На правах рукописи

Ковалев Илья Александрович

МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ СИНТЕЗА КРОССПЛАТФОРМЕННОГО КОНТРОЛЛЕРА АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2017 г.

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

Научный руководитель: **Мартинов Георги Мартинов**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»,
заведующий кафедрой компьютерных систем управления.

Официальные оппоненты: **Сидоренко Валентина Геннадьевна**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», профессор кафедры «Управление и защита информации»;

Балабанов Андрей Валерьевич
кандидат технических наук,
ФГБУН Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, старший научный сотрудник.

Ведущая организация: ОАО «Национальный институт авиационных технологий», г. Москва.

Защита диссертации состоится «____» _____2017 года в ___:___ часов на заседании диссертационного совета Д 212.142.03 при ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» по адресу: 127055, г. Москва, Вадковский переулок, д. 1.

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

Автореферат разослан «____» _____2017 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.142.03,
к.т.н. Тюрбеева Татьяна Борисовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Сокращение времени разработки специализированных средств автоматизации технологических процессов обусловлено необходимостью скорейшего выпуска новой продукции на рынок.

Большинство современных производителей АСУ ТП (Schneider Electric, Rockwell Automation, Fagor Automation) используют набор решений, которые покрывают определенные секторы на рынке автоматизации. Крупные европейские производители (Siemens, Robert Bosch) ориентируются на создание собственных платформ для систем управления, где применяется аппаратное обеспечение с различной вычислительной мощностью и конфигурируемое прикладное программное обеспечение, ориентированное на разные ценовые диапазоны. Другие производители, такие как ICP DAS, «Балт-Систем», зачастую подбирают максимальную комплектацию других производителей и добавляют свое прикладное программное обеспечение (ПО). Перечисленные подходы приводят к избыточности решений, что выливается в дополнительные финансовые затраты.

В настоящее время на российских промышленных предприятиях наблюдаются тенденции перехода к использованию систем управления, построенных на основе отечественной программной и аппаратной базы. Российские производители (АО «Байкал Электроникс», АО «МЦСТ») предоставляют возможность разработчикам систем управления переносить свой программный продукт на отечественные платформы разных вычислительных мощностей и конфигураций (при этом стоимость может существенно варьироваться).

Проблема заключается в том, что на сегодняшний день отсутствует системный подход, позволяющий подобрать минимально достаточную конфигурацию программно-аппаратной платформы и прикладного ПО в зависимости от технического задания (ТЗ) на объект управления с учетом вычислительных возможностей платформы исполнения.

В результате исследования была выявлена необходимость разработки способа синтеза кроссплатформенного контроллера автоматизации в зависимости от вычислительных возможностей программно-аппаратной платформы , предоставляя конечному пользователю, с одной стороны, выбор из всего многообразия технических решений одного, полностью удовлетворяющего требованиям поставленной задачи, с другой – варианты исключения внештатных ситуаций, связанных с невозможностью программно-аппаратной платформы выполнять поставленные задачи.

Степень разработанности исследования. Проблемам построения систем управления в области промышленного сектора посвящены труды В.Л. Сосонкина, Г.М. Мартинова, М.М. Аршанского, В. Болтона (W.Bolton), Г. Олссона (G. Olsson), Й. Брюля (J. Brühl), М. Намие (M. Namie), В.Г. Митрофанова и др. Работы перечисленных авторов содержат теоретические основы разработки различных видов систем управления

технологическими процессами. В трудах вышеперечисленных ученых проведен обширный анализ имеющихся на рынке решений, четко прописаны методы построения, описаны принципы работы распределенных систем управления, имеющих открытую модульную архитектуру и базирующихся на кроссплатформенных решениях. Описаны тенденции развития в данной области. Рассмотрены основные принципы построения систем управления технологических процессов и производств, их программирования, настройки и конфигурации. Показано, что для определенного класса сложных задач применяются системы с расширенными аппаратными возможностями для поддержания дополнительных программных модулей.

Однако зависимости структуры систем управления и особенности их функционирования от возможностей вычислительных платформ исследовались не в полном объеме: не рассматривался систематизированный подход, позволяющий сопоставить сложность задачи с необходимостью применения того или иного решения и максимальным количеством программных модулей, которые могут быть использованы для конкретной технологической задачи.

Цель работы: сокращение времени разработки специализированных средств автоматизации технологических процессов и производств на основе синтеза кроссплатформенного контроллера автоматизации в зависимости от конкретного технического задания на объект управления.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели в работе необходимо решить следующие научные задачи:

1. разработать структурную модель компонентов кроссплатформенного контроллера автоматизации для работы в виде автономного устройства (автономное решение) или в составе системы ЧПУ (встраиваемое решение);
2. разработать обобщенную архитектурную модель автономного решения и встраиваемого решения;
3. разработать способ синтеза кроссплатформенного контроллера автоматизации технологических процессов;
4. реализовать на базе предложенных моделей и комбинированного алгоритма синтеза кроссплатформенного контроллера автоматизации прикладные решения для управления электроавтоматикой гаммы резьбошлифовальных станков в составе системы ЧПУ и при управлении гидроцилиндром в качестве автономного решения.

Научная новизна. В диссертационной работе получены следующие новые научные результаты:

1. установлены взаимосвязи между технологической задачей производственного оборудования и нагрузкой на вычислительное ядро системы управления, позволяющие определить необходимый состав и количество модулей для синтеза ядра кроссплатформенного контроллера автоматизации;
2. на основе установленных взаимосвязей построена структурная модель кроссплатформенного контроллера автоматизации для автономного решения и встраиваемого решения в систему управления, отличающаяся

выделением набора обязательных и выбираемых модулей, привязанных к программно-аппаратной платформе исполнения;

3. разработан и реализован комбинированный алгоритм нахождения граничных условий по количеству модулей для синтеза кроссплатформенного контроллера автоматизации и количеству компонентов программы управления, учитывающий техническое задание на объект управления, а также программно-аппаратную платформу исполнения;

4. предложен способ синтеза кроссплатформенного контроллера автоматизации технологических процессов на основе матрицы выбора модулей;

5. разработан инструментарий определения вычислительных возможностей программно-аппаратной платформы и проверки работоспособности синтезируемого контроллера автоматизации.

Теоретическая значимость заключается в разработанных моделях, алгоритмах и предложенном способе синтеза кроссплатформенного контроллера автоматизации технологических процессов на основе набора обязательных и выбираемых модулей, компонентов программы управления в зависимости от технического задания на объект управления и вычислительных возможностей программно-аппаратной платформы исполнения.

Практическая значимость работы заключается в:

1. Созданной методике определения набора модулей для синтеза кроссплатформенного контроллера автоматизации технологических процессов на основе технического задания на объект управления.

2. Разработке базового набора обязательных и выбираемых модулей и программных компонентов, обеспечивающих синтез кроссплатформенного контроллера автоматизации.

3. Наборе специализированных оценочных тестов для определения вычислительных возможностей программно-аппаратной платформы исполнения.

4. Разработанном программном инструментарии определения вычислительных возможностей программно-аппаратной платформы и проверки работоспособности синтезируемого контроллера автоматизации.

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

Положения, выносимые на защиту:

1. Структурная модель кроссплатформенного контроллера автоматизации для работы в виде автономного и встраиваемого решений, отличающаяся выделением набора обязательных и выбираемых модулей.

2. Обобщенная архитектурная модель автономного решения и встраиваемого решения.

3. Способ синтеза кроссплатформенного контроллера автоматизации на основе матрицы выбора модулей.

4. Комбинированный алгоритм нахождения граничных условий по количеству модулей для синтеза кроссплатформенного контроллера автоматизации и количеству компонентов программы управления, учитывающий техническое задание на объект управления, а также программно-аппаратную платформу исполнения.

Достоверность полученных результатов подтверждается согласованием теоретических и экспериментально полученных данных, апробацией разработанных моделей и алгоритмов в рамках разработки автономного решения и в варианте встраивания в систему ЧПУ.

Апробация работы. Теоретические и практические результаты, полученные автором, докладывались на заседаниях кафедры компьютерных систем управления ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», IV Всероссийской мультиконференции по проблемам управления (МКПУ – 2011),VII Международной научно-образовательной конференции «Машиностроение – традиции и инновации» (МТИ – 2014), XI Всероссийской научно-практической конференции «Современные информационные технологии в науке, образовании и практике» (СИТ – 2014), XIV и XV Международных конференциях «Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта» (CAD/CAM/PDM – 2014, 2015). Разработанный инструментарий в составе системы ЧПУ используется в учебном процессе на кафедре «Компьютерные системы управления» ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» по дисциплинам «Проектирование автоматизированных систем» и «Проблемы управления технологическими процессами в машиностроении».

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания № 2.1237.2017/4.6, а также в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы по теме «Создание открытой модульной платформы взаимодействия средств промышленной электроавтоматики на основе синтеза компонентных решений» (ГК № 16.740.11.0267), гранта Президента РФ по теме «Создание кроссплатформенного программно-реализованного логического контроллера для управления технологическим оборудованием» (№ МК-323.2011.9), гранта на выполнение НИР по программе «УМНИК» ФГБУ «Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» по теме «Создание программно реализованного контроллера автоматизации технологических процессов» (№ 7165ГУ/2015), НИОКР по теме «Создание гаммы резьбошлифовальных станков особо высокой точности», договор ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» № 62М от 11.10.2011 совместно со станкостроительным предприятием ЗАО «МСЗ-Салют» (подтверждено справкой об использовании результатов диссертационного исследования).

На основе результатов работы создано 8 объектов интеллектуальной собственности в виде свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ. Практические и теоретические разработки по данной теме отмечены Премией Правительства Москвы молодым ученым за 2015 г. в номинации

«Передовые промышленные технологии», серебряной медалью и дипломом XVIII Московского международного Салона изобретений и инновационных технологий «Архимед – 2015», дипломом Победителя Молодёжного конкурса на лучшую предпринимательскую инициативу «Московский молодёжный старт – 2014» (Весенний финал) по программе «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» («УМНИК») Фонда содействия малых форм предприятий в научно-технической сфере, золотой медалью 1-го Российско - Британского Форума изобретений и инновационных технологий (2013 г.), дипломами XIV и XII Международной Специализированной выставки Передовые Технологии Автоматизации «ПТА – 2014, 2012», диплом за II место 4-ой Всероссийской мультиконференции по проблемам управления (МКПУ – 2011) локальной конференции «Мехатроника и эргатические системы».

Соответствие диссертации паспорту специальности. Диссертационная работа соответствует формуле научной специальности 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические системы)» в части п.п. 8, 10, 15 в области исследования паспорта специальности.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 25 печатных работ (из них 6 в журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК, 1 в журнале, индексируемом Web of Science и 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 литературы из 96 наименований. Работа изложена на 157 страницах машинописного текста, содержит 52 рисунка, 14 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы по сокращению времени разработки специализированных средств автоматизации технологических процессов, сформулированы цели и задачи исследования, раскрыто основное содержание научной новизны и практической значимости выполняемой работы.

В первой главе рассмотрены теоретические основы создания многофункциональных систем управления технологическими процессами, а также затронуты вопросы построения различных вариантов архитектур систем числового программного управления (ЧПУ) и программируемых контроллеров автоматизации (ПАК или PAC - Programmable Automation Controller).

Систематизирована информация о механизмах взаимодействия основных компонентов систем управления. Выявлен ряд специфичных требований, которые должны предъявляться к разрабатываемому механизму взаимодействия компонентов кроссплатформенного контроллера

автоматизации при варианте встраиваемого решения в стороннюю систему управления и при варианте автономного решения.

В процессе исследования были проанализированы платформы построения систем ЧПУ: Fanuc30i, УЧПУ NC-301, Fagor 8055, «АксиОМА Контрол», а также PAC систем: WinAc, IndraControlXM, WinPAC ICP (таблица 1).

Таблица 1 – Фрагмент таблицы анализа платформ построения систем управления

Характе-ристики	**Системы ЧПУ**			**PAC системы**	
	Fanuc 30i	*Fagor 8055*	*«АксиОМА Контрол»*	*WinAc*	*WinPAC ICP*
Открытость системы управления, возможность масштабирования					
Открытость системы	Закрытая	Открытая	Открытая	Закрытая	Закрытая
Масшта-бирование	Нет	Для ПО	ПО и аппарат-ная часть	Нет	Нет
Особенности технических характеристик					
Управление движением	Да	Да	Да	Доп.пакет Easy MC	Нет
Входы/ выходы	SoftPLC	SoftPLC	SoftPLC	ПЛК S7	Собственные входы/выходы
Протоколы связи	FSSB Genius	CANOpen Sercos II	SercosIII, CAN, EtherCAT	ProfiBus DP ProfiBus IO	CANOpen, RS485/422
ОС ядра	Windows Embedded	Linux	Win RTX LinuxRT	Win RTX	Win CE
Особенности работы системы управления					
Синтез ядра в зависимости ТЗ	Широкая линейка	Нет	Нет	Нет	Нет
Портируе-мость		На уровне ОС	Да	Нет	Нет
Стоимость,$	~15000	~8000	~4000	~700	~1000

Архитектура современных систем управления (системы числового программного управления и программируемые контроллеры автоматизации) предполагает использование определенной программно-аппаратной платформы, при этом некоторые производители заверяют о возможности портирования ядра системы управления на другие платформы. При таком подходе вычислительные возможности выбираемой платформы четко не регламентированы, в связи с чем они могут быть как сильно завышены, так и недостаточны для обеспечения требований, предъявляемых техническим заданием. Следует учитывать, что при конфигурировании системы изначально могут быть заданы параметры, заранее не удовлетворяющие возможностям программно-аппаратной платформы исполнения (такт выполнения, допустимый объем оперативно запоминающего устройства (ОЗУ), загрузка центрального процессора (ЦП) и т.д.).

При анализе архитектурных решений в области современных систем управления технологическими процессами было установлено, что существуют

области, где применение мощных дорогостоящих систем управления типа систем ЧПУ или PAC систем является избыточным, и связано с дополнительными финансовыми затратами предприятия.

В настоящее время отсутствует системный подход к созданию контроллеров автоматизации технологических процессов в зависимости от технического задания на объект управления и вычислительных возможностей программно-аппаратной платформы исполнения. Набор используемых модулей закладывается или изначально в ядро системы управления (и неизменяем впоследствии – ICP DAS, УЧПУ NC-301) или выбирается системным инженером без контроля вычислительных возможностей платформы исполнения (WinAc, IndraMotion XM).

Выявлено, что, проверка работоспособности системы управления, выполняется, как правило, на этапе функционирования, а не на этапе конфигурирования. При таком подходе неправильный выбор параметров аппаратной платформы (вычислительная мощность, объем ОЗУ), осуществленный без учета конкретного набора используемых программных модулей вместе с набором компонентов программы управления приводит к дополнительным итерациям и возврату проекта на стадию разработки.

Во второй главе установлены взаимосвязи между параметрами технического задания на объект управления, необходимым составом модулей для синтеза ядра кроссплатформенного контроллера автоматизации и вычислительной нагрузкой на ядро системы управления, которая определяет максимально допустимое количество модулей при синтезе ядра кроссплатформенного контроллера автоматизации технологических процессов, а также предельно допустимое количество компонентов программы управления.

Для обеспечения унификации и работы разрабатываемого решения как единого автономного варианта, так и варианта встраивания в стороннюю систему управления, была разработана структурная модель компонентов кроссплатформенного контроллера автоматизации, что позволило выделить группы обязательных и выбираемых модулей (рисунок 1).

Обязательные модули должны присутствовать всегда, так как они обеспечивают связь с терминальными клиентами, выстраивание взаимосвязей между остальными модулями и проведение самотестирования для определения работоспособности синтезированного решения. Выбираемые модули зависят от конкретной необходимой функциональности и являются конфигурируемыми (например, при необходимости работы с электроавтоматикой выбираются модули логической задачи управления дискретных или аналоговых входов/выходов). Набор модулей является расширяемым, что позволяет добавлять новый функционал в систему управления по мере необходимости.

Терминальные клиенты отправляют в ядро контроллера значения параметров настройки системы, программы управления, получают различные диагностические данные и реализуют интерфейс взаимодействия с оператором.

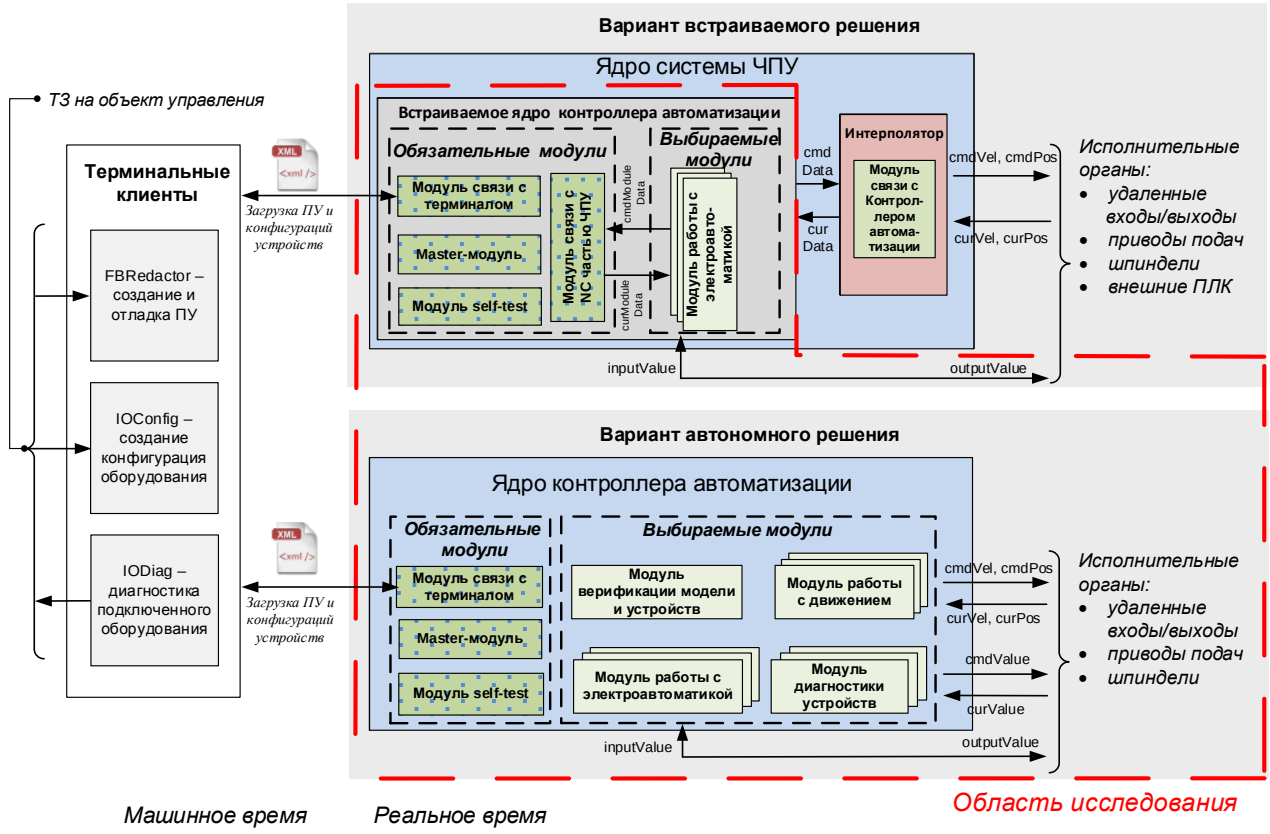


Рисунок 1 – Структурная модель кроссплатформенного контроллера автоматизации (встраиваемое/автономное решение)

В работе не рассматривается их реализация, но интерфейсы взаимодействия с ядром синтезируемого решения в качестве обязательного модуля представлены и описаны.

В зависимости от технологических задач требуются разные виды контроллеров: как автономные, так и встраиваемые в систему ЧПУ решения.

Вариант автономного решения востребован при выполнении несложных технологических операций, таких как: упаковка продукции, сбор диагностической информации, вспомогательное управление гидроцилиндрами и гидромоторами, позиционное управление несвязанными осями и др.

Вариант встраиваемого в ядро системы ЧПУ решения с одной стороны расширяет функциональные возможности последней, с другой – делегирует синтезируемому контроллеру часть исполняемых функций, что позволяет высвободить вычислительные ресурсы системы ЧПУ для более трудоемких задач, таких как формообразование. Реализация этих двух вариантов управления потребовала разработки обобщенной архитектурной модели кроссплатформенного контроллера по типу виртуальной машины (рисунок 2) с выделением основных уровней.

Уровень исполнительных устройств (самый нижний уровень) формируют модули ввода/вывода, полевые шины и подключаемые к ним датчики, приводы и т.д., которые подключаются к контроллеру.

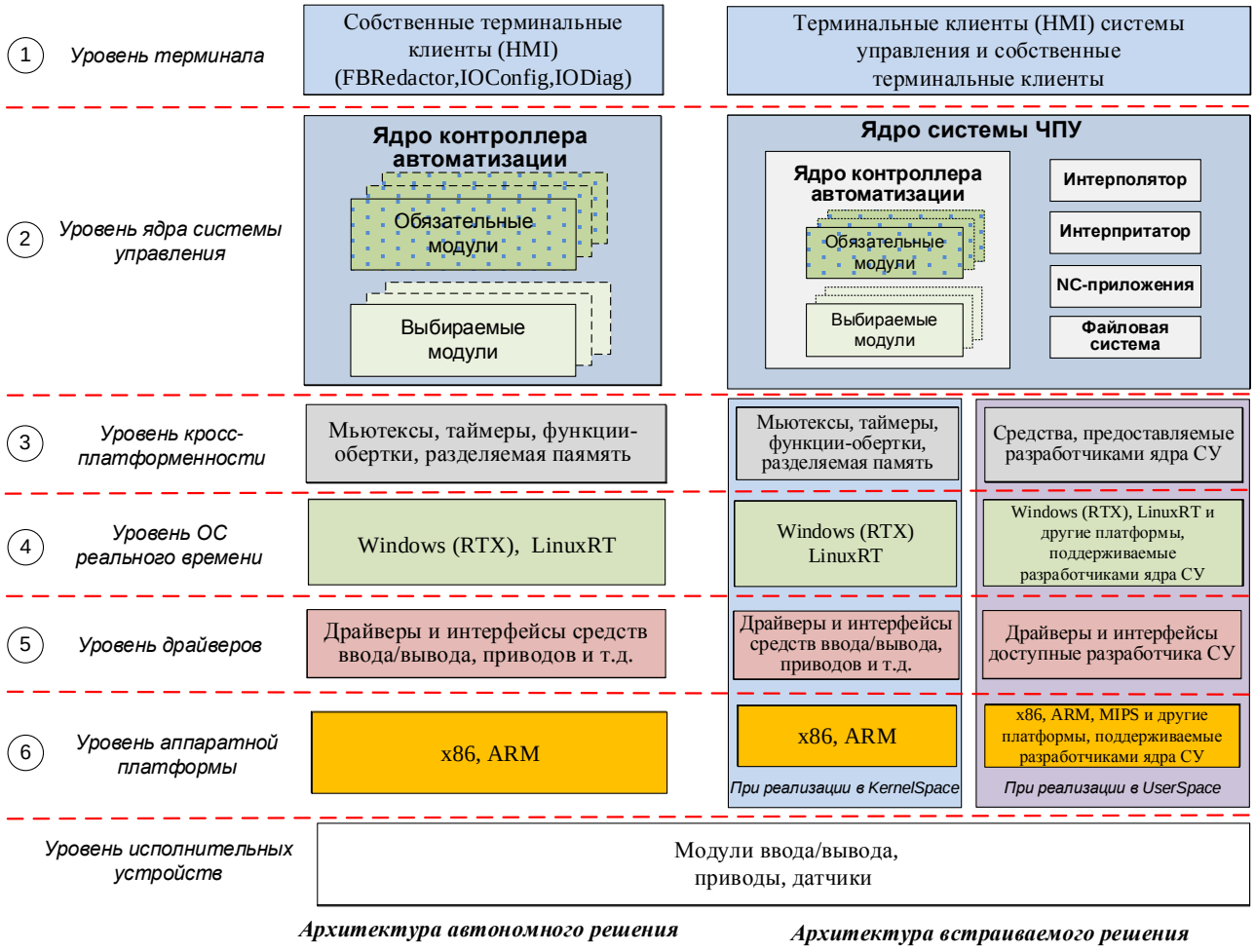


Рисунок 2 – Обобщенная архитектурная модель кроссплатформенного контроллера (встраиваемого и автономного решений) по типу виртуальной машины

Уровень аппаратной платформы включает в себя x86 или ARM архитектуры. Первые зарекомендовали себя как надежные проверенные решения, разработка под которые ведется уже достаточно давно и есть большое количество поддерживаемых решений. Вторые – новое веяние в области мобильной техники. Это маломощные процессоры, с низким энергопотреблением, имеющие свой круг технологических задач. При построении архитектуры создаваемого контроллера автоматизации технологических процессов необходимо ориентироваться на оба эти направления. Предложенный подход позволяет избежать избыточности решения и привязать себестоимость синтезируемого контроллера автоматизации к сложности управляемого объекта в зависимости от технического задания на него.

Уровень драйверов и интерфейсов обеспечивает обмен данными в режиме реального времени.

Уровень операционной системы реального времени (ОСРВ) включает MS Windows с расширением реального времени RTX для PC архитектуры и LinuxRT для PC и ARM архитектур, при необходимости может быть добавлена поддержка других ОСРВ, например, MS DOS, Solaris и др.

Заложенная кроссплатформенность предполагает работу как на стандартных PC-платформах с архитектурой x86 для более сложных задач управления, так и на платформах типа ARM для несложных задач и объектов управления. При этом портирование ядра синтезированного контроллера автоматизации с одной платформы на другую происходит с минимальными изменениями за счет использования функций-оберток, таймеров, объектов синхронизации. Решение поставленной задачи кроссплатформенности требует создания механизма портирования ядра системы управления на различные программно-аппаратные платформы для обеспечения независимости в случае прекращения выпуска целевой вычислительной платформы (продолжение жизненного цикла разработки), а также для обеспечения многовариантности решения в различных ценовых категориях.

На уровне ядра системы управления располагается вычислительное ядро синтезируемой системы управления для автономного решения и для решения, встраиваемого в систему ЧПУ, которое включает обязательные и выбираемые модули.

На самом верхнем уровне архитектурной модели располагаются терминальные клиенты для реализации интерфейса оператора.

Следует отметить, что вариант встраивания контроллера автоматизации в систему ЧПУ требует, чтобы функции работали в пространстве ядра ОС (kernel space), которую использует система ЧПУ. Ограничением также является то, что уровни 3, 4, 5 и 6 должны быть совместимыми и использовать одни и те же программные и аппаратные технологии (ОСРВ, архитектура вычислительной платформы, драйверы устройств и интерфейсов), что и система ЧПУ. В противном случае ядро контроллера автоматизации функционирует в пользовательском пространстве ОС (user space) и является дополнительным плагином ядра системы ЧПУ. Такой подход также востребован для простых и вспомогательных технологических задач (подача СОЖ, смена инструмента и т.д.)

Во встраиваемом решении синтезированного контроллера автоматизации в системы ЧПУ определяющим условием работоспособности является учет количественных параметров, которые предоставляет пространство ядра системы ЧПУ, такие как максимально возможное количество оперативной памяти, которое используется для новых объектов, такт работы системы и т.д. В варианте автономного решения контроллера автоматизации технологических процессов важен выбор вычислительной программно-аппаратной платформы исполнения.

В результате проводимых исследований была разработана обобщенная матрица модулей для синтеза на их основе контроллера автоматизации (рисунок 3). Ячейки матрицы содержат набор тех модулей и подмодулей, которые необходимы для определенной функциональности в зависимости от условий технического задания на объект управления.

		Обязательные модули			Выбираемые модули							
	Модули	**Связь с терми-налом**	**Мастер-модуль**	**Self-test**	**Электроавто-матика**		**Работа с движением**			**Диагностика**		**Связь с NC частью ЧПУ**
	Подмодули	Терминальный клиент	Сборка выбранных модулей	Проверка работоспособ-ности	Решение логической задачи	Дискретные/ана логовые входы/выходы	Решение геометрич. задачи	Синхронные/аси нхронные двигатели	Шаговые двигатели	Внешние устройства	Канал обмена данными	Расширение возможностей системы управления
Функциональность	**Подсистема электроавто-матики**											
	Измерение инструмента и заготовки											
	Управление сменой инструмента											
	Гидромоторы и гидроцилиндры											
	Диагностика подсистем и оборудования											

Рисунок 3 – Фрагмент обобщенной матрицы выбора модулей для синтеза кроссплатформенного контроллера автоматизации ТП

Матрица является расширяемой, что позволяет изменять ее функциональную наполняемость, а также добавлять необходимые выбираемые модули или их подмодули (например, модуль верификации программы управления или подмодуль работы с SSI сигналами в модуле электроавтоматики).

В третьей главе предложен способ синтеза кроссплатформенного контроллера автоматизации технологических процессов, включающий в себя алгоритм проверки работоспособности конечного полученного решения. Предложен комбинированный алгоритм нахождения граничных условий по количеству модулей для синтеза кроссплатформенного контроллера автоматизации и количеству компонентов программы управления, учитывающий техническое задание на объект управления, а также программно-аппаратную платформу исполнения.

На первом шаге предлагаемого способа (рисунок 4) на основе технического задания на объект управления (алгоритмы работы, циклограммы, описание необходимых функциональностей и т.д.) происходит выбор модулей из обобщенной матрицы и формализуется архитектурная модель контроллера для встраиваемого или автономного решения.

На втором шаге с помощью разработанного инструментария с набором специализированных нагрузочных тестов выполняется определение вычислительных возможностей программно-аппаратной платформы (при этом акцент делается на тестирование с использованием модулей из матрицы, составленной на первом шаге). В диссертационной работе показано, что модули (обязательные или выбираемые) оказывают нагрузку на вычислительную

платформу, но по сравнению с использованием компонентов программы управления это является малым значением.

Рисунок 4 - Способ синтеза кроссплатформенного контроллера автоматизации технологических процессов

На основе полученных результатов строится таблица зависимостей от количества используемых элементов. Инструментарий проверки работоспособности состоит из набора тестовых программ, реализованных в виде пользовательских библиотек, которые выявляют значения измеряемых параметров (таблица 2).

Таблица 2 - Основные параметры, влияющие на работоспособность синтезируемого решения

Ограничивающие параметры	Вид анализа	Описание (набор специализированных нагрузочных тестов)
Используемая ОЗУ	Статический анализ	Обязательные и выбираемые модули, компоненты программы управления
Загрузка ЦП	Анализ, исходя из конкретной программно-аппаратной платформы исполнения	Табличные характеристики с последующей аппроксимацией значений
Время цикла программы управления		
Время отклика устройств		В зависимости от конфигураций конкретного оборудования

Результатом третьего шага является синтезируемое решение с использованием составленной матрицы модулей на основе результатов первого шага и использованием структурной модели для конкретного типа решения (автономное или встраиваемое). Обязательный master-модуль производит сборку выбранных модулей и их подмодулей в единое ядро контроллера автоматизации (автономное или встраиваемое) на основе создаваемого

конфигурационного файла. Также этот master-модуль на данном шаге выстраивает взаимосвязи между отдельными модулями конечного решения.

На четвертом шаге с помощью инструментария проверки и результатов 2 шага способа определяются объём использования ОЗУ, загрузки ЦП для целевой платформы. Результатом являются граничные условия для разрабатываемых компонентов программы управления.

Были выявлены функции ограничения создания различных модулей.

Все модули синтезируемого решения являются элементами единого конечного множества A (выражение 1), такого, что:

$$A = \{A_1, A_2, \dots A_n\}, \quad \text{при } n \in \mathbb{N} \qquad (1)$$

При этом каждый модуль состоит из набора подмодулей, которые также являются элементами единого множества A (выражение 2):

$$A = \{A_1\{A_{11}, A_{12}, \dots A_k\}, A_2\{A_{21}, A_{22}, \dots A_{2n}\}, \dots A_n\{A_{n1}, A_{n2}, \dots A_{ns}\}\} \qquad (2)$$

при $k, m, n, s \in \mathbb{N}$

На рисунке 5 показано схематическое описание множества модулей синтезируемого контроллера автоматизации.

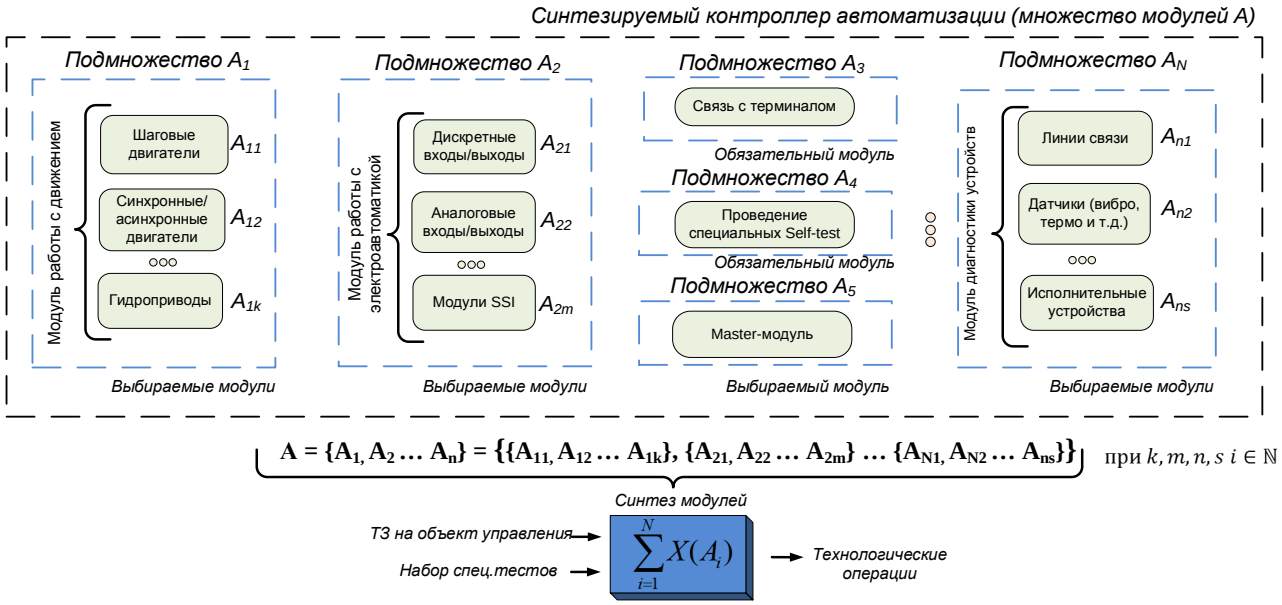


Рисунок 5 – Множество модулей синтезируемого контроллера автоматизации

Все модули являются частью одной синтезируемой системы управления (контроллера автоматизации) технологических процессов. В зависимости от входящего ТЗ на объект управления и разработанной программы управления, количество этих модулей может меняться, но более вероятен вариант изменения количества компонентов программы управления, при этом характеристики нагрузки программно-аппаратной платформы также будут изменяться. Каждому рассматриваемому модулю и, соответственно, его подмодулям, может быть сопоставлено множество численных значений компонентов (аргумент x) программы управления, определяющих основные параметры, влияющие на работоспособность синтезируемого решения. Результатом будет совокупность всех обязательных и выбираемых модулей,

удовлетворяющих ТЗ на объект управления и возможностям программно-аппаратной платформы (выражение 3).

$$\sum_{i}^{N} X(A_i) \quad \text{при } i \in \mathbb{N}, N \in \mathbb{N} \tag{3}$$

Представлено множество Ω – бесконечное множество, такое, что для любого $A_i \in A$ и $A \in \Omega$ следует, что $A_i \in \Omega$, при $i \in \mathbb{N}$ по свойству транзитивности.

Пусть областью определения функции $f(x)$ является Ω, тогда множество $A \in \Omega$ - подмножество этой области, следовательно $f(x)$ определена при всех $x \in A$. Рассмотрев значения в точках $x \in A$, в итоге была получена функция, областью определения которой служит множество A.

В выражении 4 показана функция ограничения $f|_A$ на множестве A.

$$f|_A : A \to \mathbb{N};\ f|_A(x) = f(x) \tag{4}$$

Для оценки эксперимента и аппроксимации значений было решено использовать регрессионный анализ как один из наиболее популярных методов обработки экспериментальных данных, который включает в себя метод наименьших квадратов.

$$f|_A(x) = \left(\frac{n \cdot \sum_{i=1}^{n}(x_i \cdot y_i) - \sum_{i=1}^{n} x_i \cdot \sum_{i=1}^{n} y_i}{n \cdot \sum_{i=1}^{n} x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} x_i\right)^2}\right)x + \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i \cdot \sum_{i=1}^{n} x_i^2 - \sum_{i=1}^{n} x_i \cdot \sum_{i=1}^{n}(x_i \cdot y_i)}{n \cdot \sum_{i=1}^{n} x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} x_i\right)^2} \tag{5}$$

В выражении 5 показана функция ограничения на множестве A для линейного представления расположения точек эксперимента. Показано, что эксперименты для выявления загрузки ЦП (рисунок 6 а)) и времени отклика устройств хорошо аппроксимируются логарифмическими зависимостями, а для загрузки ОЗУ (рисунок 6 б)) и времени такта программы управления – линейными.

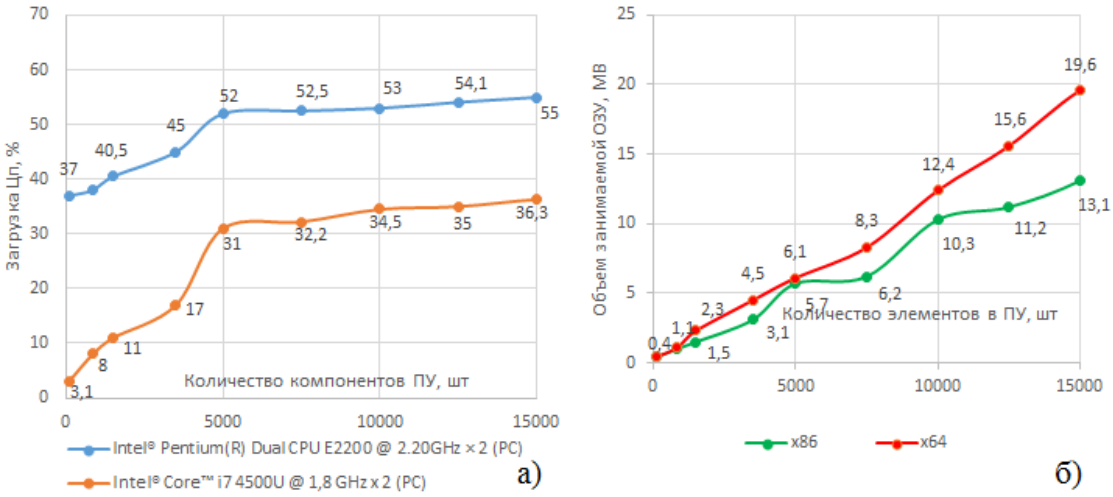


Рисунок 6 – Примеры снятия характеристик загрузки ЦП и ОЗУ для разных программно-аппаратных платформ исполнения

Показана программная возможность выбора между среднеквадратичным отклонением σ и 3σ при получении функций ограничения на множестве.

Разработан алгоритм определения работоспособности получаемого решения (рисунок 7).

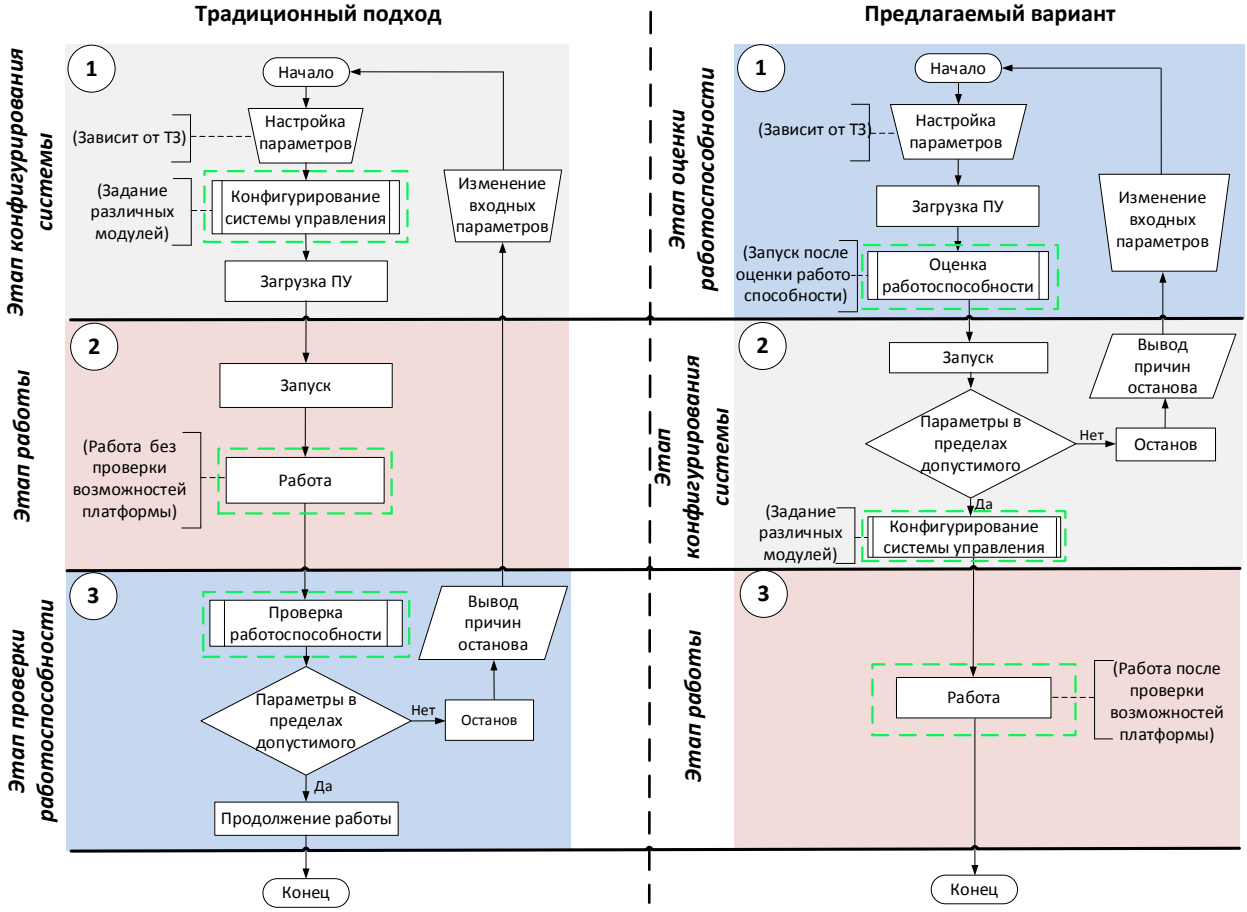


Рисунок 7 – Алгоритм определения работоспособности получаемого решения

В традиционном подходе после загрузки программы управления в ядро системы управления происходит начало работы и в случае выхода за предел, например, времени цикла обработки элементов, программа может завершиться с ошибкой. В предлагаемом же варианте, до запуска работы происходит проверка возможности работы синтезированного контроллера с использованием результатов тестов, полученных на втором шаге предлагаемого способа.

В четвертой главе проиллюстрировано практическое применение разработанных моделей и алгоритмов синтеза кроссплатформенного контроллера автоматизации на примере встраиваемого и автономного решений.

Представлено построение специализированной системы для гаммы резьбошлифовальных станков (проект «Резьба», выполненный совместно ЗАО «МСЗ-Салют» и ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»). Задачей проекта была разработка принципиальных технических решений, обеспечивающих процессы шлифования резьб особо высокой точности. В качестве системы управления используется система ЧПУ «АксиОМА Контрол» с открытой модульной архитектурой, способной к масштабированию функционала. Реализация встраиваемого в ядро системы ЧПУ решения является чисто программной, без

использования дополнительного аппаратного вычислителя. Необходимо было учесть ограничения на вычислительные ресурсы ядра системы ЧПУ, которые могут быть выделены под сторонние встраиваемые приложения.

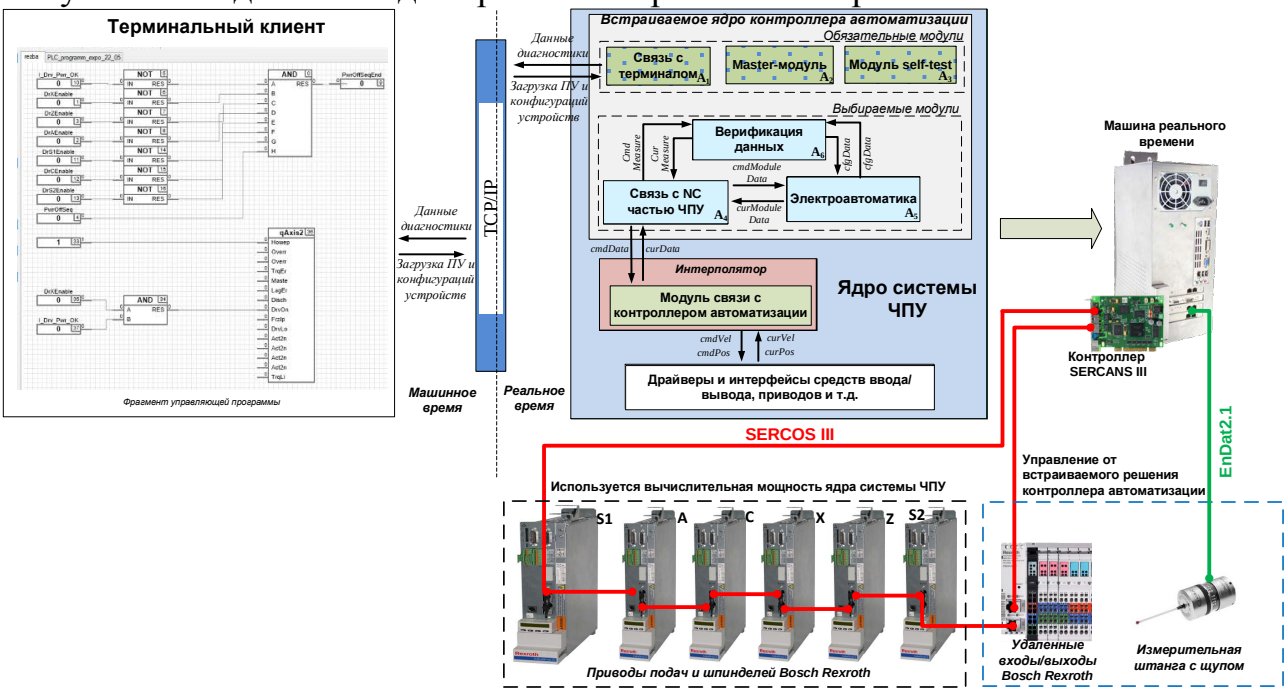


Рисунок 8 – Структурная схема использования встраиваемого решения контроллера автоматизации в систему ЧПУ «АксиОМА Контрол»

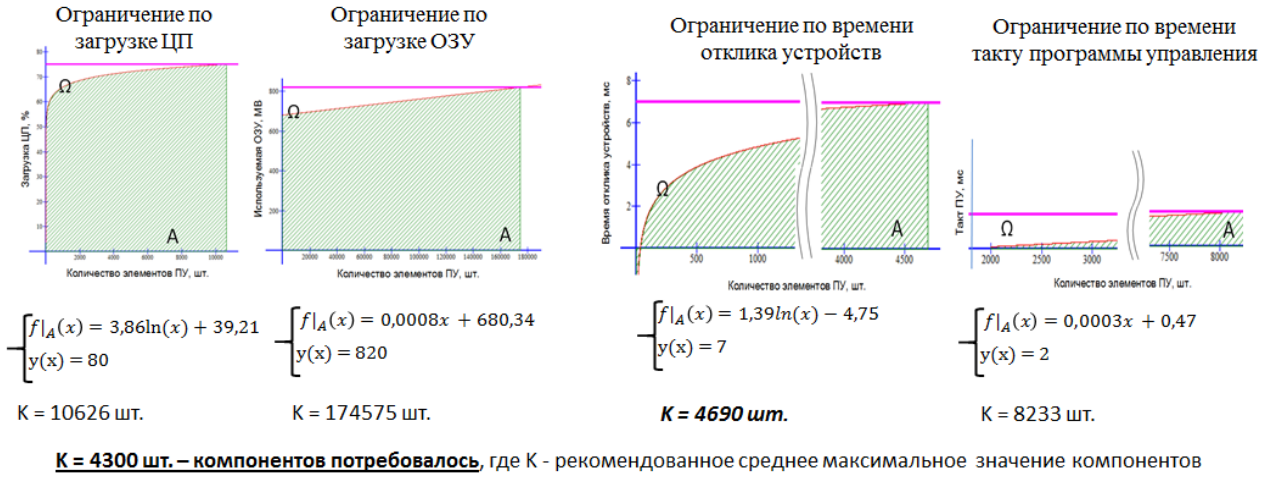
На рисунке 8 представлена структурная схема работы контроллера автоматизации, встроенного в систему ЧПУ «АксиОМА Контрол». Обязательными модулями являются: связь с терминалом (A_1), master-модуль (A_2) и self-тест (A_3). Выбираемыми модулями являются: связь с NC частью ЧПУ (A_4), модуль работы с электроавтоматикой (A_5) и модуль верификации (A_6).

Контроллер автоматизации выполняет расширенные функции ПЛК и отвечает за управление электроавтоматикой и измерительной системой резьбошлифовального станка, позволяя сосредоточить основные вычислительные ресурсы системы ЧПУ на задаче формообразования.

Стоит отметить, что для реализации данного проекта, важным фактором являлось значение максимальных ресурсов, выделенных под интеграцию встраиваемого решения. В качестве программно-аппаратной платформы использовалась: ОС LinuxRT x86, PC с ЦП Intel Core i3 330E с тактовой частотой 2 ГГц и общей доступной ОЗУ 1028 МБ.

Было проведено определение вычислительных возможностей программно-аппаратной платформы, после чего были определены функции ограничения на множестве для загрузки ЦП, ОЗУ, такта программы управления и времени отклика устройств (рисунок 9). Таким образом, были получены максимально допустимые значения количества компонентов программы управления для удовлетворения требованиям интеграции получаемого синтезируемого решения в программное пространство системы ЧПУ «АксиОМА Контрол» для решения задач по управлению электроавтоматикой станка и системой диагностики детали. При составлении программы

управления необходимо было ориентироваться на количество компонентов программы управления для характеристики времени отклика устройств, т.к. это значение является меньше значений, полученных для других характеристик: 4690 < 8233 < 10626 < 174575.



К = 4300 шт. – компонентов потребовалось, где К - рекомендованное среднее максимальное значение компонентов

Рисунок 9 – Функции ограничения на множестве по загрузке ЦП, ОЗУ и такту программы управления для встраиваемого решения

При проверке работоспособности при запасе менее 10% от рекомендуемого среднего максимального значения компонентов (в представленном случае потребовалось 4300 компонентов при 4690 рекомендуемых) выдается соответствующее предупреждение.

Предложенный подход позволил сократить время разработки подсистемы электроавтоматики и измерительной системы (системы контроля детали) на 27% (с 720 чел.-час часов до 525 чел.-час).

Автономное решение синтезированного контроллера автоматизации проиллюстрировано на управлении гидроцилиндром Л-500 (проект «Гидропривод», выполненный ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» совместно с ЗАО «ЭНИМС»). Задачей проекта было разработать автономный вариант системы управления гидроцилиндром.

Использование таких систем управления, как ЧПУ или Motion Control, в проекте являлось нецелесообразным в финансовом плане и абсолютно избыточным в плане функциональности, при этом классические ПЛК не подходили из-за имеющихся технических ограничений (динамика управления, возможность быстрой перенастройки системы и т.д.).

Решение задачи потребовало построения архитектуры управления распределителем гидроцилиндра с использованием плат ввода/вывода (или GPIO) посредством цифровых сигналов с жестким тактом реального времени (до 100 мкс).

Изначально в качестве программно-аппаратной платформы должен был быть использован одноплатный компьютер «Тион Про 28». Но после определения вычислительных возможностей было выявлено, что данная платформа не удовлетворяет ТЗ на объект управления (выход за предельно допустимое значение ОЗУ при использовании набора обязательных и

выбираемых модулей). Следовательно, была выдана рекомендация о смене программно-аппаратной платформы исполнения.

В качестве новой платформы была выбрана ОС Windows RTX, PC с ЦП Intel Dual CPU E2200 с тактовой частотой 2,20 ГГц, 2048 МБ ОЗУ с возможностью работы в реальном времени с поддержкой высоких тактов управления.

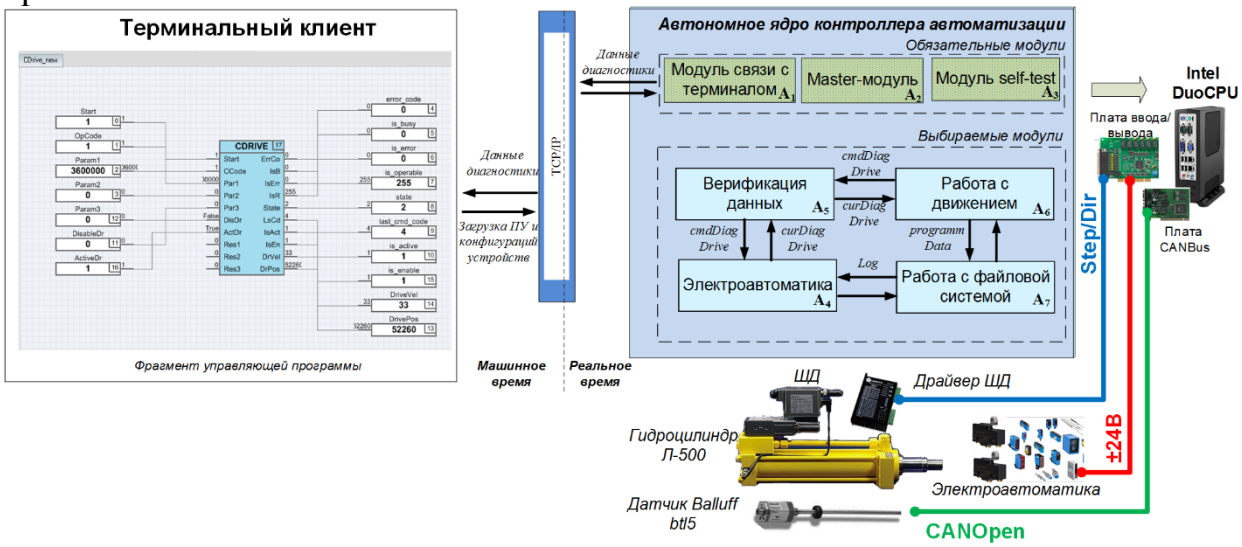


Рисунок 10 – Структурная схема использования автономного решения контроллера автоматизации при управлении гидроцилиндром

Обязательными модулями являются (рисунок 10): связь с терминалом (A_1), master-модуль (A_2), модуль self-test (A_3). К выбираемым модулям относятся: электроавтоматика (работа с концевыми выключателями, датчиками уровня масла и т.д.) (A_4), верификация данных (A_5), работа с движением (позиционирование золотника в распределителе и работа с датчиком – в качестве данного модуля использовалось готовое решение) (A_6), работа с файловой системой (ведение логов) (A_7).

После определения вычислительных возможностей программно-аппаратной платформы были найдены функции ограничения на множестве для загрузки ЦП, ОЗУ, такта программы управления и времени отклика устройств (рисунок 11).

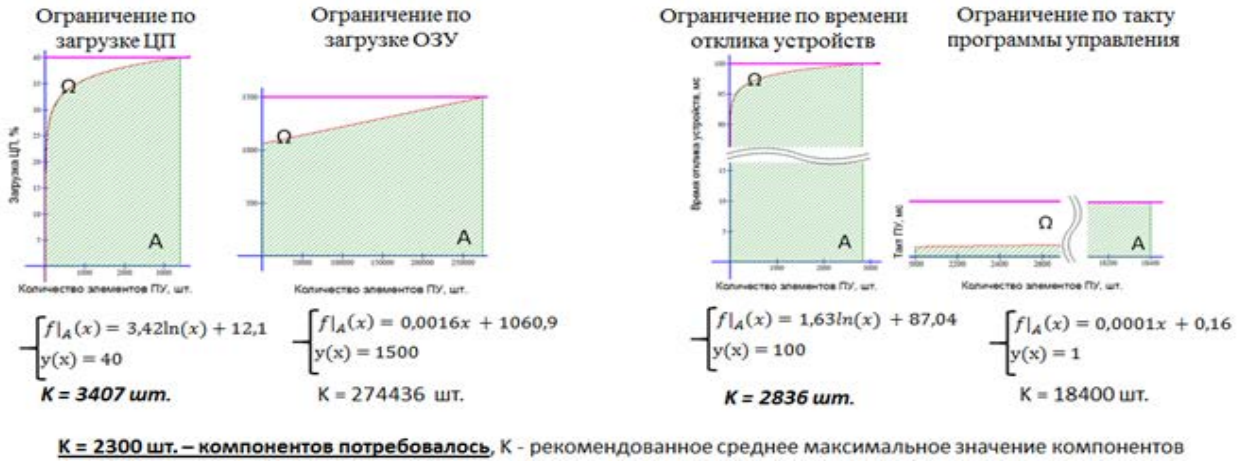


Рисунок 11 – Функция ограничения на множестве по загрузке ЦП, ОЗУ и такту программы управления для автономного решения

При составлении программы управления необходимо было ориентироваться на количество компонентов программы управления для характеристики времени отклика устройств и загрузки ЦП, т.к. это значение является меньше значений, полученных для других характеристик: 2836 < 3407 < 18400 < 274436. Запас более 20% от рекомендованного среднего максимального значения количества компонентов позволяет расширять программу управления в случае необходимости.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Выполнена научно-квалификационная работа, в которой содержится решение актуальной задачи, связанной с разработкой моделей и алгоритмов синтеза кроссплатформенного контроллера автоматизации, направленной на сокращение времени разработки специализированных средств систем управления технологическими процессами.
2. В процессе работы установлены взаимосвязи между технологической задачей и нагрузкой на вычислительное ядро системы управления, отличительной особенностью которых является возможность определения необходимого набора модулей для синтеза ядра кроссплатформенного контроллера автоматизации технологических процессов и предельно допустимого количества компонентов программы управления.
3. На основе установленных взаимосвязей построена структурная модель кроссплатформенного контроллера автоматизации, отличающаяся выделением набора базовых и выбираемых модулей.
4. Разработан алгоритм и осуществлена программная реализация нахождения граничных условий по количеству модулей для синтеза кроссплатформенного контроллера автоматизации, а также определение предельного количества компонентов программы управления, учитывающие ТЗ на объект управления и программно-аппаратную платформу исполнения.
5. Предложен способ синтеза кроссплатформенного контроллера автоматизации технологических процессов, позволяющий сократить время разработки специализированных средств систем управления технологическими процессами без потери качества.
6. Эффективность разработанного способа синтеза кроссплатформенного контроллера автоматизации технологических процессов доказана внедрением результатов диссертации на ЗАО «МСЗ Салют» (г. Москва), что позволило сократить время разработки подсистемы электроавтоматики на 27% (с 720 чел.-час часов до 525,6 чел.-час).
7. Полученные результаты рекомендованы к применению на предприятиях машиностроительного профиля, разрабатывающих металлообрабатывающие станки и комплексы с ЧПУ, а также в учебном процессе при подготовке инженерных кадров по направлению «Автоматизация технологических процессов и производств».

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в периодических изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Никишечкин, П.А. Кроссплатформенная система сбора и обработки диагностической информации о работе технологического оборудования / П.А. Никишечкин, И.А. Ковалев, А.С. Григорьев, А.Н. Никич // Вестник МГТУ Станкин. – 2017. – № 1 (40). – С. 94-98.
2. 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. - 2017. - №5. - С. 5-9.
3. Козак, Н.В. Реализация логической задачи ЧПУ и задачи производственной безопасности на основе внешних вычислительных модулей SoftPLC / Н.В. Козак, Р.А. Абдуллаев, И.А. Ковалёв, Н.Ю. Червоннова // Автоматизация в промышленности. – 2016. – №5. – С. 29–31.
4. Ковалев И.А. Построение специализированной системы ЧПУ для резьбошлифовальных станков / И.А. Ковалев, С.В. Соколов, Л.И. Мартинова, С.В. Рыбников // Автоматизация в промышленности. – 2015. – №5. – С. 38–40.
5. Мартинов Г.М. Построение специализированной распределенной системы управления прецизионным обрабатывающим центром VMG 50 / Г.М.Мартинов, Н.В. Козак, Р.А. Абдуллаев, И.А. Ковалев // Автоматизация в промышленности. - 2014. - №6. - С.16 - 20.
6. Мартинов Г.М. Подход к построению мультипротокольной системы ЧПУ / Мартинов Г.М., Любимов А.Б., Бондаренко А.И., Сорокоумов А.Е., Ковалев И.А. //Автоматизация в промышленности. - 2012. - №5. - С.8 - 11.

Статьи, опубликованные в изданиях WebOfScience и Scopus:

7. Martinov G. M. An Approach to Building a Multiprotocol CNC System / G. M. Martinov, A. B. Lyubimov, A. I. Bondarenko, A. E. Sorokoumov, I. A. Kovalev // Automation and Remote Control. - 2015, - Vol. 76, No. 1 - pp. 172-178

Другие публикации автора:

8. Мартинов Г.М. Разработка программно-аппаратного модуля станочной панели с применением одноплатного ARM компьютера / Г.М. Мартинов, И.А. Ковалев, М.С. Бабин // Труды XVI-ой международной молодёжной конференции "Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM - 2016). Под ред. А.В. Толока. М.: ООО «Аналитик». –2016. с. 153-156.

9. Никишечкин П.А. Практические аспекты реализции базовых модулей подсистемы диагностирования и прогнозирования состояния режущего инструмента / Никишечкин П.А., Ковалев И.А., Григорьев А.С. // Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции "Новые направления и концепции в современной науке". Ч. 2. Смоленск: ООО «Новаленсо». - 2016. с.31-33.

10. Мартинов Г.М. Программно-реализованный контроллер автоматизации технологических процессов для умных производств в сфере машиностроения / Мартинов Г.М., Никишечкин П.А., Ковалев И.А., Григорьев А.С. // Материалы международной научно-технической конференции молодых ученых "Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности". ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет», 2016. с. 26.

11. Мартинов Г.М. Теория и техника построения контроллера автоматизации технологических процессов на базе отечественной элементной базы / Мартинов Г.М. Ковалев И.А. // Труды 15-й международной конференции "Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM - 2015). Под ред. А.В. Толока. М.: ООО "Аналитик". - 2015. с.159-161.

12. Бабин М.С. Создание программно-аппаратной платформы для тестирования жидкокристаллических индикаторов вывода информации состояния работы ядра системы ЧПУ / Бабин М.С., Ковалев И.А. //Материалы студенческой научно-практической конференции "Автоматизация и информационные технологии (АИТ-2015)". Первый тур. Сборник докладов. - М.: ФГБОУ ВПО МГТУ "Станкин", 2015. - С.21-25.

13. Ковалев И.А. Реализация управления знакосинтезирующим индикатором посредством динамической индикации с использованием программно-реализованного контроллера электроавтоматики SoftPLC / Ковалев И.А., Бабин М.С., Травкин Р.В. // Материалы VII Международной научно-образовательной конференции "Машиностроение - традиции и инновации" (МТИ-2014). - М.: ФГБОУ ВПО МГТУ "СТАНКИН", 2014. - с.5-8.

14. Ковалев И.А. Реализация управления гидроприводом посредством программно-реализованного контроллера автоматизации / Ковалев И.А., Любимов А.Б. // Материалы XI Всероссийской научно-практической конференции. - Оренбург: ООО ИПК "Университет", 2014. - 427с. с.29-32.

15. Ковалев И.А. Построение модульной архитектуры программно-реализованного контроллера электроавтоматики / Ковалев И.А., Рыбников С.В., Соколов С.В. // Труды 14-й международной конференции "Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM - 2014). - М.: ООО "Аналитик". - 2014. с.158-161.

16. Ковалев И.А. Реализация обмена диагностическими данными между программно-реализованным контроллером электроавтоматики и редактором управляющих программ. Материалы студенческой научно-

практической конференции "Автоматизация и информационные технологии (АИТ-2014)". Первый тур. Сборник докладов. - М.: ФГБОУ ВПО МГТУ "Станкин", 2014. - С.22-25.

17. Мартинова Л.И. Автоматизация процесса тестирования многофункциональных систем ЧПУ / Мартинова Л.И., Ковалев И.А., Комаров А.В. // Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции "Компьютерная интеграция производства и ИПИ - технологии". с.66-74.

18. Мартинова Л.И. Инструментарий поддержки процесса отладки многофункциональных систем ЧПУ / Мартинова Л.И., Ковалев И.А., Комаров А.В. // Тезисы 13-й Международной конференции, с.67.

19. Ковалев И.А. Реализация управления шаговым двигателем посредством программно-реализованного контроллера электроавтоматики. // Материалы студенческой научно-практической конференции "Автоматизация и информационные технологии (АИТ-2013)". Первый тур. Сборник докладов. - М.: ФГБОУ ВПО МГТУ "Станкин", 2013. - С.19-22.

20. Пушков Р.Л. Компенсация погрешностей перемещений в современных системах ЧПУ / Пушков Р.Л., Евстафиева С.В., Ковалев И.А. // Тезисы 12-й Международной конференции, с.66.

21. Ковалев И.А. Разработка библиотеки логических элементов для программно-реализованного контроллера электроавтоматики. // Материалы студенческой научно-практической конференции "Автоматизация и информационные технологии (АИТ-2012)". Первый тур. Сборник докладов. - М.: ФГБОУ ВПО МГТУ "Станкин", 2012. - С.31-32.

22. Ковалев И.А. Разработка системного драйвера EtherNET/IP для подсистемы электроавтоматики в системе ЧПУ / Ковалев И.А., Обухов А.И. // Материалы студенческой научно-практической конференции "Автоматизация и информационные технологии (АИТ-2012)". Первый тур. Сборник докладов. - М.: МГТУ "Станкин", 2012. - С.26-30

23. Рыбников С.В. Реализация компонентов ядра в системе ЧПУ для управления сервоприводами СПШ на основе протокола CAN с применением обратной связи / Рыбников С.В., Ковалев И.А. // с.276-280.

24. Ковалев И.А. Специфика управления отечественными мехатронными системами на базе промышленного протокола CANBUS / Ковалев И.А., Козак Н.В., Абдуллаев Р.А., Соколов С.В.

25. Ковалев И.А. Структура программ измерительных циклов в системе ЧПУ / Ковалев И.А., Рыбников С.В. // с.26-28.

Объекты интеллектуальной собственности автора:

1. Ковалев И.А., Григорьев А.С., Пушков Р.Л., Никич А.Н. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017613093 «Программный модуль для оперативной установки системы управления с использованием портативных средств переноса информации» от 10.03.2017

2. Ковалев И.А., Григорьев А.С., Никишечкин П.А., Соколов С.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017612978 «Модуль обмена диагностическими данными между ядром и редактором программно-реализованного контроллера электроавтоматики» от 07.03.2017

3. Мартинова Л.И., Ковалёв И.А., Любимов А.Б. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016610045 «Модуль управления движением на базе программно-реализованного контроллера автоматизации» от 11.01.2016.

4. Козак Н.В., Ковалев И.А., Мартинова Л.И., Пушков Р.Л. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015610687 «Модуль коммуникационного канала ЧПУ-ПЛК "АксиОМА-TCP" для исполнения в составе системы ЧПУ» от 20.02.2015.

5. Мартинова Л.И., Григорьев А.С., Ковалёв И.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013613090 «Библиотека программных компонентов электроавтоматики» от 25.03.2013.

6. Мартинов Г.М., Нежметдинов Р.А., Григорьев А.С., Ковалев И.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013615768 «Программный компонент реализации машины состояний ядра системы управления электроавтоматикой» от 20.06.2013.

7. Мартинов Г.М., Любимов А.Б., Ковалёв И.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013610475 «Программный компонент проектирования и разработки управляющих программ электроавтоматики на языке FunctionalBlocks» от 09.01.2013.

8. Мартинов Г.М., Нежметдинов Р.А., Кулиев А.У., Никишечкин П.А., Ковалев И.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012660015 «Программный компонент проектирования и редактирования управляющих программ для ПЛК на языке FunctionalBlocks» от 08.11.2012.