

Нежметдинов Рамиль Амирович

**ПРИНЦИПЫ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ
ПРОГРАММНЫХ СИСТЕМ ЛОГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ОБОРУДОВАНИЕМ**

Специальность 05.13.06 - «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические системы)»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



Самара – 2020 г.

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» (ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»).

Научный консультант:	Мартинев Георгий Мартинев доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», заведующий кафедрой компьютерных систем управления.
Официальные оппоненты:	Коростелев Владимир Федорович доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», заведующий кафедрой «Автоматизация, мехатроника и робототехника» Поляков Александр Николаевич доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», заведующий кафедрой технологии машиностроения, металлообрабатывающих станков и комплексов Сидоренко Валентина Геннадьевна доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», профессор кафедры «Управление и защита информации»
Ведущая организация:	Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН (ИПУ РАН)

Защита диссертации состоится «25» июня 2020 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.217.07 созданного на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» по адресу: г. Самара, ул. Галактионовская, 141, аудитория 33.

Отзывы на автореферат просим высылать по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Самарский государственный технический университет, Главный корпус, на имя ученого секретаря диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного технического университета, по адресу: ул Первомайская, 18.

Автореферат разослан « ____ » _____ 20__ года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.217.07,
к.т.н., доцент



Ярославкина Екатерина Евгеньевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Сегодняшний этап развития общества относят к постиндустриальному, основу которого составляет информация как средство и объект производства. В этих условиях изменились средства сбора, обработки и передачи информации: все большее количество людей для работы с информационными ресурсами используют мобильные устройства, а для доступа к большим объемам данных применяют глобальную сеть и облачные технологии. Эти изменения отразились и на промышленных технологиях, в которых произошел переход от концепции, направленной на автоматизацию отдельных машин и процессов к концепции, предусматривающей цифровое представление всех физических активов с последующей интеграцией в цифровую глобальную систему, выстроенную совместно с партнерами, участвующими в цепочке создания стоимости. В основе новой концепции лежит многоуровневая, сложная, глобальная технологическая и организационная система, которая подразумевает интеграцию в единое информационное пространство физических операций и сопровождающих их процессов. Эффект от её внедрения возможен в том случае, если структурирован процесс получения, анализа и обмена данными между технологическим оборудованием и различными уровнями производственной системы в целом. При этом на промышленных предприятиях происходит переход от классической модели производственных систем к «умным» или интеллектуальным производствам (англ. smart manufacturing), предусматривающим объединение производства в единую цифровую экосистему. Развитием идеи интеллектуальных производств является концепция цифровых платформ, которая предполагает наличие взаимосвязанных программных и аппаратных средств, позволяющих сократить циклы производства товара и срок вывода новых продуктов на рынок. При этом на цеховом уровне указанные изменения напрямую затрагивают системы логического управления, которые должны иметь механизмы взаимодействия с цифровой экосистемой производства. Под термином «системы логического управления» будем понимать совокупность систем управления (программируемые логические контроллеры - ПЛК, контроллеры автоматизации, системы управления безопасностью и управления движением), решающие логические задачи управления в технологических системах. Указанные системы относятся к типу систем программного управления и в работе рассматривается вариант их применения для управления технологическим оборудованием (рисунок 1).

В промышленной среде появилась необходимость применения технологии анализа больших объемов данных (англ. «Big data»), которая предполагает использование большого количества датчиков, установленных на ключевых узлах объектов управления, при этом сбор и предварительную обработку данных с датчиков выполняют системы логического управления. Анализ информации, полученной указанным путем, представляет объективные и точные данные о работе конкретного оборудования и предприятия в целом. Применение большого количества датчиков используют для получения цифрового образа конкретного физического изделия в процессе его эксплуатации, что является основой концепции «цифровых

двойников». Анализ «цифровых двойников» позволяет корректировать как характеристики готовых изделий в ходе их работы, так и технологический процесс их изготовления.

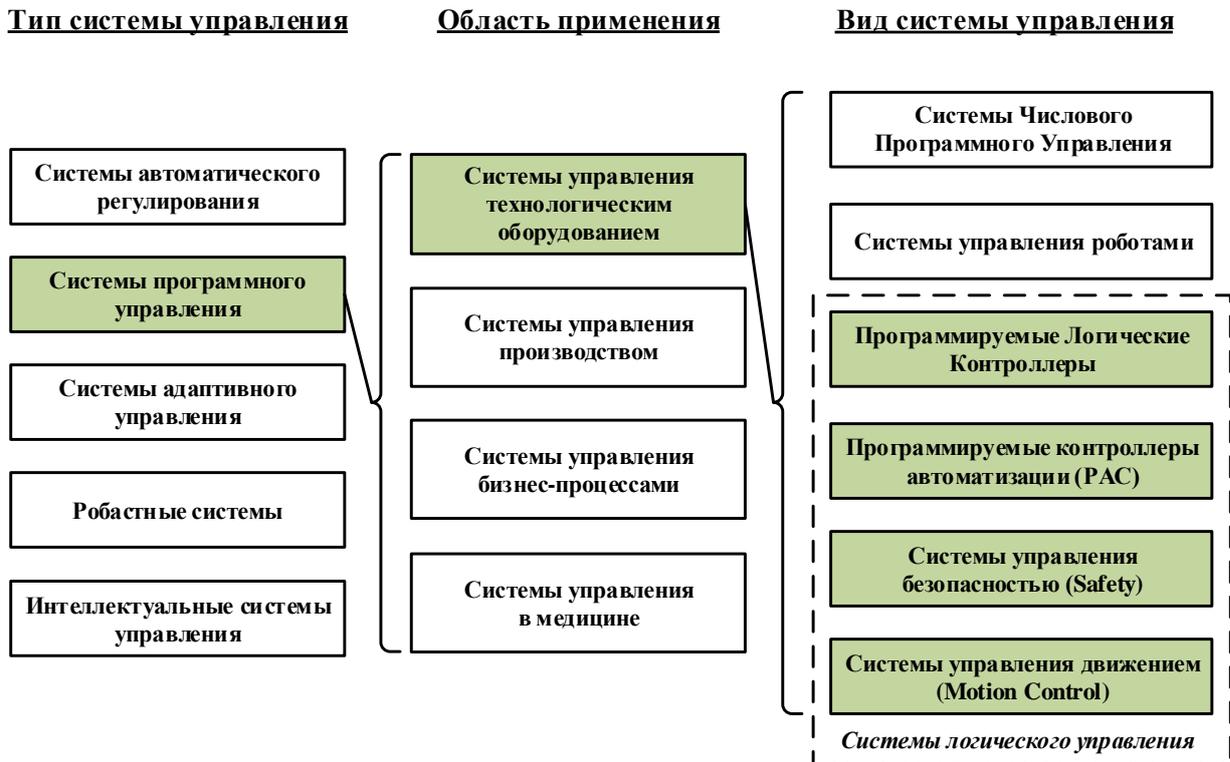


Рисунок 1 - Место систем логического управления в классификации систем управления

В связи с наличием кризисных явлений в экономике все большее внимание при проектировании оборудования уделяют вопросам энергоэффективности. В этом случае системы логического управления объектами должны обеспечивать наличие режима ожидания (англ. standby) с уменьшенным потреблением энергии, переход в который осуществляется при простое энергоемкого оборудования.

Учитывая перечисленные факторы, проблема построения устройств логического управления, обеспечивающих согласованную работу механизмов и агрегатов, является одной из важнейших при решении задач автоматизации производственных процессов в различных отраслях промышленности, в первую очередь в машиностроении и станкостроении. На большинстве предприятий Российской Федерации на сегодняшний момент в качестве основного звена автоматизации используются классические ПЛК, называемые также внешне реализованными контроллерами, которые показали свою надёжность и широкий спектр применения. В то же время, на мировом рынке промышленной автоматизации наметился ряд тенденций в области развития ПЛК, среди которых можно выделить следующие: применение высокоскоростных протоколов связи на базе технологии Ethernet для взаимодействия с системами управления и исполнительными устройствами в рамках цифровой экосистемы предприятия; реализация распределенного управления на базе многоранговых сетей, работающих по принципу «ведущий-ведомый» (англ. «master-slave»), для обеспечения согласованной работы разнородного оборудова-

ния в рамках единого технологического процесса; использование в качестве системного программного обеспечения операционных систем реального времени (ОСРВ), что позволяет реализовать систему логического управления на базе вычислительной платформы общего назначения; применение технологий анализа больших объемов данных в связи постоянным увеличением объемов информации получаемой с объекта управления; применение для связи с устройствами автоматизации единого интерфейса взаимодействия на базе технологии OPC, что позволяет реализовать коммуникационный канал между устройствами различных производителей; интеллектуализация периферийных модулей, в частности модулей ввода/вывода, что позволяет производить обработку информации непосредственно на объекте управления и др.

По оценкам аналитиков компании HIS Markit, объем мирового рынка программируемых логических контроллеров в 2017 году составил 8,5 млрд. \$ и ожидается, что к 2021 году он превысит 9,5 млрд. \$. На сегодняшний день в области систем промышленной автоматизации в целом и в области ПЛК в частности, Россия идет по пути «догоняющего развития» (англ. catch-up growth), следствием чего является отсутствие в стране производства контроллеров мирового уровня на собственной элементной базе и программном обеспечении отечественной разработки. Российские разработчики контроллеров «ОВЕН», «Fastwell», «Робокон» и др. в качестве аппаратной базы используют электронные компоненты зарубежного производства, часть из которых является OEM (original equipment manufacturer) решениями, а в качестве среды программирования применяются коммерческие пакеты, разработанные иностранными компаниями (например, CoDeSys). Такой подход не позволяет осуществлять контроль над функциями программного обеспечения и накладывает ограничения при выборе аппаратных комплектующих и по большей части не может считаться отечественным решением.

В свою очередь западные компании развивают решения в области автоматизации на новой программно-аппаратной базе. Среди наиболее перспективных решений стоит выделить следующие: PAC-системы (Programmable Automation Controller) – контроллеры на базе персональных компьютеров (ПК) промышленного исполнения, программно реализованные контроллеры (в западной терминологии Soft PLC) – программное обеспечение, устанавливаемое на вычислительную платформу (например, ПК) и на системном уровне реализующее функции контроллера и системы управления движением (в западной терминологии Motion Control). Указанный класс систем позволяет с меньшими экономическими, технологическими и временными издержками реализовывать проекты по управлению сложным технологическим оборудованием и агрегатами. При этом основные алгоритмы и механизмы функционирования систем заложены в программном ядре, что позволяет российским производителям вывести разработки на современный уровень и избавиться от импортозависимости в основных вопросах проектирования и разработки. Успешность в значительной степени будет зависеть от правильности выбора архитектурной концепции и используемых технологий.

Системы управления ПЛК, PAC системы, контроллеры безопасности и контроллеры движения развивались самостоятельно, без взаимной связи между собой. Они имеют традиции, которые сформировали обособленные принципы построения

каждой из этих систем управления. Для их проектирования используют разные: аппаратные решения, системное программное обеспечение (ПО), инструментарий проектирования и др. До недавнего времени указанные типы систем отвечали за реализацию узкоспециализированных задач, сегодня с развитием вычислительной техники и технологий каждый из них позволяет реализовывать в том числе не традиционные для себя функции (например, ПЛК с функцией управления движением). Все большее расширение функциональных возможностей систем позволяет применять единое решение при проектировании и реализации логической задачи управления вне зависимости от типа, применяемого оборудования. Такой подход наиболее актуален для нетривиальных задач, к которым можно отнести проектирование электроавтоматики сложных станков-комбайнов или больших технологических комплексов. (рисунок 2) Системы логического управления применяются для работы со всеми видами технологического оборудования, используемого на машиностроительных предприятиях.



Рисунок 2 - Область применения систем логического управления

В Российской Федерации действуют государственные программы, которые предполагают проектирование и реализацию оборудования отечественного производства, такие как: цифровая экономика Российской Федерации (до 2024 года), развитие науки и технологий (до 31.12.2020), развития вооружений (до 31.12.2020), развитие авиационной промышленности (до 31.12.2025), развитие промышленности и повышение её конкурентоспособности (до 31.12.2020). В этой связи остро стоит проблема реализации систем управления независимых от импортных программных и аппаратных комплектующих.

Чтобы реагировать на перечисленные вызовы и с учетом тенденции развития современных промышленных предприятий, направленной на реализацию единой

цифровой экосистемы с поддержкой концепций: цифровых двойников и платформ, работы с «большими данными», энергосбережения и др., требуется переосмысление логической задачи управления. Необходима новая концепция построения систем логического управления, которая должна базироваться на моделях, учитывающих: применение высокоскоростных протоколов связи, реализацию распределенного управления на базе многограновых сетей, использование в качестве системного программного обеспечения ОСРВ, применение единого интерфейса взаимодействия на базе технологии OPC, интеллектуализация периферийных модулей и др., что обуславливает актуальность диссертационной работы.

В диссертационной работе рассмотрены вопросы создания на научной основе систем логического управления технологическими процессами и оборудованием, их последовательная увязка по иерархическим уровням и интеграция в единую сеть сбора и обработки данных. В исследовательской части работы рассмотрены: методология и формализованные методы построения систем логического управления технологическими процессами и оборудованием; теоретические основы, средства и методы промышленной технологии создания систем логического управления; теоретические основы, алгоритмы и методы решения прикладных задач при построении систем логического управления; использование методов автоматизированного проектирования для повышения эффективности разработки и модернизации систем логического управления.

Степень разработанности темы исследования. Вопросы моделирования, проектирования, разработки, программирования и эксплуатации систем логического управления рассмотрены в работах таких российских и зарубежных ученых, как: Сосонкин В.Л., Соломенцев Ю.М., Мартинов Г.М., Юдицкий С.А., Гаврилов М.А., Грейнер Г.Р., Петров И.В., Аршанский М.М., Титаренко Ю.И., Дубинин В.Н., G. Olsson, G. Piani, Rullan A., E.A. Parr, Frank D. Petruzella, Quan Liang.

В научных работах, выполненных до конца прошлого века, в качестве основной аппаратной единицы систем логического управления рассматривались ПЛК. Были предложены стандартные архитектурные решения для построения указанного типа систем, методы выбора программных и аппаратных компонент. В области программирования систем логического управления были предложены методы, основанные на применении математических аппаратов сетей Петри, автоматных моделей, операторных формул и др. Однако, на рубеже веков были выдвинуты новые идеи построения систем логического управления, основанные на глубокой проработке математического обеспечения ядра системы управления и применении аппаратной платформы персональных компьютеров. Зарубежными учеными и разработчиками были предложены новые формы организации систем, среди которых можно выделить программно реализованные и РАС контроллеры. В то же время эти изменения пришлись на период, сопровождавшийся в России кризисом в реальном секторе экономики. В связи с этим комплексных исследований по вопросам построения систем логического управления в стране почти не проводилось, а те результаты, которые были получены, касались отдельных узких областей применения систем управления.

Объект исследования. Системы логического управления технологическим оборудованием.

Предмет исследования. Модели, методы, алгоритмы и программно-аппаратное обеспечение, используемое при разработке систем логического управления технологическим оборудованием.

Цель и задачи работы. В работе поставлена следующая цель - повышение эффективности функционирования систем логического управления технологическим оборудованием за счет формализации и инструментальной поддержки процессов их проектирования и программной реализации.

Для достижения цели работы должны быть решены следующие задачи:

- Проанализировать современные системы логического управления, выявить тенденции и перспективы их развития;
- Разработать теоретические основы для описания моделей построения программных систем логического управления технологическим оборудованием;
- Создать формальный аппарат построения подсистемы программирования и исполнительного ядра системы логического управления технологическим оборудованием;
- Разработать методологические основы построения систем логического управления технологическим оборудованием;
- На базе теоретических и методологических основ построения систем логического управления разработать практические аспекты реализации систем логического управления конкретным технологическим оборудованием.

Научная новизна работы

1. Установлены и впервые формализованы взаимосвязи между характеристиками технологического оборудования и задачами, функциями, параметрами систем логического управления технологическим оборудованием, влияющими на структуру системы управления и определяющими состав программно-аппаратных модулей логических контроллеров, как основного инструментария автоматизации.
2. На основе установленных взаимосвязей разработаны модели систем логического управления, отличающиеся от известных, тем что ориентированы не на автоматизацию автономного технологического оборудования, а на его интеграцию в цифровые производства, обеспечивают кроссплатформенную реализацию и составляют теоретические основы проектирования систем логического управления, которые предполагают последовательную трансформацию моделей для получения полного описания системы.
3. Разработаны теоретические основы построения исполнительного ядра систем логического управления технологическим оборудованием, с применением комплекса решений из смежных областей: клиент-серверной архитектуры для подключения терминальных клиентов, механизма разделяемой памяти для взаимодействия с аппаратными входами/выходами в режиме жесткого реального времени и автоматной парадигмы программирования с реализацией машины состояний в виде конечного автомата.
4. Разработаны теоретические основы построения среды программирования систем логического управления технологическим оборудованием согласно стандарту МЭК 61131-3, которые предполагают использование расширяемого языка разметки XML для формализованного описания программы логического управления и конфигурации аппаратных устройств.

5. Разработан методологический базис построения современных систем логического управления, соответствующий требованиям предъявляемым международными стандартами, обеспечивающий, в отличие от известных, возможность применения: аппаратных модулей ввода/вывода использующих промышленные протоколы связи, стандартных средств операционных систем, стандартных и оригинальных инструментальных средств реализации программ логического управления.

6. Предложена методология построения систем логического управления технологическим оборудованием, содержащая:

- формализованный процесс выбора аппаратных средств проектирования систем логического управления;

- способы создания программ логического управления на основе систематизированных математических методов проектирования программ логического управления;

- расширенную, по сравнению с традиционной, методику построения систем управления, с добавлением шагов по: адаптации моделей системы управления под конкретный технологический объект, разработке сетевой структуры системы управления и настройке режимов отображения экрана оператора.

Теоретическая значимость работы заключается в:

- установленных и впервые формализованных в результате анализа взаимосвязей между характеристиками технологического оборудования и задачами, функциями, параметрами систем логического управления технологическим оборудованием;
- разработанных теоретических основах построения исполнительного ядра и среды программирования систем логического управления технологическим оборудованием;
- предложенной совокупности моделей построения систем логического управления технологическим оборудованием;
- систематизации и обосновании математических методов проектирования программ логического управления.

Практическая значимость работы заключается в:

- программной реализации исполнительного ядра системы логического управления технологическим оборудованием;
- программной реализации подсистемы программирования системы логического управления технологическим оборудованием;
- разработке методики проектирования систем логического управления технологическим оборудованием, которая позволяет:
 - производить адаптацию моделей и настройку систем логического управления под конкретный технологический объект;
 - использовать готовые программные и аппаратные компоненты системы управления, имеющие стандартные интерфейсы подключения;
 - получать систему управления, обладающую новыми качественными и количественными характеристиками, за счет конфигурирования программно-аппаратных компонент;
 - использовать готовые библиотеки программ логического управления для поддержки функций отдельных узлов технологического оборудования.

- в разработке специализированных систем логического управления электроавтоматикой для: установки гидроабразивной резки, гаммы токарно-фрезерных высокоточных обрабатывающих центров с числовым программным управлением наклонной компоновки, вертикально-фрезерного обрабатывающего центра.

Методология и методы исследований. Теоретические исследования выполнялись с использованием математического аппарата булевой алгебры, автоматных моделей, теории графов, аппарата разностных уравнений, теории автоматического управления (теории регуляторов), теории алгоритмов и линейной алгебры. Проектирование программных компонент осуществлялось с использованием объектно-ориентированного подхода. Лабораторные испытания проводились на специально разработанных стендах с применением современных средств автоматизации. Экспериментальные исследования проводились в производственных условиях на современном технологическом оборудовании. Обработка результатов теоретических и практических исследований осуществлялась с использованием программных инструментов обработки информации.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты комплексного анализа вопросов построения систем логического управления технологическим оборудованием, на основе которых формализованы взаимосвязи между характеристиками технологического оборудования и задачами, функциями, параметрами систем логического управления технологическим оборудованием.
2. Совокупность моделей систем логического управления, составляющих теоретические основы проектирования систем логического управления.
3. Теоретические основы построения исполнительного ядра систем логического управления технологическим оборудованием, как системы жесткого реального времени.
4. Теоретические основы построения среды программирования систем логического управления технологическим оборудованием согласно стандарту МЭК 61131-3.
5. Методологический базис построения современных систем логического управления, соответствующий требованиям предъявляемым международными стандартами.
6. Методология построения систем логического управления технологическим оборудованием.
7. Результаты практической разработки специализированных систем логического управления конкретным технологическим оборудованием.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов, полученных в ходе работы над диссертацией подтверждается применением системного подхода к решению поставленных задач, корректностью методов, применяемых для теоретических и экспериментальных исследований. Теоретические аспекты работы строятся на результатах, прошедших проверку и согласуются с имеющимися в открытом доступе экспериментальными данными по теме диссертации. Сбор, обработка, анализ и интерпретация экспериментальных данных проведена с применением современных методов статистического анализа и обработки информации.

Основные положения и результаты работы докладывались на международных и всероссийских конференциях: «Мехатроника, автоматизация, управление» (МАУ-2010) (г. Санкт-Петербург, 2010 г.); II Международная Интернет-конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Инновационные технологии: теория, инструменты, практика» (InnoTech 2010); X - XVII международные конференции "Системы проектирования технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM)" (ИПУ РАН, г. Москва, 2010-2018 г.г.); всероссийская научно-практическая конференция с элементами научной школы для молодежи "Проведение научных исследований в области информационно-телекоммуникационных технологий" (ВВЦ, г. Москва, 2010 г.); III научно-образовательная конференция "Машиностроение – традиции и инновации" (МТИ-2010) (ГОУ ВПО МГТУ "Станкин", г. Москва, 2010 г.); Международная научно-практическая конференция "Передовые информационные технологии, средства и автоматизации и их внедрение на российских предприятиях" АИТА 2011 (ИПУ РАН, г. Москва, 2011 г.); III Международная научно-техническая конференция "Модернизация машиностроительного комплекса России на научных основах технологии машиностроения" ТМ-2011 (Брянский государственный технический университет, г. Брянск, 2011 г.); Всероссийская научная школа "Современные технические средства диагностики металлорежущих станков" (МГТУ им. Баумана, г. Москва, 2011 г.); IV Всероссийская мультikonференция по проблемам управления (МКПУ - 2011) (с. Дивноморское, Краснодарский край, 2011 г.); XIX Международная научно-техническая конференция "Информационные средства и технологии" (г. Москва, 2011 г.); Всероссийская молодежная конференция "Инновационные технологи в машиностроении" (ИТМ - 2011) (ФГБОУ ВПО МГТУ "СТАНКИН", г. Москва 25-26 октября 2011 г.); XII Всероссийское совещание по проблемам управления (ИПУ РАН, г. Москва, 2014 г.); XI Всероссийская научно-практическая конференция "Современные информационные технологии в науке, образовании и практике" (Оренбургский государственный университет, г. Оренбург, 2014 г.); VII Международная научно-образовательная конференция "Машиностроение - традиции и инновации" (МТИ - 2014) (МГТУ «СТАНКИН», г. Москва, 2014 г.).

Работа выполнялась на кафедре компьютерных систем управления ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН». Результаты использованы в рамках:

- работ по ФЦП «Научные и педагогические кадры инновационной России» (Минобрнауки РФ) по государственным контрактам: П-1313 от 09.06.2010 «Создание распределенных вычислительных систем управления производственно-технологическим оборудованием на базе логических контроллеров и контроллеров автоматизации» (руководитель проекта), П-1368 от 11.06.2010 «Обработка, хранение, передача и защита технологической информации в распределенных системах управления» (руководитель проекта), 16.740.11.0228 от 22.09.2010 «Распределенная компьютерная система управления механолазерным комплексом прецизионной обработки», 02.740.11.0488 от 18.11.2009 «Создание гетерогенной распределенной компьютерной системы для управления в реальном времени децентрализованными высокотехнологичными производствами, объединенными в виртуальные корпорации» (исполнитель в проекте);

- выполнения государственных контрактов по заданию Минобрнауки РФ: № 1357 «Методы, модели и алгоритмы построения компьютерных систем управления для цифрового производства» (исполнитель в проекте), 2.1237.2017/ПЧ «Исследование и разработка высокопроизводительных распределенных систем управления на базе микропроцессоров «Эльбрус» для цифровых производств» (исполнитель в проекте);
- выполнения работ по грантам Президента РФ в поддержку молодых ученых кандидатов наук по государственным контрактам: 16.120.11.323-МК от 18.02.2011 «Создание кроссплатформенного программно реализованного логического контроллера для управления технологическим оборудованием» (руководитель проекта), 14.124.13.4353-МК от 04.02.2013 «Организация управления децентрализованными производствами с применением программно реализованных средств электроавтоматики» (руководитель проекта);
- работ по ФЦП "Национальная технологическая база" (Минпромторг РФ) в рамках государственных контрактов: 9411.1003702.05.010 от 23.09.09 при создании установки гидроабразивной резки (совместно с ОАО НИАТ и ООО «Савеловский машиностроительный завод», исполнитель в проекте), 252и/60М от 29.09.2011 при создании гаммы токарно-фрезерных высокоточных обрабатывающих центров с числовым программным управлением наклонной компоновки (совместно с ОАО «САСТА», исполнитель в проекте);
- работ по договору 14-45/х от 10.07.2014 с ОАО «Ковровский электромеханический завод» по разработке электрооборудования и изготовлении комплектной системы ЧПУ для оснащения станка MV184P/15C (исполнитель в проекте).
Результаты работы в виде программ и методических материалов внедрены в учебный процесс кафедры компьютерных систем управления ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» в рамках освоения дисциплин:
- «Автоматика и управление движением», «Автоматные модели в системах управления» подготовки бакалавров по направлению 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств»;
- «Программируемые логические контроллеры в системах управления» подготовки магистров по направлению 15.04.04 «Автоматизация технологических процессов и производств»;
- «Информационные системы в автоматизированном производстве» подготовки аспирантов по научной специальности 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами».

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Содержание материалов диссертационной работы соответствует разделу «Области исследований» паспорта специальности 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами» по следующим пунктам:

3 - Методология, научные основы и формализованные методы построения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) и производствами (АСУП), а также технической подготовкой производства (АСТПП) и т. д.;

5 - Теоретические основы, средства и методы промышленной технологии создания АСУТП, АСУП, АСТПП и др.;

15 - Теоретические основы, методы и алгоритмы интеллектуализации решения прикладных задач при построении АСУ широкого назначения (АСУТП, АСУП, АСТПП и др.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 89 печатных работы, из которых: 29 статья в журналах из перечня научных рецензируемых журналов ВАК РФ, 8 печатных работ, входящих в реферативные базы Web of Science и SCOPUS, 40 материалов конференций, 11 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ, 1 патент на полезную модель.

Личный вклад автора. Все результаты определяющие научную новизну, получены автором лично. В публикациях выполненных в соавторстве, лично автору принадлежат следующие результаты: [1, 2] – архитектурная модель программно реализованного контроллера, [3] – механизм реализации логической задачи ЧПУ, [4] – реализация управления электроавтоматикой с применением разработанных панелей, [5, 6] – архитектурная модель управления электроавтоматикой станков и способ управления отдельными узлами станка, [8, 9] – сетевая структура реализации логической задачи управления и виртуальная модель кроссплатформенной системы управления, [10] – механизм взаимодействия компонент в среде разработки программ, XSD схема описания функциональных блоков, [11] – матрица формирования характеристик и функциональности компонент, [12] – программная реализация управления упаковочным оборудованием, [13,14, 15] – виртуальная модель контроллера, архитектура контроллера и реализация программ логического управления, [16] – реализация подсистемы логического управления, [18] – компонентный подход при реализации программ логического управления, [19] – анализ современных средств программирования контроллеров, интеграция редактора в систему управления, [20] – анализ кинематической схемы, решение логической задачи ЧПУ, [21] – разработка сетевой архитектуры системы управления, реализация обратной связи по положению на основе контроллера, [22] – программная реализация управления основными узлами обрабатывающего центра, [23] – разработка алгоритма и программная реализация управления сменой инструмента, [26] – архитектурная модель системы логического управления, программа логического управления для реализации синхронизации работы оборудования, [27] – структура разделяемой памяти при управлении электроавтоматикой, конфигурация устройство электроавтоматики, [28] - разработка схемы взаимодействия основных компонент системы управления, [29, 30, 31] – реализация логической задачи управления и интеграция ее в состав системы ЧПУ, [32] – архитектурная модель взаимодействия основных компонент системы управления, [33] - сетевая структура мультипротокольной системы управления, [34] – реализация логической задачи ЧПУ, [35] – архитектурная модель системы логического управления, разработка алгоритма и программы логического управления.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений, списка использованной литературы и приложений. Работа изложена на 252 страницах машинописного текста, содержит 87 рисунков, 28 таблиц, 2 приложения. Список литературы содержит 206 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В диссертационной работе рассмотрены вопросы создания на научной основе систем логического управления технологическими процессами и оборудованием, их последовательная увязка по иерархическим уровням и интеграция в единую сеть сбора и обработки данных. В исследовательской части работы рассмотрены: методология и формализованные методы построения систем логического управления технологическими процессами и оборудованием; теоретические основы, средства и методы промышленной технологии создания систем логического управления; теоретические основы, алгоритмы и методы решения прикладных задач при построении систем логического управления; использование методов автоматизированного проектирования для повышения эффективности разработки и модернизации систем логического управления.

В **первой** главе проведен анализ методов проектирования систем логического управления. В нашей стране теорией и практикой релейно-контактных схем автоматизации занимались Гаврилов М.А., Копыленко В.М., Грейнер Г.Р. Большой вклад в теорию синтеза систем управления внес С.А. Юдицкий, который положил основы синтеза систем логического управления для машин-автоматов. С.А. Юдицкий также было предложено применение математического аппарата на базе сетей разработанного К.А. Петри для моделирования систем управления. Построение систем логического управления в рамках машиностроительных производств имеют свои особенности, в частности это согласованная работа контроллеров в рамках систем ЧПУ, в качестве головного устройства в гибких производственных модулях (ГПМ), ячейках (ГПЯ) и системах (ГПС). Развитием теории проектирования систем логического управления в машиностроении занимались Соломенцев Ю.М., Сосонкин В.Л., Аршанский М.М., а позднее и Мартинов Г.М. На очередном витке развития технологий Г. Бучем была предложена объектно-ориентированная парадигма проектирования и программирования, которая нашла применение и в промышленных системах управления, в том числе и в логическом управлении. Развитием теории построения промышленных систем управления на основе объектно-ориентированной парадигмы на западе занимались A. Rullan, E. A. Parr, F.D. Petruzella, в России - Шалыто А.А., Аршанский М.М., Мартинов Г.М. и др.

Проведенный анализ современных тенденций в области построения систем логического управления, показал, что изменилась их архитектура, потребительские свойства, аппаратное и программно-математическое обеспечение. К причинам изменений можно отнести: ориентация на концепцию цифрового производства (распределенное управление, высокоскоростные протоколы связи, интеллектуализация входов/выходов, удаленная диагностика и др.); появление новых типов аппаратных устройств вычислительной техники (одноплатные компьютеры, микроЭВМ, мобильные устройства и др.); появление общедоступных операционных систем реального времени (ОСРВ) в том числе и для установки на мобильные платформы (Linux RT, Windows Embedded и др.); развитие свободно распространяемых и коммерческих программных библиотек. Представленные изменения требуют пересмотра методической базы проектирования систем логического управления. Рассмотрение

современных тенденций в области развития систем логического управления показывает, что они направлены на снижение себестоимости конечного продукта, с одновременным повышением степени гибкости и открытости.

Во **второй** главе предложены модели построения систем логического управления технологическим оборудованием и определена схема их последовательной трансформации. На сегодняшний момент появился ряд факторов, которые требуют пересмотра концепции, основанной на базе релейных схем автоматики, это: многократное увеличение вычислительных ресурсов ЭВМ; появление новых типов ЭВМ; появление новых принципов организации контроллеров (Soft PLC, PAC контроллеры); популяризация идей интеграции производственных ресурсов. Систематизируя требования, предъявляемые к системам логического управления, были выделены группа общих требований, необходимых при работе с любым оборудованием и группа частных требований, актуальных для конкретного оборудования и определяемых особенностями его функционирования. К общим отнесены: открытость, мультипротокольность, наличие встроенного и автономного решений, кроссплатформенность реализации, модульность, конфигурируемость, масштабируемость, распределенная реализация, надежность, ремонтпригодность, безопасность, модифицируемость, максимальная длительность жизненного цикла, сохранение инвестиций, вложенных в проект, уменьшение периода пуско-наладочных работ. К частным можно отнести: количество и типы сигналов входов/выходов, наличие и тип противоаварийной защиты, класс защиты по IP и др.

Разработка модульной организации структуры систем логического управления. При проектировании архитектуры сложных систем производится их разбиение на модули, которые представляются в виде законченного блока с реализацией определенного функционала. Каждый модуль – это автономное решение в рамках системы, что в итоге определяет общий уровень гибкости и конфигурируемости. Модульную организацию систем логического управления стоит рассматривать как на уровне приложений, так и на уровне аппаратуры и системного программного обеспечения. В рамках системы логического управления принцип модульной организации аппаратного обеспечения должен быть сохранен и в зависимости от требований объекта управления должна быть подобрана конфигурация. На уровне прикладных решений система управления разбивается на модули по функциональным признакам. Подход к модульной структуре систем логического управления предложенный в работе позволит выделить отдельные модули, которые будут иметь: структурное единообразие, общий механизм межмодульных связей; при этом система управления в целом примет структурированный вид. Такой подход позволит:

- организовать процесс управления как в рамках единой вычислительной платформы, так и на нескольких платформах, путем разделения группы модулей по единому функциональному признаку;
- комплектовать систему управления в зависимости от реализуемой задачи;
- применять компоненты различных производителей, в том числе сочетая их между собой.

Предложена *последовательная схема трансформации моделей системы логического управления* для формализации процесса разработки. Системы логического управления являются системами со сложной иерархической структурой, достигнуть существенного упрощения в понимании принципов, лежащих в основе работы которых можно за счет выбора модельно-ориентированного подхода к разработке в целом и за счет разбиения структуры системы на ряд модулей. По аналогии с модульным принципом построения систем управления (в частности, систем ЧПУ) в работе применен подход, учитывающий возможности системы и последние достижения в области автоматизации, что позволило определить формальные модели, необходимы при разработке и объединить их в логическую схему последовательного их создания и трансформации (рисунок 3). В результате моделирования получим основные модули системы, определим их функционал и взаимосвязь модулей между собой. Моделирование состоит из шести шагов и делится на два блока – блок проектной и технологической подготовки.

К блоку проектной подготовки относятся первые три этапа. На **первом этапе** проводится анализ требуемых потребительских свойств систем управления, исходя из которых выделяются основные функции и компоненты их реализующие. На **втором этапе** создается модель по типу виртуальной машины, которая позволяет выстроить многоуровневую структуру системы управления с выделением межуровневых зависимостей между платформой и прикладной компонентой и обеспечивается портируемость посредством ввода кроссплатформенной библиотеки. На **третьем этапе** создается потоковая модель данных (англ. Data Flow Diagrams – DFD), которая позволяет систематизировать основные потоки данных в системе управления. После третьего этапа осуществляется выбор среды и средств производства. Далее реализуется блок технологической подготовки, к которому относятся 4, 5 и 6 этапы. На **четвертом этапе** строится архитектурная модель системы логического управления, определяющая структуру системы и выделяет взаимные связи между объектами. На **пятом этапе** строится модель подготовки и исполнения программы логического управления, которая определяет привязку компонент системы управления к фазам процесса управления. На **шестом этапе** строится распределенная модель системы логического управления, которая позволяет определить схему её функционирования в условиях распределения ресурсов.

Разработана *функциональная модель системы логического управления технологическим оборудованием в нотации IDEF 0* (рисунок 4), в которой система представлена как набор функций, связанных между собой связями.

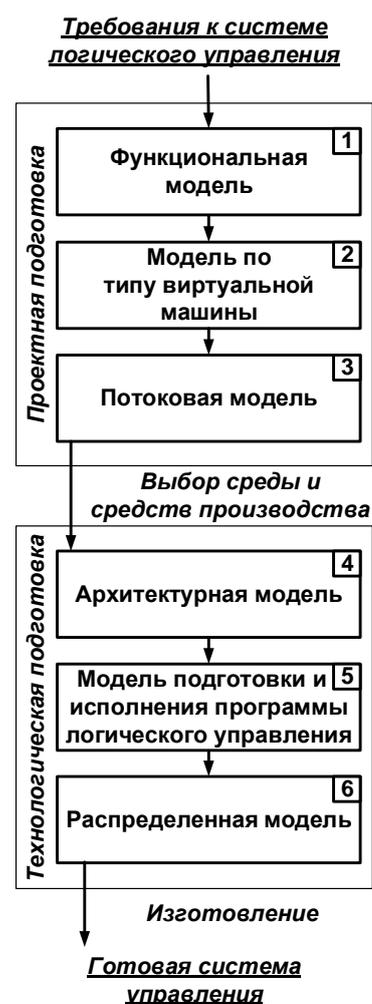


Рисунок 3 -
Совокупность моделей систем логического управления

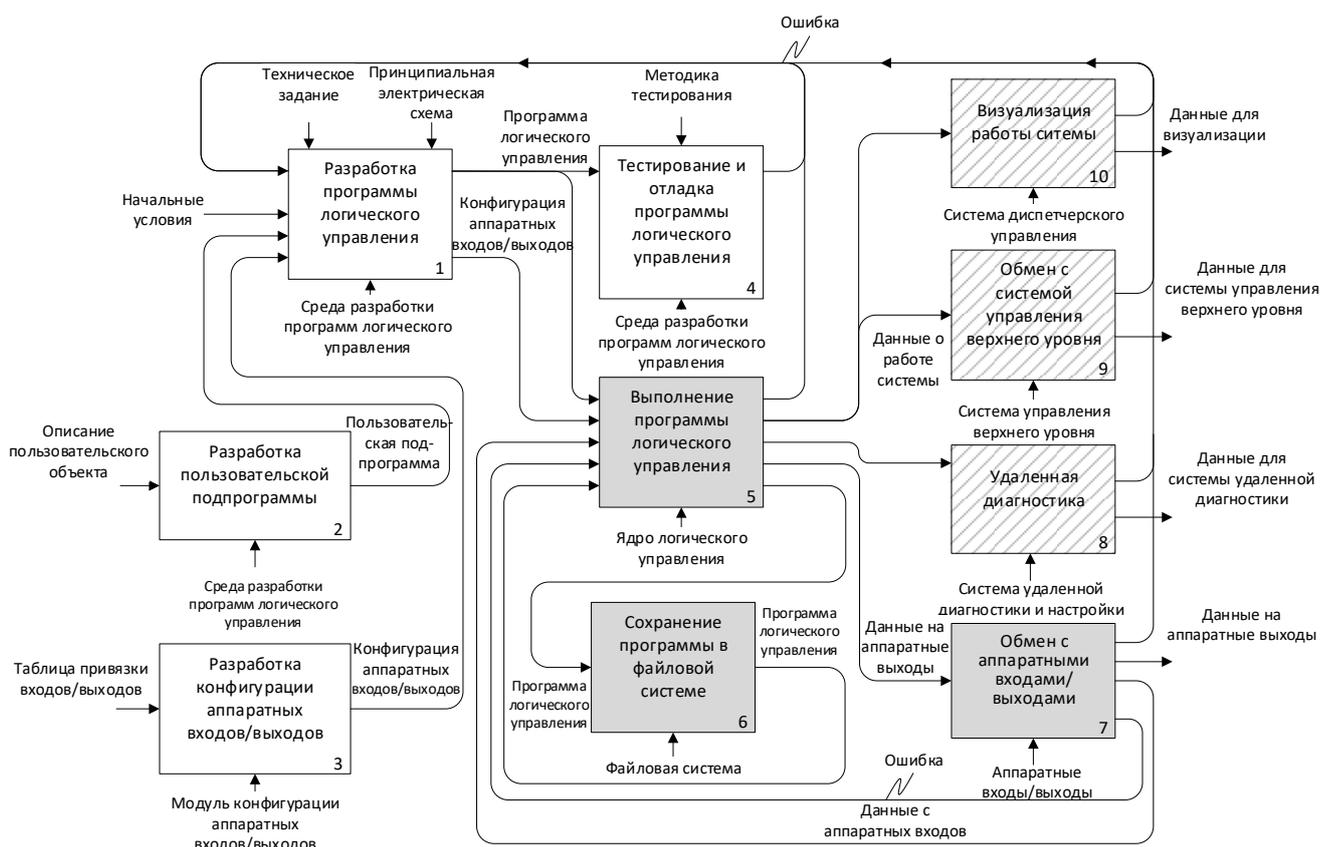


Рисунок 4 - Функциональная модель системы логического управления IDEF 0

При моделировании выделены три группы функций: функции по разработке программ логического управления (без выделения); функции исполнительной системы (ядра) логического управления (выделены серым); функции внешних систем (выделены штриховкой). Функциональная модель позволила выделить основные функции системы логического управления и привязать их к компонентам системы управления для последующей реализации.

Разработана модель системы логического управления по типу виртуальной машины, объединяющая используемые при разработке системы управления элементы с указанием связей между ними (рисунок 5). Уровни виртуальной модели – это независимые уровни абстракции, которые рассматриваются без привязки к другим уровням. На каждом из уровней решаются следующие задачи: аппаратный уровень позволяет выбрать компоненты; системный уровень определяет конфигурацию операционной системы; уровень интерфейсов прикладного программирования позволяет организовать контроль доступа к системному уровню; уровень программной платформы определяет выбор программной платформы; прикладной уровень отвечает за решение прикладных задач.

Модель по типу виртуальной машины позволяет: получить целостное представление о системе логического управления, без привязки к способу программного исполнения компонент; проектировать системы с учетом кроссплатформенности и снижения времени на разработку; сфокусироваться на решении прикладных задач и получить независимость приложения от объекта управления.



Рисунок 5 - Обобщенная модель системы логического управления по типу виртуальной машины

Разработана *поточная модель системы логического управления технологическим оборудованием* (рисунок 6), которая позволяет систематизировать основные потоки данных в системе логического управления.

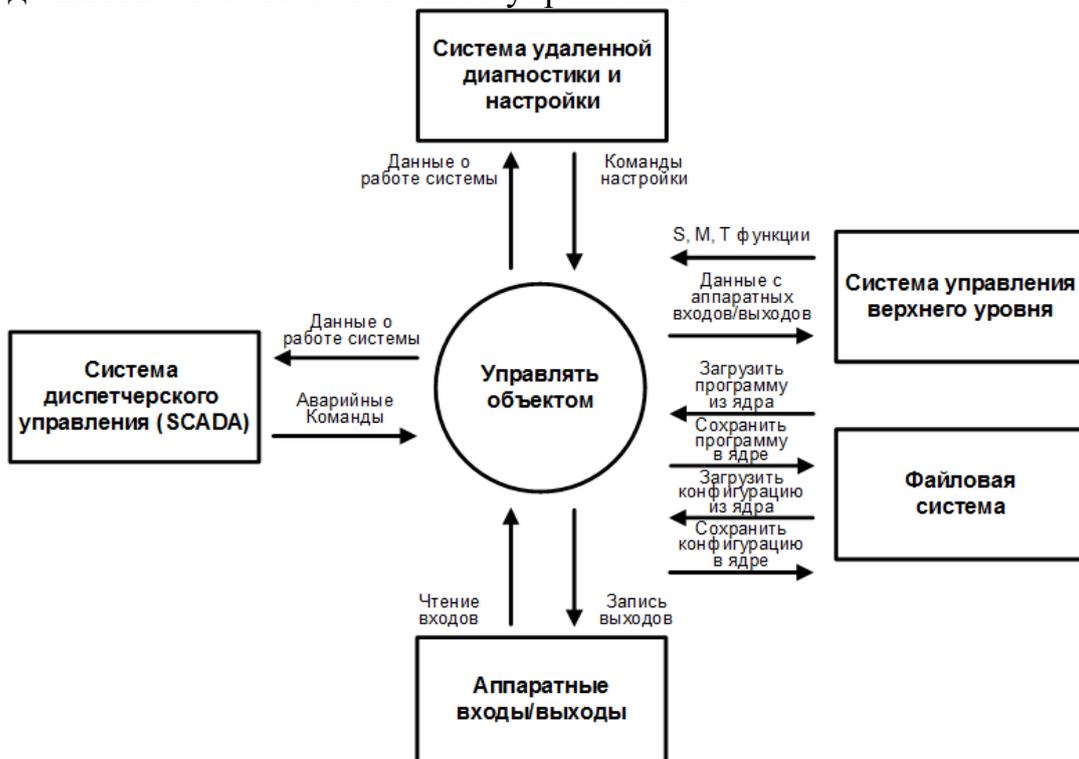


Рисунок 6 - Исходная диаграмма обобщенной поточной модели системы логического управления

При проектировании систему управления рассматривают как набор связанных между собой процессов, взаимодействие которых осуществляется посредством передачи данных. Система управления содержит процессы, преобразующие информацию, в результате преобразования порождаются новые потоки данных. Поточковая модель является многоуровневой иерархической моделью. Каждый процесс подвергается декомпозиции. Поточковая модель — средство для отображения разрабатываемой системы, совместно с внешней средой. Это отображение описывается на исходной диаграмме верхнего уровня в иерархии потоковой модели. Поточковая модель позволяет смоделировать процесс трансформации входных потоков данных в выходные потоки. Структура, семантика и типы потоков данных, полученные при моделировании, используются в дальнейшем при построении архитектурной модели.

Разработана *архитектурная модель системы логического управления технологическим оборудованием* (рисунок 7), которая позволила выявить количество и структурное расположение модулей, а также связей между ними.

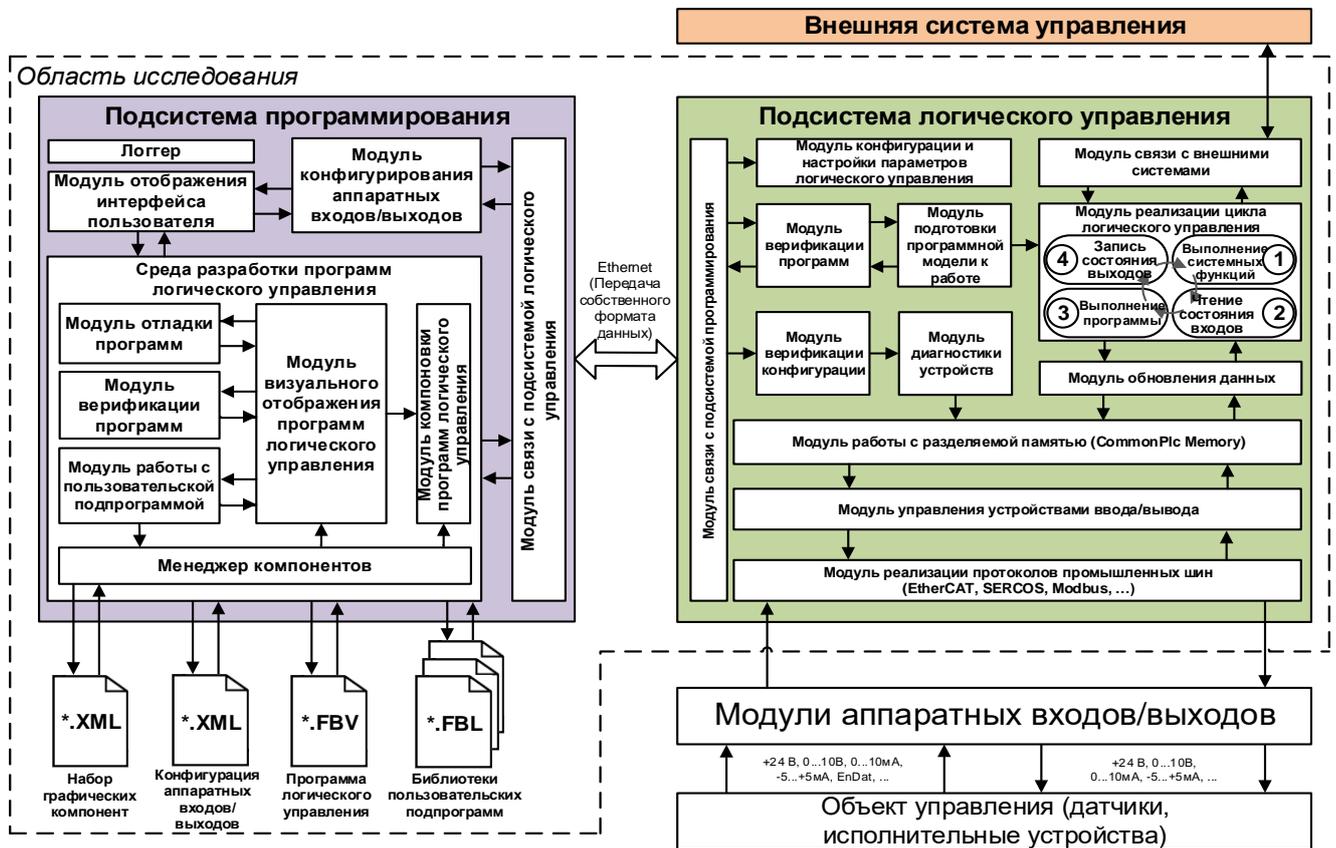


Рисунок 7 - Обобщенная архитектурная модель системы логического управления

Архитектура системы логического управления состоит из двух подсистем: программирования и логического управления. Подсистема программирования решает задачу проектирования и разработки программы логического управления. Подсистема логического управления решает задачу исполнения программы логического управления.

Задача разработки программы логического управления разделена на две составляющие: программная реализация алгоритма работы системы управления, конфигурирование аппаратных входов/выходов. Подсистема программирования связана с подсистемой логического управления посредством коммуникационного канала. Центральным модулем подсистемы логического управления является «модуль реализации цикла логического управления», который реализует следующую периодически выполняемую последовательность действий: системное тестирование, опрос входов, выполнение программы логического управления и запись выходов. Модули аппаратных входов/выходов связаны с подсистемой логического управления посредством одного из высокоскоростных протоколов связи. Модули аппаратных входов/выходов соединены физическими линиями связи непосредственно с датчиками и исполнительными устройствами. Архитектурная модель системы управления позволила: определить модульную структуру системы; произвести моделирование взаимоотношений модулей друг с другом и внешней средой; определить возможные пути масштабирования системы.

Разработана модель подготовки и исполнения программы логического управления (рисунок 8), которая определяет механизм преобразования и запуска программы логического управления в процессе работы системы.

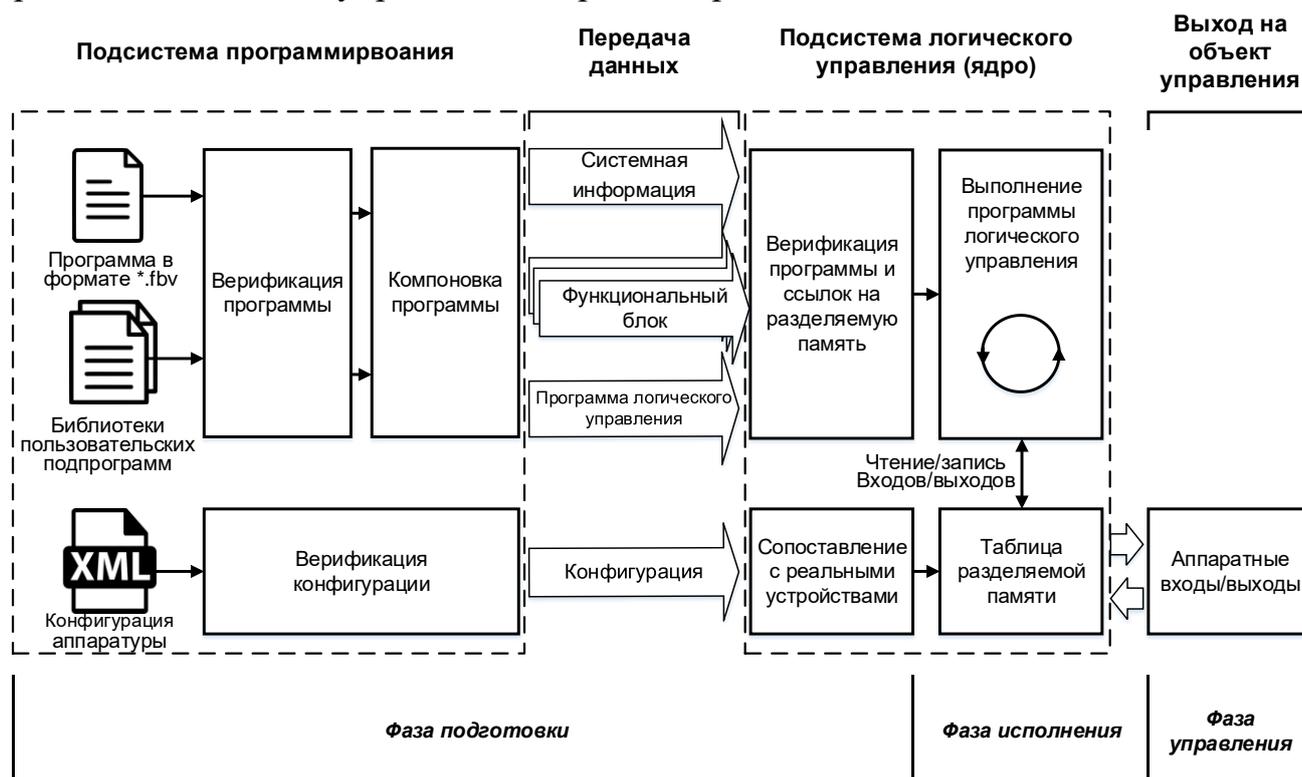


Рисунок 8 - Обобщенная модель подготовки и исполнения программы логического управления

Разработка программы логического управления разделяется на два независимых процесса: разработка программы на языке FBD и конфигурирования аппаратных входов/выходов. Программа логического управления проходит фазы подготовки, исполнения и управления. Программа логического управления состоит из основной программы и множества пользовательских подпрограмм, вызываемых из

основной программы и оформленных в виде библиотек. В подсистеме программирования предварительно проводится верификация программы, далее производится ее компоновка. В результате компоновки получается единая программа логического управления.

На следующем шаге производится поэтапная передача программы в подсистему логического управления. При получении объединенной программы, подсистема логического управления осуществляет повторную верификацию, в ходе которой осуществляется проверка ссылок на разделяемую память, которые прописываются в функциональных блоках входов и выходов программы. При отсутствии ошибок производится запуск программы в цикле работы контроллера. Конфигурация аппаратных входов/выходов хранится в формате «*.xml» и содержит сведения о модулях аппаратных входов/выходов, подключенных к системе управления. Перед началом работы, конфигурация проходит процесс формальной верификации и передается в ядро логического управления. Процесс верификации заключается в проверке дерева конфигурации на отсутствие повторов и непротиворечивость (отсутствие ссылок на один участок памяти для разных входов/выходов).

В ядре логического управления конфигурация сопоставляется с реальными устройствами, подключенными к системе управления. При отсутствии ошибок, формируется таблица разделяемой памяти, которая содержит группы ячеек памяти, закрепленных за отдельными устройствами аппаратного ввода/вывода. В фазе исполнения работающая программа логического управления осуществляет чтение данных о состоянии входов из разделяемой памяти и запись обновленных данных о состоянии выходов в разделяемую память.

Разработана *распределённая модель системы логического управления технологическим оборудованием* (рисунок 9), для определения: схемы использования распределенных вычислительных ресурсов; связей с объектами управления посредством аппаратных модулей ввода/вывода; необходимого оборудования сторонних производителей; необходимого специализированного оборудования, разработанного для конкретной системы управления; способа интеграции с системами управления верхнего уровня; механизма взаимодействия с системами, находящимися на значительном удалении от объекта управления с применением web-технологий.

В **третьей** главе создан формальный аппарат построения подсистемы программирования и исполнительного ядра системы логического управления технологическим оборудованием, на основе которого реализовано программно-математическое обеспечение системы логического управления.

Реализована *подсистема программирования для систем логического управления технологическим оборудованием*, основной функцией которой является организация интерфейса оператора, в состав которого входят среда разработки программ логического управления, выполненная по требованиям стандарта МЭК 61131-3 и утилита конфигурации оборудования.

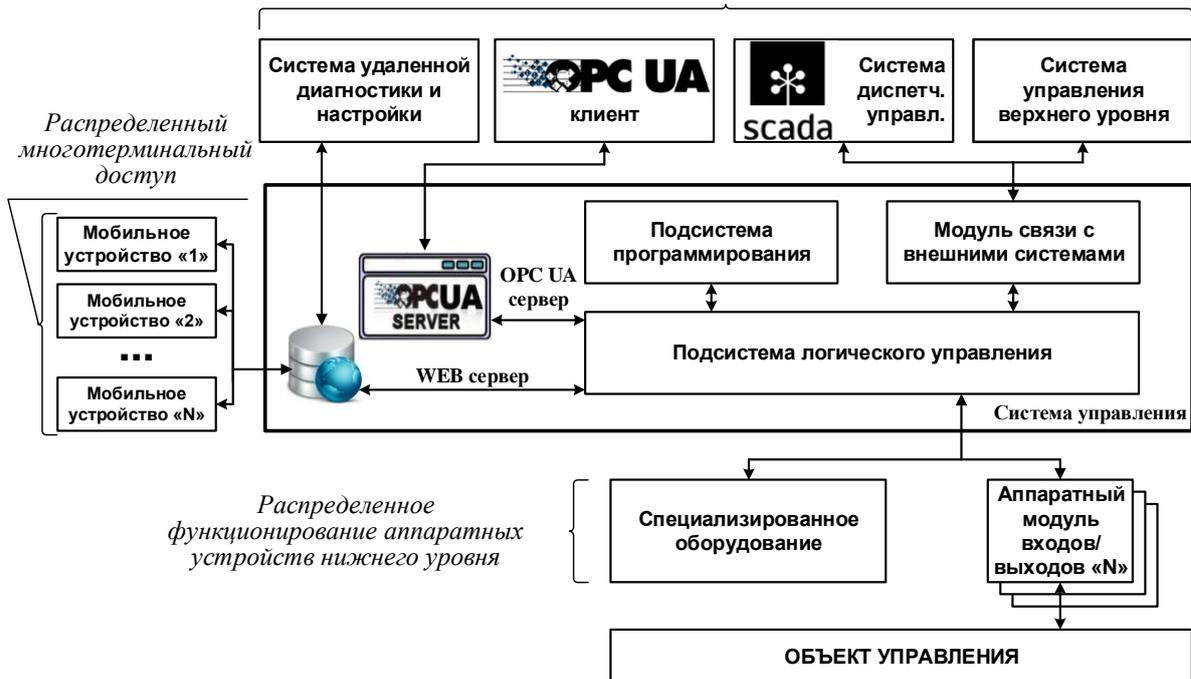


Рисунок 9 - Обобщенная распределенная модель системы логического управления

Проведенный анализ показал, что ряд недостатков не позволяет применять существующие программные среды в кроссплатформенных проектах. Это: ориентация на конкретную операционную систему; необходимость приобретения лицензии на коммерческое использование; закрытость системы, ориентированная на комплексное решение, без возможности его модернизации и доработки; отсутствие программных пакетов с «открытым» программным кодом. Предложен подход по разработке собственной среды проектирования программ логического управления. Выделены следующие основные требования для разрабатываемого инструментария: аппаратная и платформенная независимость, отсутствие платной лицензии, открытость механизма для конечного пользователя, простота работы, стандартный язык программирования, возможность расширения функционала и модернизации за счёт открытости кода, возможность использования в учебных целях. При разработке инструментария за прототип были взяты среды CoDeSys, LabView, ISaGRAF в силу их полноты реализации и масштабируемости применения. Выбор в качестве базового языка разработки Functional Block Diagram (FBD) был обусловлен тем, что программа на языке FBD напоминает электрическую схему, а большая часть проектов по реализации систем логического управления предполагает разработку принципиальных электрических схем подключения узлов электроавтоматики.

Разработан модуль конфигурирования аппаратных входов/выходов для систем логического управления, который позволяет произвести отображение переменных ПЛК-проекта на аппаратные входы/выходы. Непосредственное управление исполнительными устройствами осуществляется через модули аппаратных входов/выходом, которые являются пассивными устройствами. Полная конфигурация аппаратных входов/выходов имеет разветвленную многоуровневую структуру. Конфигурирование и выбор параметров модулей входов/выходов для их инте-

грации в состав системы логического управления осуществляется с использованием механизма разделяемой памяти. Каждый слот отображается на области разделяемой памяти и занимает определенный объем и позицию, в зависимости от своего типа. Состояние входов проецируется из внутренней памяти устройства в область разделяемой памяти системы управления, а в обратном направлении передаются управляющие воздействия на выходные каналы периферийных модулей. Готовая конфигурация упаковывается в специальную структуру и передается в исполнительное ядро. Инициализация адресного пространства ядра логического управления для работы с аппаратными входами/выходами производится на основе загруженной конфигурации в момент первоначального запуска.

Разработано *исполнительное ядро системы логического управления технологическим оборудованием, как система реального времени*. Основными задачами ядра являются: опрос входных сигналов с аппаратных входов; выполнение алгоритмов управления; подготовка и формирование управляющих сигналов на аппаратные выходы; сохранение результатов обработки; передача результатов в подсистему программирования для отладки; контроль системы на отсутствие ошибок. При реализации ядра использовался кроссплатформенный подход. В состав исполнительного ядра системы входят модули, представленные на рисунке 10.



Рисунок 10 - Модули системного ядра логического управления

Разработана *машина состояний ядра системы логического управления* на базе автоматной парадигмы программирования (рисунок 11). В момент первоначального включения, ядро логического управления находится в состоянии «НАЧАЛО». При отсутствии системных ошибок осуществляется переход в состояние «Конфигурация отсутствует». Дальнейшие действия можно выполнять, только сконфигурировав ядро, т.е. перейдя в сложное состояние «Создать конфигурацию». При выключении ядра файл конфигурации сохраняется. Последующее

включение приведет к загрузке сохраненной конфигурации. После конфигурирования ядро переходит в режим готовности, загрузка программы логического управления и нажатие на кнопку «СТАРТ» переводит систему в режим работы. Из каждого состояния, при наличии ошибки, предусмотрен переход в состояние «Ошибка», выход из состояния «Ошибка» осуществляется посредством сброса системы. Состояние «Работа» является сложным состоянием, в котором происходит запуск цикла работы ядра с программой логического управления. Ядро системы логического управления периодически (с периодом от 10 до 100 мс) повторяет жестко определенную последовательность - цикл работы ПЛК.

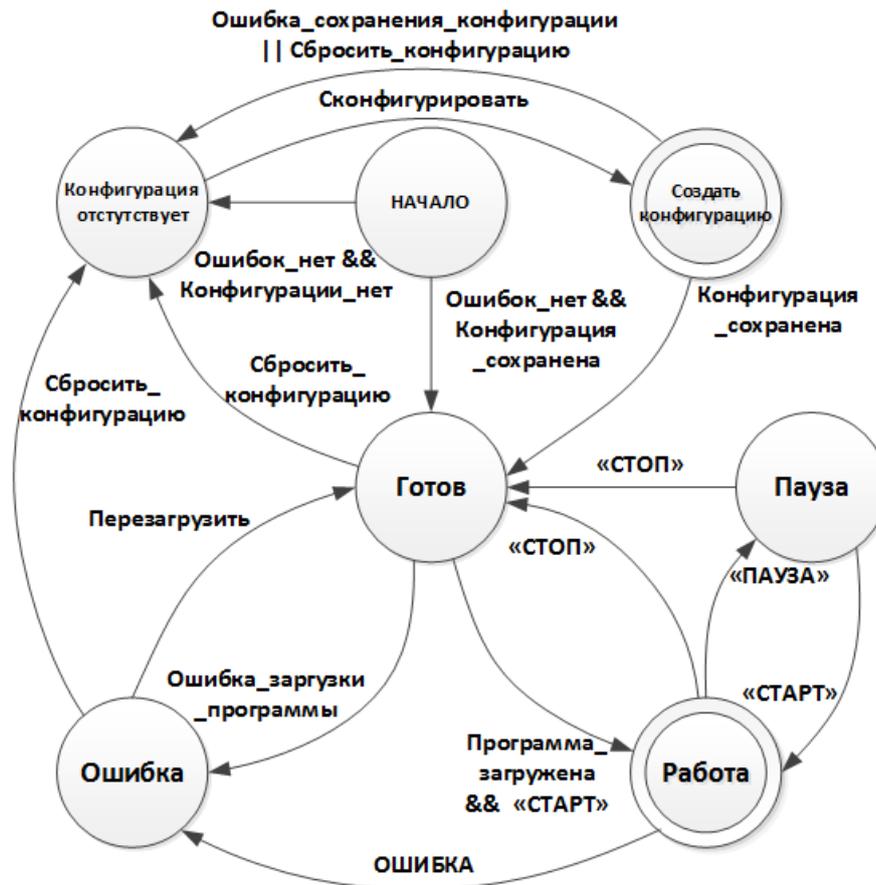


Рисунок 11 - Машина состояний ядра системы логического управления

Разработана *схема организации адресного пространства разделяемой памяти* (рисунок 12), для синхронизации данных между аппаратными входами/выходами и программой логического управления.

Разделяемая память используется, в связи с тем, что время прямого обращения к физической памяти аппаратных устройств много больше программного запроса на обмен с внутренним модулем ядра. При обращении к разделяемой памяти удобно работать отдельно с массивом входов и отдельно с массивом выходов. Поэтому для системы управления выделено отдельное подмножество адресного пространства для массива входных и выходных данных. Размер разделяемой памяти устанавливается пользователем в настройках системы.

Общий объем разделяемой памяти по функциональному назначению разделен на 6 областей. Для работы с аппаратными входами/выходами в адресном про-

странстве ядра организована область 3. На каждом из участков третьей области разделяемой памяти, в соответствии с конфигурацией, последовательно записываются данные с аппаратных модулей начиная с младшего бита модуля с наименьшим номером физического адреса до старшего бита модуля с наибольшим номером адреса.

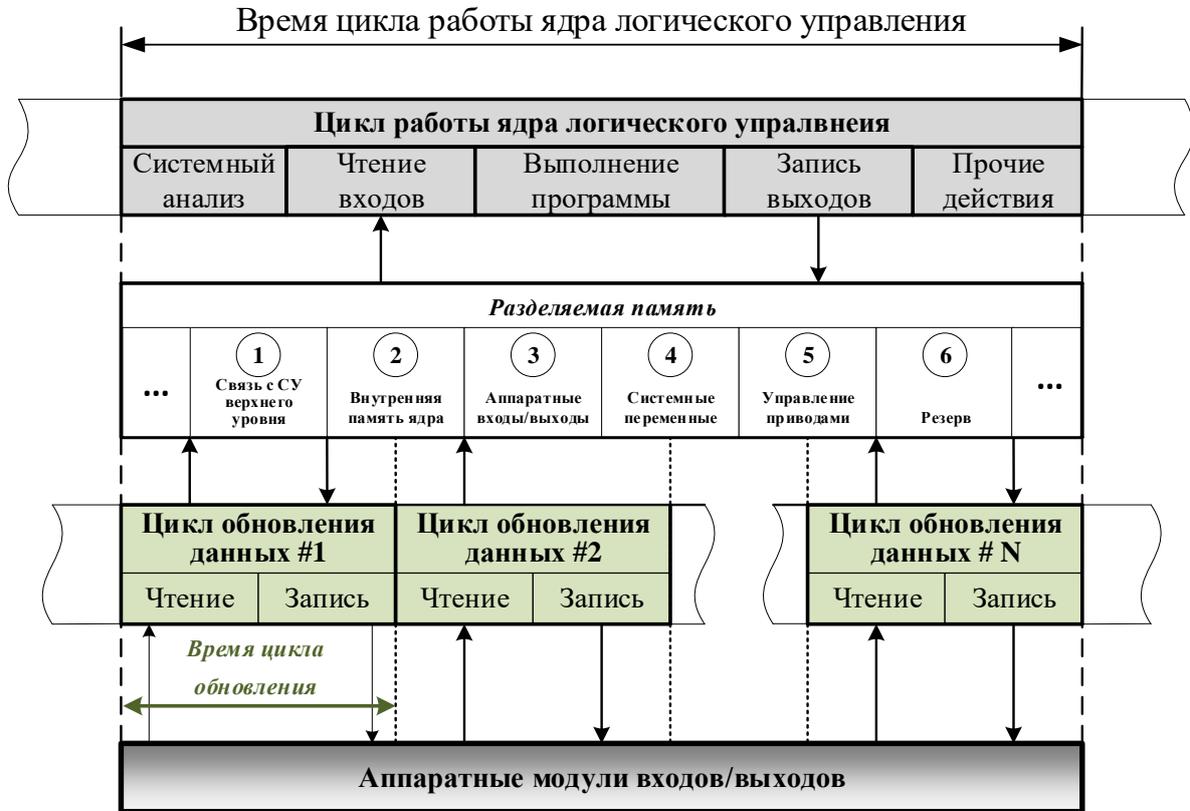


Рисунок 12 - Циклы обновления данных в разделяемой памяти

Для конфигурирования системы логического управления каждый из головных модулей ввода/вывода и слотов должен иметь свой адрес в рамках адресного пространства. Время выполнения цикла синхронизации данных между аппаратными входами/выходами и разделяемой памятью существенно меньше времени выполнения цикла ядра логического управления. Во время выполнения цикла работы ядра логического управления укладывается несколько циклов обновления данных - это позволяет поддерживать в актуальном состоянии аппаратные входы/выходы в разделяемой памяти системы управления.

Разработан механизм взаимодействия подсистемы программирования и исполнительного ядра системы логического управления. Сетевое взаимодействие между аппаратными платформами целесообразно организовать на базе стандарта Ethernet с применением протокола TCP/IP. Для работы подсистемы программирования и исполнительного ядра в рамках одного компьютера используется стандартное обращение к самой себе, посредством механизма локального хоста (англ. localhost). Для реализации трансфера данных между подсистемой программирования и исполнительным ядром необходим универсальный механизм, позволяющий передавать разнородные типы данных, который не требует жесткого специфицирования передаваемых пакетов и базируется на протоколе TCP/IP. Согласно указанным требованиям был выбран многоцелевой канал взаимодействия.

В главе **четыре** разработана методика построения систем логического управления технологическим оборудованием, которая определяет фиксированный набор практических шагов, результатом выполнения которых является готовая система логического управления (рисунок 13). На **первом** шаге производится адаптация моделей системы управления под конкретный объект управления. Результатом выполнения первого шага является получение набора моделей для построения про-



Рисунок 13 - Методика построения систем логического управления

граммных систем логического управления технологическим оборудованием. На **десятом** шаге проводится тестирование разработанной системы управления и оформляется протокол тестирования.

Проведена *систематизация математических методов, используемых при проектировании программ логического управления*. Область применения систем логического управления накладывает свои ограничения и предъявляет требования к разработке программ, что определяет различие сложившихся подходов к применению математических методов. Единый подход к использованию математического аппарата для проектирования программ логического управления невозможен в связи с тем, что каждый из методов имеет свои преимущества и недостатки, которые должны быть учтены при решении определенного класса задач. В таблице 1 приведена систематизация математических методов, используемых при программировании систем логического управления.

На **втором** шаге разрабатывается сетевая структура системы управления, которая позволяет выделить используемые сети и протоколы связи.

На **третьем** шаге выделяется набор специализированных функций и команд, характерных для конкретного технологического оборудования. На **четвертом** шаге составляется таблица привязки аппаратных входов/выходов для связи системы управления с конкретным технологическим оборудованием.

На **пятом** шаге производится конфигурирование аппаратных входов/выходов, в результате которого создается файл конфигурации в формате «*.bin» или «*.xml».

На **шестом** шаге производится настройка режимов отображения экрана оператора, результатом которой является подготовка набора изображений, текстовых сообщений и алгоритмов визуализации для отображения на экране оператора.

На **седьмом** шаге осуществляется декомпозиция задачи логического управления на набор задач по управлению конкретным технологическим оборудованием. На **восьмом** шаге разрабатываются специализированные библиотеки управления на основе пользовательских функциональных блоков.

На **девятом** шаге разрабатывается программа логического управления конкретным технологическим оборудованием. На **десятом** шаге проводится тестирование разработанной системы управления и оформляется протокол тестирования.

Таблица 1 Систематизация методов проектирования программ логического управления

	Мат. аппарат	Область применения	Способ задания	Графическое представление	Требования к квалификации
Комбинационные схемы	Булева алгебра	Объекты управления, в которых комбинация сигналов на выходе в любой момент времени однозначно определяется комбинацией сигналов на входе.	таблица истинности	функциональная схема	низкие
Технологические объекты	Временные булевы функции	Объекты поведение которых определяется в том числе сигналами задержки времени, реализация которых осуществляется с использованием таймеров.	временная диаграмма, таблица истинности	временная диаграмма	средние
Цикловая электроавтоматика	Автоматные модели	Объекты управления поведение которых определяется множеством дискретных операций, повторяющихся циклически с определенным периодом.	циклограмма	автоматный граф	средние
Дискретные системы	Разностные уравнения	Объекты управления, в которых можно осуществить квантование непрерывных входных и выходных сигналов по времени.	математическая модель	структурная схема	высокие

Программирование цикловой электроавтоматики с применением математического аппарата автоматных моделей использует формальное описание дискретного управляющего автомата, который в сочетании с технологическим объектом (ТО) образует систему управления циклическим процессом. В качестве примера построения дискретного управляющего объекта рассмотрена технологическая схема управления револьверной головкой для осевого инструмента.

Технологический граф работы револьверной головки состоит из вершин, соответствующих технологическим операциям: A_0 – все исполнительные механизмы револьверной головки находятся в исходном состоянии; A_1 – нахождение нулевой позиции инструментальной головки; A_2 – режим готовности; A_3 – работа револьверной головки в режиме вращения инструмента (шпиндельный режим); A_4 – режим смены инструмента.

Технологический граф работы револьверной головки диалогический. Переход между вершинами отмечен блокировками. Реакция на аварийную ситуацию будет представляться следующим соотношением: $\forall i[A_i \Rightarrow X_{100}A_5]$, где $i \neq 0$. Операция A_5 (обработка ошибки) характеризуется воздействием Z_5 , вызывая остановку электродвигателя.

Переход из состояния A_5 возможен только в состояние A_0 , по реакции $X_{100} \rightarrow \bar{X}_{100}$ (ошибка устранена). На графе операций представленном на рисунке 14 для описанного режима внесена вершина, соединенная с вершиной A_0 . На основе спроектированного графа операций работы револьверной головки можно реализовать программу логического управления на языке функциональных блоков (рисунок 15).

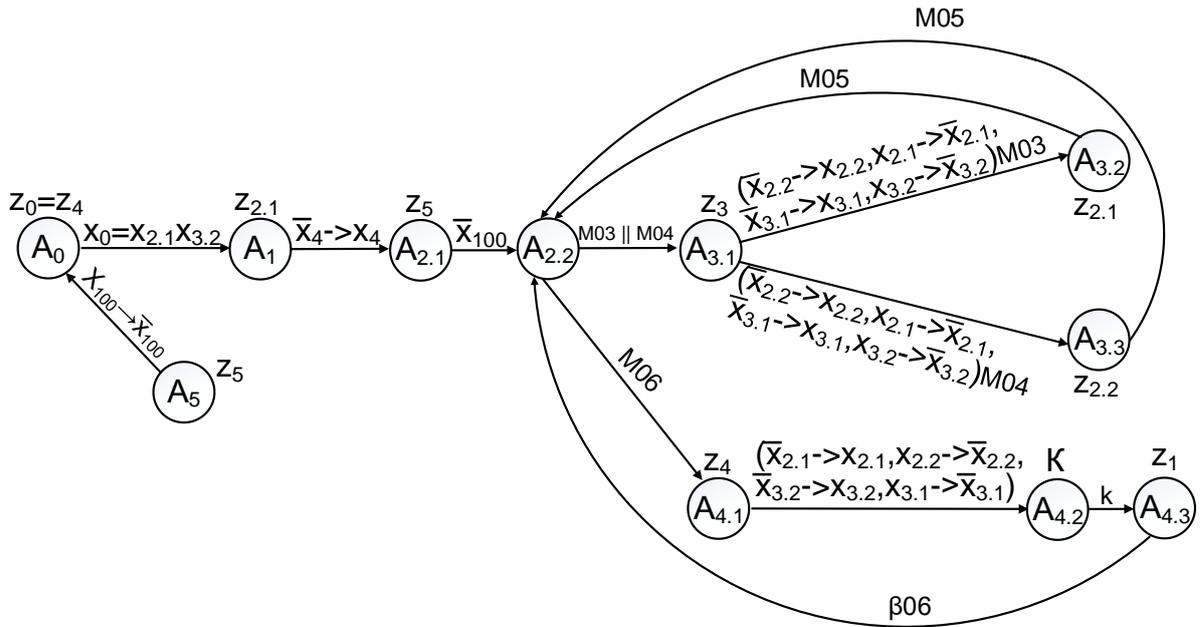


Рисунок 14 - Граф операций работы револьверной головки

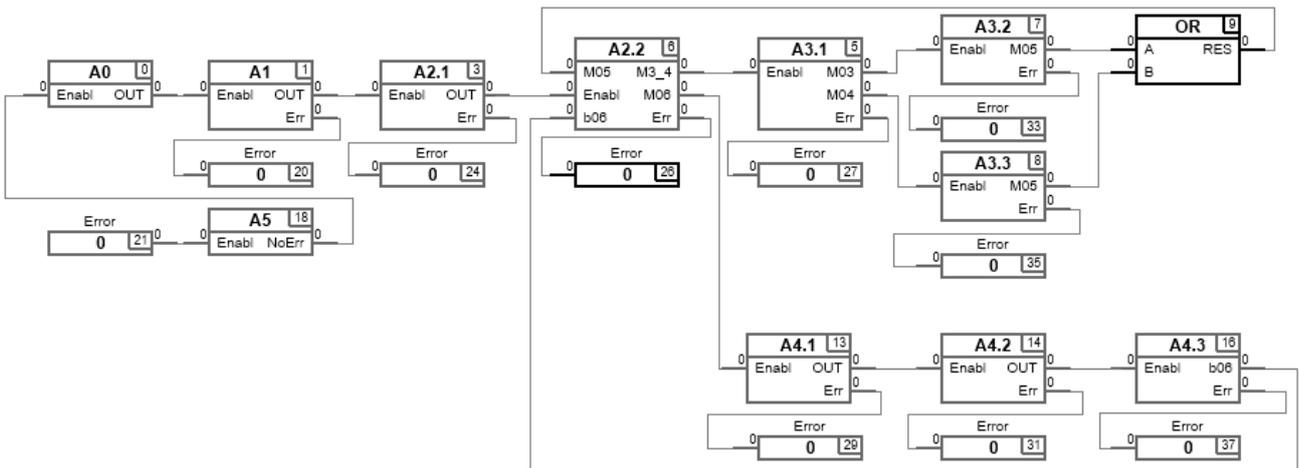


Рисунок 15 - Программа управления электроавтоматикой револьверной головки

Программа логического управления полностью повторяет структуру графа операций, каждое из состояний графа операций (A0, A1, ...) заменено на пользовательский функциональный блок (с именами A0, A1, ...). Реализованные блоки могут содержать вложенные пользовательские блоки (например, в функциональном блоке A4.2 реализован блок вычисления угла поворота для поиска инструмента).

Программирование дискретных систем с использованием математического аппарата разностных уравнений. При управлении электроавтоматикой технологических объектов задачи контроля параметров с последующим изменением управляющего воздействия решаются с применением регуляторов. В рамках решения логической задачи управления на базе классического контроллера реализовать регулятор без применения специализированных аппаратных решений не представляется возможным. Приведенный ниже подход позволяет реализовать ПИД-регулятор с использованием ограниченных ресурсов инструментальных средств программирования системы логического управления без привлечения специализированных дополнительных аппаратных модулей.

В качестве примера рассмотрена гамма токарно-фрезерных обрабатывающих центров высокой точности производства ОАО «Саста», в которых для достижения класса точности А применяется регулирование температуры отдельных узлов (станина, шпиндель, инструмент). В работе предложена последовательность действий, которая позволяет получить на языке FBD блок ПИД-регулятора (рисунок 16).

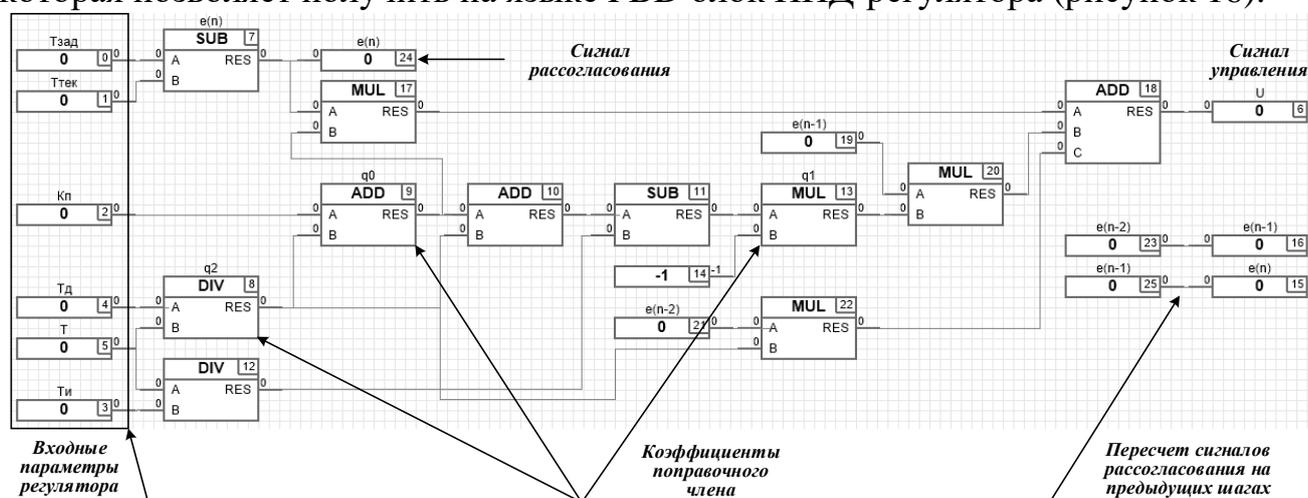


Рисунок 16 - Реализация ПИД регулятора на языке функциональных блоков

Шаг 1. Передаточная функция $W(p)$ ПИД-регулятора записана в виде:

$W(p) = K_p + \frac{1}{T_i p} + T_d p$, где K_p – коэффициент передачи пропорциональной части, T_i , T_d – постоянная времени интегрирования и дифференцирования.

Шаг 2. Управляющий сигнал ПИД-регулятора представляется в виде дифференциального уравнения: $U(t) = K_p \varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t) dt + T_d \frac{d\varepsilon}{dt}$, где $U(t)$ – выходная величина регулятора (управляющий сигнал), $\varepsilon(t)$ – сигнал рассогласования (ошибка регулирования).

Шаг 3. Управляющий сигнал ПИД регулятора представляется в виде разностного уравнения: $U[n] = K_p \varepsilon[n] + \frac{T}{T_i} \sum_{i=1}^n \varepsilon[i] + \frac{T_d}{T} (\varepsilon[n] - \varepsilon[n-1])$

Шаг 4. Управляющий сигнал ПИД регулятора записывается в рекуррентном виде: $\Delta U[n] = U[n] - U[n-1] = q_0 \varepsilon[n] + q_1 \varepsilon[n-1] + q_2 \varepsilon[n-2]$, где $q_0 = K_p + \frac{T}{T_i} + \frac{T_d}{T}$, $q_1 = -K_p - \frac{2T_d}{T}$, $q_2 = \frac{T_d}{T}$ – коэффициенты поправочного члена.

Разработана методика нагрузочного тестирования ядра системы логического управления для проверки соответствия системы предъявляемым требованиям. В случае с системой логического управления нагрузочному тестированию подвергалось ядро, как приложение наиболее критичное к имеющимся вычислительным ресурсам. На рисунке 17 представлена зависимость потребления ресурсов процессора от сложности программы, выявленная при нагрузочном тестировании.

Разработана методика расчета средней наработки на отказ, на основе общих правил расчета надежности технических объектов, предъявляемых ГОСТ 27.301-95. Для ядра системы логического управления под наработкой на отказ принимается срок до возникновения необходимости полного перезапуска системы.

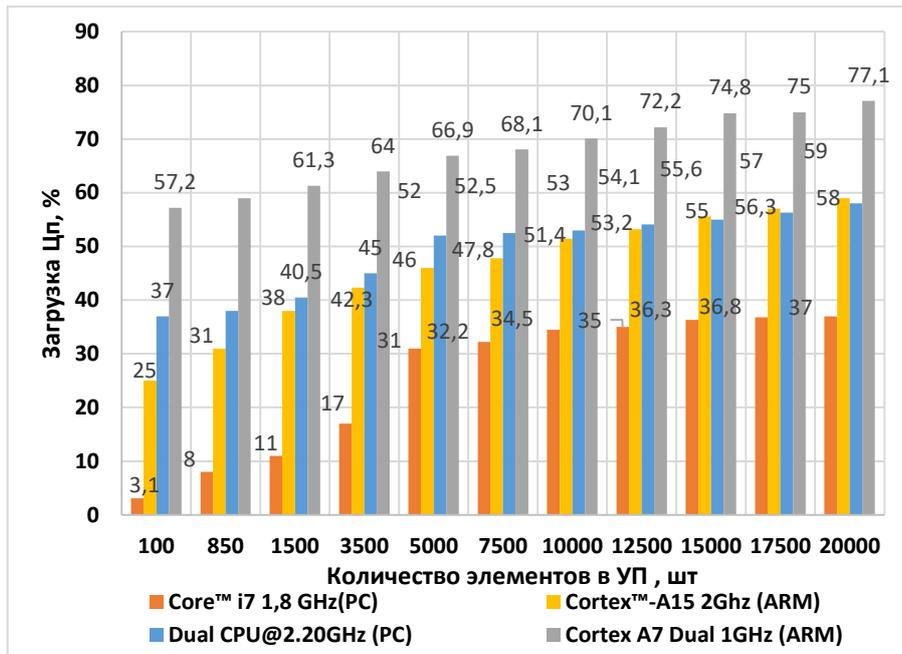


Рисунок 17 - Зависимость потребления ресурсов ЦП от сложности программы

Для расчета вероятности безотказной работы используют формулу:

$$P_k = (1 - \frac{r_1}{s_1})(1 - \frac{r_2}{s_2})(1 - \frac{r_k}{s_k}),$$

где P_k - оценка вероятности безотказной работы в момент времени t_k , r_i - число отказов, S_i - число объектов в изучаемой выборке оборудования, наработка которых более t_{k-1} . P_k вычисляется для каждого из интервалов t_{i-1} до t_i . Зависимость вероятности безотказной работы от наработки определяется следующей функцией:

$$P(t) = \exp(-a_1 t - a_2 t^2),$$

где a_1 и a_2 - постоянные коэффициенты. Функция позволяет сделать прогноз зависимости вероятности безотказной работы от времени за пределами времени, изученного в ходе экспериментов (рис. 17). Средняя наработка до отказа T_{cp} определяется следующим образом:

$$T_{cp.} = \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} \exp(-a_1 t - a_2 t^2) dt$$

Геометрическим смыслом T_{cp} является площадь под графиком зависимости безотказной работы. Расчет показателей надежности проводится для конкретной системы логического управления. Расчет средней наработки на отказ показал, что безотказная работа ядра логического управления превышает 1000 часов, что соответствует требованиям к системе. Основными причинами отказов стали «зависания» ядра логического управления, что связано с увеличением потребления вычислительных ресурсов с ростом времени наработки.

В пятой главе рассмотрены практические аспекты реализации систем логического управления технологическим оборудованием на примерах: комплекса гидроабразивной резки, гаммы экспериментальных токарно-фрезерных обрабатывающих центров наклонной компоновки и вертикально-фрезерного обрабатывающего

центра. Адекватность разработанных принципов построения систем первоначально проверена на экспериментальных стендах, что позволило до реализации рабочего варианта системы управления провести необходимые корректировки.

Разработана система логического управления электроавтоматикой экспериментального комплекса гидроабразивной резки УГСР (Установка Гидро Струйной Резки), реализованного ОАО «СМЗ» в рамках совместного опытно-конструкторского проекта с МГТУ «СТАНКИН» и ОАО «НИАТ». Комплекс гидроабразивной резки имеет шесть управляемых осей: X и Z – линейные, Y и V – порталные, A и C – круговые, что позволяет обрабатывать детали сложной формы. Задача логического управления разрабатывалась как составная часть программно-математического обеспечения системы ЧПУ.

Согласно методике построения систем логического управления, разработана сетевая структура системы управления (рисунок 18), в состав которой входят: ядро со встроенным программно реализованным контроллером, терминал оператора, аппаратные модули входов/выходов, система управления автономной станцией высокого давления, контроллеры приводов подачи (для 6 осей, с учетом порталной кинематики) и станочная панель управления.

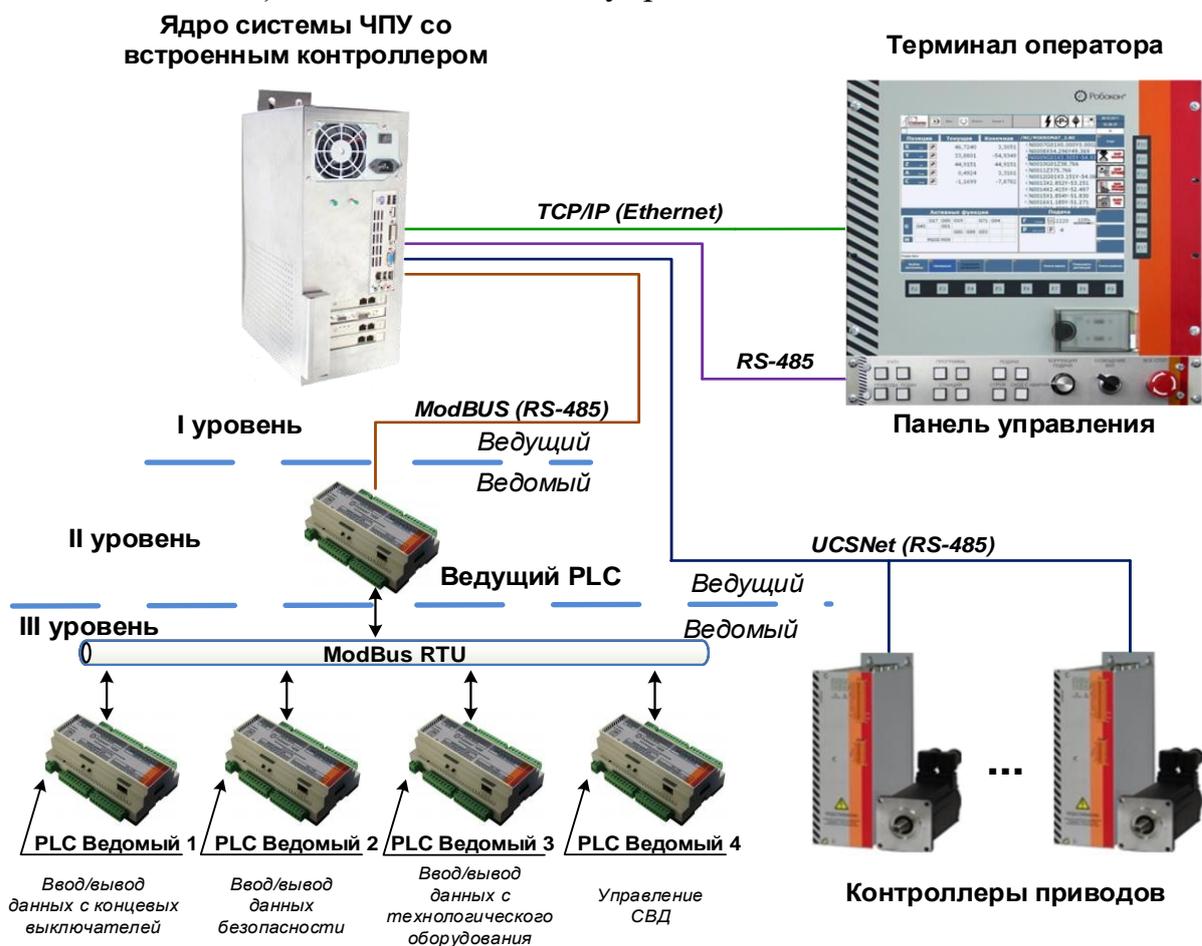


Рисунок 18 - Сетевая структура системы управления УГСР

Логическая задача ЧПУ решается посредством распределенной системы управления, которая состоит из программно-реализованного контроллера и модулей аппаратных входов/выходов. Взаимодействие автономных модулей входов/вы-

ходов организовано по принципу «ведущий – ведомый» («master - slave») с образованием многогранговой сети. При управлении УГСП использована комбинация подходов: программирование алгоритмов управления формированием струи и управление станцией высокого давления (СВД) реализовано непосредственно на контроллерах, а алгоритмы контроля безопасности, управления питанием, управление пневмосистемой и панелью - на базе программно реализованного контроллера, встроенного в систему управления. Применение системы логического управления УГСП совместно со специализированной технологией обработки позволило значительно экономить расход абразивного материала (25 до 30 % по сравнению с установками аналогичного класса).

Разработана система логического управления электроавтоматикой гаммы экспериментальных токарно-фрезерных обрабатывающих центров наклонной компоновки (производство ОАО «Саста»). В качестве примера рассмотрен обрабатывающий центр наименьшего типоразмера «СА 535», имеющий широкую номенклатуру входящего в его состав технологического оборудования и оснащенный: продольными (X1, X2) и поперечными (Z1, Z2) осями верхнего и нижнего суппортов, основным шпинделем и противошпинделем (с возможностью продольного перемещения - ось Z) для обеспечения параллельной обработки. Исходя из технического задания и предъявляемых требований, была разработана сетевая структура системы (рисунок 19).

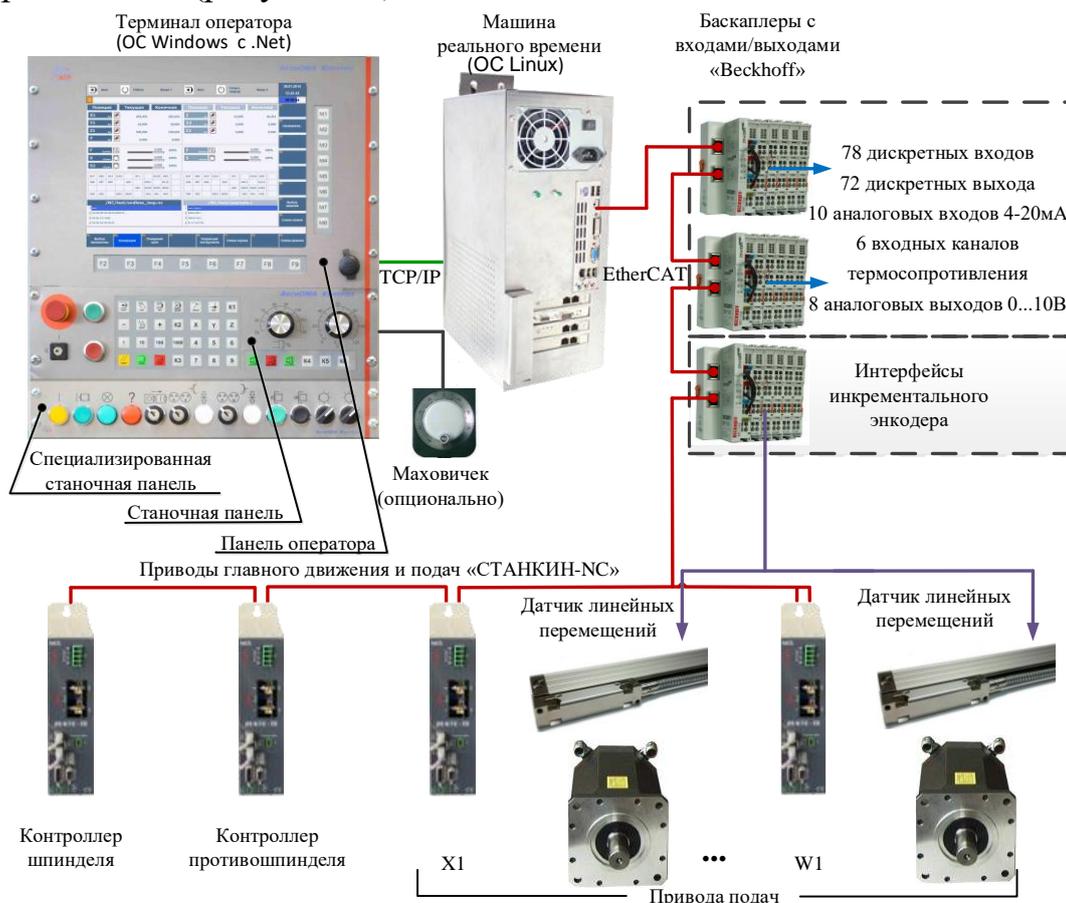


Рисунок 19 - Сетевая структура системы управления обрабатывающим центром «СА 535»

Разработана система логического управления электроавтоматикой вертикально-фрезерного обрабатывающего центра Quaser MV184P (ОАО «КЭМЗ»). Кинематическая схема вертикально фрезерного обрабатывающего центра предполагает наличие шпинделя, трех интерполируемых осей (X, Y, Z) и оси A (опционально), отвечающей за поворотные движения рабочего стола. Разработана структура системы управления обрабатывающим центром (рисунок 20). Сбор и обмен данными в сети между вычислительными устройствами осуществляется на базе открытого высокоскоростного протокола EtherCAT, а шпиндельный узел управляется по протоколу SERCOS.

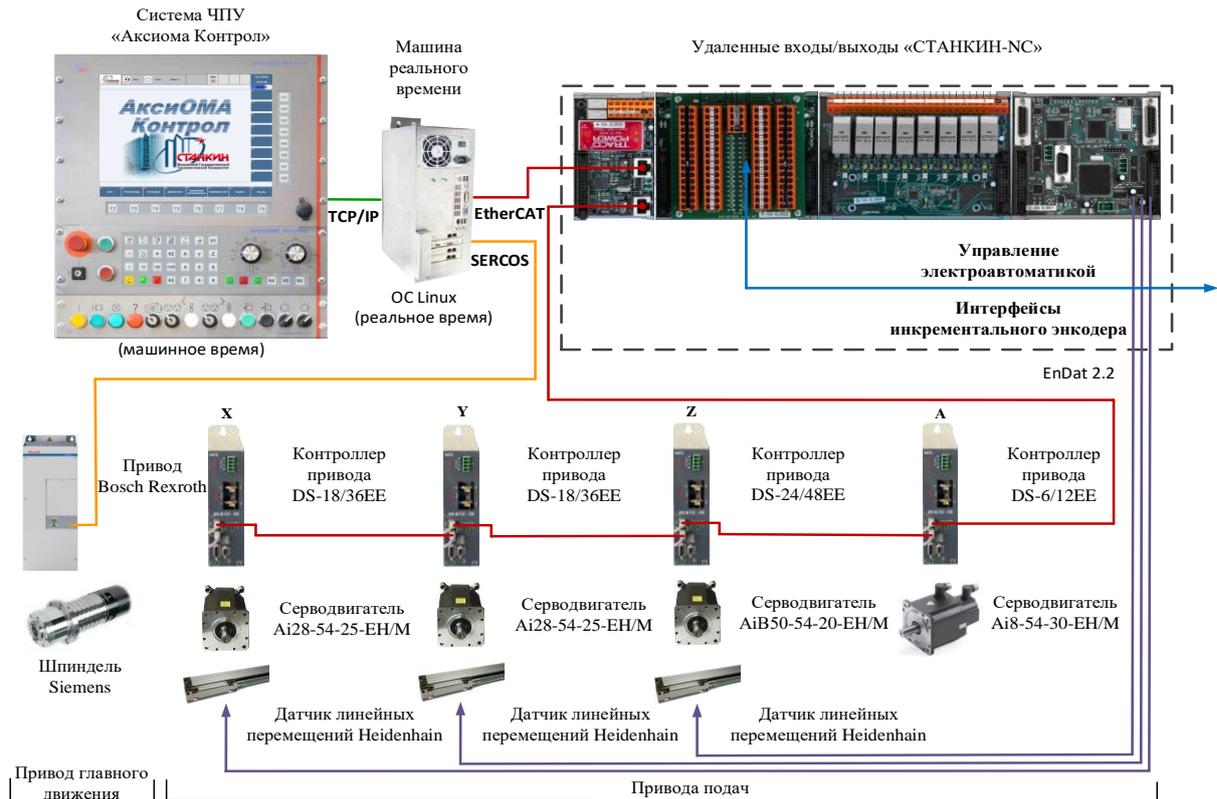


Рисунок 20 - Сетевая структура системы управления обрабатывающим центром «Quaser MV184P»

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. В работе решена актуальная научная проблема, имеющая важное значение для развития промышленности РФ - создание теоретических и методологических основ построения кроссплатформенных, мультипротокольных систем логического управления технологическим оборудованием, реализованных по модульному принципу, имеющих открытую архитектуру и поддерживающих работу с широким классом аппаратных устройств.
2. Установлены и впервые формализованы взаимосвязи между характеристиками технологического оборудования и задачами, функциями, параметрами систем логического управления технологическим оборудованием, влияющими на структуру системы и определяющими состав программно-аппаратных модулей логических контроллеров как основного инструментария автоматизации.

3. Разработаны формальные модели проектирования систем управления, объединенные в логическую схему последовательного их создания и трансформации. Модели каждого уровня описывают определенные аспекты работы системы логического управления и позволяют: определить основные функции системы, выявить зависимость между платформой и прикладной компонентой, систематизировать основные потоки данных, определить структуру системы управления, формализовать этапы проектирования программ логического управления, определить схему функционирования системы в условиях распределения вычислительных ресурсов.
4. Подход к модульной структуре системы логического управления, предложенный в работе, предполагает выделение модулей, имеющих структурное единообразие и общий механизм связей, что позволяет: организовать систему управления как в рамках единой платформы, так и на нескольких платформах, путем разделения группы модулей по единому функциональному признаку; комплектовать систему в зависимости от реализуемой задачи; использовать программные и аппаратные компоненты различных производителей.
5. Предложенная модульная структура позволяет снизить требования к аппаратному обеспечению реального времени, посредством разделения системы логического управления на две подсистемы и закрепления модулей за ними: подсистему программирования, работающая в режиме машинного времени, и исполнительное ядро, работающее в режиме жесткого реального времени. Взаимодействие между двумя подсистемами на физическом уровне реализовано на базе Ethernet, на программном уровне - на базе технологии сокетов.
6. Разработанная методология позволяет предложить комплексное решение проблемы проектирования и реализации систем логического управления. Каждая фаза процесса разработки формирует конкретное решение, набор которых охватывает весь последовательный процесс проектирования системы.
7. Сформирован набор формализованных математических методов, которые позволяют проектировать программы логического управления любой сложности в разработанной среде проектирования.
8. Проведено комплексное тестирование предложенных в диссертации систем логического управления, которое включает: нагрузочное тестирование, тестирование на отказ и проведение приемо-сдаточных испытаний. Указанные виды тестовых испытаний позволяют сделать выводы о возможности эксплуатации разработанной системы управления.
9. Реализованы системы логического управления реальными технологическими объектами с использованием разработанной методики проектирования, подтвердившие эффективность новых принципов построения систем управления.
10. Полученные результаты рекомендуется использовать при создании систем управления технологическим оборудованием для машиностроительных предприятий и в учебном процессе при подготовке инженерно-технических и научно-педагогических кадров по направлению «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами».

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Шемелин, В.К. Повышение качества архитектурных решений систем ЧПУ на основе программно реализованного контроллера типа SoftPLC/Шемелин В.К., Нежметдинов Р.А.//Автоматизация и современные технологии.-№6.-2008. -с.33-35.

2. Шемелин, В.К. Применение технологии клиент-сервер при проектировании контроллера типа SoftPLC для решения логической задачи в рамках систем ЧПУ / В.К. Шемелин, Р.А. Нежметдинов // Автоматизация и современные технологии.- №3.- 2010. - с. 31-37.
3. Мартинов, Г.М. Принцип построения распределенной системы ЧПУ с открытой модульной архитектурой / Г.М. Мартинов, Н.В. Козак, Р.А. Нежметдинов, Р.Л. Пушков // Вестник МГТУ "Станкин". -2010.-№4(12).- с.116-122.
4. Мартинов, Г.М. Специфика построения панелей управления систем ЧПУ по типу универсальных программно-аппаратных компонентов / Г.М. Мартинов, Н.В. Козак, Р.А. Нежметдинов, А.Б. Любимов // Автоматизация и современные технологии.- 2010. - №7.- с. 34-40.
5. Мартинова, Л.И. Реализация открытости управления электроавтоматикой станков в системе ЧПУ класса PCNC / Л.И. Мартинова, Н.В. Козак, Р.А. Нежметдинов, Р.Л. Пушков // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика.2011. №02. С. 11-16.
6. Мартинов, Г.М. Прикладные решения в области управления электроавтоматикой станков с ЧПУ класса PCNC / Г.М. Мартинов, Р.А. Нежметдинов, Н.В. Козак, Р.Л. Пушков // Промышленные АСУ и контроллеры. - 2011. - №4. - с. 48-53
7. Нежметдинов, Р.А. Программная реализация управления электроавтоматикой технологического оборудования с применением компонентного подхода // Главный механик, 2011 №6, с. 42-46.
8. Мартинов, Г. М. Организация распределенного управления станком гидроабразивной резки с ЧПУ / Г. М. Мартинов, Р. А. Нежметдинов, С. В. Рыбников, А.У. Кулиев // Мехатроника, автоматизация, управление.- 2011.- №11.- с. 35-39.
9. Мартинов, Г.М. Принципы построения распределенной системы ЧПУ технологическими машинами с использованием открытой модульной архитектуры /Г.М. Мартинов, Л.И. Мартинова, Н.В. Козак, Р.А. Нежметдинов, Р.Л. Пушков // Справочник. Инженерный журнал.- 2011.- №12.- с. 116-122.
10. Мартинов, Г.М. Разработка средств визуализации и отладки управляющих программ для электроавтоматики, интегрированных в систему ЧПУ / Г.М. Мартинов, Р.А. Нежметдинов, П.А. Никищечкин // Вестник МГТУ «СТАНКИН».- 2012.- №4.- с. 134-138.
11. Мартинов, Г.М. Способ построения инструментария систем мониторинга и настройки параметров мехатронного технологического оборудования на основе специализированных программных средств / Г.М. Мартинов, Р.А. Нежметдинов, С.В. Соколов // Мехатроника, автоматизация, управление.- 2012.- №7.- с.45-50.
12. Козак, Н.В. Применение программно-реализованных логических контроллеров в системах автоматизации упаковочного оборудования / Н.В. Козак, Р.А. Нежметдинов // Автоматизация в промышленности.- 2012.- №11.- с.23-28.
13. Мартинов, Г.М. Кроссплатформенный программно-реализованный логический контроллер управления электроавтоматикой станков с ЧПУ / Г.М. Мартинов, Р.А. Нежметдинов // Автоматизация и современные технологии.-2013.-№1.-с.15-23

14. Мартинов, Г.М. Принципы построения кроссплатформенного программно реализованного контроллера электроавтоматики систем ЧПУ высокотехнологичными производственными комплексами / Г.М. Мартинов, Р.А. Нежметдинов, А.С. Емельянов // Вестник МГТУ «СТАНКИН». - 2013. - №1. - с.42-51.
15. Мартинов Г.М. Новый подход к построению программно реализованного контроллера электроавтоматики технологического оборудования с ЧПУ / Г.М. Мартинов, Р.А. Нежметдинов, А.С. Емельянов // Известия Юго-Западного государственного университета. - 2013. - № 3 (48). - с. 156-166.
16. Нежметдинов, Р.А. Разработка подсистемы защиты информационных потоков для систем ЧПУ технологического оборудования / Р.А. Нежметдинов, А.С. Емельянов, Н.В. Козак // Известия Юго-Западного государственного университета. - 2013. - №5. - с. 61 – 67.
17. Нежметдинов, Р.А. Эффективность функционирования электроавтоматики станков с ЧПУ / Нежметдинов Р.А. // Главный механик. - 2013. - № 9. - с. 33-43.
18. Нежметдинов, Р.А. Управление электроавтоматикой токарных и токарно-фрезерных станков на базе Soft PLC / Р.А. Нежметдинов, А.У. Кулиев, А.Ю. Никушкин, Н.Ю. Червонова // Автоматизация в промышленности. - 2014. - №4.
19. Мартинов, Г.М. Специфика построения редактора управляющих программ электроавтоматики стандарта МЭК 61131 / Г.М. Мартинов, Р.А. Нежметдинов, П.А. Никишечкин // Вестник МГТУ Станкин. - 2014. - № 4 (31). - с. 127-132.
20. Нежметдинов, Р.А. Построение специализированной системы ЧПУ для многокоординатных токарно-фрезерных обрабатывающих центров / Р.А. Нежметдинов, Р.Л. Пушков, С.В. Евстафиева, Л.И. Мартинова // Автоматизация в промышленности. - №6. - 2014. – с.25-28.
21. Нежметдинов, Р.А. Числовое программное управление фрезерными обрабатывающими центрами с использованием высокоскоростных протоколов связи / Р.А. Нежметдинов, Р.Л. Пушков, А.Б. Любимов, Л.И. Мартинова, С.В. Евстафиева // Автоматизация в промышленности. - №5. - 2015. - с.24-26.
22. Нежметдинов, Р.А. Практические аспекты применения программно-реализованного контроллера для управления электроавтоматикой вертикально-фрезерных станков Quaser MV184 / Нежметдинов Р.А., Никишечкин П.А., Пушков Р.Л., Евстафиева С.В. // Автоматизация в промышленности. - №5. - 2016. - с.15-18.
23. Нежметдинов, Р.А. Управление автоматической сменой инструмента на многоцелевых обрабатывающих центрах с применением унифицированных программных решений / Р.А. Нежметдинов, П.А. Никишечкин, Р.Л. Пушков // Промышленные АСУ и контроллеры - №6. - 2016. - с. 19-24.
24. Нежметдинов, Р.А. Программно-реализованный логический контроллер – инновационный продукт для автоматизации технологического оборудования / Р.А. Нежметдинов // Инновации. - №8. – 2016. - с. 99-103.
25. Нежметдинов, Р.А. Подход к проведению стендовых экспериментальных исследований систем логического управления технологическим оборудованием / Р.А. Нежметдинов // Вестник МГТУ «СТАНКИН». - №1. – 2017. - с. 35-38.
26. Нежметдинов, Р.А. Подход к построению систем логического управления технологическим оборудованием для реализации концепции «Индустрия 4.0» /

Р.А. Нежметдинов, П.А. Никишечкин, И.А. Ковалев, Н.Ю. Червоннова // Автоматизация в промышленности. - №5. - 2017. - с.5-9.

27. Козак, Н.В. Интеграция данных систем логического управления в "умное" производство на основе концепции Industry 4.0 / Н.В. Козак, Р.А. Нежметдинов, Л.И. Мартинова // Автоматизация в промышленности. - 2018. - № 5. - с. 11-15.

28. Квашнин, Д.Ю. Агрегирование информации о работе технологического оборудования с применением Industrial Internet of Things / Д.Ю. Квашнин, И.А. Ковалёв, Р. А. Нежметдинов, В.В. Чекрыжов // Автоматизация в промышленности. - №5. - 2019. - с. 29 – 32.

В реферативных базах SCOPUS и Web of Science

29. Nezhmetdinov, R. A. Extending the functional capabilities of NC systems for control over mechano-laser processing / R. A. Nezhmetdinov, S. V. Sokolov, A. I. Obukhov, A. S. Grigor'ev // Automation and Remote Control. - May 2014.–Volume 75–p. 945-952.

30. Martinov, G. M. Modular design of specialized numerical control systems for inclined machining centers / G. M. Martinov, R. A. Nezhmetdinov // Russian Engineering Research. – May 2015. – Volume 35, Issue 5. – p. 389-393.

31. Martinova, L. I. The Russian multi-functional CNC system AxiOMA control: Practical aspects of application / L. I. Martinova, N. V. Kozak, R. A. Nezhmetdinov // Automation and remote control. – JAN 2015. – Vol: 76, No: 1. – p. 179-186.

32. Martinov, G.M. Approach to implementing hardware-independent automatic control systems of lathes and lathe-milling CNC machines / G.M. Martinov, R.A. Nezhmetdinov, A.U. Kuliev // Izv.Vuz. Av. Tekhnika. - 2016. - no. 2. - p. 128–131.

33. Martinov, G.M. Implementation of Control for Peripheral Machine Equipment Based on the External Soft PLC Integrated with CNC / G.M. Martinov, N.V. Kozak, R.A. Nezhmetdinov // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). - 16-19 May. - 2017. - p.1-4.

34. Martinov, G.M. Method of decomposition and synthesis of the custom CNC systems / G.M. Martinov, N.V. Kozak, R.A. Nezhmetdinov, A.S. Grigoriev, A.I. Obukhov, L.I. Martinova // Automation and remote Control. - 2017. – 78. - p. 525 - 536.

35. Nezhmetdinov, R. Approach to the Construction of Logical Control Systems for Technological Equipment for the Implementation of Industry 4.0 Concept. / R. Nezhmetdinov, P. Nikishechkin, A. Nikich // In: 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). Sochi: IEEE.

Объекты интеллектуальной собственности

36. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2011612404 Российская Федерация. Программный эмулятор задач контроллера электроавтоматики систем ЧПУ / Козак Н.В., Нежметдинов Р.А., Абдуллаев Р.А.; правообладатель ГОУ ВПО МГТУ «Станкин». - №2011610524 заяв. 01.02.2011; зарегистр. 23.03.2011 – 1с.

37. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2011610551 Российская Федерация. Компонент графической визуализации параметров технологической системы / Нежметдинов Р.А., Соколов С.В., Саламатин Е.В.; правообладатель ГОУ ВПО МГТУ «Станкин». - №2010616728 заяв. 02.11.2010; зарегистр. 11.01.2011 – 1 с.

38. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2010617381 Российская Федерация. Универсальная виртуальная панель управления технологическим оборудованием / Григорьев А.С., Нежметдинов Р.А., Кулиев А.У.; правообладатель ГОУ ВПО МГТУ «Станкин». – №2010615580 заяв. 14.09.2010; зарегистр. 10.11.2010 – 1 с.
39. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011615524 Российская Федерация. Программный инструментарий для разработки и тестирования шаблонов регулярных выражений / Мартинов Г.М., Нежметдинов Р.А., Григорьева В.С.; правообладатель Российская Федерация. – №2011613814 заяв. 24.05.2011; зарегистр. 14.07.2011 – 1 с.
40. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011615523 Российская Федерация. Компонент графической визуализации параметров скорости системы Числового Программного Управления / Мартинов Г.М., Нежметдинов Р.А., Дубровин И.А.; правообладатель Российская Федерация. – №2011613813 заяв. 24.05.2011; зарегистр. 14.07.2011 – 1 с.
41. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011615522 Российская Федерация. Программный компонент системы управления для организации работы с контроллерами управления приводами по протоколу Metabus / Мартинов Г.М., Пушков Р.Л., Нежметдинов Р.А., Сорокоумов А.Е.; правообладатель Российская Федерация. - №2011613812 заяв. 24.05.2011; зарегистр. 14.07.2011 – 1с.
42. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2011611201 Российская Федерация. Программный комплекс интерпретации языка управляющих программ для механо-лазерного технологического оборудования с ЧПУ / Мартинов Г.М., Нежметдинов Р.А., Обухов А.И.; правообладатель Российская Федерация. - №2010617700 заяв. 07.12.2010; зарегистр. 04.02.2011 – 1с.
43. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2011610554 Российская Федерация. Универсальный интерпретатор языка управляющих программ для механо-лазерных станков с ЧПУ / Мартинов Г.М., Нежметдинов Р.А., Обухов А.И.; правообладатель ГОУ ВПО МГТУ «Станкин». – №2010616732 заяв. 02.11.2010; зарегистр. 11.01.2011 – 1 с.
44. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2010614074 Российская Федерация. Универсальный редактор управляющих программ для систем числового программного управления / Мартинов Г.М., Мартинова Л.И., Нежметдинов Р.А., Григорьев А.С., Пушков Р.Л.; правообладатель ГОУ ВПО МГТУ «Станкин». – №2010612277 заяв. 29.04.2010; зарегистр. 23.06.2010– 1с.
45. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012660015 Российская Федерация. Программный компонент проектирования и редактирования управляющих программ на языке FunctionalBlocks / Мартинов Г.М., Нежметдинов Р.А., Кулиев А.У., Ковалев И.А; правообладатель Российская Федерация. - №2012617646 заяв. 13.09.2012; зарегистр. 08.11.2012 –1 с.
46. Патент на полезную модель №126855 Российская Федерация. Программно-аппаратный комплекс для управления технологическим оборудованием с ЧПУ / Мартинов Г.М., Нежметдинов Р.А., Любимов А.Б.; правообладатель ФГБОУ ВПО

МГТУ «СТАНКИН». – №2012146709 приоритет 02.11.2012; зарегистр. 10.04.2013, срок действия 02.11.2022 – 3с.

47. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013615768 Российская Федерация. Программный компонент реализации машины состояний яда системы управления электроавтоматикой / Мартинов Г.М., Нежметдинов Р.А., Григорьев А.С., Ковалев И.А.; правообладатель Российская Федерация.- №2013613431 заяв. 25.04.2013; зарегистр. 20.06.2013 – 1с.

Формат 60x84 1/16. Уч.изд.л. 2,0 . Тираж 100 экз. Заказ №

Отпечатано в типографии Самарского государственного технического университета 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, корпус, 8
e-mail: polygraf@samgtu.ru.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета Д212.217.07
ФГБОУ ВО "Самарский государственный технический университет
(протокол №2 от 23 марта 2020 г.)