

На правах рукописи



Путинцева Елена Валентиновна

**МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ТЕСТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЛОГИЧЕСКОГО
УПРАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ
ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ СТЕНДОВ**

Специальность 2.3.3 – «Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2024

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

**Научный
руководитель:**

Нежметдинов Рамиль Амирович

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры компьютерных систем управления ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», г. Москва.

**Официальные
оппоненты:**

Аристова Наталья Игоревна

доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории идентификации систем управления ФГБУН Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, г. Москва;

Колбасин Александр Маркович

кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва.

**Ведущая
организация:**

Акционерное общество «Национальный институт авиационных технологий», г. Москва.

Защита диссертации состоится «24» января 2025 года в 12:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.332.02 при ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» по адресу: 127994, г. Москва, Вадковский переулок, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», www.stankin.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 20__ года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.332.02
д.ф.-м.н., доцент



Елисеева Юлия Витальевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. На протяжении нескольких последних десятилетий области электроники и систем логического управления (далее – СЛУ) демонстрируют все больше и больше возможностей, достигаемых с помощью их инструментов. В настоящий момент в Российской Федерации запускается национальный проект технологического лидерства «Развитие средств производства и робототехники», что приведет к активному созданию нового промышленного технологического оборудования, большая часть которого предполагает наличие разнородных систем автоматизики. Соответственно, в ближайшие годы или даже десятилетия будет активно создаваться новое и модифицироваться имеющееся промышленное технологическое оборудование (далее – ТО), большая часть которого предполагает наличие разного рода систем управления и автоматизации.

Вопрос безотказной работы создаваемых систем управления является признаваемым во всем мире аспектом эксплуатации любого оборудования или устройства. В зависимости от сложности проекта этап тестирования может занимать как 15-20% времени всего жизненного цикла (далее – ЖЦ) создания СЛУ, так и 40-45% для более сложных разработок. Поэтому становится актуальным решение вопроса проверки работоспособности проектируемых программных систем.

Степень разработанности исследования. Проблемам оценки и повышения качества вновь разрабатываемых систем логического управления, круг применения и популярность использования которых растет с каждым днем, посвящены труды Р. Калбертсона, К. Брауна, Г. Кобба (Быстрое тестирование); С. Канера, Дж. Фолка, Е.К. Нгуена (Тестирование программного обеспечения. Фундаментальные концепции менеджмента бизнес-приложений); М. Фьюстера, Д. Грэхам (Software Test Automation); Г. Майерса (Искусство тестирования программ); К. Азарского (Тестирование. Легкий старт); С. Куликова «Тестирование программного обеспечения. Базовый курс».

В настоящее время существует огромное количество попыток систематизировать и классифицировать существующие способы тестирования программного обеспечения (далее – ПО) систем автоматизики. С другой стороны, нет четко сформулированного и структурированного подхода к тестированию и отладке СЛУ, включающих в себя как аппаратную, так и программную составляющие. Среди рассмотренных источников имеются некоторые, так или иначе затрагивающие интересующие нас вопросы, но в них преобладающим направлением является тестирование исключительно программного обеспечения, не касаясь аппаратной части систем, зачастую на английском языке, сугубо практического характера, изобилующие огромным количеством специфических терминов, относящихся к той или иной узкой области знаний, без научно-исследовательской составляющей и применения инструментов формализации. Поиск отечественных научных публикаций по тестированию

программного или программно-аппаратного обеспечения в промышленности показал недостаточность исследований в этой области.

Целью работы является сокращение времени тестирования систем логического управления технологическим оборудованием за счет использования разработанных моделей и алгоритмов с применением специализированных испытательных стендов.

В соответствии с поставленной целью было необходимо решить ряд **научно-технических задач**, а именно:

1. Проанализировать существующие методы тестирования систем управления с учетом области их применения, выявить особенности функционирования СЛУ ТО.
2. Разработать формализованное описание ЖЦ средств тестирования систем промышленной автоматики и сформировать структурную модель комплекса тестирования СЛУ.
3. Разработать методику, алгоритмы и сценарии стендового тестирования СЛУ.
4. Реализовать прикладные решения для тестирования СЛУ с использованием стендов.

Объект исследования – системы логического управления технологическим оборудованием.

Предмет исследования – модели, методы и алгоритмы тестирования СЛУ.

Научная новизна:

- разработано графовое представление структуры управляемых компонент станка, позволившее выявить связи, соответствующие работе СЛУ ТО;
- установлены взаимосвязи между существующими видами тестирования программно-аппаратного обеспечения и их применимостью для проверки работоспособности СЛУ ТО;
- разработано формализованное описание ЖЦ технологического (станочного) оборудования, СЛУ ТО и стендов тестирования СЛУ, позволившее выявить объекты и процессы ЖЦ ТО, установить их взаимное влияние, а также формализовать взаимосвязи между компонентами через среду их функционирования;
- на основе установленных взаимосвязей разработана структурная модель комплекса тестирования СЛУ, отличающаяся от известных тем, что ориентирована на возможность использования как классических (традиционных) ПЛК, так и программно реализованных контроллеров.

Теоретическая значимость исследования заключается в разработанной формализованной модели ЖЦ средств тестирования систем промышленной автоматики, которая может быть использована для дальнейшего развития теоретических основ моделирования жизненных циклов объектов и процессов технических систем.

Практическая значимость работы заключается в:

- разработанных алгоритмах тестирования СЛУ, ориентированных на применение языка функциональных блоков, а также предусматривающих возможность тестирования программно-математического обеспечения ядра систем логического управления;
- разработанных сценариях, применяемых для ручного и автоматизированного тестирования;
- разработанной методике тестирования систем логического управления, основанной на принципе разделения их по структуре, а также позволяющей реализовывать помодульное тестирование программного обеспечения;
- реализации на базе предложенной модели стенда тестирования СЛУ и проведении тестовых испытаний.

Методы исследования. Теоретические исследования в диссертации базируются на основных положениях теории автоматического управления, теории графов, аппарате системного анализа, теории множеств, методах синтеза, абстракции и декомпозиции, концепции объектно-ориентированного программирования.

При решении поставленных задач использовались методы структурного анализа и моделирования, теории алгоритмов, язык программирования логических контроллеров FBD, принципы разработки человеко-машинного интерфейса.

Положения, выносимые на защиту:

- графовое представление структуры управляемых компонент станка;
- формализованное описание жизненных циклов технологического (станочного) оборудования, СЛУ ТО и стендов тестирования СЛУ;
- структурная модель комплекса тестирования СЛУ;
- методика тестирования СЛУ;
- алгоритмы и сценарии тестирования СЛУ, применяемые для ручного и автоматизированного тестирования.

Достоверность полученных результатов подтверждается согласованием теоретических и экспериментально полученных данных, применением системного подхода к решению поставленных задач, корректностью методов, применяемых для теоретических и экспериментальных исследований, апробацией разработанных алгоритмов и программ в системе управления электроавтоматикой металлорежущего оборудования с ЧПУ. Сбор, обработка, анализ и интерпретация экспериментальных данных проведена с применением математических методов и методов статистического анализа и обработки информации.

Апробация работы. Теоретические и практические результаты, полученные автором, докладывались на заседаниях кафедры «Компьютерные системы управления» ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Международной научно-практической конференции «Наука сегодня. Вызовы, перспективы и возможности»-2019, VII Всероссийской научной конференции с

международным участием «Информационные технологии и системы», Международной научно-практической конференции «Наука сегодня. Вызовы, перспективы и возможности»-2020, Всероссийской молодежной научно-технической конференции «ПРОТЭК'20».

Соответствие диссертации паспорту специальности. Диссертационная работа соответствует формуле научной специальности 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами в части п. 2 – «Автоматизация контроля и испытаний»; п. 3 – «Методология, научные основы, средства и технологии построения автоматизированных систем (АСУТП) и производствами (АСУП), а также технической подготовкой производства (АСТПП) и т. д.», п. 13 – «Методы планирования, оптимизации, модификации и эксплуатации подсистем АСУТП, АСУП, АСТПП и др., включающие задачи управления качеством, финансами и персоналом» области исследования паспорта специальности.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 16 печатных работ (из них 5 в журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК, 2 в журналах, входящих в перечень Scopus), включая тезисы докладов, опубликованные в рамках международных и региональных научно-технических конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка литературы и приложений. Работа изложена на 160 страницах сквозной нумерации, включая 3 страницы списка условных сокращений и 2 страницы приложений. Содержит 32 рисунка, 19 таблиц, 146 наименований списка литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, определены цели и задачи, раскрыто основное содержание научной новизны и практической значимости выполняемой работы, сформулированы основные положения исследования.

Первая глава посвящена исследованию существующих работ по тестированию СЛУ ТО. Подробно исследованы и проанализированы основные применяемые на сегодняшний день виды тестирования с точки зрения характерной области их применения, систематизирована информация по каждому из них, составлена классификация методов тестирования.

В качестве дополнительного результата проведенного исследования была сформирована структура управляемых элементов станка с ЧПУ в виде графа (рисунок 1) с выделенными элементами СЛУ (система электроавтоматики), выявлены отличительные свойства СЛУ ТО по сравнению с другим программным обеспечением.

Проведенное исследование методов тестирования и выявленные отличительные свойства СЛУ ТО стали обоснованием для формулирования специфичных критериев, которые должны предъявляться к комплексу проверки работоспособности СЛУ в промышленности. Данными критериями являются:

сравнительно небольшая стоимость реализации; быстрота; простота алгоритма; низкая трудоемкость реализации; универсальность; масштабируемость; возможность агрегации; информативность; отсутствие необходимости привлекать специалиста высокой квалификации.

К перечисленным выше критериям применим такой термин как «полезность» для тестирования СЛУ технологическим оборудованием. В ходе анализа всех существующих методов тестирования была выявлена максимальная полезность выбранных критериев для включения того или иного метода тестирования в итоговое комплексное решение.

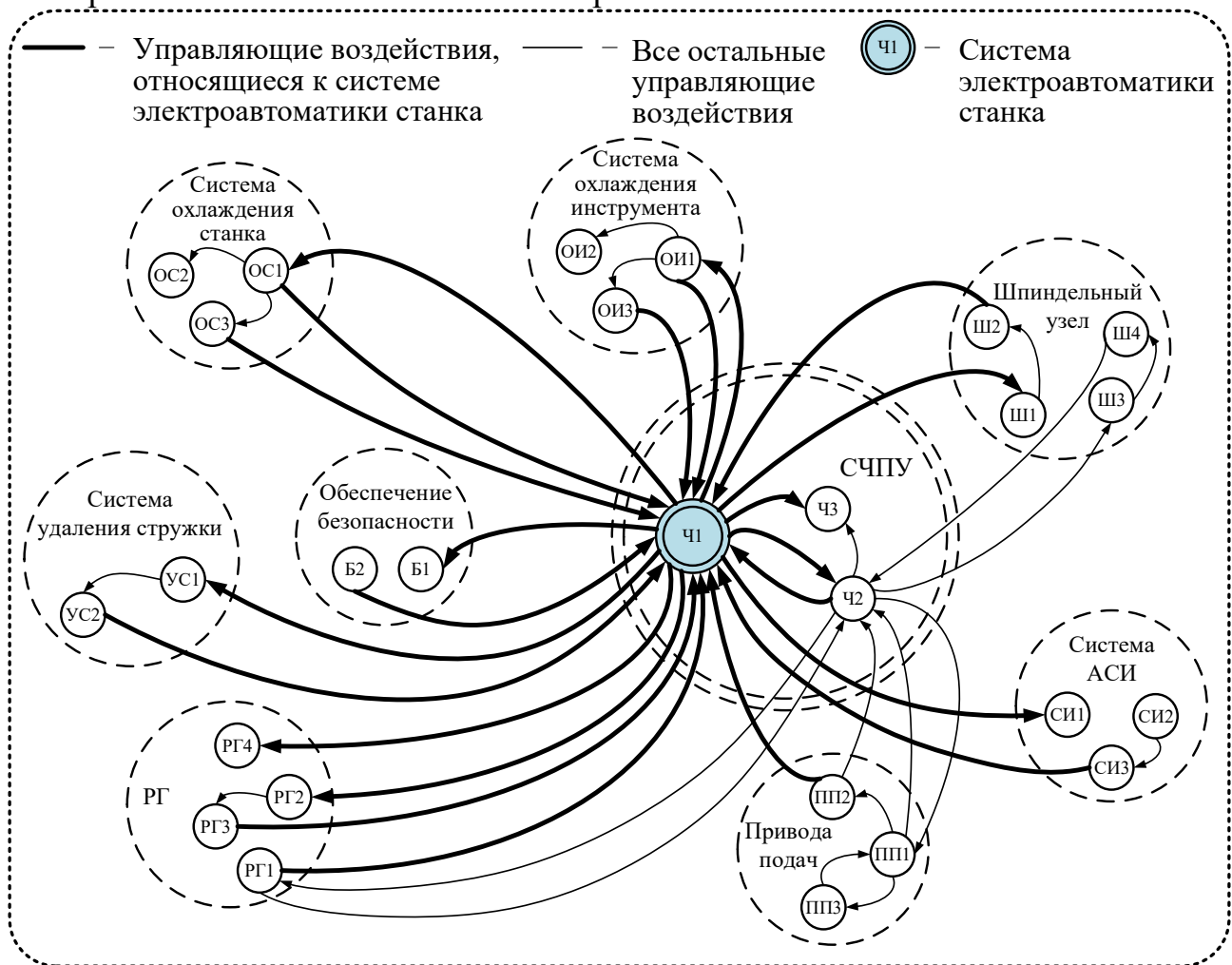


Рисунок 1 – Структура управляемых компонент станка, оснащенного системой логического управления

Анализ существующих методов тестирования показал, что наиболее продуктивной для проверки работоспособности СЛУ ТО является комбинация следующих видов: ручное функциональное с помощью тестовых сценариев методом «черного ящика», автоматизированное функциональное с помощью тестовых сценариев методом «черного ящика», нагрузочное автоматизированное тестирование, модульное.

Во второй главе рассмотрены основные процессы жизненных циклов промышленного оборудования с СЛЮ, СЛУ и стенда тестирования разработанной СЛЮ с присущими им взаимосвязями (рисунок 2).

Переходя от графического описания к формальному, воспользуемся понятиями теории систем, которые позволяют описать систему в виде двух уравнений: взаимосвязь объектов и процессов внутри системы и взаимодействие системы с внешней средой.

Для описания системы, формирующей процесс 1 ЖЦ ТО (рисунок 2), в соответствии с инструментами системного анализа, можно применить следующую формализацию:

$$S_{DG1}^{EQ} = \langle Y_{DG}^{EQ}, X_{DG}^{EQ}, q(Y_{DG}^{EQ}), q(X_{DG}^{EQ}), R_{DG1}^{EQ} \rangle, \quad (1)$$

где Y_{DG}^{EQ} – структура процесса проектирования ТО; X_{DG}^{EQ} – множество входных/выходных объектов, включающее ТЗ, техническое предложение, эскизный, технический и рабочий проекты на разработку ТО; $q(Y_{DG}^{EQ})$ – множество различных свойств, описывающих элементы структуры процесса проектирования ТО; $q(X_{DG}^{EQ})$ – множество различных свойств, характеризующих множество входных/выходных объектов; R_{DG1}^{EQ} – множество связей между компонентами системы S_{DG1}^{EQ} .

Аналогичным образом было составлено формальное описание для всех блоков рисунка 2. Тогда обобщенное формальное описание для каждого из трех жизненных циклов даст следующие три формулы.

Для описания всех подсистем ЖЦ ТО:

$$S_1^{EQ} = S_{DG1}^{EQ} \cap S_{PM1}^{EQ} \cap S_{M1}^{EQ} \cap S_{T1}^{EQ} \quad (2)$$

Для описания всех подсистем ЖЦ СЛЮ:

$$S_1^{CS} = S_{RA1}^{CS} \cap S_{DC1}^{CS} \cap (S_{DTS1}^{CS} \cup S_{DPC1}^{CS} \cup S_{HA1}^{CS}) \cap S_{T1}^{CS} \cap S_{IPC1}^{CS} \quad (3)$$

Для описания всех подсистем ЖЦ испытательного стенда:

$$S_1^{TS} = S_{DG1}^{TS} \cap S_{PM1}^{TS} \cap S_{M1}^{TS} \cap S_{T1}^{TS} \quad (4)$$

На рисунке 2 связи 1 и 3 показывают, что результаты выполнения процесса 1.2 используются в качестве входных объектов для процесса 1.2.1, а результаты выполнения процесса 1.2.2 – в качестве входных объектов для процесса 1.2.3.1.1. Связи 2 и 4 показывают взаимодействие, осуществляемое через среду функционирования. Тогда для связей 2 и 4 можем применить формулу учета окружающей среды рассматриваемой системы, общий вид которой предлагается в рамках системного анализа. Здесь связь 4 будет отождествлять собой среду S_{T2}^{CS} для функционирования разработанной СЛЮ в режиме отладки на этапе тестирования на испытательном стенде:

$$S_{T2}^{CS} = \langle S_{T1}^{CS}, Z_T^{CS}, R_{T2}^{CS} \rangle, \quad (5)$$

где Z_T^{CS} – это структура, описывающая множество элементов среды SR_T^{CS} , включающее готовый испытательный стенд, R_{T2}^{CS} – множество связей между компонентами системы S_{T2}^{CS} .

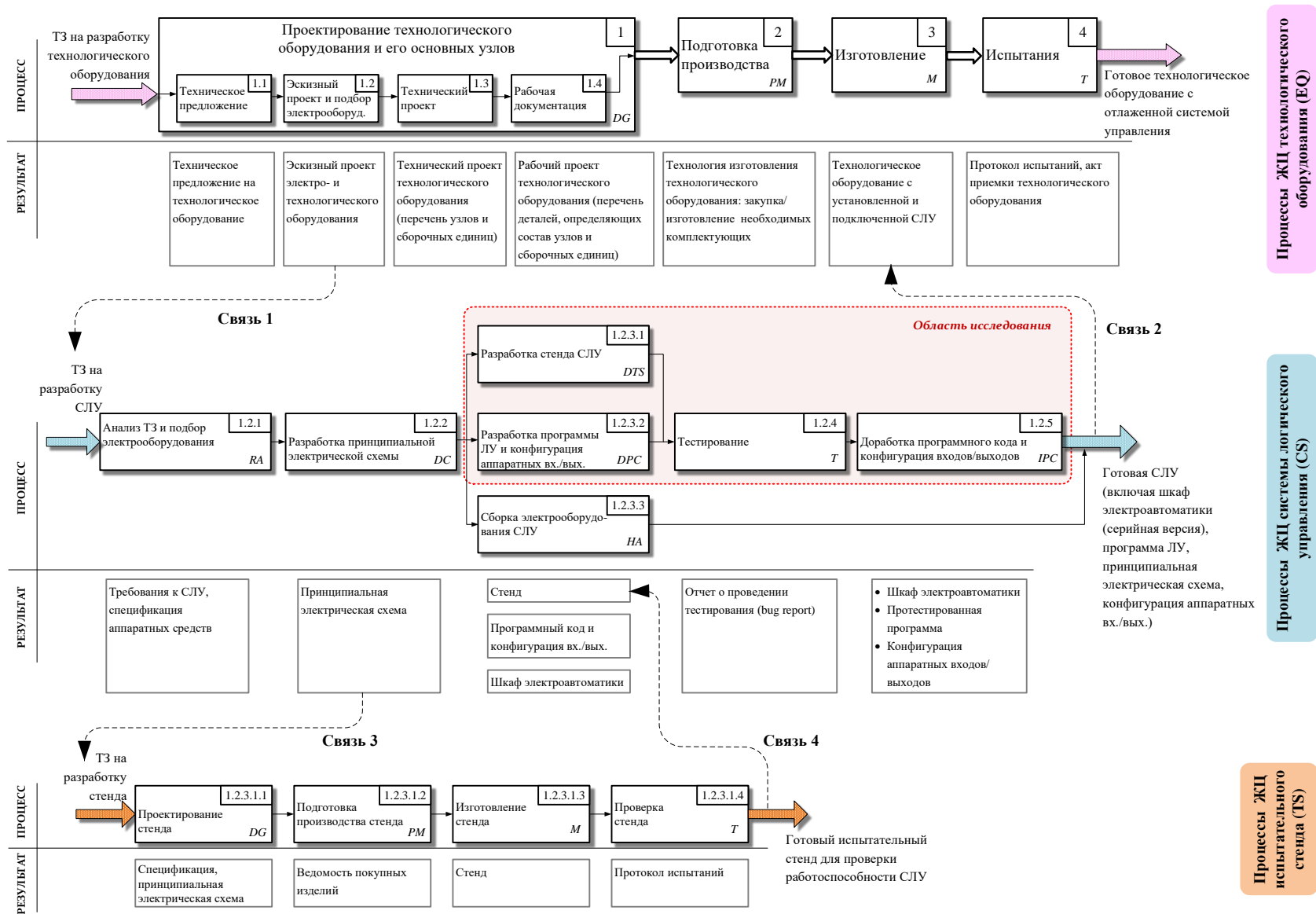


Рисунок 2 – Взаимосвязи жизненных циклов компонентов технологического оборудования и средства тестирования системы электроавтоматики

В свою очередь связь 2 будет отображать среду S_{IPC2}^{CS} для функционирования готовой отлаженной СЛУ в качестве системы электроавтоматики в изготовленном технологическом оборудовании:

$$S_{IPC2}^{CS} = \langle S_{IPC1}^{CS}, Z_{IPC}^{CS}, R_{IPC2}^{CS} \rangle, \quad (6)$$

где Z_{IPC}^{CS} – это структура, описывающая множество элементов среды SR_{IPC}^{CS} , включающее готовое ТО, R_{IPC2}^{CS} – множество связей между компонентами системы S_{IPC2}^{CS} .

Получение формальное описание процессов, объектов и их взаимосвязей представлено схематически на рисунке 3.

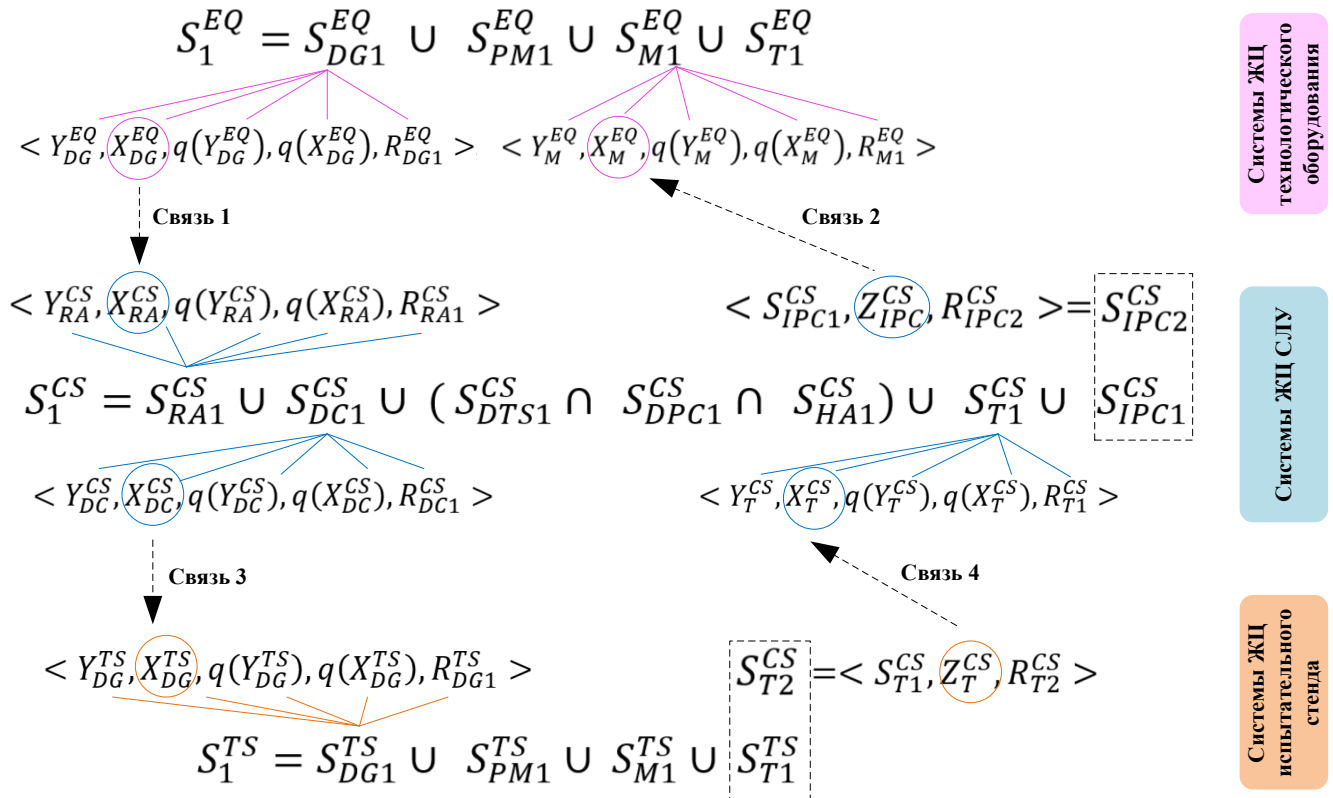
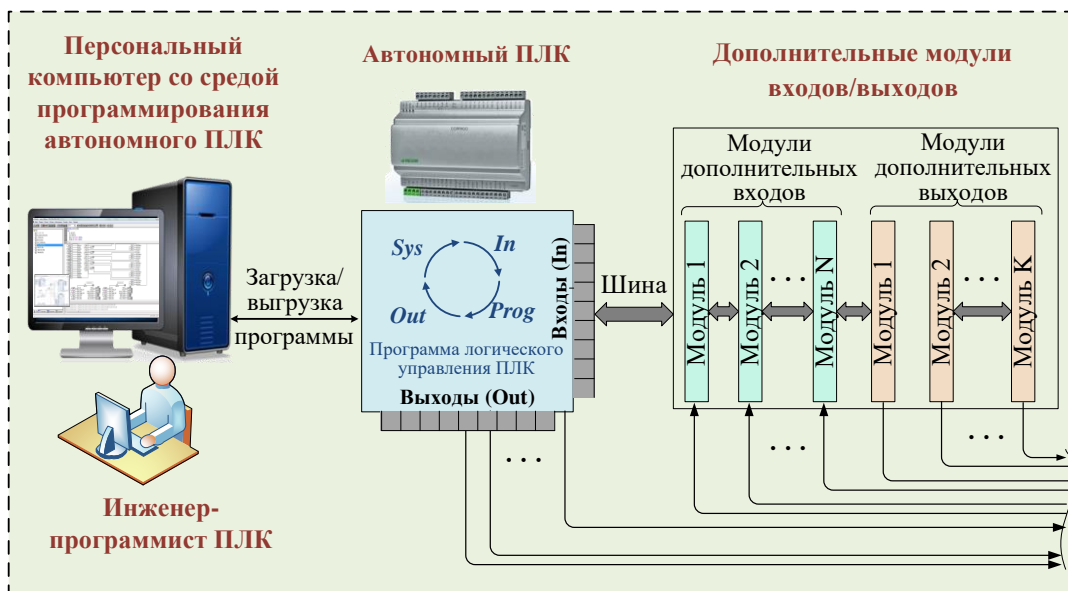


Рисунок 3 – Формальное описание и связи компонентов ЖЦ ТО и средства тестирования системы электроавтоматики

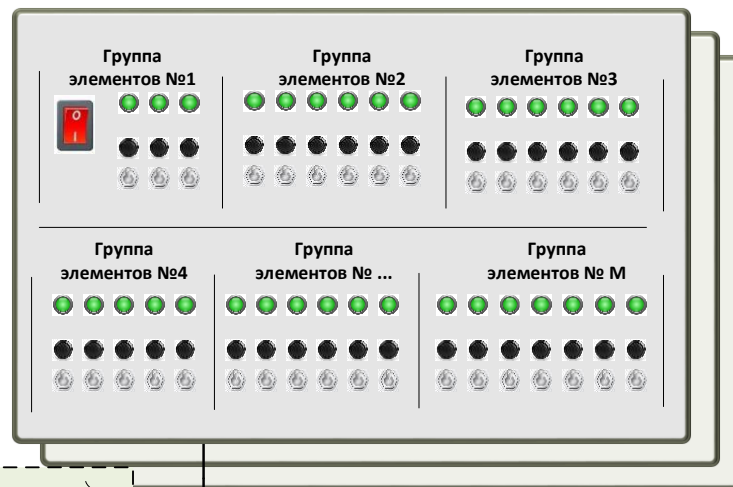
На основе установленных взаимосвязей разработана структурная модель комплекса тестирования СЛУ с использованием специализированного стенда тестирования, ориентированная на возможность использования как традиционных ПЛК, так и программно реализованных контроллеров (рисунок 4).

Описываемая структурная модель хорошо подходит для отражения особенностей архитектуры наиболее часто проектируемых СЛУ. Такая модель взаимодействия позволит отслеживать ошибки, если таковые имеются, как в исполнительном ядре системы управления (для этого будет использоваться автоматизированное тестирование и предложены тестовые сценарии), так и проводить тестирование программы, реализующей логику работы всей СЛУ в целом (для этого будет использоваться ручное тестирование и предложены соответствующие тестовые сценарии).

Вариант с использованием традиционного ПЛК



Стенд тестирования СЛУ



Вариант с использованием SoftPLC

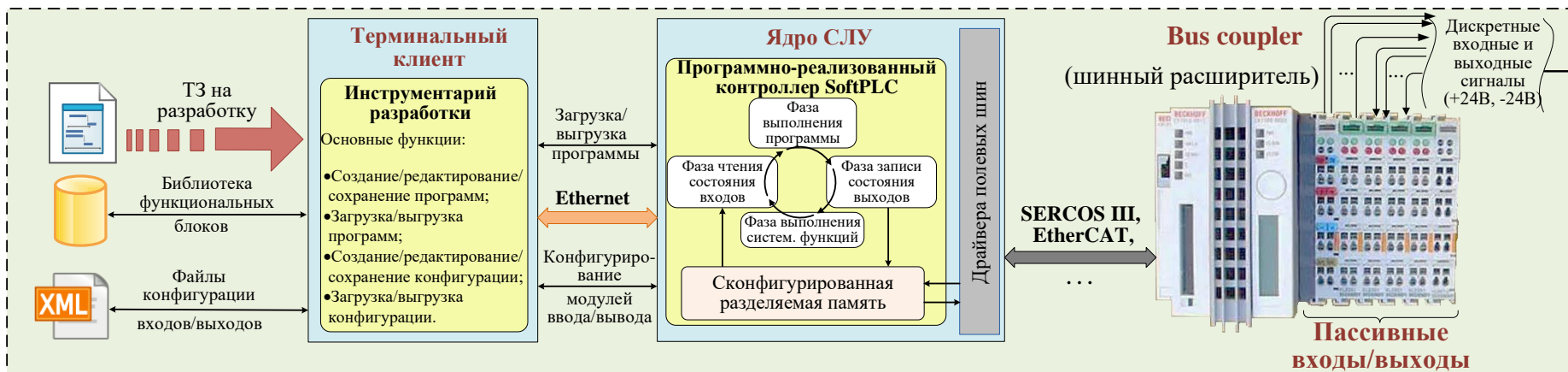


Рисунок 4 – Структурная модель комплекса тестирования систем

Включение в структурную модель специализированного стенда тестирования дает целый спектр преимуществ как на этапе разработки системы логического управления, так и на этапе ее непосредственного тестирования. Использование технологии стендового тестирования существенно сокращает цикл разработки систем логического управления, а также делает процедуру проверки удобной с точки зрения человека, осуществляющего тестирование.

Для случая подключения системы управления, работающей на базе аппаратного ПЛК, к стенду тестирования имеем подключение дискретных входов/выходов стенда непосредственно к входам/выходам ПЛК. Загруженная через подключенный компьютер со средой программирования контроллера программа логического управления начинает свою работу, функционируя в цикле. В качестве входных данных поступают сигналы от тумблерных или кнопочных переключателей стенда. Программа логического управления, используя заданный тестировщиком набор дискретных входных значений, работает в соответствии с заложенным алгоритмом и генерирует набор дискретных выходных значений, воспринимаемых стендом через линии связи как сигнал для включения или выключения соответствующих световых индикаторов. Полученные выходные значения сравниваются с требуемыми и на основании этого делается вывод об успешном/ошибочном завершении тест-кейса. По итогу обработки всех заданных наборов входных значений и фиксации выходных формируется отчет об ошибках, оформляемый в виде таблицы.

Аналогичным образом происходит взаимодействие со стендом тестирования системы управления, построенной на базе SoftPLC. Основное отличие здесь состоит в том, что дискретные входы и выходы стенда соединяется с контроллером не напрямую, а через пассивный блок входов/выходов (bus coupler). Еще одной особенностью системы управления, использующей программно реализованный контроллер, является то, что все взаимодействие человека с системой и контроллером происходит через терминального клиента. С помощью него загружается/выгружается программа логического управления в контроллер, подгружаются системные и пользовательские библиотеки программ, производится конфигурирование входов\выходов с помощью специальных файлов конфигурации. На этом отличия исчерпываются. Вся остальная схема работы абсолютно идентична тому, как это было описано для аппаратного ПЛК.

В третьей главе изложена методика тестирования систем логического управления, основанная на применении специализированных стендов. В рамках методики продемонстрированы алгоритмы и сценарии стендового тестирования.

Реализация предлагаемого подхода предполагает разработку методики, включающей в себя несколько последовательных шагов, изображенных на рисунке 5.

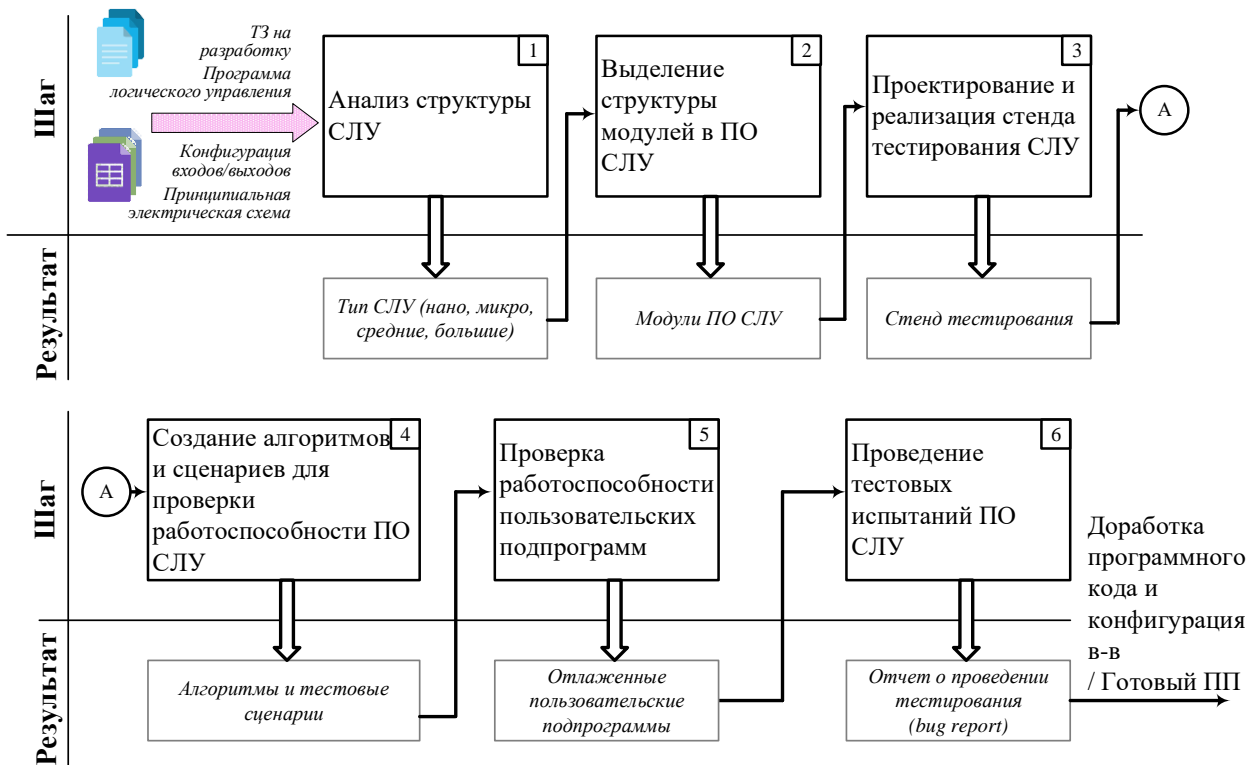


Рисунок 5 – Методика стендового тестирования систем логического управления

За исходные данные в методике берутся: техническое задание на разработку, программа логического управления тестируемой СЛУ, а также предварительная конфигурация входов/выходов контроллера (аппаратного или SoftPLC). На основе данной информации производится анализ автоматизированной системы с целью отнесения ее к одному из четырех возможных вариантов (шаг 1), в зависимости от общего числа точек ввода/вывода: нано (менее 15), микро (15-128), средние (128-512) и большие (более 512).

Результатом первого шага будет принятое решение о том, с системой какого типа предстоит работать на дальнейших этапах реализации методики тестирования.

Исследования популярности использования различных видов СЛУ показывают, что чаще всего востребованы микро и средние системы. При наличии в испытываемой системе более 100 входов/выходов выполнять проверку на стенде, полностью имитирующем реальную СЛУ, не представляется целесообразным, тестирование таких систем будет проводиться с выделением отдельных логических модулей, что и происходит на 2 шаге методики.

Далее на основе сформированных модулей системы логического управления, с учетом их группировки по основным функциональным узлам объекта управления, разрабатывается и собирается стенд тестирования (шаг 3). Структурно стенд включает в себя те же группы элементов, которые были получены на шаге 2.

Наличие готового стенда тестирования позволяет перейти к следующему шагу методики – разработке алгоритмов и сценариев для проверки работоспособности программы логического управления СЛУ (шаг 4). Приведенные алгоритмы ориентированы на применение языка функциональных блоков, являющегося одним из стандартных для программирования ПЛК.

Учитывая бинарный характер входов и выходов логических операций, а значит конечный набор возможных сочетаний входов-выходов блока, имеем возможность автоматизировать процесс тестирования и сформулировать соответствующий алгоритм (рисунок 6).

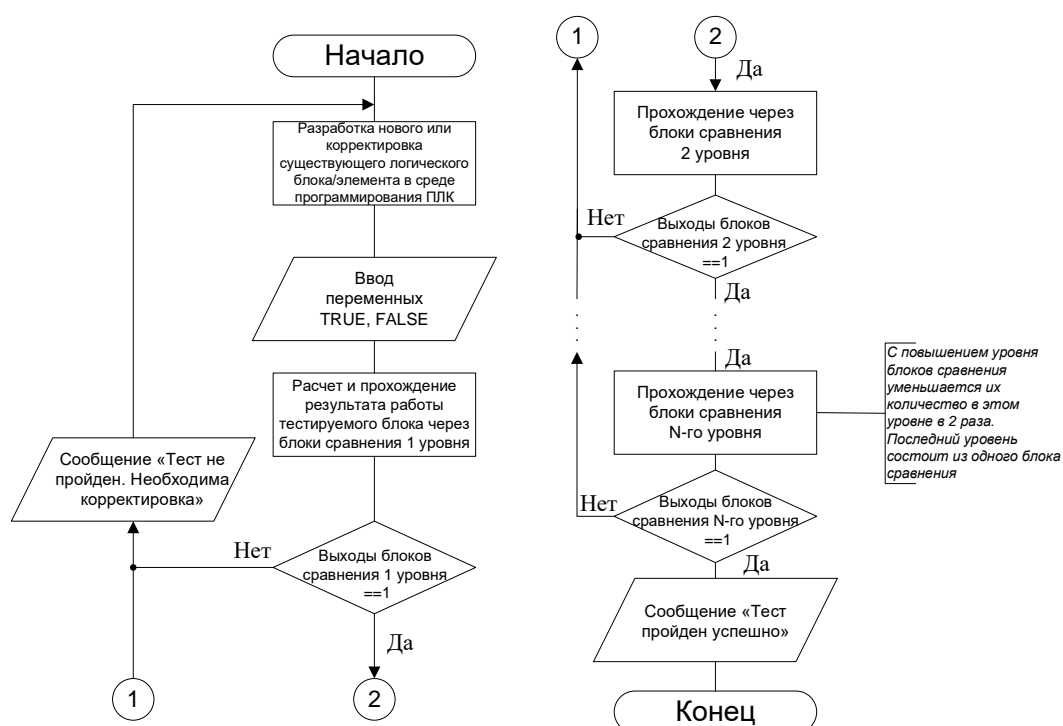


Рисунок 6 – Алгоритм работы автоматизированного тестирования функциональных блоков

Суть данного алгоритма заключается в следующем. Для инициализации процесса тестирования необходимо однократно подать на вход блока два управляющих сигнала. Эти сигналы, последовательно проходя через базовые тестируемые логические блоки, а также через блоки сравнения 1, 2 и 3 уровней, формируют на выходе сигнал в виде логического 0 или 1. Успешное тестирование фиксируется при достижении логической 1 на выходе пользовательского блока. Если же значение на выходе равно 0 – тестовый сценарий считается не пройденным, блок работает с ошибкой.

Важно отметить, что автоматизированное тестирование не требует абсолютно никаких знаний внутреннего содержания тест-блока, нет необходимости в высокой квалификации оператора или владения какими-либо специальными знаниями.

Однако обойтись исключительно автоматизированным тестированием не удастся ни в одной нетривиальной разработке, поэтому предложен алгоритм ручного тестирования (рисунок 7). При использовании ручной проверки формируется набор тестовых сценариев, которые последовательно обрабатываются оператором (таблица 1).

На входы A, B, C, T_V (первые три из них – входные значения, последнее – целевое значение, т.е. то число, с которым сравнивается полученное расчетное) блока тестирования подаются значения из заранее подготовленных тест-кейсов, которые обрабатываются в соответствии с логикой работы проверяемого блока. Затем выходное значение сравнивается с целевым, зафиксированным также в таблице тест-кейса (вход T_V). Если они совпадают, то на выходе формируется 1 – тестирование пройдено успешно. В противном случае – 0 – тест не пройден, в работе блока фиксируется наличие ошибки.

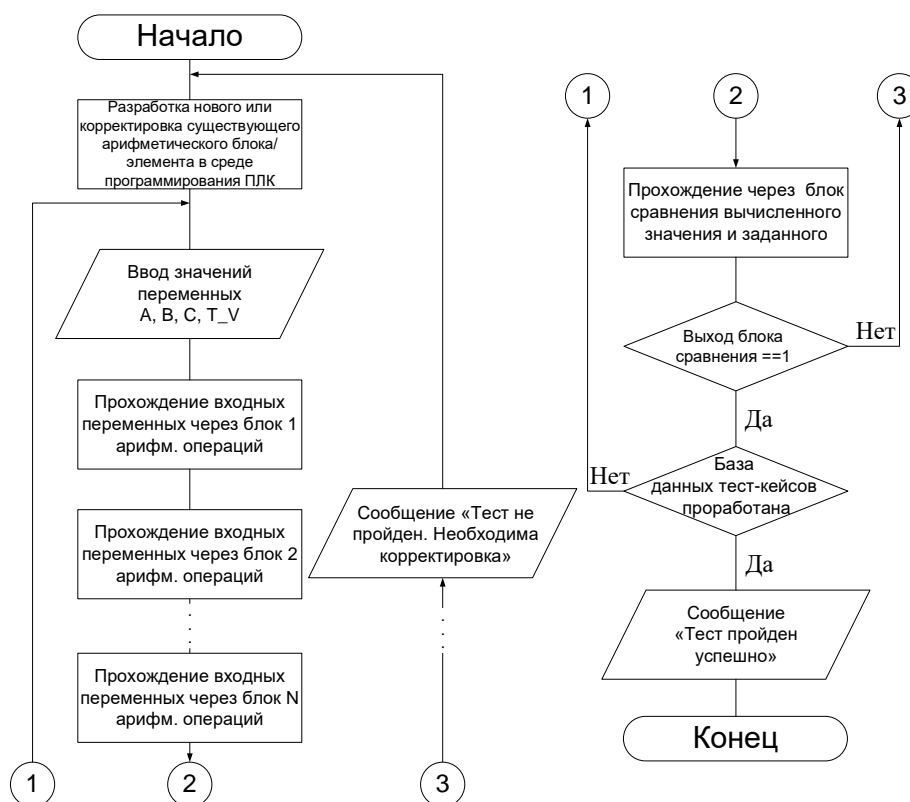


Рисунок 7 – Алгоритм работы ручного тестирования функциональных блоков

Тестирование в ручном режиме, по сравнению с автоматическим, дает больше возможностей и вариантов для более полной и всесторонней проверки. Однако здесь потребуются некоторые знания и навыки оператора, понимание основ работы в среде, а также займет больше времени.

Таблица 1 – Пример создания тест-кейсов для ручного тестирования (фрагмент)

Тест Math-блок											
A	7	-30	-11	-100	-326	-561	0	513	78	11	-54
B	-8	-18	-4	-154	198	-323	0	769	26	-68	-39
C	3	-65	-5	-657	547	911	0	-401	91	-54	-77
T_V	-8	76	4	2797	-12756	36492	0	78841	457	-169	379
$T_V = (A+2C+AB)/5$											

5 этап методики подразумевает проверку работоспособности пользовательских библиотек, являющихся частью основной тестируемой программы логического управления. В процессе разработки программных проектов формируются некоторые шаблоны, библиотеки и пользовательские подпрограммы, используемые многократно в различных системах. Прежде чем приступить к тестированию прикладного решения текущего объекта управления, необходимо убедиться, что все используемые библиотеки работают корректно и соответствуют текущей версии среды разработки управляющих программ. Успешное завершение 5 шага позволит приступить к заключительному, 6-ому – тестированию непосредственно программы логического управления в целом на специализированном разработанном стенде с помощью составленных тестовых сценариев и набора тест-кейсов. Результатом 6 шага является сформированный отчет об ошибках (bug report).

По итогам проведения бго шага на основе отчета об ошибках принимается решение о необходимых мерах по устранению обнаруженных ошибок, уязвимостей и нерегулярных ситуаций. Если же тестирование закончено, то на выходе имеем готовый программный продукт (ПП).

Для повышения эффективности испытания, его ускорения и удешевления, на определенном этапе необходимо сделать выводы о степени проверенности программного продукта и целесообразности прекращения испытаний. Эта цель может быть достигнута путем применения двух математических критериев.

Критерий интенсивности обнаружения ошибок

$$N(K) = 1 - n/K, \quad (7)$$

где n — суммарное количество обнаруженных и устраненных ошибок за число экспериментов K ; K — количество экспериментов; позволяет проанализировать процесс тестирования с точки зрения количества обнаруживаемых ошибок и оставшегося необходимого количества испытаний для достижения допустимого уровня безошибочности ПО.

Применение критерия интенсивности обнаружения ошибок наиболее применимо в случае проведения ручного тестирования, так как результатом анализа в рамках данного критерия является порядковый номер итерации тестирования, после которого достигается требуемая степень безошибочности программного продукта.

Пример результата расчетов на основе критерия интенсивности обнаружения ошибок приведен на рисунке 8.

В рассматриваемой задаче отлаживаемая программа логического управления проходила проверку в режиме ручного тестирования. В качестве требуемого значения критерия интенсивности было принято значение 0,9 (рекомендуемый интервал 0,8-0,95). В ходе вычислений было получено число испытаний 50, после которого будет достигнут требуемый уровень безошибочности ПО.

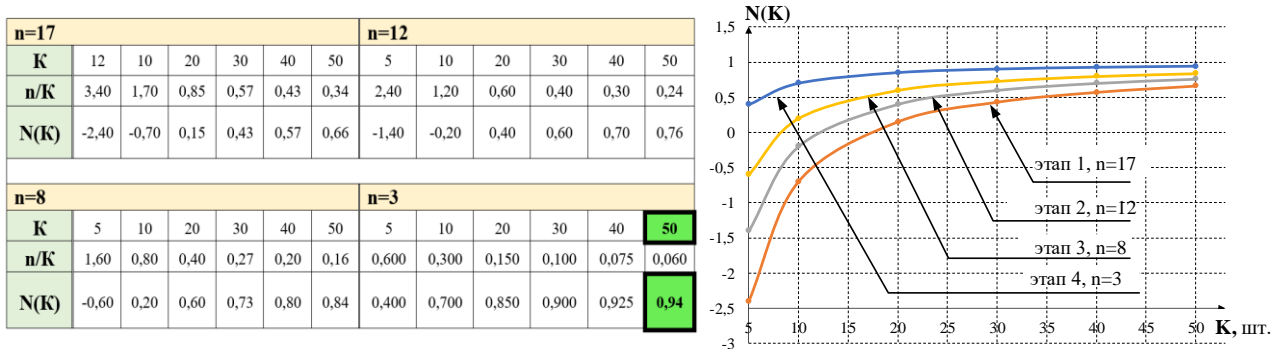


Рисунок 8 – Экспериментальные данные для построения кривых критерия интенсивности обнаружения ошибок

Критерий заданного значения средней наработки на отказ позволяет рассчитать требуемое время для дальнейшего прогона программы при планировании хода испытаний

$$\Delta\tau = \frac{M_0 T_0}{C} \ln \left(\frac{T_\tau}{T} \right), \quad (8)$$

где

M_0 - общее количество дефектов, которое может проявиться за время эксплуатации программного средства;

T_0 - средняя наработка на отказ в начале испытаний;

T_τ - требуемое (заданное) значение средней наработки на отказ, критерий завершения испытаний;

T - текущее значение средней наработки на отказ тестируемой программы;

C — коэффициент сжатия тестов.

Применение критерия заданного значения средней наработки на отказ на практике (рисунок 9) наиболее применимо для автоматизированного тестирования, так как данный критерий дает информацию о количестве времени, в течение которого необходимо продолжать прорабатывать программу через автоматически запускаемые тестовые сценарии, чтобы в результате получить систему с требуемым значением наработки на отказ.

В рассматриваемой задаче отлаживаемая программа логического управления проходила проверку в режиме автоматизированного тестирования. В качестве требуемого значения средней наработки на отказ было принято значение 1000 часов (рекомендуется). В ходе вычислений был получен

временной интервал в 72 часа для проведения тестовых прогонов, что даст отлаженный программный продукт с величиной наработки на отказ в 1000 часов.

$T_0 = 3$	- средняя наработка на отказ в начале испытаний, час;
$C = 10$	- коэффициент сжатия тестов;
$M_0 = 50$	- общее количество дефектов, которое может проявиться за время эксплуатации программного средства;
$T_\tau = 1000$	- требуемое (заданное) значение средней наработки на отказ, критерий завершения испытаний, час;
$T = 8,15$	- текущее значение функции $T(\tau)$, час; определяется исходя из текущего момента времени испытаний $\tau = 15$ час.

$$\Delta\tau = \frac{M_0 T_0}{C} \ln\left(\frac{T_\tau}{T}\right) = \frac{50 \cdot 3}{10} \ln\left(\frac{1000}{8,15}\right) = 72 \text{ часа}$$

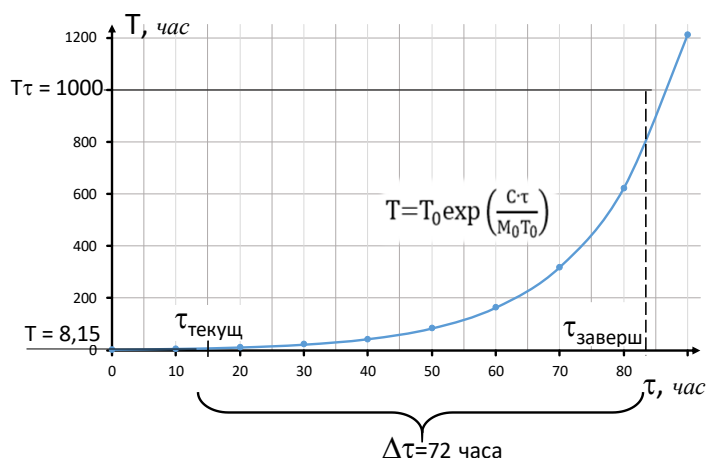


Рисунок 9 – Экспериментальные данные для построения кривой зависимости средней наработки на отказ

В четвертой главе продемонстрировано практическое применение разработанной методики и алгоритмов на примере проверки работоспособности систем электроавтоматики обрабатывающего центра с ЧПУ СА535С10Ф4, а также токарного станка с ЧПУ СА-700. Тестирование системы электроавтоматики СА535С10Ф4 рассмотрим более подробно, как примера наиболее сложной СЛУ.

Данная СЛУ относится к категории средних систем, следовательно, необходимо выполнить разделение всех элементов на условно независимые блоки (модули). При формировании модулей учитывался принцип разделения по функциональному признаку. В результате такой дифференциации были получены 10 условно независимых блоков. Преобразованная в такой вид СЛУ становится приемлемой для применения стендового тестирования с использованием модульного принципа, а также для дальнейшего применения методики тестирования.

На этапе технического проектирования стенда была разработана схема расположения элементов будущего испытательного стенда как на рисунке 10. За основу в проектируемом стенде взято 43 постоянно подключенных цифровых входа (не считая элементов питания), 17 постоянно подключенных цифровых выходов, а также 10 подключаемых опционально цифровых входов и 10 выходов.

Разработанный стенд позволил смоделировать работу узлов при разработке и тестировании программ управления электроавтоматикой станка СА535С10Ф4. Для продолжения процесса далее необходимо спроектировать тестовые сценарии.



Рисунок 10 – Макет испытательного стенда после выделения структуры модулей в СЛУ

В качестве примера, демонстрирующего процесс подготовки тестового сценария, рассмотрим тестирование модуля элементов, реализующих систему управления работой револьверной головки (далее – РГ). На рисунке 11 изображена программа логического управления, отображающая ее работу, написанная на языке FBD в среде FVEditor (блок «Change_of_tool» рисунка 10).

Процедура проверки работы системы управления РГ осуществляется подачей на входы блока «Change_of_tool» различных комбинаций нулей и единиц, имеющих физический смысл (положение/отсутствие рычага в позиции 0, 90, 180 градусов, вращение барабана по/против часовой стрелки, наличие/отсутствие свободного кармана для инструмента, включение ручного режима, вращение/останов шпинделя), и фиксация получаемых выходных реакций системы в виде включения/выключения лампочек-индикаторов. Затем получаемые выходные наборы сравниваются с требуемыми, заданными в тестовом сценарии. При полном совпадении фиксируется прохождение тест-кейса, при каком-либо отклонении – сбой.

В результате проведенного тестирования с помощью разработанных тестовых сценариев были обнаружены ошибки, связанные с нарушением логики работы программы. Данные об ошибках были занесены в таблицу, был сформирован отчет о результатах тестирования и проведена соответствующая отладка программы логического управления.

Итогом применения стендового тестирования для проверки работоспособности системы электроавтоматики станка CA535C10Ф4 стало

сокращение времени отладки на 28% по сравнению с тестированием без использования специализированного стенда.

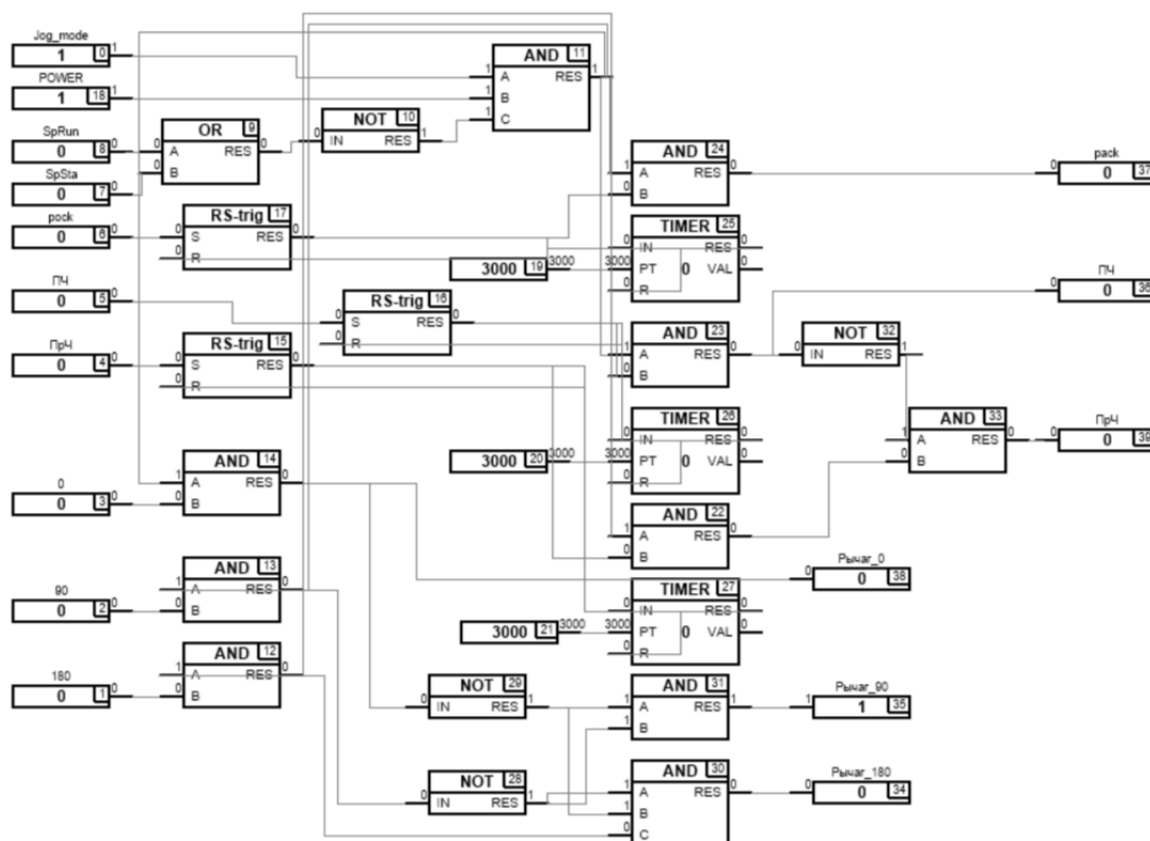


Рисунок 11 – Программа логического управления блоком револьверной головки на языке FBD

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены новые теоретически обоснованные методические решения и разработки, связанные с сокращением времени тестирования систем логического управления технологическим оборудованием за счет разработки моделей и алгоритмов с применением специализированных испытательных стендов, имеющие существенное значение для развития станкостроительной отрасли.

2. Разработано графическое описание управляемых компонент станка, оснащенного системой логического управления, в виде ориентированного графа, позволившее выявить и сформулировать отличительные свойства систем логического управления станочным оборудованием.

3. Проведенное исследование существующих способов тестирования позволило установить взаимосвязи между видом тестирования и типом проверяемой системы логического управления, что позволило сформировать итоговое комплексное решение для проверки работоспособности систем логического управления технологическим оборудованием.

4. Разработано формальное описание процессов и объектов жизненного цикла технологического оборудования и входящих в него подсистем. Выявлены и формализованы взаимосвязи подсистем и процессов с учетом среды функционирования.

5. На основе установленных взаимосвязей разработана структурная модель комплекса тестирования систем логического управления, основанная на применении стендового тестирования и позволяющая производить комплексную проверку СЛУ технологического оборудования.

6. Предложены алгоритмы и сценарии тестирования систем логического управления технологическим оборудованием, ориентированные на применение языка функциональных блоков, позволяющие осуществлять тестирование программно-математического обеспечения ядра систем логического управления.

7. Сформулирована методика тестирования систем логического управления, основанная на принципе разделения систем управления по структуре, что позволяет производить помодульное тестирование программного обеспечения и дает возможность сокращения времени разработки до 30%.

8. Предложено использование двух математических критериев окончания тестовых испытаний, используемых в комплексе мер по обнаружению ошибок в программных продуктах. Приведены примеры расчетов, демонстрирующих их эффективность и результативность.

9. Сформулированная в работе методика, алгоритмы и сценарии успешно апробированы в ООО «Станкотехника» при реализации научно-исследовательских, опытно-конструкторских работ, а также в учебном процессе при подготовке инженерных кадров по направлению 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств», что подтверждается справками об использовании.

10. Полученные результаты рекомендованы к применению на предприятиях станкостроительного профиля, разрабатывающих металлообрабатывающие станки и комплексы с ЧПУ, а также в учебном процессе при подготовке инженерных кадров по направлению 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств».

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в периодических изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Деркач Е.В., Нежметдинов Р.А. Подход к проведению тестирования программ логического управления электроавтоматикой станков // Научный рецензируемый журнал. – М.: Вестник МГТУ «СТАНКИН», 2020. – №4(55) – С. 8-13.

2. Деркач Е.В., Нежметдинов Р.А. Разработка методики и алгоритмов стендового тестирования систем логического управления // Научный рецензируемый журнал. – М.: Вестник МГТУ «СТАНКИН», 2021. – №4(59) – С. 13-18.

3. Практические аспекты анализа лог-файлов технологического оборудования на примере набора данных “Mill Data Set” / Е.В. Путинцева, Р.А. Нежметдинов, И.А. Ковалев, Ш. Котырова, // Научный рецензируемый журнал. – М.: Вестник МГТУ «СТАНКИН», 2022. – №2(61) – С. 8-14.

4. Путинцева Е.В., Нежметдинов Р.А. Практические аспекты обнаружения ошибок при тестировании программ логического управления для ПЛК // Научный рецензируемый журнал. – М.: Вестник МГТУ «СТАНКИН», 2023. – №2(66) – С. 8-14.

5. Путинцева Е.В. Формализованный подход к описанию жизненных циклов объектов технологического оборудования, оснащенного системами логического управления, и средств их тестирования // Научно-технический журнал. – М.: Промышленные АСУ и контроллеры, 2024. – №7 – С. 21-27.

Статьи, опубликованные в изданиях из перечня Scopus:

6. Approach to Testing Logical Control Systems of Technological Equipment / Nezhmetdinov, R.A., Urinov, N.F., Derkach, E.V., Abdullaeva, D.H. // (2020) 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020, статья № 9271361

7. Mathematical criteria for testing the logical control programs for technological equipment / Ramil Nezhmetdinov, Elena Putintseva, Dilnavoz Abdullaeva, and Dismurod Bafoev // E3S Web of Conferences 390, 03006 (2023) – Agritech-VIII 2023 – <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339003006>

Публикации в других изданиях:

8. Деркач Е.В., Нежметдинов Р.А. Практические аспекты проведения тестовых испытаний исполнительного ядра систем логического управления // Наука сегодня: вызовы и перспективы [Текст]: материалы международной научно-практической конференции, г. Вологда, 23 сентября 2020 г. – Вологда: ООО «Маркер», 2020, С. 38-41 // ISBN 978-5-907341-13-5 , УДК 001.1 ББК 60 Н34

9. Деркач Е.В. Функциональное тестирование исполнительного ядра программно реализованного контроллера на этапе разработки программной составляющей. // Труды Седьмой Всероссийской научной конференции с международным участием «Информационные технологии и системы». Под ред. Ю.С.Попкова, А.В.Мельникова, Научное электронное издание. Ханты-Мансийск, 2019, С. 88-93 // ISBN 978-5-6042173-7-5

10. Деркач Е.В. Проверка работоспособности системы логического управления на примере функционального тестирования исполнительного ядра программно реализованного контроллера. // Материалы международной научно-практической конференции «Наука сегодня. Вызовы, перспективы и возможности», часть 1. Научный центр «Диспут». Вологда, 2019 – С. 37-43 // eLIBRARY ID: 41669348 // ISBN 978-5-907083-76-9 (Часть 1)

11. Деркач Е.В., Нежметдинов Р.А. Практические аспекты тестирования программно реализованных контроллеров, применяемых при автоматизации экологических и энергетических систем // Производство. Технология. Экология – ПРОТЭК'20: сборник трудов Всероссийской молодёжной научно-технической конференции с международным участием (г. Москва, (29 сентября – 1 октября 2020 г.) / под ред. проф. В. А. Аксёнова, доц. Е. В. Бутримовой, проф. Л. Э. Шварцбурга. – Москва : ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», 2020, С. 186-191 // ISBN 978-5-7028-0643-3

12. Деркач Е.В., Нежметдинов Р.А. Методика стендового тестирования систем логического управления // Сборник научных статей по итогам IX международной научной конференции «Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности». – Казань, 29-30 сентября 2021 г. – НПП Медпромдеталь, ООО Газпром Трансгаз – С. 161-163 // ISBN 978-5-6046923-9-4

13. Деркач Е.В., Нежметдинов Р.А. Практические аспекты проведения тестирования систем логического управления с использованием стендов // Материалы XIV всероссийской конференции с международным участием «Машиностроение: традиции и инновации (МТИ – 2021)». Сборник докладов. – М.: ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», 2021. – С. 135-143 // eLIBRARY ID: 47379716 // УДК: 002:621

14. Путинцева Е.В., Нежметдинов Р.А. Тестовые испытания систем логического управления технологическим оборудованием // Современная Российская наука: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей IV Всероссийской научно-практической конференции. Пенза: – МЦНС «Наука и Просвещение». – 2022. – С. 46-49. // ISBN 978-5-00173-329-4

15. Путинцева Е.В., Нежметдинов Р.А. Методика разработки систем логического управления технологическим оборудованием // Материалы VI международной научной интернет-конференция «Проблемы и перспективы развития научно-технологического пространства». Сборник докладов. - Вологда 2022. – С.573-579.

16. Путинцева Е.В., Нежметдинов Р.А. Подходы обнаружения ошибок в программном обеспечении систем логического управления технологическим оборудованием // Материалы XV всероссийской конференции с международным участием «Машиностроение: традиции и инновации (МТИ – 2022)». Сборник докладов. – М.: ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», 2022. – С. 135-143 // eLIBRARY ID: 47379716 // УДК: 002:621