействия за счёт использования энергии рабочей жидкости. ЭГУМы широко применяются в системах управления подвижными частями оборудования, где требуется высокая точность, надёжность и быстрое реагирование на управляющие команды.

В данной работе рассматривается задача разработки системы управления электрогидравлическим усилителем мощности на основе SCADA-системы. Проект реализуется в программной среде MasterSCADA, с использованием имитационной модели контроллера, выполняющей

обработку сигнала управления и моделирование ответной реакции объекта. Предусматривается визуализация параметров ЭГУМ, реализация базовых функций сигнализации, а также возможность задания управляющего воздействия с интерфейса оператора.

Целью работы является разработка функциональной модели системы управления электрогидравлическим усилителем мощности с использованием SCADA-системы MasterSCADA.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Провести анализ современных технических решений в области управления электрогидравлическими системами и SCADA-технологий.
2. Разработать математическую модель ЭГУМ и определить основные параметры объекта управления.
3. Сформировать структурную схему системы управления с выделением ключевых компонентов и сигналов.
4. Реализовать интерфейс оператора и алгоритмы управления в среде MasterSCADA.
5. Выполнить имитационное моделирование работы системы, провести проверку функционирования и проанализировать результаты.

1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СОВРЕМЕННОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ, НОРМАТИВНОЙ, МЕТОДИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, ЗАТРАГИВАЮЩЕЙ ИССЛЕДУЕМУЮ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКУЮ ПРОБЛЕМУ

1.1. НАЗНАЧЕНИЕ И ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ

Электрогидравлические усилители мощности (ЭГУМ) представляют собой важный класс устройств в современных системах автоматического управления, выполняющих функцию преобразования и усиления управляющих сигналов. Эти устройства занимают промежуточное положение между системами управления и силовыми исполнительными механизмами, обеспечивая согласование параметров управляющих сигналов с характеристиками рабочих органов технологического оборудования [1, 2].

Основное назначение ЭГУМ заключается в точном преобразовании маломощных электрических сигналов управления в пропорциональные им гидравлические воздействия значительной мощности [1, 3]. Такое преобразование позволяет осуществлять эффективное управление мощными гидравлическими приводами при помощи относительно слабых электрических сигналов, поступающих от систем автоматического регулирования. Особую значимость эти устройства приобретают в системах, где требуется сочетание высокой точности управления с существенными выходными усилиями.

Принцип работы электрогидравлических усилителей мощности основан на каскадном преобразовании энергии [3]. Первичный электрический сигнал управления поступает на электромеханический преобразователь, где происходит его трансформация в механическое перемещение. Это перемещение воздействует на чувствительный элемент гидравлической части усилителя – обычно золотниковый распределитель,

который регулирует потоки рабочей жидкости. В результате создается управляющее гидравлическое воздействие, пропорциональное входному электрическому сигналу, но обладающее значительно большей мощностью.

На рисунке 1.1 представлена вариация принципиальной схемы ЭГУМ. 1 – управляющая заслонка; 2 – сопла; 3 – постоянные гидравлические дроссели; 4 – золотник гидравлического исполнительного механизма; 5 – центрирующие пружины; 6 – рабочие камеры; 7 – электромеханический преобразователь; P_n – давление питания.

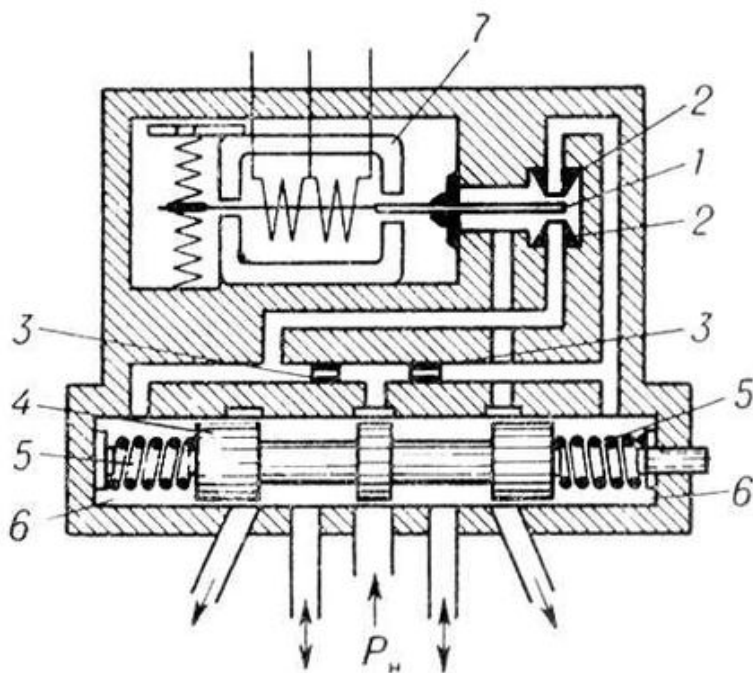


Рисунок 1.1 – Принципиальная схема ЭГУМ [16]

Современные электрогидравлические усилители мощности характеризуются рядом существенных особенностей. Во-первых, они используют принцип отрицательной обратной связи, когда фактическое положение выходного звена непрерывно измеряется и сравнивается с заданным значением. Это позволяет компенсировать различные нелинейности системы, такие как трение, люфты и гистерезисные явления. Во-вторых, в последних разработках все шире применяются цифровые методы управления, обеспечивающие более высокую точность и гибкость регулирования [2, 4].

Области применения ЭГУМ чрезвычайно разнообразны. В авиационной технике они используются для управления рулевыми поверхностями, где требуются высокая надежность и точность позиционирования. В промышленном оборудовании эти устройства применяются в прессовых установках, металлообрабатывающих станках, системах автоматизации производственных линий [5]. Особые требования к характеристикам усилителей предъявляются в робототехнике, где необходимо обеспечить плавность движений при значительных нагрузках.

Эволюция электрогидравлических усилителей мощности отражает общие тенденции развития мехатронных систем [6]. Современные устройства отличаются от своих предшественников более компактными размерами, повышенной энергоэффективностью и лучшими точностными характеристиками. Особое внимание при их разработке уделяется вопросам надежности и долговечности, что достигается применением новых материалов и совершенствованием конструктивных решений.

Перспективы развития ЭГУМ связаны с дальнейшей интеграцией электронных и гидравлических компонентов, внедрением интеллектуальных алгоритмов управления, а также совершенствованием диагностических систем [7]. Все это позволит создавать устройства с улучшенными эксплуатационными характеристиками, способные эффективно работать в составе сложных автоматизированных комплексов.

1.2. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ И ИХ ЭВОЛЮЦИЯ

Современные электрогидравлические усилители мощности (ЭГУМ) представляют собой результат последовательного технологического развития, отражающего общие тенденции совершенствования мехатронных систем. Исторический анализ показывает, что эволюция конструкций происходила по пути повышения точности, надежности и

энергоэффективности при одновременном уменьшении массогабаритных показателей.

На начальном этапе развития ЭГУМ основывались на релейных соленоидных системах с дискретным управлением. Такие конструкции отличались относительной простотой, но имели существенные ограничения по точности позиционирования и ресурсу работы. Переход к пропорциональным системам управления стал возможен благодаря развитию электронных компонентов и появлению новых материалов, что позволило реализовать плавное регулирование параметров.

Современные электрогидравлические усилители характеризуются комплексным подходом к проектированию, учитывающим взаимное влияние электрических, механических и гидравлических процессов. Особенностью последних разработок стало применение прецизионных электромеханических преобразователей с цифровым управлением, обеспечивающих высокую линейность характеристик. В гидравлической части используются многоступенчатые усилительные каскады, позволяющие достигать значительных коэффициентов усиления при сохранении стабильности работы. На рисунке 1.2 представлен макет ЭГУМ, разработанный в ЮУрГУ в 2024 г.



Рисунок 1.2. – Макет ЭГУМ [17]

Важным направлением совершенствования конструкций стало внедрение новых материалов для критических узлов. Рабочие поверхности золотниковых пар теперь выполняются с применением износостойких покрытий, существенно увеличивающих ресурс устройства. Для уплотнений используются современные композитные материалы, сочетающие низкое трение с высокой химической стойкостью. Корпусные детали изготавливаются из специальных термостабильных сплавов, минимизирующих температурные деформации.

Эволюция конструктивных решений привела к появлению компактных модульных систем, легко интегрируемых в автоматизированные комплексы. Современные усилители часто оснащаются встроенными датчиками состояния, позволяющими осуществлять непрерывный мониторинг рабочих параметров. Это особенно важно для систем, работающих в интенсивном режиме или труднодоступных для обслуживания местах [4, 7].

Перспективные разработки в данной области ориентированы на создание полностью цифровых устройств с непосредственным управлением через промышленные сети. Такие решения демонстрируют улучшенные

динамические характеристики и упрощают интеграцию в системы управления нового поколения. Одновременно ведется работа по дальнейшему уменьшению габаритов при сохранении мощностных параметров, что открывает новые возможности применения в робототехнике и компактных промышленных установках.

1.3. ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ

Анализ динамических характеристик электрогидравлических усилителей мощности требует комплексного подхода, учитывающего взаимосвязь электрических, механических и гидравлических процессов. Поведение системы в переходных режимах определяется совокупностью инерционных, упругих и диссипативных свойств ее элементов.

Электромеханическая часть усилителя характеризуется наличием электромагнитной инерции, обусловленной конечной скоростью нарастания тока в обмотках управления. Этот процесс описывается дифференциальными уравнениями первого порядка, где постоянная времени зависит от параметров электрической цепи и магнитной системы. Механическая подсистема вносит дополнительную инерционность, связанную с массой подвижных элементов и жесткостью механических связей. На рисунке 1.3 представлена структурная схема системы управления.

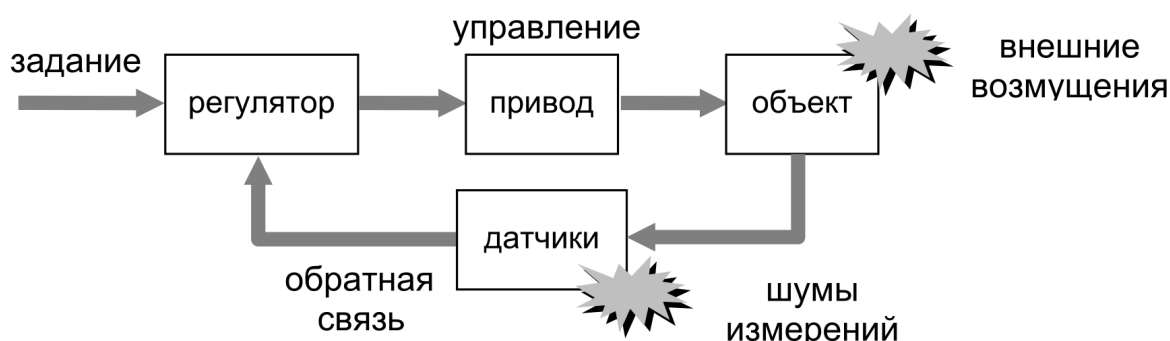


Рисунок 1.3 – Структурная схема системы управления [18]

Гидравлическая составляющая системы представляет наибольшую сложность для математического описания. Течение рабочей жидкости через дросселирующие каналы описывается нелинейными зависимостями, учитывающими турбулентный характер потока при больших перепадах давления. Упругие свойства жидкости и трубопроводов приводят к появлению колебательных процессов, частота которых определяется объемным модулем упругости и геометрическими параметрами гидравлической системы [8].

Современные подходы к моделированию ЭГУМ основываются на методе пространства состояний, позволяющем компактно представить систему дифференциальных уравнений высокого порядка. Вектор состояния обычно включает: ток управления, положение якоря, скорость движения золотника, давление в рабочих полостях и положение выходного звена. Такая модель адекватно описывает поведение системы в широком диапазоне рабочих режимов.

Экспериментальные исследования динамических характеристик проводятся с использованием специализированных стендов, оснащенных датчиками высокого быстродействия. Полученные переходные характеристики позволяют идентифицировать параметры модели и оценить запасы устойчивости системы. Особое внимание уделяется анализу частотных характеристик, демонстрирующих резонансные явления в различных частотных диапазонах.

Важным аспектом динамического анализа является исследование устойчивости системы при различных внешних воздействиях. Современные методы теории автоматического управления позволяют синтезировать корректирующие устройства, обеспечивающие требуемые показатели качества переходных процессов. Наибольшее распространение получили ПИД-регуляторы с адаптивными алгоритмами настройки, компенсирующие нелинейности системы.

Перспективным направлением развития математических моделей является учет тепловых процессов, влияющих на вязкость рабочей жидкости и зазоры в подвижных соединениях. Такие уточненные модели особенно важны для систем, работающих в условиях переменных тепловых нагрузок или требующих высокой точности в широком диапазоне температур.

1.4. SCADA-СИСТЕМЫ В УПРАВЛЕНИИ ГИДРАВЛИЧЕСКИМИ ПРИВОДАМИ: СОВРЕМЕННЫЕ РЕШЕНИЯ

Современные системы диспетчерского управления и сбора данных (SCADA) занимают центральное место в автоматизации управления электрогидравлическими усилителями мощности. Их внедрение позволило перейти от локального управления отдельными агрегатами к комплексному контролю технологических процессов в реальном времени [9].

Архитектура SCADA-систем для управления ЭГУМ строится по трехуровневому принципу. Нижний уровень включает полевые устройства – датчики давления, расхода, положения и температуры, соединенные с программируемыми логическими контроллерами (ПЛК). Промежуточный уровень представляет собой промышленные сети передачи данных, обеспечивающие обмен информацией между оборудованием и верхним уровнем – операторскими станциями. Особенностью современных решений является использование распределенных баз данных и web-технологий, позволяющих осуществлять удаленный мониторинг и управление [11, 12].

Функциональные возможности SCADA-систем применительно к управлению ЭГУМ включают несколько ключевых аспектов. Во-первых, это визуализация технологического процесса с отображением текущих параметров работы усилителя – давления в магистралях, положения исполнительного механизма, температуры рабочей жидкости. Во-вторых, реализация алгоритмов автоматического регулирования, включая ПИД-регуляторы и более сложные адаптивные системы управления. В-третьих,

ведение архива параметров с возможностью последующего анализа и формирования отчетов [10].

Особого внимания заслуживают диагностические функции SCADA-систем. Современные программные комплексы, такие как MasterSCADA, включают модули прогнозирования технического состояния оборудования. Анализируя динамику изменения рабочих параметров, система способна обнаруживать признаки износа критических компонентов – увеличение утечек, изменение характеристик золотниковых пар, снижение КПД. Это позволяет перейти от планово-предупредительного обслуживания к обслуживанию по фактическому состоянию.

Интеграция ЭГУМ в SCADA-систему требует решения ряда технических задач. Ключевой из них является обеспечение надежной связи между гидравлическим оборудованием и системой управления. В современных проектах для этого используются промышленные протоколы связи (Modbus, PROFIBUS, OPC UA), обеспечивающие необходимую скорость и надежность передачи данных. Важное значение имеет также вопрос кибербезопасности, особенно для систем, подключенных к корпоративным сетям.

Перспективы развития SCADA-систем для управления ЭГУМ связаны с внедрением технологий искусственного интеллекта и промышленного интернета вещей (IIoT). Машинное обучение позволяет создавать более точные модели прогнозирования состояния оборудования, а технологии IIoT – организовывать распределенные системы управления с минимальными задержками. Особенно перспективным направлением является создание цифровых двойников гидравлических систем, позволяющих оптимизировать режимы работы без вмешательства в реальный технологический процесс [13, 14].

1.5. НОРМАТИВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ

Разработка и эксплуатация электрогидравлических усилителей мощности осуществляется в строгом соответствии с установленными нормативными документами. Эти требования охватывают все аспекты – от выбора материалов до алгоритмов управления, обеспечивая безопасность, надежность и совместимость оборудования.

Международные стандарты IEC серии 61131 устанавливают базовые принципы построения систем автоматизации. Особое значение имеет часть IEC 61131-3, регламентирующая языки программирования промышленных контроллеров. Для гидравлических систем критически важны требования стандартов ISO 4413 и ISO 18749-2, определяющие параметры рабочей жидкости, допустимые уровни давления и методы испытаний.

В российской практике основополагающим является ГОСТ Р 52725-2007 "Гидроприводы объемные. Общие технические требования". Этот документ детально регламентирует:

- методы контроля параметров;
- требования к герметичности;
- допустимые уровни шума;
- показатели энергоэффективности.

Особую группу составляют отраслевые стандарты. Например, в авиационной технике применяются дополнительные требования к виброустойчивости и температурному диапазону работы. Для промышленного оборудования важны стандарты, касающиеся электромагнитной совместимости и защиты от перегрузок.

Современные тенденции в стандартизации отражают растущую важность вопросов кибербезопасности. Новые редакции нормативных документов включают требования к защите систем управления от

несанкционированного доступа. Это особенно актуально для SCADA-систем, подключенных к корпоративным сетям.

Не менее важны экологические нормативы, регламентирующие использование рабочих жидкостей и материалов. Европейские директивы RoHS и REACH устанавливают строгие ограничения на содержание опасных веществ. В России аналогичные требования содержатся в технических регламентах Таможенного союза.

Перспективы развития нормативной базы связаны с гармонизацией национальных и международных стандартов. Это особенно важно для производителей, работающих на глобальных рынках. Активно разрабатываются новые стандарты для цифровых гидравлических систем и интеллектуальных датчиков.

1.6. МЕТОДИКИ РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИМИ УСИЛИТЕЛЯМИ МОЩНОСТИ

Проектирование систем управления электрогидравлическими усилителями мощности требует комплексного подхода, учитывающего взаимосвязь электрических, механических и гидравлических процессов. Современные методики расчета основаны на принципах системного анализа и включают несколько последовательных этапов.

На начальном этапе проектирования выполняется анализ технического задания с определением основных требований к системе. Ключевыми параметрами являются: требуемое выходное усилие, точность позиционирования, быстродействие, диапазон рабочих температур и условия эксплуатации. Эти данные становятся основой для последующих расчетов.

Расчет гидравлической части начинается с определения рабочих давлений и расходов. Используются уравнения неразрывности потока и баланса давлений, учитывающие характеристики насосного агрегата, гидравлического сопротивления трубопроводов и рабочих органов. Особое

внимание уделяется расчету динамических характеристик, где применяются методы теории автоматического управления с построением передаточных функций.

Электрическая часть рассчитывается исходя из требований к управляющим сигналам. Определяются параметры электромагнитных преобразователей: сила притяжения, рабочий ход, индуктивность обмоток. Для цифровых систем управления дополнительно рассчитываются параметры интерфейсных схем и фильтров.

Современные методики проектирования все чаще используют компьютерное моделирование. Применение специализированного ПО (например, MATLAB SimHydraulics или AMESim) позволяет:

- анализировать переходные процессы;
- оптимизировать параметры системы;
- проводить виртуальные испытания;
- оценивать надежность конструкции.

Важным этапом проектирования является разработка алгоритмов управления. Для ЭГУМ наиболее распространены ПИД-регуляторы, параметры которых рассчитываются методами модального управления или частотными характеристиками. В сложных системах применяются адаптивные и нечеткие алгоритмы, обеспечивающие устойчивую работу при изменяющихся нагрузках.

Заключительной стадией проектирования является разработка конструкторской документации. Современные требования предусматривают создание не только традиционных чертежей, но и 3D-моделей всех компонентов системы. Это позволяет проводить проверку на технологичность и собираемость еще на этапе проектирования.

Особое внимание уделяется методикам испытаний и приемочного контроля. Разрабатываются специальные тестовые режимы, позволяющие проверить работу системы в экстремальных условиях. Все чаще

применяются автоматизированные стенды, способные проводить комплексные испытания с регистрацией сотен параметров в реальном времени.

1.7. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ

Современный рынок электрогидравлических усилителей мощности предлагает широкий спектр технических решений, различающихся по конструктивному исполнению, характеристикам и области применения. Проведенный анализ позволяет выделить несколько ключевых направлений развития данной техники.

Наибольшее распространение получили золотниковые усилители с пропорциональным управлением. Их преимущество заключается в отработанной конструкции и относительно низкой стоимости. Однако такие системы обладают ограниченным быстродействием (порядка 50-100 Гц) и чувствительны к загрязнению рабочей жидкости. В последние годы наблюдается устойчивый рост доли цифровых усилителей прямого действия, где золотник приводится в движение линейным сервоприводом. Эти решения демонстрируют лучшее быстродействие (до 200 Гц) и точность позиционирования, но требуют более сложной системы управления.

Анализ продукции ведущих производителей (Bosch Rexroth, Parker Hannifin, Eaton) показывает существенные различия в подходах к проектированию. Немецкая школа характеризуется акцентом на точность и надежность, что отражается в использовании прецизионных материалов и сложных систем фильтрации. Американские производители делают ставку на стандартизацию и унификацию компонентов, что упрощает обслуживание и ремонт. Японские разработки отличаются миниатюризацией и высокой энергоэффективностью.

Особого внимания заслуживает сравнение традиционных гидравлических решений с новыми электромеханическими приводами. Если

первые сохраняют преимущество в системах с экстремальными нагрузками (усилие свыше 100 кН), то вторые демонстрируют лучшие показатели в приложениях, требующих высокой динамики и точности. Компромиссным решением становятся гибридные системы, сочетающие преимущества обоих подходов.

Важным критерием сравнения является степень интеграции с системами автоматизации. Современные тенденции показывают устойчивый рост доли "интеллектуальных" усилителей, оснащенных встроенными датчиками и сетевыми интерфейсами. Такие решения особенно востребованы в концепциях "Индустрии 4.0", где требуется глубокая интеграция оборудования в цифровую среду предприятия.

Перспективы развития видятся в дальнейшей дифференциации решений под конкретные задачи. Уже сегодня можно наблюдать появление специализированных серий для робототехники, авиакосмической техники и тяжелого машиностроения. Особый интерес представляют разработки с адаптивными характеристиками, автоматически подстраивающиеся под изменение внешних условий и нагрузок.

1.8. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ

Современные научные исследования в области электрогидравлических усилителей мощности демонстрируют устойчивую тенденцию к созданию интеллектуальных систем нового поколения. Основным вектор развития связан с внедрением адаптивных алгоритмов управления, способных компенсировать изменение эксплуатационных параметров в реальном времени. Особое внимание исследователей привлекает разработка методов автоматической коррекции характеристик, учитывающих температурную зависимость вязкости рабочей жидкости и прогрессирующий износ сопрягаемых деталей.

Перспективным направлением научных изысканий является интеграция методов искусственного интеллекта в системы управления гидравлическими усилителями. Современные исследования показывают эффективность применения нейросетевых алгоритмов для прогнозирования остаточного ресурса критически важных компонентов. Данный подход позволяет существенно повысить надежность работы оборудования за счет своевременного предупреждения о потенциальных отказах.

Значительный научный интерес представляет разработка энергоэффективных решений на основе принципов рекуперации энергии. Теоретические исследования и экспериментальные данные подтверждают возможность существенного снижения энергопотребления за счет оптимизации гидравлических схем и применения прецизионных систем дозирования рабочей жидкости. Особенно перспективными считаются разработки, сочетающие цифровые методы управления с использованием новых типов рабочих сред, обладающих улучшенными эксплуатационными характеристиками [15].

В контексте цифровой трансформации промышленности особую актуальность приобретают исследования в области сетевого взаимодействия гидравлических систем. Научные работы последних лет демонстрируют возможность эффективной интеграции ЭГУМ в промышленные сети передачи данных с использованием современных протоколов, таких как OPC UA и TSN. Это направление открывает новые перспективы для реализации концепций предиктивного обслуживания и удаленного мониторинга состояния оборудования.

Материаловедческие исследования сосредоточены на разработке новых композиционных материалов для критически важных узлов усилителей. Перспективные разработки включают применение наноструктурированных покрытий, способных существенно увеличить ресурс трущихся пар, а также использование самосмазывающихся материалов для работы в экстремальных условиях эксплуатации. Особого внимания заслуживают исследования в

области создания экологически безопасных решений, соответствующих принципам устойчивого развития.

Теоретические и прикладные исследования в области миниатюризации гидравлических компонентов открывают новые возможности для применения ЭГУМ в робототехнике и медицинском оборудовании. Современные научные работы демонстрируют возможность создания компактных систем с сохранением высоких мощностных характеристик, что особенно важно для перспективных областей применения.

2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭГУМ

2.1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Целью разработки имитационной модели электрогидравлического усилителя мощности (ЭГУМ) в рамках данной работы является исследование его динамических характеристик и анализ поведения системы управления при различных воздействиях. Модель предназначена для реализации в среде SCADA-системы MasterSCADA с целью обеспечения возможности виртуальной отладки алгоритмов управления и визуализации параметров объекта.

Основными задачами моделирования являются:

- описание взаимосвязанных физических процессов в системе управления ЭГУМ, включая электромеханическое управление золотником, распределение потоков рабочей жидкости и изменение давления в рабочих полостях;
- реализация алгоритмов управления, включая блокировку, возврат в нейтральное положение и обработку аварийных ситуаций;
- формализация физических зависимостей в виде расчетных выражений и их последующая реализация средствами MasterSCADA;

- создание инструментов визуализации параметров модели (расходов, давлений, положения золотника), обеспечивающих наглядное отображение динамики процесса;
- обеспечение возможности последующей верификации модели и использования ее в качестве основы для расширения функциональности системы управления.

Разрабатываемая модель должна учитывать основные нелинейные зависимости, характерные для гидравлических систем, и обеспечивать приближенную адекватность поведения объекта управления в динамике при изменении управляющего сигнала и начальных условий.

2.2. СТРУКТУРА МОДЕЛИ

Структура имитационной модели ЭГУМ включает в себя несколько взаимосвязанных функциональных блоков, каждый из которых отвечает за моделирование определённой физической подсистемы:

Блок управления золотником – реализует обработку управляющего сигнала (влево, вправо, блокировка) и определяет целевое положение золотника. Здесь же осуществляется имитация возврата золотника в нейтральное положение при отсутствии управляющего воздействия.

Электромеханическая модель перемещения золотника – описывает динамику перемещения золотника в зависимости от сигнала управления, с учётом ограничений на максимальное положение и скорость перемещения.

Гидравлический распределитель (золотник) – осуществляет логическое управление открытием каналов подачи и отвода рабочей жидкости в зависимости от текущего положения золотника (открытие каналов РА, РВ, АТ, ВТ).

Блок расчета расходов – производит вычисление расходов жидкости через каналы на основе уравнения расхода через дросселирующее отверстие с учётом перепадов давления и степени открытия канала.

Модуль расчёта давления в рабочих полостях – рассчитывает изменение давления в камерах А и В на основании баланса притока и оттока жидкости, используя модуль объемной упругости масла.

Система обработки аварийных и блокирующих условий – обеспечивает остановку работы модели или переключение её в безопасное состояние при превышении допустимых значений параметров или наличии признаков неисправности.

Взаимосвязь компонентов модели представлена на структурной схеме (рисунок 2.1), где стрелками обозначены направления передачи данных между модулями. Каждый элемент модели взаимодействует с другими посредством обмена расчетными величинами (давление, расходы, положение и т.д.), что обеспечивает целостность системы.

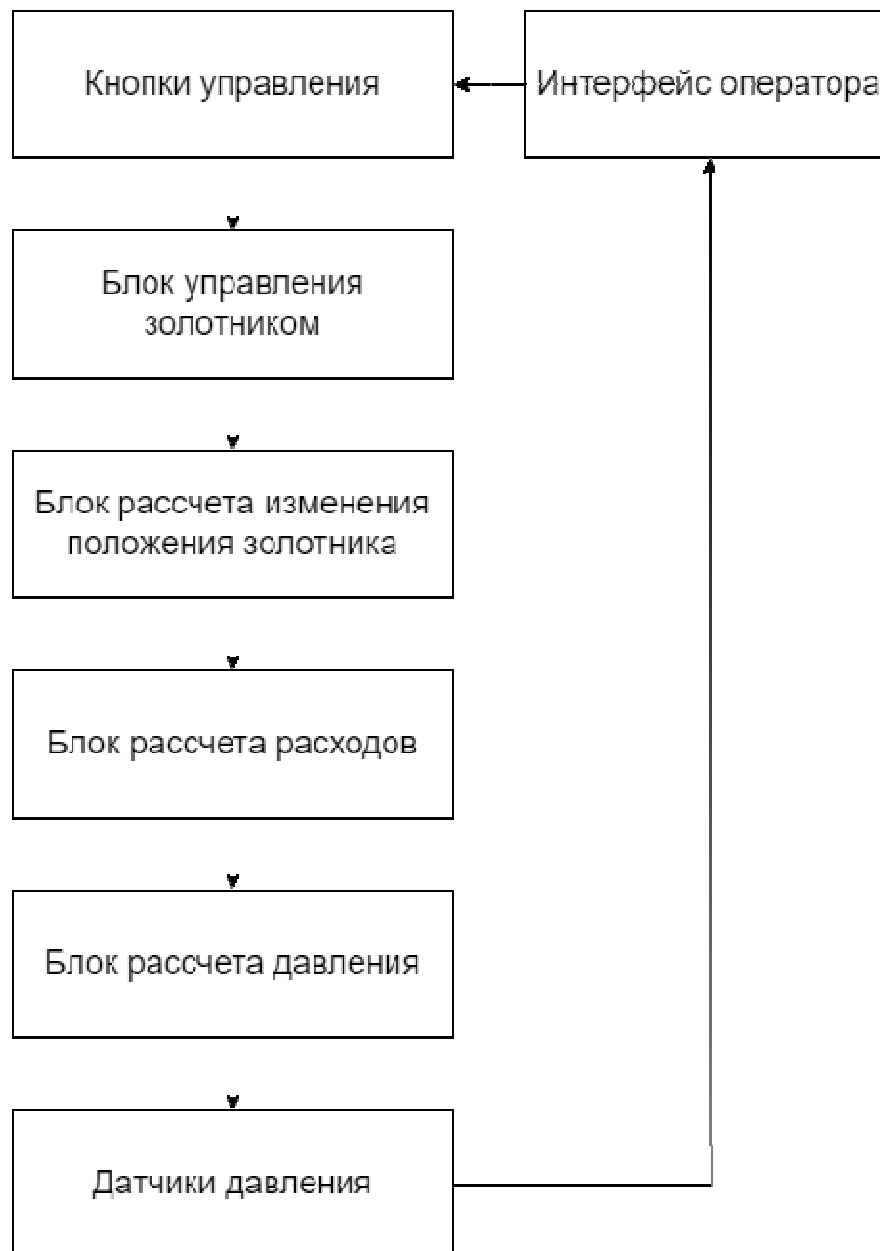


Рисунок 2.1 – Структурная схема модели системы управления ЭГУМ

2.3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ МОДЕЛИ

2.3.1. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЗОЛОТНИКОМ

Перемещение золотника в рассматриваемой модели описывается с использованием упрощенного кинематического уравнения, учитывающего скорость перемещения, ограниченную физическими характеристиками электромеханического привода. Положение золотника $x \in [-1, 1]$ изменяется в зависимости от управляющего сигнала $u \in \{-1, 0, 1\}$, где $u = -1$ – команда

на перемещение влево; $u = 1$ – команда на перемещение вправо; $u = 0$ – сигнал отсутствует, реализуется возврат в нейтральное положение посредством пружины.

Уравнение изменения положения золотника при наличии сигнала управления определяется формулой (1)

$$x(t + \Delta t) = x(t) + u \cdot v_{max} \cdot \Delta t, \quad (1)$$

где v_{max} – максимальная скорость перемещения золотника;

Δt – шаг моделирования (временной интервал).

Если управляющий сигнал отсутствует, реализуется возврат в ноль по тому же закону, но с противоположным направлением (2)

$$x(t + \Delta t) = \begin{cases} x(t) - v_{max} \cdot \Delta t, & \text{если } x(t) > 0 \\ x(t) + v_{max} \cdot \Delta t, & \text{если } x(t) < 0 \\ 0, & \text{если } x(t) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

Для обеспечения корректной работы модели вводятся ограничения на крайние положения золотника (3)

$$x(t) \in [-1, 1] \quad (3)$$

Таким образом, в модели реализована простая инерционная система без учета масс и ускорений, что допустимо для имитации медленных процессов или в контексте логического тестирования.

2.3.2. РАСЧЕТ РАСХОДОВ ЧЕРЕЗ ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ КАНАЛЫ

Расход рабочей жидкости через каждый канал (РА, РВ, АТ, ВТ) моделируется по уравнению (4) для течения через дросселирующее отверстие

$$Q = \begin{cases} C_d \cdot A_{отв} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot |\Delta P|}{\rho}}, & \text{если } \Delta P > 0 \\ -C_d \cdot A_{отв} \cdot \sqrt{\frac{-2 \cdot |\Delta P|}{\rho}}, & \text{если } \Delta P < 0 \\ 0, & \text{если } \Delta P = 0 \end{cases}, \quad (4)$$

где Q – расход;

C_d – коэффициент расхода;

$A_{отв}$ – площадь открытого сечения (пропорциональна степени открытия золотника);

ΔP – перепад давления на канале;

ρ – плотность рабочей жидкости.

Площадь проходного сечения $A_{отв}$ определяется по формуле (5)

$$A_{отв} = A_{max} \cdot |x(t)|, \quad (5)$$

где A_{max} – максимальная площадь канала при полном открытии.

В модели реализована проверка: для каждого канала расход считается только при соответствующем направлении открытия золотника.

Таким образом, обеспечивается логика работы золотникового распределителя, при которой одновременно открываются соответствующие каналы подачи и слива в зависимости от направления перемещения.

2.3.3. РАСЧЕТ ДАВЛЕНИЯ В КАМЕРАХ

Изменение давления в рабочих полостях А и В рассчитывается на основе закона сжимаемости жидкости. Баланс массы в каждой камере выражается уравнением (6)

$$\Delta P = \frac{E}{V} \cdot \Delta V, \quad (6)$$

где E – модуль объемной упругости рабочей жидкости;

V – объём камеры;

ΔV – разность притока и оттока жидкости за шаг моделирования.

Для каждой камеры используется следующая формула:

Камера А (7, 8)

$$\Delta V_A = Q_{PA} - Q_{AT}, \quad (7)$$

$$P_A(t + \Delta t) = P_A(t) + \frac{E}{V_A} \cdot \Delta V_A \cdot \Delta t, \quad (8)$$

Камера В (9, 10)

$$\Delta V_B = Q_{PB} - Q_{BT}, \quad (9)$$

$$P_B(t + \Delta t) = P_B(t) + \frac{E}{V_B} \cdot \Delta V_B \cdot \Delta t \quad (10)$$

Это приближение позволяет получить зависимость давления от изменения расходов и определить динамику нагнетания и сброса жидкости при движении исполнительного механизма.

2.3.4. ЛОГИКА УПРАВЛЕНИЯ И АВАРИЙНАЯ БЛОКИРОВКА

В модели предусмотрены базовые механизмы защиты, включающие:

- Блокировку управления – отключает обработку управляющего сигнала и переводит золотник в нейтральное положение:
- если Блокировка = TRUE, то $u := 0$
- Аварийный режим – активируется при выходе давления в камерах за допустимые пределы:
- если $P_A < P_{\min}$ или $P_B < P_{\min}$, то Авария := TRUE
- После срабатывания аварии возможна автоматическая или ручная блокировка дальнейшего управления.

2.3.5 СТАТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ

Также в программу моделирования необходимо включить набор статических параметров, описывающих физико-технические характеристики электрогидравлического усилителя мощности, а также постоянные значения, используемые в расчетах. Эти параметры остаются неизменными на протяжении выполнения модели и определяют поведение объекта при различных управляющих воздействиях. Значения параметров подобраны исходя из типовых характеристик гидравлических систем и приведены в таблице 2.1. Приведённые значения могут быть откорректированы в соответствии с реальными характеристиками проектируемого объекта или требованиями технического задания.

Таблица 2.1 – Обозначения статических параметров

Наименование параметра	Обозначение	Единица измерения
Максимальное проходное сечение золотника	A_{max}	м^3
Плотность масла	ρ	Кг/м^3
Коэффициент расхода	C_d	-
Объём камеры А	V_A	м^3
Объём камеры В	V_B	м^3
Площадь поршня	S	м^2
Давление на входе (Р)	P	Па
Давление в баке (слив)	P_T	Па
Модуль объемной сжимаемости масла	E	Па
Шаг моделирования	Δt	с
Скорость перемещения золотника	v_{max}	отн. ед./с (безразм.)

3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ SCADA-СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ.

3.1. АРХИТЕКТУРА SCADA-ПРОЕКТА

Разработка имитационной модели системы управления электрогидравлическим усилителем мощности (ЭГУМ) выполнена в среде MasterSCADA с применением стандартных средств визуального моделирования и сценарного программирования. Структура проекта организована по функциональным блокам, каждый из которых отражает физическую или логическую подсистему объекта управления.

Основные компоненты проекта:

Золотник:

- переменная Положение – текущее положение золотника;
- переменные Канал_РА_Открыт, Канал_РВ_Открыт, Канал_АТ_Открыт, Канал_ВТ_Открыт – булевы флаги открытия каналов;
- проходное_Сечение – значение площади проходного сечения.

Гидравлика:

- давление_А, Давление_В – текущие давления в рабочих полостях;
- расход_РА, Расход_РВ, Расход_АТ, Расход_ВТ – расходы жидкости по направлениям;
- V_А, V_В – объёмы камер.

Управление:

- сигнал_влево, Сигнал_вправо – двоичные входы, имитирующие задающий сигнал;
- положение_золотника_сигнал – переменная направления управления (-1, 0, 1);

- блокировка, Авария – флаги безопасности.

Логика, подкаталог Программы, содержащий скрипты:

- управление – обработка сигнала и блокировки;
- открытие_каналов – логика распределителя;
- расчёт_расходов – вычисление расходов;
- расчёт_давления_в_камерах – обновление давления;
- управление_электромеханическим_приводом – движение золотника.

3.2. РЕАЛИЗАЦИЯ ЛОГИКИ УПРАВЛЕНИЯ

Вся логика работы модели реализована через последовательное выполнение программных модулей в каталоге Логика/Программы. Каждая программа выполняет отдельный этап моделирования и реализует один из описанных в главе 2 математических блоков.

Программа «Управление» формирует управляющее воздействие на золотник на основе сигналов Сигнал_влево, Сигнал_вправо и проверки флага Блокировка и записывает результат в переменную Положение_золотника_сигнал.

Программа Управление_электромеханическим_приводом реализует кинематику перемещения золотника с учетом ограничения скорости, возврат в ноль при отсутствии сигнала и ограничение положения в пределах $[-1;1]$

Программа Открытие_каналов определяет, какие каналы считаются "открытыми", в зависимости от положения золотника, устанавливает булевы переменные Канал_X_Открыт для логики визуализации и расчётов.

Программа Расчёт_расходов вычисляет значения расходов Q по четырём направлениям (РА, РВ, АТ, ВТ) в зависимости от: перепада давления ΔP , текущего положения золотника, коэффициента C_d , максимального сечения и плотности масла.

Программа Расчёт_давления_в_камерах обновляет значения давления в камерах А и В на основе уравнения объемной сжимаемости масла и баланса

расходов. Использует параметры V_A, V_B, модуль сжимаемости и шаг моделирования deltaT.

3.3. ИНТЕРФЕЙС ОПЕРАТОРА

Для обеспечения взаимодействия пользователя с имитационной моделью в среде MasterSCADA был разработан визуальный интерфейс оператора, реализованный в виде двух окон. Первое окно (Рисунок 3.1) обеспечивает как задание управляющих сигналов, так и отображение ключевых параметров работы системы в реальном времени. Второе окно содержит графики давления, смещения золотника, блокировки и аварии. (Рисунок 3.2)



Рисунок 3.1 – Окно управления

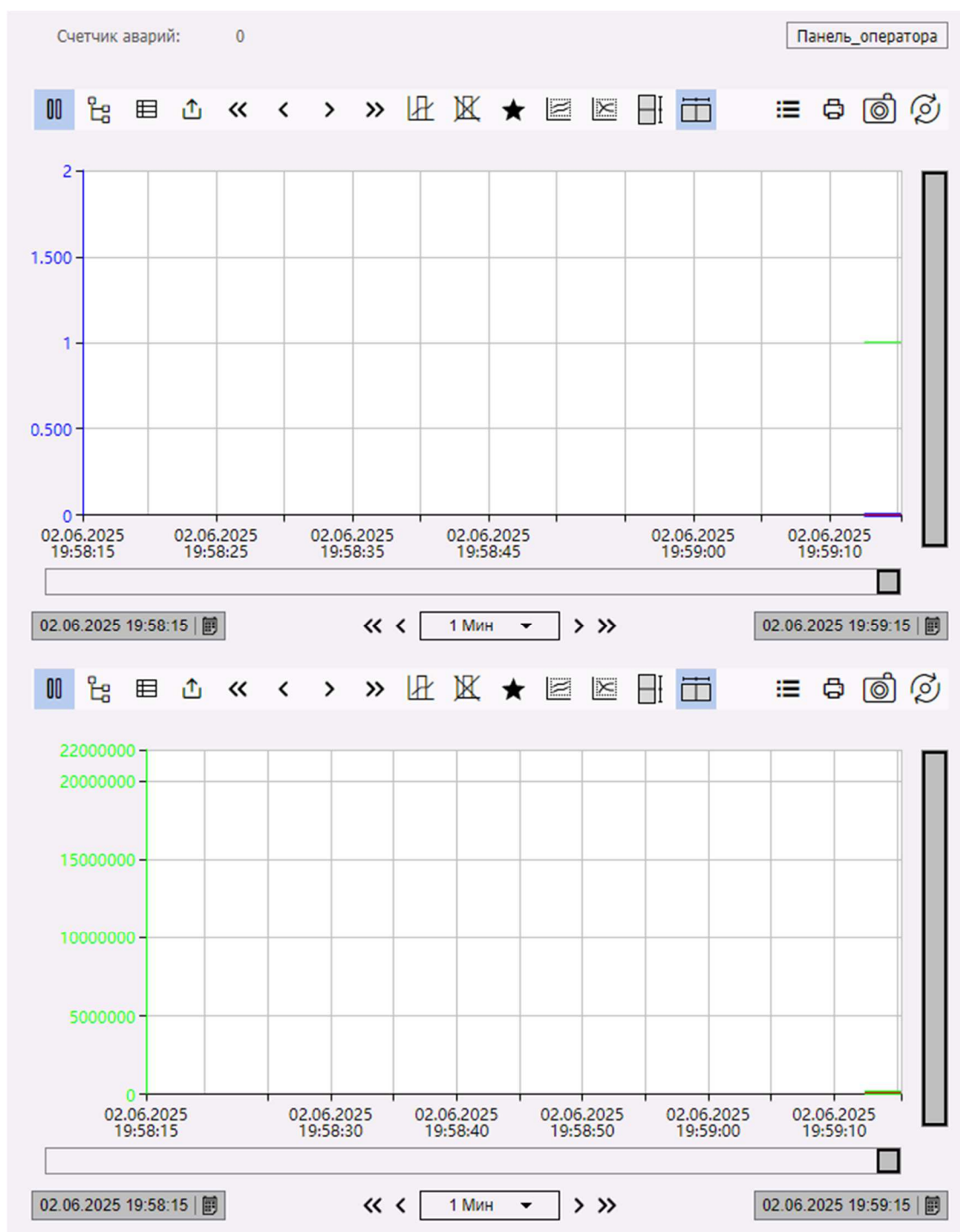


Рисунок 3.2 – Окно трендов

В верхней части окна управления, отображается состояние направлений (РА, РВ, АТ, ВТ) и объем масла протекающего по ним в секунду. Ниже, слева кнопки управления имитирующие трехпозиционный тумблер, задающий сигнал управления ЭГУМ. Справа от них расположен индикатор положения золотника, для отслеживания его состояния. Под ним находятся стрелочные индикаторы давления в камере А и В. Максимальное

значение давления указывается перед запуском симуляции. Справа от стрелочных индикаторов находится индикатор состояния системы. Под ним 3 кнопки, первая – блокирует управление, вторая – сбрасывает блокировку, третья – сбрасывает состояние аварии, если авария устранена.

В окне трендов вверху находится счетчик аварий, произошедших за время работы. Ниже расположены 2 графика. Первый график отображает движение золотника, а также в какой период была авария и блокировка. На втором графике отображены показатели давления в камерах А и В.

3.4. ОБРАБОТКА АВАРИЙНЫХ И БЛОКИРУЮЩИХ УСЛОВИЙ

Для обеспечения надёжности функционирования имитационной модели и приближения её поведения к реальным условиям эксплуатации в проекте предусмотрена обработка аварийных и блокирующих состояний. Реализация логики защиты выполнена средствами MasterSCADA на уровне скриптового программирования и задействует несколько ключевых переменных и проверок.

Одним из важнейших защитных механизмов является функция блокировки управления. При активации переменной блокировки любые управляющие сигналы принудительно обнуляются, а золотник возвращается в нейтральное положение. Это обеспечивает гарантированное прекращение управляющего воздействия на систему в случае внешней команды или внутреннего условия безопасности.

Дополнительно реализована проверка аварийного состояния по уровню давления в рабочих полостях. В случае, если давление в камере А или В превышает допустимое предельное значение, автоматически устанавливается флаг аварии. Дальнейшее управление в этом режиме блокируется, золотник фиксируется в текущем положении, а на интерфейсе оператора появляется соответствующее уведомление. Такая логика имитирует срабатывание предохранительных устройств в реальных гидравлических системах и предотвращает дальнейшее развитие отказа.

Также в перспективе может быть реализована функция контроля «зависания» золотника. Она предполагает мониторинг времени отсутствия изменения положения при наличии управляющего сигнала. В случае, если за определённый интервал времени перемещение не происходит, генерируется сообщение о возможной неисправности исполнительного механизма.

При устранении причины аварийной ситуации оператор может вручную сбросить флаг аварии нажатием соответствующей кнопки на интерфейсе. Однако повторное включение управления становится возможным только при условии, что все параметры системы вернулись в допустимые границы. Это повышает надёжность эксплуатации и предотвращает случайные повторные запуски в аварийных условиях.

Таким образом, реализованные механизмы обработки ошибок позволяют обеспечить безопасное поведение модели, приближенное к промышленным стандартам, и делают возможной дальнейшую отладку алгоритмов без риска повреждения оборудования.

4. ПРОВЕРКА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

4.1. ЦЕЛЬ ПРОВЕРКИ МОДЕЛИ

Разработанная в среде MasterSCADA имитационная модель электрогидравлического усилителя мощности представляет собой программно-аппаратный прототип системы управления, воспроизводящий основные процессы, происходящие в реальном исполнительном механизме. Основной целью проверки модели является подтверждение корректности реализованных алгоритмов управления и расчетов, а также оценка адекватности динамики системы в различных режимах работы.

В процессе испытаний необходимо убедиться в том, что поведение модели соответствует физическим принципам функционирования электрогидравлического усилителя, а программная реализация

демонстрирует устойчивость, воспроизводимость и своевременную реакцию на управляющие воздействия. Дополнительно проводится проверка срабатывания аварийной защиты при нарушении предельных условий и восстановления нормального режима работы после их устранения.

Таким образом, результаты проверки позволяют оценить применимость разработанной модели для дальнейших исследований, отладки логики управления и возможного расширения функционала системы.

4.2. МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ

Для оценки корректности функционирования модели был разработан набор тестовых сценариев, охватывающих как нормальные, так и аварийные режимы работы. Проверка проводилась вручную с использованием разработанного графического интерфейса, позволяющего задавать управляющее воздействие, инициировать блокировку, а также визуально отслеживать ключевые параметры системы.

Перед началом каждого теста система переводилась в исходное состояние: золотник находился в нейтральном положении, давление в камерах А и В соответствовало входным условиям, аварийные флаги были сброшены. Управляющий сигнал задавался при помощи трехпозиционного тумблера на интерфейсе, имитирующего команды «влево», «вправо» и «стоп». Временной шаг моделирования составлял 0,1 секунды.

В ходе испытаний регистрировались следующие параметры:

- положение золотника;
- давления в рабочих камерах;
- состояния гидравлических каналов;
- факт срабатывания аварийной защиты;
- корректность возврата системы в исходное состояние.

Для проверки динамических характеристик использовались графические тренды давления и положения золотника. Это позволило

оценить скорость реакции системы, плавность изменений и соответствие теоретическим ожиданиям. Дополнительно контролировалось поведение модели при активной блокировке управления и при превышении допустимых значений давления, что позволяло оценить эффективность реализованных механизмов безопасности.

4.3. ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ

Для проведения испытаний были заданы исходные параметры, соответствующие реальному электрогидравлическому усилителю мощности промышленного класса. В качестве ориентира использовались технические характеристики золотниковых ЭГУМ, аналогичных моделям серий G761 (Moog) или Bosch Rexroth 4WRTE. Типичные параметры таких устройств приведены ниже:

- максимальное рабочее давление – 21 МПа (210 бар);
- расход при полном открытии – до 20 л/мин ($0,00033 \text{ м}^3/\text{с}$);
- площадь проходного сечения – около $0,8...1,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$;
- объём камеры – порядка $5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$;
- плотность масла – $850...880 \text{ кг/м}^3$;
- модуль объемной упругости – $1,5 \cdot 10^9 \text{ Па}$;
- шаг моделирования – 0,005 с;
- коэффициент расхода C_d – 0,65.

Использование этих параметров позволяет получить достоверные результаты моделирования и сравнивать поведение имитационной модели с реальными динамическими характеристиками.

Сценарий 1. Нормальный режим работы

В начальный момент система находится в состоянии покоя: золотник в нулевом положении, давления в камерах А и В находятся на уровне давления слива (1 бар). Оператор подаёт команду «влево» через тумблер управления. Золотник начинает смещаться в отрицательную сторону, при этом

открываются каналы РА и ВТ. Давление в камере А начинает возрастать за счёт поступающего потока от источника давления, обеспечивая перемещение исполнительного органа, а камера В в этот момент соединена с баком через канал ВТ. Поскольку в начальном состоянии давления в обеих камерах были равны давлению в баке, при открытии ВТ заметного падения давления в камере В не происходит – она продолжает сообщаться с линией слива, и давление остаётся практически неизменным.

После завершения перемещения оператор возвращает тумблер в нейтральное положение. Золотник плавно возвращается в центральное положение за счёт логики самовыравнивания, реализованной в программе управления. Давления в камерах при этом стабилизируются, и система снова переходит в состояние покоя.

Для проверки обратного хода после паузы оператор подаёт команду «вправо». В ответ золотник начинает смещаться в положительную сторону, при этом открываются каналы РВ и АТ. Теперь поток рабочей жидкости направляется в камеру В, обеспечивая нарастание давления в ней, а камера А соединяется с баком через АТ. В этом случае наблюдается рост давления в камере В за счёт поступающего потока и сброс давления в камере А через открытый канал АТ. Поскольку камера А теперь "разгружается", её давление снижается до уровня давления слива.

По завершении движения оператор переводит тумблер в нейтральное положение. Золотник плавно возвращается в центральное положение благодаря реализованной логике управления. В нейтральном положении все каналы (РА, РВ, АТ, ВТ) оказываются перекрытыми, в результате чего прекращается сообщение между гидравлическими камерами и с линией слива.

Давление, накопленное в камерах А и В в ходе перемещения, сохраняется на прежнем уровне и не выравнивается, поскольку гидравлические связи заблокированы. Это соответствует поведению реального золотникового распределителя, в котором центральное положение

обеспечивает герметичную изоляцию рабочих полостей, предотвращая дальнейшее движение и обеспечивая удержание нагрузки.

Таким образом, система фиксируется в устойчивом состоянии с сохранёнными давлениями в камерах, соответствующими последнему этапу движения. Полное возвращение в исходное состояние возможно только при целенаправленном сбросе давления – либо за счёт открытия соответствующих каналов, либо по истечении времени через контролируемые утечки, что в рамках данной модели не рассматривается.

На рисунке 4.1 графики, отображающие давление в камерах А и В и смещение золотника во время испытаний.

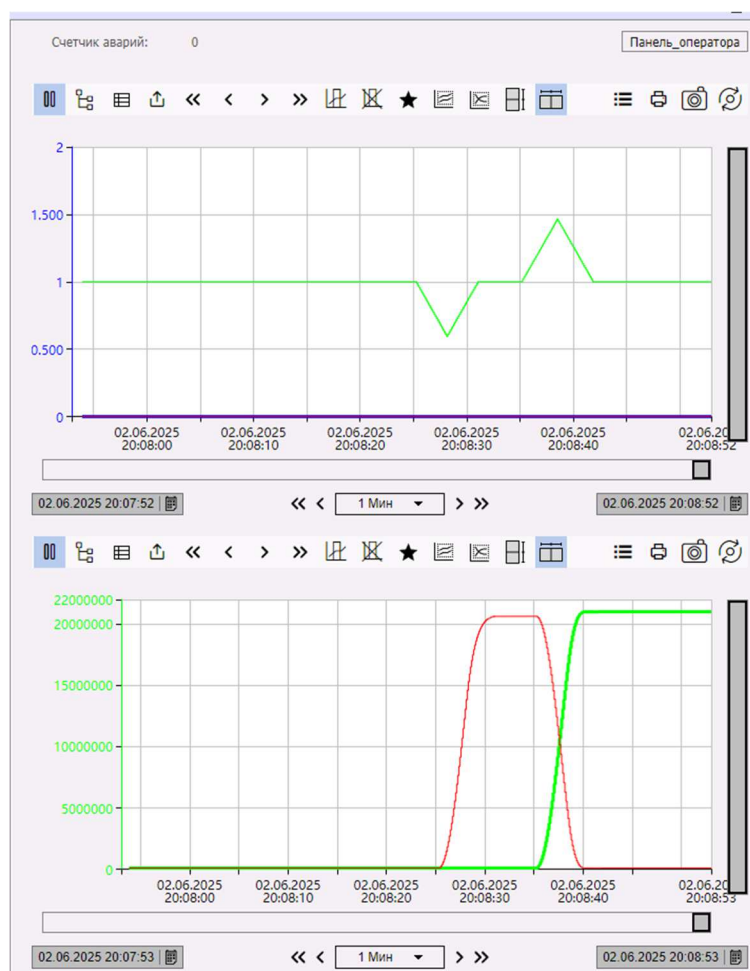


Рисунок 4.1 – Графики первого сценария испытаний

Сценарий 2. Авария при падении давления

Во втором испытании моделируется ситуация, связанная с внутренним повреждением или утечкой в гидравлической системе исполнительного устройства – например, износом уплотнений, разрушением шланга или негерметичностью цилиндра. В условиях моделирования такая неисправность реализуется как неконтролируемый отток жидкости из рабочей камеры А при подаче управляющего сигнала на движение влево.

Оператор подаёт команду «влево», в результате чего золотник смещается в отрицательную сторону, открывая каналы РА и ВТ. При этом в нормальных условиях в камеру А должен поступать поток жидкости, обеспечивающий нарастание давления. Однако в данном сценарии смоделирована условная «разгерметизация» камеры А – расход из неё увеличивается за счёт утечки, и давление не может нарасти до необходимого значения.

В результате, несмотря на открытие канала РА, давление в камере А продолжает снижаться и опускается ниже аварийного порога (например, 0,2 МПа). Для эмуляции подобной ситуации, можно вручную выставить низкое значение давления в камере. Это состояние распознаётся системой как критическое: автоматически срабатывает защита, устанавливается флаг «Авария», управляющий сигнал обнуляется, и дальнейшее движение блокируется. Интерфейс оператора отображает текстовое сообщение о неисправности и активирует визуальную индикацию аварии.

После устранения причины (в рамках модели – прекращение искусственной утечки), оператор имеет возможность сбросить аварийное состояние с помощью соответствующей кнопки. При этом система возвращается в штатный режим работы, и управление становится вновь доступным.

Сценарий 3. Работа при активной блокировке

Третий сценарий проверяет реакцию системы на внешнюю блокировку управления. При активной блокировке («Блокировка» = TRUE) пользователь

подаёт команду на движение, однако система принудительно устанавливает значение «Положение_золотника_сигнал» = 0, и перемещение золотника не происходит. Все параметры остаются в исходных значениях, флаг блокировки отображается на экране, а система не реагирует на ввод до тех пор, пока блокировка не будет снята.

Этот сценарий соответствует ситуации технологического межблочного контроля или внешнего условия безопасности, при котором управление системой временно отключено.

4.4. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ результатов испытаний показал, что разработанная имитационная модель электрогидравлического усилителя мощности в среде MasterSCADA демонстрирует устойчивую и адекватную реакцию на управляющие воздействия, соответствует физическим принципам функционирования реального объекта и корректно отрабатывает аварийные и блокирующие сценарии.

В ходе проведения первого сценария система показала правильную динамику перемещения золотника: при подаче сигнала «влево» происходило его смещение в отрицательную сторону, открытие каналов РА и ВТ, а также рост давления в камере А. При обратном ходе при подаче сигнала «вправо» фиксировалось ожидаемое повышение давления в камере В при открытии канала РВ, а также снижение давления в камере А при открытии АТ. После возврата золотника в нейтральное положение гидравлические каналы были корректно перекрыты, и система сохраняла давления в камерах без изменения, что соответствует свойствам золотникового распределителя в центральном положении.

Во втором испытании имитировалась аварийная ситуация, связанная с разгерметизацией исполнительного устройства. Снижение давления в камере А вследствие утечки при активном управляющем сигнале «влево» было корректно зафиксировано системой. При достижении критического порога

давления автоматически сработал механизм аварийной защиты: управляющий сигнал был принудительно обнулён, дальнейшее движение заблокировано, а на интерфейсе отобразилось уведомление о срабатывании аварии. После устранения условия (восстановления герметичности камеры) и нажатия кнопки сброса, система корректно вышла из аварийного состояния и вернулась в рабочий режим. Это подтверждает работоспособность заложенных алгоритмов безопасности и адекватность их функционирования в условиях критических отклонений параметров.

В третьем сценарии проводилась проверка реакции системы на внешнюю блокировку управления. При активной блокировке, несмотря на подачу управляющего сигнала, перемещение золотника не происходило, сигнал управления обнулялся программно, а визуальные элементы интерфейса информировали оператора о недоступности управления. После снятия блокировки управление восстановилось. Такая логика соответствует требованиям безопасности к промышленным исполнительным системам и демонстрирует правильную реализацию приоритетов доступа.

Таким образом, проведённые испытания подтвердили соответствие работы модели заложенным алгоритмам, физической правдоподобности и устойчивости во времени. Отображаемые параметры и их динамика соответствуют ожидаемым по теоретическим расчётам. Аварийные механизмы корректно реагируют на критические отклонения и позволяют гарантировать безопасность управления.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы была разработана модель системы управления электрогидравлическим усилителем мощности на основе SCADA-среды MasterSCADA. Реализованная модель включает математическое описание основных процессов: движение золотника, распределение потоков, изменение давления в рабочих камерах и реакцию на управляющие воздействия.

Модель реализована в программной среде MasterSCADA с использованием скриптов и визуального интерфейса. В неё встроены алгоритмы блокировки и аварийной защиты, что позволяет имитировать нештатные ситуации, такие как разгерметизация исполнительного устройства. Проведённые испытания показали корректную работу системы в нормальных и аварийных режимах.

Полученные результаты подтверждают адекватность модели и возможность её использования для обучения, отладки логики управления и дальнейших исследований в области автоматизации гидравлических систем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шагинян, С.И. Электрогидравлические усилители / С.И. Шагинян. – Гомель: ГГУТ, 2016. – 124 с.
2. Коломиец, А.В. Электрогидравлический усилитель-преобразователь типа «сопло-заслонка»: дис. ... канд. техн. наук / А.В. Коломиец. – Новосибирск, 2019. – 124 с.
3. Оболенский, В.Н. Электрогидравлические усилители мощности: учеб. пособие / В.Н. Оболенский, Е.И. Петров. – М.: Энергоатомиздат, 2018. – 144 с.
4. Копылов, С.П. Электрогидравлический усилитель–преобразователь типа «сопло-магнитожидкостная заслонка» / С.П. Копылов. – Барнаул: НГАУ, 2020. – 96 с.
5. Ильин, А.Н. Определение гидродинамической силы, действующей на золотник электрогидравлического усилителя мощности с применением средств САПР / А.Н. Ильин, И.С. Сорокин // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информатика, системы управления. – 2021. – № 4. – С. 44-51.
6. Юткин, Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности / Л.А. Юткин, Л.И. Гольцова. – Л.: Машиностроение, 1986. – 200 с.
7. Васечкин, Ю.С. Гидравлические приводы летательных аппаратов / Ю.С. Васечкин, Ю.Г. Оболенский. – М.: МГТУ им. Баумана, 2008. – 198 с.
8. Гавриленко, Б.А. Гидравлический привод / Б.А. Гавриленко, В.А. Минин, С.Н. Рождественский. – СПб.: Наука и Техника, 2017. – 286 с.
9. Петров, С.В. Разработка принципиальной схемы и SCADA-системы для испытательной машины УРС-50-50 / С.В. Петров, А.В. Артемьев, А.П. Пономарев // Техническая кибернетика. – 2018. – № 2. – С. 42-48.

10. Смирнов, И.Н. Организация и управление технологическими процессами строительного производства с использованием SCADA-систем / И.Н. Смирнов, С.И. Розанов // Строительные материалы и изделия. – 2020. – № 5. – С. 22-26.
11. Абдуллин, Р.Ф. SCADA и HMI для мониторинга насосного оборудования / Р.Ф. Абдуллин // Промышленная энергетика. – 2025. – № 4. – С. 18-23.
12. ИСУП. Основы построения систем диспетчеризации и учёта ресурсов на базе MasterSCADA / ИСУП. – М.: МГТУ ГА, 2015. – 92 с.
13. Yadav, G. Architecture and Security of SCADA Systems: A Review // International Journal of Computer Applications. – 2020. – Vol. 177, No. 2. – P. 9-15.
14. Abbas, H.A. Review on the Design of Web Based SCADA Systems Based on OPC DA Protocol / Abbas, H.A. // International Journal of Scientific and Research Publications. – 2015. – Vol. 5, No. 1. – P. 1-6.
15. Кангин, В.В. Разработка SCADA-систем / В.В. Кангин, М.В. Кангин, Д.Н. Ямолдинов. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. – 160 с.
16. Хохлов, В. А. Большая советская энциклопедия / Хохлов, В. А. – <https://www.booksite.ru/fulltext/1/001/008/010/169.htm> – дата обращения: 29.04.2025.
17. Ученые ЮУрГУ разработали первый отечественный усилитель мощности для высокочастотных испытаний // Сайт Южно-Уральского государственного университета. – <https://www.susu.ru/ru/news/2024/07/11/uchenye-razrabotali-pervyy-otchestvennyy-usilitel-moshchnosti-dlya-vysokochastotnyh> – дата обращения: 30.04.2025.
18. Автоматизация. Глава 1. Основные понятия и определения // EnergyEd.ru. – <http://energyed.ru/Auto/UprCh01> – дата обращения: 08.05.2025.