

На правах рукописи



Мухопад Александр Юрьевич

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ УСТРОЙСТВ УПРАВЛЕНИЯ ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННЫМИ СРЕДСТВАМИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ И СЛОЖНЫМИ ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

Специальность 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Иркутск - 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Иркутский государственный университет путей сообщения»

Научный консультант — доктор технических наук доцент
Сизых Виктор Николаевич

Официальные оппоненты: Титов Виталий Семенович,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой вычислительной техники
Юго-Западного государственного университета,
г. Курск.

Смагин Алексей Аркадьевич,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой телекоммуникационных
технологий и систем Ульяновского
государственного университета

Ирхин Валерий Петрович,
доктор технических наук, профессор кафедры
основ радиотехники и электроники
Воронежского института ФСИН России

Ведущая организация — Новосибирский государственный технический университет

Защита диссертации состоится 27 октября 2016г. в 15 час. 15 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.268.03 Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУРа по адресу: 634045, г. Томск, ул. Красноармейская, 146 и на сайте ТУСУРа:
<http://www.tusur.ru/ru/science/education/dissertations/2015-009.html>

Автореферат разослан «28» июня 2016.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Зыков Дмитрий Дмитриевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

В средствах управления распределенными системами с критическими технологиями, бортовыми системами летательных аппаратов, быстропротекающими технологическими процессами и взрывоопасными производствами, определяющую роль в обеспечении безопасности функционирования играют информационно-управляющие системы (ИУС) как комплекс спецпроцессоров (СПР).

Управление промышленными предприятиями реализуется программными системами для относительно мощных, многоядерных процессоров. Однако главные проблемы связаны с проектированием устройств более низкого уровня управления, реализуемых на сегодня программными средствами для микроконтроллеров. Такие программные подсистемы управления имеют низкую надежность и производительность. При модификации требуется повторное проектирование. Все эти факторы определяют актуальность перехода к СПР

В настоящее время информационные технологии на основе весьма сложных программных средств составляют основу как стационарных, так и подвижных систем. Однако чем сложнее управляющие программы, тем больше риск их повреждения за счет внешнего вредоносного воздействия. Причем программные средства защиты информации также подвержены атакам. Поэтому начали интенсивно развиваться аппаратные методы криптографической защиты информации, и возникла острая необходимость замены ведущих программных средств аппаратными управляющими автоматами. Современный уровень развития интегральной схемотехники позволяет произвести такую замену¹.

Проблемно-ориентированные СПР при ограниченном числе вычислительных операций контролируют большое число параметров с выработкой команд управления в реальном масштабе времени. В СПР наиболее сложным устройством является управляющая подсистема, реализуемая одним или несколькими взаимодействующими автоматами. Поэтому особенно актуальна разработка методики синтеза и структурной организации средств контроля и управления сложными техническими системами и технологическими процессами.

Теория синтеза развивалась применительно к реализации комплекса относительно простых микропрограммных автоматов вычислительной техники. Методы проектирования сложных управляющих автоматов не достаточно развиты.

¹Соловьев В.В., Климович А. Логическое проектирование цифровых систем на основе программируемых логических интегральных схем. – 2-е изд., стереотип. - М.: Горячая линия-Телеком, 2014. -376с.: ил.

Целью диссертационных исследований является развитие методов анализа и структурного синтеза устройств управления спецпроцессоров технических систем реального времени.

Предметом исследования является структурная организация спецпроцессоров и автоматов управления.

Объект исследования - методы анализа, синтеза и проектирования управляющих автоматов.

Задачи исследования:

- разработка метода синтеза сложных управляющих автоматов;
- разработка структурной организации управляющих автоматов при большом числе логических условий и состояний;
- разработка структурной организации взаимодействующих автоматов;
- сравнительный анализ разработанных управляющих автоматов с основными структурами автоматов Мура и Мили;
- разработка метода моделирования сложных управляющих автоматов;
- разработка новых методов контроля и диагностики сложных управляющих автоматов;
- разработка спецпроцессоров и алгоритмов управления для технических систем народно-хозяйственного применения.

Методы исследования основаны на системном анализе, теории дискретных устройств и автоматов, теории кодирования информации, теории контроля и диагностики и методов моделирования систем обработки информации и управления.

Научная новизна исследований определяется следующими положениями:

1. Выполнен системный анализ методов синтеза спецпроцессоров и управляющих подсистем за значительный временной период (1960-2015г.г.) и сделан вывод о целесообразности использования пятикомпонентной модели из функциональной, информационной, логической, адресной и управляющей подсистем для анализа и синтеза спецпроцессоров и устройств управления.

2. Предложен новый метод структурного синтеза управляющих автоматов (УА), основанный на преобразовании операторной схемы алгоритма, позволяющий значительно снизить объем оборудования комбинационных схем в УА с оригинальной структурной организацией.

3. Предложены варианты структурной организации УА и модификация предложенного метода структурного синтеза, обеспечивающие дополнительное снижение оборудования на реализацию комбинационных схем автоматов \approx в 2 раза по сравнению с новой базовой структурной организацией УА.

4. Предложены методы структурного синтеза УА: с памятью на счетчике и разделением комбинационной схемы на две части, метод декомпозиции, метод структурной организации иерархических и взаимодействующих автоматов на УА с новой структурной организацией.

5. Диссертантом предложены оригинальные методы динамического контроля и диагностики автоматов:

а) метод представления кода с числом «1», равным количеству трехразрядных групп (p) в выходном коде комбинационной схемы переходов - код pC_n . Этот код преобразуется в двоичный непозиционный код (ДНК) состояния автомата для подачи на вход комбинационной схемы. По сравнению с известным кодом с фиксированным числом единиц (kC_n), в котором «1» расположены произвольно, фиксация наличия числа единиц в группах кода pC_n осуществляется значительно проще. Метод позволяет контролировать комбинационную схему переходов, как по входу, так и по выходу. При соединении предлагаемого метода с методом синтеза УА с разделенными комбинационными схемами (разделением на младшие и старшие разряды), контроль таких схем кодами pC_n дополнительно упрощается и реализуется с наименьшими затратами оборудования.

б) метод реализации дублирующей схемы в виде двух схем, сопоставляющих коды предыдущего и последующего состояний автомата по их половинным частям, с добавлением к кодам каждой половины двух разрядов, значение одного из которых доопределяется. Метод может быть осуществлен только для автоматов нового типа, предложенных соискателем;

в) метод мажоритарного резервирования с использованием резервной схемы для преобразования выходного кода комбинационной схемы переходов во входной код предыдущего состояния автомата. Метод отличается быстродействием принятия решений при выборе одной из двух резервных схем. Предложена оригинальная реализация с представлением всех дублирующих схем в виде части таблиц переходов с синхронизацией частей по значению «0» или «1» логического условия выбранного мультиплексором. Метод позволяет осуществить не только контроль, но и диагностику управляющего автомата в условиях потока отказов.

6. Предложен новый метод динамического контроля автоматов с использованием счётчика Грея в котором коды предыдущего и последующего состояний делятся пополам. По специальной процедуре производится выбор и модификация кодов для состояний, не относящихся к счётчику. Метод отличается тем, что требует минимальных затрат оборудования на средства встроенного контроля и не снижает быстродействия автомата управления.

7. Предложен новый способ моделирования автоматов управления и его обобщение в виде метода структурного автоматного программирования микроконтроллеров и спецпроцессоров реального времени. Предложенный метод позволяет получать наиболее простые и быстродействующие программы для любых типов микроконтроллеров с единой ведущей программой опроса трех зон ОЗУ по алгоритму функционирования УА.

8. Предложены алгоритмы и структурная организация спецпроцессора с УА нового типа для криптографической защиты информации, отличающиеся тем, что кодирование информации осуществляется аппаратным способом за

единицы микросекунд при высоком уровне криптостойкости недостижимом другими методами.

9. Предложена новая методология проектирования управляющих автоматов спецпроцессоров сложных технических систем реального времени.

10. Разработаны оригинальные спецпроцессоры для народно-хозяйственного применения в различных отраслях промышленности (управление мехатронными устройствами, нефтехимическими установками, устройствами навигации подвижных объектов и др.).

Соответствие специальности определяется ее направлением на «совершенствование и создание принципиально новых элементов и устройств вычислительной техники и систем управления, включая разработку научных основ физических и технических принципов создания указанных элементов и устройств». Диссертационные исследования соответствуют области исследований специальности 05.13.05 по трем из четырех пунктов:

п.1 «Разработка научных основ создания и исследования общих свойств и принципов функционирования элементов, схем и устройств вычислительной техники и систем управления». По п.1 проведены исследования, позволившие разработать методические основы создания моделей спецпроцессоров и управляющих устройств для технологических процессов и сложных технических систем.

п.3 «Разработка принципиально новых методов анализа и синтеза элементов и устройств вычислительной техники и систем управления с целью улучшения их технических характеристик». По п.3 выполнены теоретические исследования, позволившие разработать новую методику синтеза управляющих автоматов и комплекс принципиально новых устройств управления с оригинальной структурной организацией, объем комбинационных схем в которых, в виде ПЗУ (ПЛМ) может быть снижен в сотни и тысячи раз в зависимости от сложности операторных схем алгоритмов управления.

п.4. «Разработка научных подходов, методов, алгоритмов и программ, обеспечивающих надежность, контроль и диагностику функционирования элементов устройств вычислительной техники и систем управления». По п.4 проведены теоретические исследования, позволившие разработать самоконтролируемые управляющие устройства с принципиально новыми методами динамического контроля и диагностики управляющих автоматов.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Метод структурного синтеза автоматов управления с выбором одного логического условия из полного множества входных переменных, позволяющий снизить сложность комбинационной схемы переходов на ПЗУ от десятков раз до нескольких тысяч раз в зависимости от специфики и сложности алгоритмов управления спецпроцессором. Метод позволяет получить различные оригинальные варианты структурной организации автоматов управления, применяемых в спецпроцессорах.

2. Метод синтеза автоматов управления со счетчиком в качестве памяти и разделенной комбинационной схемой переходов по значению логического условия. Метод обеспечивает дополнительное снижение оборудования комбинационных схем по сравнению с предложенным вариантом по п.1.

3. Новый метод декомпозиции сложных УА, не требующий реализации декомпозируемых частей независимыми УА и создания ведущего автомата. По предложенному методу создается единый многорежимный УА с обращением к отдельным частям условно декомпозируемой ГСА по коду соответствующих частей. Предложенный метод позволяет обеспечить дополнительное снижение объема адресной подсистемы.

4. Три самостоятельных метода синтеза самоконтролируемых автоматов, обеспечивающих безопасность функционирования информационно-управляющих систем, позволившие получить оригинальную структурную организацию автоматов с минимальными затратами встраиваемого оборудования.

5. Новый метод структурного автоматного программирования, отличающийся наличием простой ведущей программы, основанной на считывании информации из таблиц, содержимое которых предварительно определяется по операторным схемам алгоритмов. Для выбранного микроконтроллера ведущая программа не меняется при смене алгоритма управления спецпроцессором.

6. Новая методология проектирования управляющих автоматов спецпроцессоров сложных технических систем реального времени.

7. Новые структурные организации быстродействующих и высоконадежных спецпроцессоров для различных отраслей промышленности.

Практическая значимость работы состоит в том, что предложенные научные результаты и конструктивные методики синтеза позволяют создавать спецпроцессоры повышенной надежности для управления сложными техническими системами мехатроники, нефтехимической отрасли, криптографической защиты информации, навигационных систем подвижных транспортных средств и средств автоматизации промышленных предприятий. Результаты исследований могут найти применение в информационно-измерительных системах широкого профиля, а также в электронной промышленности при проектировании и производстве высоконадежных СБИС, в системах управления распределенными критическими технологиями и для систем контроля и диагностики бортовых автоматизированных комплексов летательных аппаратов.

Достоверность результатов исследования подтверждается корректным использованием теоретических методов вышеназванных научных дисциплин, патентной экспертизой, созданием и внедрением СПР для различных отраслей промышленности.

Реализация и внедрение результатов работы осуществлена в задачах управления технологическими процессами добычи и переработки нефти (ОАО

«Томская нефтегазовая компания» г.Томск), в задачах проектирования автоматизации предприятия (ЗАО «Энерпред» г.Иркутск), при разработке устройств управления режимами электроэнергетических систем (ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» - СибНИИЭ г.Новосибирск).

Результаты исследований нашли применение в учебном процессе, в лекционных курсах, в дипломном проектировании специальностей: мехатроника, управление техническими системами, автоматика и связь на ж.д. транспорте, информационные системы, безопасность информации и др. в ФГБОУ ВПО ИрГУПС, ИРНТУ (г.Иркутск), БрГУ (г.Братск), АГТА (Ангарск), ВУНЦ ВВС «ВВА» (г.Воронеж).

Апробация результатов исследований проводилась с 1996 по 2015г.г. на:

- конференции «Математическое моделирование систем», Институт динамики и теории систем управления СО РАН, Иркутск, 1996г.
- III и IV международных конференциях «Проблемы механики современных машин», Улан-Удэ, 2006, 2009г.г.
- VII Всероссийской научно-практической конференции аспирантов и молодых ученых «Молодежь и современные информационные технологии», Томск, 2009г.
- Научной международной школе РАН по проблемам машиноведения и технологических процессов, СПб, 2009г.
- VIII международной конференции «Системный анализ в проектировании и управлении», СПб, 2009г.
- XIV Байкальской Всероссийской конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении». – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2009.
- XXII Международной конференции «Математические методы в технике и технологиях». – Псков, 2009.
- Ежегодной осенней сессии РАЕ с конференцией «Фундаментальные исследования».- Москва, 2010г.
- Международной конференции «Транспорт XXI века».- Екатеринбург, 2011г.
- Научно-практической конференции «Проблемы транспорта Восточной Сибири».- Иркутск: ИрГУПС, 2012г.
- Всероссийской конференции «Актуальные проблемы развития гражданской авиации России». – Иркутск, Москва, 2013.
- XII Всероссийском научном семинаре по проблемам управления.- СПб: ИПУ РАН, 2014г.
- II Международной научно-практической конференции «Проблемы и достижения в науке и технике» (г. Омск). Секция №2. Информатика, вычислительная техника и управление (специальность 05.13.00), 2015.
- Ежегодных научно-технических конференциях Иркутского государственного университета путей сообщения, с 2006- 2016г.г.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 59 работ, в том числе 1 монография, 14 работ в журналах из списка ВАК, 4 патента на изобретения, 7 патентов на полезные модели, во Всероссийском фонде зарегистрировано 2 программы, 18 работ в едином авторстве. В работах с соавторами соискателю принадлежит от 45 до 70% результатов. Положения, составляющие научную новизну и выносимые на защиту, получены лично автором.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа содержит 244 страницы, включая текст на 167 страницах, 105 рисунков, 50 таблиц, список литературы из 223 наименований, список публикаций автора. В приложении включены акты о внедрении и краткое описание патентов, листинги программ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность исследований для задач управления мехатроникой, распределенными технологическими комплексами с быстро протекающими процессами, летательными аппаратами, оборонными комплексами для работы в экстремальных условиях. Методика анализа и синтеза таких информационно-управляющих систем (спецпроцессоров) недостаточно развита.

В первой главе отмечается тот факт, что проектирование сложных технических систем в настоящее время осуществляется через системы VPD (Virtual Product Development). Для средств вычислительной техники и автоматики наиболее развитыми средствами VPD являются САПР системы VHDL, которые позволяют осуществить весь цикл проектирования, если состав блоков и их связей структурной организации системы известен. Для СПР структура заранее не задана.

Для синтеза СПР определяющим фактором является выбор структурной модели. Из моделей СПР известна двух блоковая структура В.М. Глушкова и пятикомпонентная структура Ю.Ф. Мухопода (в виде функциональной - Ф, информационной - И, логической - Л, адресной - А и управляющей - У подсистем). Наиболее эффективно использование последней модели. Информация в СПР может быть представлена в аналоговом виде или цифровыми кодами с фиксированной запятой с разрядностью ≤ 16 . При этом важнейшей подсистемой является управляющая, т.к. совместно с памятью она может составлять до 2/3 оборудования всей ИУС.

Соискателем предлагается методика синтеза ИУС на основе пятикомпонентной модели (ФИЛАУ) с последовательным определением состава блоков подсистем $\Phi \rightarrow \text{И} \rightarrow \text{Л} \rightarrow \text{А} \rightarrow \text{У}$ на основе системного анализа и базовых задач в соответствии с проблемной ориентацией конкретной области применения.

Приводится краткий анализ существующих методик структурного синтеза спецпроцессоров, которые основаны на предварительном задании

расширенного состава блоков (В.Б. Смоллов, В.А. Горбатов, А.В. Чечкин и др.). Несмотря на сложность применяемых наукоемких методов, методики имеют узкую область применения, так как, фактически вместо структурного проводится параметрический синтез при заданном наборе операций и расширенном составе блоков преобразования информации.

Дается детальный анализ методов синтеза конечных автоматов, как теоретической базы проектирования управляющих устройств СПР. Основные работы в этой области выполнены отечественными учеными (М.А. Гаврилов, В.М. Глушков, А.Д.Закревский, В.А. Горбатов, В.Г. Лазарев, С.И. Баранов, А.А. Шалыто, В.В. Соловьев, В.В. и Вл.В. Сапожниковы, Ю.Ф. Мухопад, Е.И. Пупырев) и зарубежными авторами (W.Quine, Mc.Cluskey, V. Agarwal, R.K. Brayton, S.Yang, M.Wilkes, M.Rawski, J.Hartmanis, R.Stearns, B.W.Johnson) и др.

Структурная организация автоматов управления за все годы исследований до настоящего времени оставалась неизменной (автоматы Мура, Мили и их комбинации). Сложность реализации автоматов управления определяется необходимостью применения в их структуре комбинационных схем с большим числом переменных $n = m+q$. Здесь m –разрядность кода состояний автомата ($m \leq 8$), q – число входных логических переменных ($q \sim 16-24$ для сложных автоматов). Научные методы синтеза связаны с задачами минимизации систем булевых функций и их декомпозицией на блоки с меньшим числом переменных.

Теоретические исследования и конструктивные подходы к синтезу управляющих автоматов достаточно подробно рассмотрены в работах В.В. и Вл.В. Сапожниковых.²

Во второй главе рассматриваются вопросы анализа и структурного синтеза автоматов управления сложных технических систем (СТС). Автоматы Мура реализуются с использованием комбинационной схемы переходов на ПЛМ или ПЗУ с объемом $V \leq m2^{m+q}$. Объем ПЗУ используется для оценки сложности комбинационной схемы УА. Реализация всего УА на ПЛИС или с применением ПЛМ не рассматривается, т.к. относится к этапу функционально-электрического проектирования, который соискателем не исследуется.

В диссертационной работе проведены теоретические исследования и предложена методика структурного синтеза управляющих автоматов, основанная на следующих преобразованиях операторной схемы алгоритма (ОСА):

1. Если в ОСА между логическими операторами α_i и $\alpha_j \in \{\alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_q\}$ нет операторов действия $A_1 A_2 \dots A_k$, то вводится пустой оператор A_0 .
 $\downarrow^1 A_i \alpha_1 \uparrow^1 \alpha_2 \uparrow^2 A_j \downarrow^2 A_r \rightarrow \uparrow^1 A_i \alpha_1 \uparrow^1 A_0 \alpha_2 \uparrow^2 A_j \downarrow^2 A_r; (\rightarrow - \text{знак замены})$

² Труды по теории синтеза и диагноза конечных автоматов и релейных устройств /под ред. В.В. Сапожникова, Вл.В. Сапожникова.- СПб: «Элмор», 2009.- 900с.

2. Вводится пустой оператор перед логическим условием α_j , если к нему передается управление от двух и более операторов.

$$(A_i \wedge A_j) \alpha \uparrow^1 A_r \downarrow^1 A_5 \rightarrow (A_i \wedge A_j) \alpha \uparrow^1 A_2 \downarrow^1 A_5$$

3. Операторная схема также приводится к однородному виду за счет ввода пустых операторов, если число входов логического или оператора действия более двух.

$$(A_1 \wedge A_2 \wedge A_3) A_4 \rightarrow (A_1 \wedge A_2) A_0 \quad \left. \begin{array}{l} A_3 \\ \end{array} \right\} A_4$$

4. Осуществляется разметка с нумерацией алгоритмов действия для всех непрерывных участков алгоритма, для которых $a(t+1) = \tilde{\alpha}_j a(t) + 1$,

Здесь $a(t)$ и $a(t+1)$ - номера (коды) предыдущего и последующих состояний.

5. Строится граф переходов автомата, в котором могут быть только два типа связей от $a(t)$ к $a(t+1)$: безусловные ($\alpha_0 = 1$) и условные, но по значению только одного $\alpha_j \in \{\alpha\}$.

Выполнение пунктов 1-5 на этапе абстрактного синтеза автомата управления позволяет определить правило функционирования автомата нового типа, предложенного в диссертации, по формулам (1).

$$a(t+1) = F_1(\alpha_j a(t)); \quad A = F_2(a(t+1)); \quad \alpha_j = F_3 a(t+1) \quad (1)$$

Для проверки методики взят алгоритм обработки протокола обмена данными, ориентированный авторами работы³ на реализацию конечным автоматом:

$$\begin{array}{l} \downarrow^0 \downarrow^7 \downarrow^8 A_0 \alpha_1 \uparrow^1 \alpha_2 \uparrow^2 \alpha_3 \uparrow^3 \alpha_4 \uparrow^4 \alpha_5 \uparrow^5 \alpha_0 \uparrow^6 A_k. \quad \downarrow^6 A_6 \alpha_0 \uparrow^0; \\ \downarrow^1 \alpha_7 \uparrow^7 A_1 \alpha_0 \uparrow^0; \quad \downarrow^2 \bar{\alpha}_8 \uparrow^8 A_2 \alpha_0 \uparrow^0; \quad \downarrow^3 A_3 \alpha_0; \quad \downarrow^4 A_4 \alpha_0 \uparrow^0; \quad \uparrow^5 \alpha_0 \uparrow^0; \end{array}$$

Предложенный метод синтеза отличается от известных подходов тем, что перед переходом от ОСА к графу переходов, преобразуется сама структура ОСА за счет ввода пустых операторов в соответствующие ветви алгоритма. При этом ввод пустых операторов не нарушает причинно-следственных и логических связей операторов, но позволяет на каждом такте работы автомата проверять значение только одного логического условия.

На основании предложенной методики структурного синтеза предложена новая оригинальная структурная организация УА (рисунок 1).

Анализ УА по пятикомпонентной структурной модели (ФИЛАУ) позволяет выделить следующие подсистемы в автомате нового типа: Φ – дешифратор (DC) кода $y_1 \dots y_m$, схема (F_2) формирования выходных ($A_1 \dots A_k$) команд и схема (F_1) определения кода $a(t+1)$ - $y_1 \dots y_m$ по коду $a(t)$ - $x_1 \dots x_m$ и значению $\alpha_j \in \{\alpha\}$; И – регистры памяти состояний с парафазной передачей информации; Л – регистр логических условий $\alpha_1 \dots \alpha_q$ от датчиков объекта управления (ОУ) и мультиплексор (М) с RS - триггером фиксации значения $\alpha_j \in \{\alpha\}$;

³ К. Хадлстон. Проектирование интеллектуальных датчиков с помощью Microchip ds PIC. Киев: «МК – Пресс», 2008, стр.164-168.

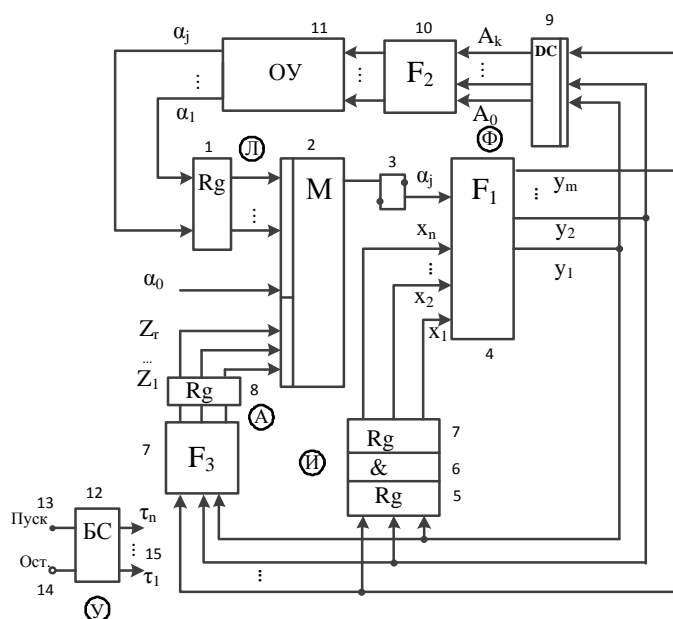


Рисунок 1. Структурная организация УА с выбором логического условия по коду состояния

A – комбинационная схема F_3 адресации мультиплексора (M) с регистром кода адреса $\{z\}$; Y – блок синхронизации (БС), формирующий сигналы $\tau_1(t) \wedge \tau_2(t) \wedge \tau_3(t) \wedge \tau_4(t) = \emptyset$ для синхронного режима УА. Для асинхронного режима формируется специальная последовательность импульсов, зависящая от внешних логических условий окончания подпрограмм.

При непосредственной структурной интерпретации формул (1) система булевых функций F_1 реализуется на элементах алгебры логики, ПЗУ, ПЛМ или ПЛИС, а F_2 с помощью дешифратора и элементов «ИЛИ», если в схеме алгоритма операторы действия повторяются. Схема, реализующая функции F_3 определяет адрес мультиплексора для выбора единственного $\alpha_j \in \{\alpha\}$ по коду состояния автомата $a(t+1)$. Структурная организация предложенного в диссертации автомата является оригинальной и защищена патентом на полезную модель.

Автоматы с выбором единственного логического условия требуют меньшего объема оборудования комбинационных схем. Оценка затрат на реализацию комбинационных схем производится через расчет объема ПЗУ.

Для автоматов Мура $V = m2^{m+q}$, а для нового автомата объем (W) определяется как $W = m2^{m+1}$. Выигрыш в объеме составляет $Q = V/W = 2^{q-1}$.

Количественная сравнительная оценка производится по введенной соискателем инженерной классификации автоматов на сверхпростые (СП), простые (ПА), средней (СА) сложности, автоматы сложные (АС), высокой сложности (ВС), а также особо сложные (ОС) и ультра сложные автоматы (УС).

В таблице 1 дана сравнительная оценка для всех типов автоматов при реальной разрядности (m_p) типовых БИС ПЗУ.

Таблица 1.

Сравнительный анализ УА

Тип	m	q	m+q	m+1	m _p	V(бит)	W(бит)	Q(раз)
СП	3	2	5	4	4	100	48	2
ПА	4	5	9	5	4	8000	128	62
СА	5	8	13	6	8	65000	512	128
АС	6	11	17	7	8	1М	1024	1000
ВС	7	14	21	8	8	16 М	2048	$8 \cdot 10^3$
ОС	8	17	25	9	8	270 М	4096	$67 \cdot 10^3$
УС	9	20	29	10	8+4	34 Г	$260 \cdot 10^3$	$130 \cdot 10^3$

При функциональной реализации УА на ПЛМ или ПЛИС реальное снижение аппаратных затрат на комбинационную схему переходов будет значительно ниже чем оценка на ПЗУ. Однако оценка через ПЗУ является точной и применима для УА с перестраиваемой программой и ПЗУ с электрическим или ультрафиолетовым стиранием информации.

Для УА с фиксированной программой и реализацией систем булевых функций на элементах логики произведена оценка по сложности представления дизъюнктивных нормальных форм в предположении, что для каждого разряда выходных функций $\{y\}$ используется одинаковое (среднее) количество конъюнкций. Величина среднего значения количества конъюнкций зависит от типа автомата. Показано, что для ВС автоматов в УА нового типа сложность комбинационной схемы снижается \sim в 3 раза.

По объему комбинационных схем для реализации функций переходов новая методика синтеза не имеет конкурентных вариантов в ряду известных методик, основанных на минимизации и декомпозиции систем булевых функций. В новой методике синтеза отсутствует проблема минимизации систем булевых функций, т.к. даже для ВС и ОС автоматов количество входных переменных ($n=m+1$) меньше или равно 8.

Соискателем предложены четыре варианта структурной организации УА.

Вариант 1. Для нового типа автоматов быстродействие снижается в k раз. $k = (N_1 + N_2)/N_1$, здесь N_1 - число операторов действия на самом длинном пути, N_2 - число введенных пустых операторов на этом же пути. Для практических схем УА $k = 1.2 - 1.5$. Вводятся схемы распознавания пустых операторов для прерывания выдержки времени по периоду (T) следования сигналов синхронизации. Такой УА не снижает своего быстродействия за счет ввода пустых операторов.

Вариант 2. Комбинационная схема переходов F_1 представлена в виде двух массивов F_1^0 и F_1^1 , размещенных в независимых зонах ОЗУ, ПЗУ. Тогда $a(t+1) = C_1(\overline{\alpha_j}) F_1^0(x_1 \dots x_m) + C_2(\alpha_j) F_1^1(x_1 \dots x_m)$. Здесь $C_1(\overline{\alpha_j})$ и $C_2(\alpha_j)$ - импульсы синхронизации для считывания массивов F_1^0 и F_1^1 соответственно. В этом случае адресом ПЗУ для этих массивов будет только код состояния $a(t) - x_1 \dots x_m$ без значения $\alpha_j \in \{\alpha\}$.

Вариант 3. Если $q \approx (1/3 \div 1/2) 2^r$, где r – разрядность адреса ($z_1 \dots z_r$) мультиплексора, то нет необходимости использовать полный типовой мультиплексор, т.к. не все 2^r комбинаций адресуются схемой F_3 . В этом случае создается единая схема (коммутатор), объединяющая функции схемы адресации F_3 и функции неполного мультиплексора. На такую реализацию получен патент на полезную модель.

Вариант 4. Существо предложенного метода синтеза сводится к тому, что альтернативное вычисление кода $a(t+1)$ производится не по полному коду конкатенации $(\alpha_j x_1 x_2 \dots x_m)$, а по частям единого кода, т.е. через $(\alpha_j x_1 x_2 \dots x_p)$ и $(\alpha_j x_{p+1} \dots x_m)$. По первой части с учетом α_j определяются младшие разряды кода $a(t+1)$, т.е. $(y_1 \dots y_p)$, а по второй – старшие разряды, т.е. $(y_m \dots y_{p+1})$. Поскольку проведено разделение переменных кода $\{x\}$ на две части, то однозначное соответствие младших $\{y\}_p$ разрядов по коду $\alpha_j \{x\}_p$ не может быть достигнуто, т.к. возникают противоречия без учета старших разрядов $\{x\}_m$. Для снятия этих противоречий предложено ввести в каждую часть $\{x\}_p$ и $\{x\}_m$, кроме α_j , еще по одному дополнительному разряду δ_1 и δ_2 , значение которых определяется в соответствии с кодами строк таблицы переходов $\alpha_j a(t) \rightarrow a(t+1)$. Таким образом общая комбинационная схема F_1 , определяющая код состояния $a(t+1) = F_1(\alpha_j x_1 x_2 \dots x_m)$ делится на две подсхемы для младших $a(t+1)_p = F_1^1(\delta_1 \alpha_j x_1 x_2 \dots x_p)$ и старших разрядов $a(t+1)_m = F_1^2(\delta_2 \alpha_j x_{p+1} \dots x_m)$. Причем части кодов $(x_1 x_2 \dots x_p)$ и $(x_{p+1} \dots x_m)$ могут «перекрываться» одним разрядом p , если значение m нечетно.

Предложенный метод реализации УА возможен только для автоматов нового типа и не применим в классических УА Мура.

Новый метод синтеза УА, предложенный в диссертации полностью применим и для автоматов с формированием команд управления по фронту сигналов синхронизации (аналог автоматов Мили).

Также как и в типовых автоматах Мили в автоматах нового типа команды $A_1 \dots A_k$ формируются по фронту синхросигналов (τ). Для этого необходимо наличие двух комбинационных схем, реализующих уравнения (2):

$$a(t+1) = F_1(\alpha_j x_1 x_2 \dots x_m); \quad A(t+1) = F_2(\alpha_j x_1 x_2 \dots x_m). \quad (2)$$

Предложена оригинальная реализация комбинационных схем F_1 и F_2 с выделением только тех переходов, которым соответствует опрос по α_j или $\bar{\alpha}_j$. Для этого в структуру комбинационных схем введен дешифратор (DC) и шифратор (CD). На УА Мили получен патент на полезную модель.

Новые автоматы с правилом формирования команд по Муру и Мили будут отличаться в основном способом синхронизации. Этот факт свидетельствует еще об одном принципиальном преимуществе предложенной методики синтеза автоматов управления.

В третьей главе дан краткий анализ принципов структурной организации комплексных автоматов: иерархичность, композиция, декомпозиция, усложнение подсистем, однородность, недетерминированность, ассоциативность, параллелизм. В диссертации исследуется структурная

организация УА только с первыми четырьмя принципами. Клеточные, вероятностные, ассоциативные, неинициальные и параллельные автоматы не рассматриваются.

В известных структурах снижение сложности УА достигается в основном за счет использования метода декомпозиции. На сегодня декомпозиция УА сводится к наукоемкой задаче выделения минимального числа подграфов в графе переходов. Известен также метод перехода к декомпозиции самих ГСА, что дает возможность снизить затраты в 1,5 - 1,7 раза. Эффективность этих методов ограничена, т.к. в методах используется структурная организация УА Мура.

В диссертации предложены новые методы синтеза комплексных автоматов. Наиболее простым вариантом является УА, в котором в качестве памяти состояний $a(t)$ используется не регистр, а счетчик и комбинационная схема F_1 , разделенная на две схемы F_1^0 и F_1^1 по значению α_j и $\bar{\alpha}_j$ (рисунок 2).

В новом автомате со счетчиком дополнительно снижается объем комбинационной схемы \sim в 2 раза по сравнению с предложенным ранее в диссертации автоматом (рисунок 1). Точная оценка зависит от типа ГСА и может быть произведена только после этапа функционального синтеза, который в диссертации не исследуется.

При использовании метода декомпозиции для УА нового типа необходимо учитывать затраты оборудования на обе схемы $F_1(\alpha_j x_1 x_2 \dots x_m)$ и $F_3(y_1 y_2 \dots y_m)$ (Ф) и (А) подсистем. Используя принцип дихотомий необходимо сравнивать общие затраты оборудования для предыдущего $R(i-1)$ и последующего $R(i)$ шага декомпозиции. Значения $R(i)$ определяются по формуле: $R(i) = F_1(i) + F_3(i) + P(i)$. Здесь $P(i)$ – объем вновь вводимого оборудования на каждом шаге декомпозиции. Для $i=0$, $P(0) = 0$. Декомпозиция прекращается, если $R(i) \geq R(i-1)$. На конкретных примерах показано, что для УА нового типа декомпозиция целесообразна для ВС, ОС и УС автоматов.

На первых шагах декомпозиции рассматривается вариант разделения ГСА на 3 части. Предложенный в диссертации метод синтеза УА состоит из нескольких этапов, который назван декомпозиционно - композиционным:

В диссертации рассматривается УА для БИС ПЗУ со стиранием информации ($m=6$, $q=12$). Значения m и q по данному методу снижены до уровня $m=4$, $q=4$, число выходов дешифратора (ДС) снижено с 64 до 16. В этом случае в схеме F_1 вместо 60 реализуется 17 переходов.

При реализации многопрограммных автоматов с алгоритмами $Z_1 Z_2 \dots Z_p$ в диссертационной работе предлагается сохранить структурную организацию основного автомата с выбором $\alpha_j \in \{\alpha\}$ по коду $a(t)$. Предложено переключать по коду программы (Z_i) зоны памяти ПЗУ схемы переходов, а также производить выбор соответствующей схемы формирования адреса мультиплексора и опрашивать различные зоны ПЗУ.

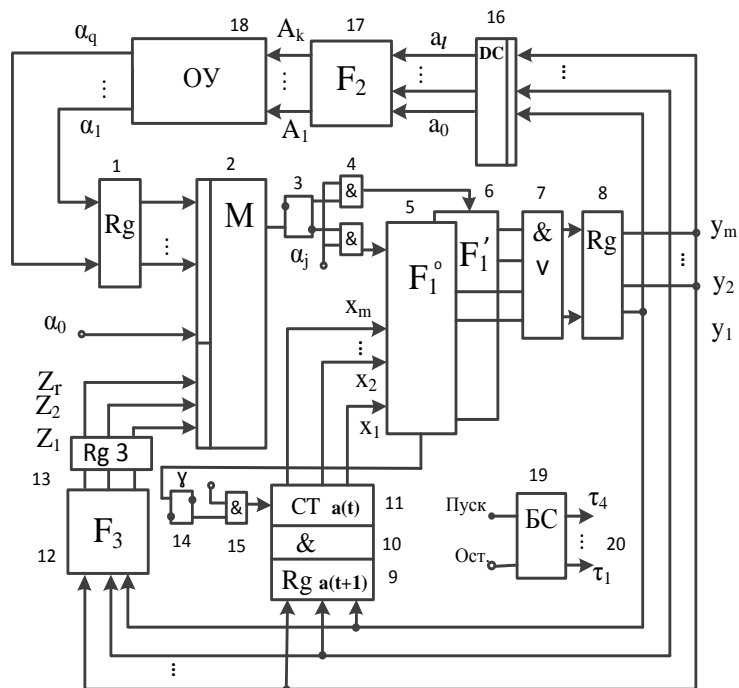


Рисунок 2. Управляющий автомат со счетчиком и разделенными схемами переходов

Во взаимодействующих автоматах из одного ведущего УА осуществляется обращение к другим УА с последующим возвращением к ведущему УА. Метод синтеза такого комплекса взаимодействующих автоматов с ориентацией на классические автоматы Мили предложен проф. А.В. Плотниковым.⁴

В диссертационной работе разработана модификация этого метода синтеза. Сохраняется сквозная нумерация состояний и стековая память, но число входных логических переменных не увеличивается и остаётся равным q , т.к. соседние α_i и α_j разделены пустыми операторами. В этом случае одно и то же $\alpha_j \in \{\alpha\}$, используемое в разных алгоритмах, будет выбираться при разных состояниях автомата. В этом случае нет необходимости в коммутаторе, т.к. система взаимодействующих автоматов сводится к синтезу одного УА с переключением на асинхронный режим работы при обращении от одного автомата к другому.

Предлагаемый в диссертации метод синтеза обеспечивает снижение сложности комбинационных схем на 2-3 порядка при оценке через ПЗУ (в зависимости от сложности каждой ГСА).

В настоящее время развиваются методы сближения аппаратных и программных средств, которые используются в открытых системах на основе микропроцессорной техники. Основная задача - это создание эффективных методов программной реализации управляющих алгоритмов и автоматов.

⁴ Плотников А.В., Баркалов А.А., Стародубцев К.Е. Микропрограммные устройства управления // Управляющие системы и машины. 1987, №4. С.38-41.

Применявшиеся ранее методы эмуляции и непосредственного переложения ГСА в программу на ассемблере приводят к получению очень сложных и медленно действующих программ. Поэтому в последнее время широко используются UML подход и автоматное программирование с ориентацией на классические структуры автоматов Мура и Мили.

В диссертационной работе предложен новый метод, названный структурно-автоматным программированием. Существо метода структурно-автоматного программирования сводится к следующему:

1. За основу берется структурная организация автоматов с выбором $\alpha_j \in \{\alpha\}$ по коду $a(t)$ и универсальным счетчиком в качестве памяти.

2. По заданной ГСА производится абстрактный синтез автомата с новой структурной организацией и определяется табличное задание функции:

$$\begin{aligned} a(t+1) &= F_1(\alpha_j x_1 x_2 \dots x_m) & A(t) &= F_2(x_1 x_2 \dots x_m) \\ j &= F_3(x_1 x_2 \dots x_m) & \gamma &= \bigvee_{r=0}^k (a_r(t)) \end{aligned} \quad (3)$$

где γ – признак необходимости использования счетчика, r – номера состояний автомата, $a_r(t)$ – коды состояний.

3. Составляется таблица соответствия номеров логических условий кодам состояния автомата.

4. Составляется ведущая программа для микроконтроллера, осуществляющая опрос $F_2 \rightarrow F_1 \rightarrow F_3$ для обеспечения переходов и выдачи команд управления (ОУ). Некоторые команды действия могут являться обращением к вычислительным процедурам микроконтроллера. Конкретный учет специфики алгоритма связан лишь с определением содержимого таблиц F_1, F_2, F_3 . Алгоритм ведущей программы представлен в форме ЛСА.

$$A_1 \downarrow^2 A_2 A_3 A_4 \bar{\gamma} \uparrow^3 A_5 A_{10} \downarrow^3 A_7 \downarrow^6 \bar{\alpha}_1 \uparrow^6 A_8 \alpha_2 \uparrow^2 A_{11} A_k.$$

Семантика операторов раскрыта в таблице 2. Алгоритм является общим и не зависит от реального приложения или типа ГСА. Метод структурно-автоматного программирования позволяет создавать ведущую программу как для синхронных процессоров управления при $T_i(A) = T_j(A)$, так и для асинхронных, для которых $T_i(A) \neq T_j(A)$. Здесь $T_i(A)$ – время выполнения i – того оператора $A_i \in \{A\}$.

Таблица 2.

Семантика операторов структурного программирования

A_i	Содержание	A_i	Содержание
1	Служебн. (инд.)	7	$\langle Rg2 \rangle \rightarrow DC$
2	$\langle 0 \rangle \rightarrow CT, Rg 1-4, Tr 1,2$	8	Пуск $A_i \in \{A\}$
3	$\langle Rg1,3 \rangle \rightarrow M; \langle M \rangle \rightarrow Tr 1$	9	Пустой оператор
4	$\langle F_1 \rangle \rightarrow Rg 2$	10	$\langle ОУ \rangle \rightarrow Rg 1$
5	$\langle F_3 \rangle \rightarrow Rg 4; \langle Rg2 \rangle \rightarrow Rg3$	11	Пустой оператор
6	$\langle CT \rangle = \langle CT \rangle + 1$	12	$\langle Rg3 \rangle \rightarrow CT$

$$\alpha_1 = \gamma = 1 \rightarrow \langle CT \rangle = \langle CT \rangle + 1$$

$$\alpha_2 = 1 \text{ окончание } A_i \in \{A\} \quad \alpha_3 = 1 \text{ признак возврата (е) к } a_0$$

По данной технологии были запрограммированы и проверены автоматы управления для практических применений, которые приведены в диссертации. По сравнению с методом автоматного программирования⁵, предложенным профессором А.А. Шалыто, разработанный метод структурно-автоматного программирования отличается предельной простотой и позволяет легко переходить от одного типа микроконтроллера к другому в разных системах с открытыми технологиями.

В четвертой главе рассмотрены вопросы синтеза автоматов управления с динамическим контролем правильности переходов во время функционирования.

Выделены три наиболее распространенных метода:

1. Резервирование комбинационных схем (включая самодвойственную организацию).

2. Использование помехозащищенных кодов, в том числе кодов с фиксированным числом единиц (kCn). Здесь k – количество единиц, n – разрядность кода.

3. Специальные структурные методы самоконтроля УА.

В диссертации предложены новые оригинальные методы синтеза самоконтролируемых автоматов во всех трех направлениях.

Предложен и развит метод, основанный на представлении выходного кода автомата конкатенацией (p) групп кодов, в каждой из которой только одна единица. В этом случае ошибка определяется выражением:

$$ERR = (\bar{a} + b + c)(a + \bar{b} + c)(a + b + \bar{c}), \text{ здесь } a, b, c - \text{ разряды в группе.}$$

Для уменьшения объема комбинационной схемы при переходе к $a(t)$ используется двоичный непозиционный код (ДНК) за счет преобразований $001 \rightarrow 00$, $010 \rightarrow 01$ и $100 \rightarrow 10$. В этом случае в ДНК в каждых двух соседних разрядах отсутствуют комбинации 11, что является дополнительным признаком контроля.

Контролируется основная комбинационная схема переходов, как по входу, так и по выходу. Не контролируется мультиплексор со схемой адресации и дешифратор кода состояния автомата. Структурная организация автомата оригинальна и защищена патентом на полезную модель. Такой код условно назван кодом pCn с переходом в двоичный непозиционный код (ДНК).

Предложено применить этот метод в УА нового типа с разделенными комбинационными схемами на младшие и старшие разряды.

Предложен специальный метод синтеза дублирующей комбинационной схемы F_1 с использованием половинных частей кода $a(t)$. При нечетном значении m половинное деление осуществляется с перекрытием одного разряда. К каждой из половин кода $a(t)$ добавляется дополнительный разряд (δ) и разряд α_j . Метод оригинален, а структура такого автомата запатентована.

Предложена оригинальная структурная организация автоматов с одной

⁵ Поликарпова Н., Шалыто А.А. Автоматное программирование. СПб: «Питер», 2009. – 176 с.

резервной комбинационной схемой переходов и добавленной третьей комбинационной схемой, осуществляющей обратное преобразование $\alpha_j y_1 y_2 \dots y_m$ в код $x_1 x_2 \dots x_m$. Метод позволяет не только осуществить контроль факта неисправности, но и произвести диагностику, т.е. принять решение - какая из дублирующих схем неисправна. По сравнению с известным способом мажоритарного резервирования предлагаемый метод позволяет синтезировать резервируемые автоматы более высокого быстродействия, т.к. не перебираются все варианты «2 из 3».

Для обеспечения высокой работоспособности УА при наличии отказов в комбинационных схемах предложено каждую из дублирующих схем представить в виде полусхем с синхронизацией по α и $\bar{\alpha}$, а схему обратного преобразования также дублировать с тем же принципом организации. Тогда УА может действовать за счет использования соответствующих исправных полусхем. Исправные полусхемы определяются методом сравнения результата дублирующей схемы (составленной из исправных частей) с кодом предыдущего состояния по схеме обратного преобразования, также восстановленной из исправных частей. УА такого типа сохраняют работоспособность при наличии потока отказов.

Предложенные методы могут использоваться только для новых типов УА, т.к. в них возможно однозначное обратное преобразование кодов.

В диссертации предложен оригинальный метод синтеза самоконтролируемых автоматов с использованием кодов Грея. Коды $a(t)$ и $a(t+1)$ также делятся приблизительно пополам (в зависимости от четности значения m). Для соседних вершин, не относящихся к счетчику, коды выбираются из таблиц Грея, но они определяются так, чтобы сумма по $\text{mod} 2$ p -младших разрядов $a(t)$ и $a(t+1)$ была равна 1. Если это условие не может быть выполнено при заданном номере вершины на длинном пути, то вводится промежуточная вершина. К старшим половинам разрядов $p+1, \dots, m$ этих кодов добавляется разряд с номером «0» в $a(t)$ и с номером $m+1$ к разрядам $a(t+1)$. Значения добавленных разрядов определяются так, чтобы сумма по $\text{mod} 2$ в старшей половине также была равна 1. Структурная схема УА оригинальна и отличается тем, что в ней используется минимальное количество встраиваемого оборудования для контроля, которое практически не снижает быстродействие автомата при самоконтроле.

Таким образом, для новой структурной организации автоматов управления предложены и разработаны соответствующие новые методы синтеза средств контроля с минимальными затратами встраиваемого оборудования и высоким быстродействием.

Комплексное использование предложенных методов и средств реализации представляют собой новую методологию синтеза УА принципиально отличающуюся от методологии проектирования на базе автоматов Мура и Мили. Эта методология представлена в виде последовательности этапов (рисунок 3).

Расшифровка операторов действия представлена в таблице 3.

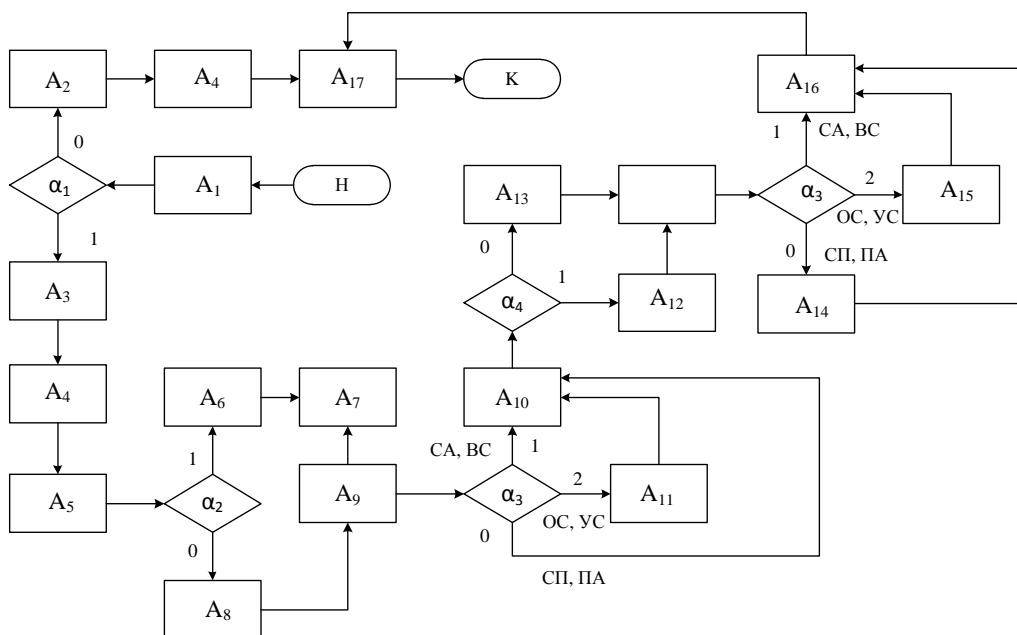


Рисунок 3. Последовательность проектирования УА

Методология проектирования самоконтролируемых управляющих автоматов сложных технических систем реального времени

Комплексное использование предложенных методов и средств реализации представляет собой новую методологию структурного синтеза УА принципиально отличающуюся от методологии проектирования на базе автоматов Мура и Мили.

Существо методологии сводится к следующему:

1. Все УА синтезируются как самоконтролируемые;
2. Заданная ГСА для УА модифицируется (МГСА) за счет ввода пустых операторов перед α_j (если у α_j имеется больше одного входа или имеется последовательность логических операторов α_j) и перед $A_i \in \{A\}$, если у A_i число входов больше двух;
3. По структуре МГСА УА относится к классу СП или к одной из трех групп УА: 0 – ПА, СА; 1- АС, ВС; 2 – ОС, УС;
4. УА класса СП синтезируются по структуре Мура;
5. Для УА второй (2) группы производится декомпозиция ГСА с целью отнесения декомпозированных УА к 0-ой или 1-ой группе;
6. В зависимости от классификации УА (1-ая или 2-ая группа) выбирается соответствующий вариант структурной организации и способа самоконтроля.

Таблица 3.

Процедуры (этапы) проектирования УА сложных технических систем реального времени.

A_i	Семантика	α_i	Семантика
1	Разработка ОСА	α_1	$q > 3$
2	Проектирование УА Мура	α_2	$N > 7$
3	Модификация ГСА	α_3	0 – УА малой и средней сложности 1 – Сложные УА и высокосложные 2 – Особосложные и ультрасложные УА
4	Переход к графу УА		
5	Выделение непрерывных путей с числом состояний N		
6	Память на счетчике		
7	Дополнительная модификация ГСА		
8	Память на регистрах	α_4	0 – нормальные условия эксплуатации 1 – экстремальные условия эксплуатации
9	Проектирование УА с мультиплексором		
10	Классификация УА		
11	Декомпозиция УА		
12	Мажоритарное резервирование с α и $\bar{\alpha}$		
13	Разделение F_1 на старшие и младшие разряды		
14	Корректирующие коды		
15	Мажоритарное резервирование		
16	Код Грея		
17	Функционально-электрический синтез		

Преимущества УА с использованием новой методологии.

- 1) Повышенный уровень надежности за счет уменьшения объема комбинационных схем в Q раз ($Q \geq 1/3 \cdot 2^q$; q – количество логических условий УА).
- 2) Эффективное использование счетчика с дополнительным уменьшением комбинационной схемы в 2-3 раза.
- 3) Новые способы повышения надежности УА, эффективно реализуемые только в предложенном УА.
- 4) Упрощение процедуры контроля и снижения сложности встроенного оборудования для самоконтроля УА.
- 5) Упрощение процедуры моделирования УА.
- 6) Возможность эффективной реализации УА как в аппаратном, так и в программном варианте для микроконтроллеров.
- 7) Упрощение процедуры перевода УА на новую ГСА за счет замены содержимого только трех зон памяти F_1, F_2, F_3 .
- 8) Существенное снижение энергопотребления УА.
- 9) Упрощение структурной организации взаимодействующих автоматов.

В пятой главе рассматриваются вопросы технической реализации спецпроцессоров и разработка устройств управления для различных отраслей промышленности.

Алгоритм 1. В задачах наведения по картам местности для управления беспилотными объектами, точного управления инструментом в станках с ЧПУ и др. определяются координаты эталонного изображения ($m \times n$) в поле неизвестного изображения ($M \times N$). Бинарное поле неизвестного изображения может формироваться электронно-оптическими, радиолокационными, гидроакустическими и др. средствами, с регистрацией и записью информации в ОЗУ в виде числовых матриц: неизвестного изображения ($M \times N$); эталонного изображения ($m \times n$) и участка неизвестного изображения ($2m \times n$), переносимого в стековую память.

Набор алгоритмов связан с реализацией следующих процедур:

1. Управление сканированием эталона в поле неизвестного;
2. Корреляционно-экстремальное сравнение эталона с участком неизвестного;
3. Смена текущего кадра неизвестного изображения с возможной заменой эталона.

В специальных информационно-измерительных системах определяются координаты известных (эталонных) изображений размером $m \times n$ в поле очередного кадра фотосъемки местности (неизвестное изображение) размером $M \times N$. Чаще всего $m = n = 8, 16, 32$ для $M=N=64, 256, 1024$ бит.

Структурная организация спецпроцессора содержит типовые Л, А – подсистемы, обеспечивающие изменения координат при сканировании. При корреляционно-экстремальном методе фиксируется максимальная сумма совпадающих пикселей и соответствующие координаты этого участка (i, j) в поле неизвестного изображения. Оригинальность, предложенного в диссертации спецпроцессора, определяется функциональной подсистемой (Ф) и алгоритмом управления для реализации процесса сканирования, корреляционно-экстремального анализа и принятия решений.

Функциональная подсистема организована из двух блоков магазинной памяти первого рода (стек) со встречным перемещением информации, соответствующей столбцам изображений ($1 \div n$). В первой стековой памяти с циклической перезаписью размещается информация об эталоне ($m \times n$), а во второй стековой памяти с односторонним сдвигом информация об участке неизвестного изображения размером $2m \times n$. Для двух «встречных» столбцов изображения ($1-n$) для каждой строк (m) находится функция равнозначности между битами эталона и неизвестного. Сумма по всем строкам выбранных столбцов в виде масштабируемого напряжения сравнивается с пороговым напряжением $U_{\text{пор}}$. Суммирование напряжений производится на аналоговых усилителях постоянного тока, т.к. уровень логической единицы соответствует $U = +5\text{В}$. Пороговое напряжение определяет допустимую степень корреляции. На суммирующем счетчике фиксируются результаты превышения порога для всех m столбцов неизвестного. Сравнивается текущее и предыдущее значения сумм с фиксацией максимального значения при текущих координатах.

Максимальное значение уровня корреляции по всему полю неизвестного дает возможность принять решение о наличии эталонного изображения в данной точке (i, j) траектории движения с использованием информационной подсистемы спецпроцессора (рисунок 4). Для спецпроцессора в диссертации разработана ГСА. Управление по ГСА реализуется двухуровневым методом. Граф переходов верхнего уровня представлен на рисунке 5. Расшифровка операторов действия соответствующих состояниям УА представлена в таблице 4, где обозначено: ПР «N» - обращение к «N» подпрограмме, ПК – признак окончания (end).

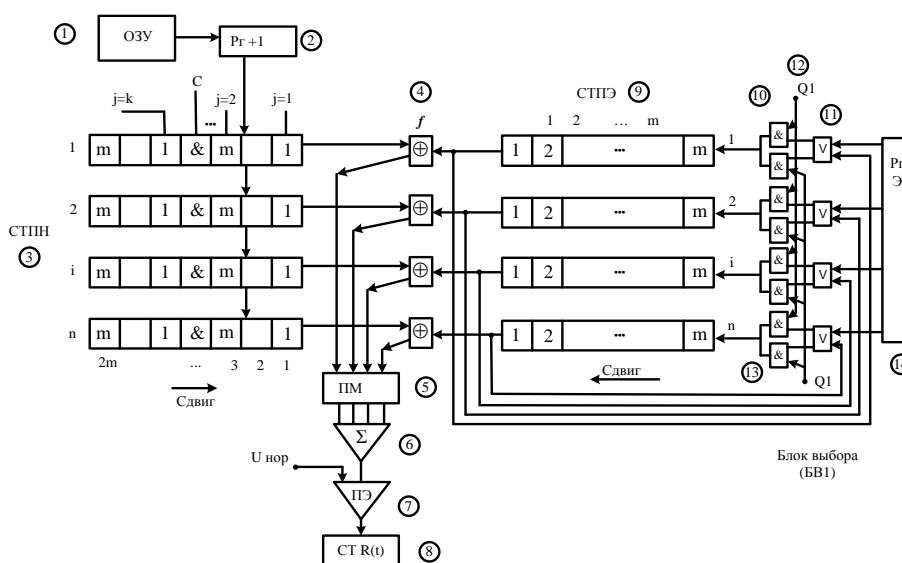


Рисунок 4. Функциональная схема спецпроцессора корреляционно-экстремальной системы навигации

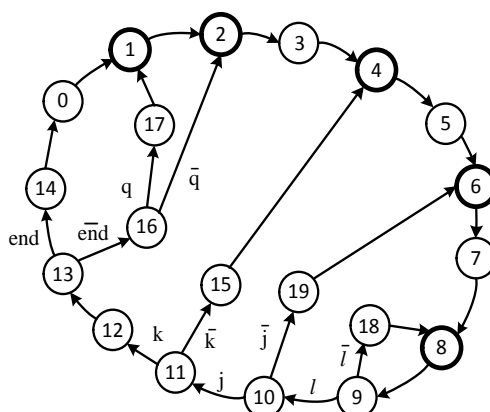


Рисунок 5. Граф переходов УА верхнего уровня управления спецпроцессором

Отмеченные состояния (1,2,4,6,8) на графе переходов соответствуют обращению к процедурам (а, б, в, г, д):

- а) $A_1 \downarrow^0 A_2 A_3 p \uparrow^1 A_5 \alpha_0 \uparrow^0$; $\uparrow^1 A_4 A_k$.
 б) $B_1 B_2 B_3 B_4 B_5 \downarrow^0 B_6 r \uparrow^1 B_7 B_8 \alpha_0 \uparrow^0$; $\downarrow^1 B_9 A_k$.

$$\begin{aligned}
\text{в) } C_1 C_2 \downarrow^0 \begin{Bmatrix} C_3 \\ C_4 \end{Bmatrix} C_5 r \uparrow^1 C_6 \alpha_0 \uparrow^0; & \quad \downarrow^1 C_7 C_8 A_k. \\
\text{г) } D_1 D_2 \downarrow^0 D_3 D_4 r \uparrow^1 D_7 \alpha_0 \uparrow^0; & \quad \downarrow^1 D_5 D_6 A_k. \\
\text{д) } H_1 H_2 H_3 \downarrow^0 H_4 i \uparrow^1 H_9 H_{10} \alpha_0 \uparrow^0; & \quad \downarrow^1 H_5 \alpha \uparrow^2 \downarrow^3 H_8 A_k. \quad \downarrow^2 H_6 H_7 \alpha_0 \uparrow^3;
\end{aligned}$$

Таблица 4.

Расшифровка состояний УА.

S	Содержание	S	Содержание	S	Содержание	S	Содержание
1	ПР «3»	11	$j = i+1$	6	$l = 0$	16	Пустой
2	ПР «0»	12	Пустой	7	$i = 0$	17	$q = q+1$
3	Нач.уст.	13	$k = k+1$	8	ПР «4»	18	Пустой
4	ПР «1»	14	Опрос ПК	9	Сдвиг СТП 1, 2 (6,7,8)	19	ПР «2»
5	$r = 0$	15	Запись	10	Пустой	0	Конец

УА верхнего уровня и УА процедур реализуются как единый автомат с общим числом состояний $N = 49$. По графу переходов определяются значения: $m = 6$, $q = 7$. Оригинальность структурной организации спецпроцессора обеспечила существенное повышение быстродействия определения координат эталона в поле неизвестного изображения очередного кадра (\approx в 250 раз по сравнению с прототипом) и снижение уровня сложности комбинационных схем УА в 512 раз.

Алгоритм 2. Защита конфиденциальной информации и исполняемого программного кода является одной из важнейших и актуальных задач для средств автоматизации управления сложными системами. Для криптографической защиты информации соискателем предложен алгоритм, состоящий из трех процедур:

1. Рассеивание информации с использованием секретных ключей. Секретные ключи представлены в виде двоичных чисел с равным числом «0» и «1», причем «1» могут быть расположены произвольно в коде порции кодируемой информации. Поступившая информация по коду ключа разделяется на два массива по признакам «0» и «1», биты которых записываются в отдельные регистры и переписываются в третий регистр как конкатенация информационных признаков первого и второго регистра.

2. Порция информации складывается по mod2 с кодом ключа, который находится в общем массиве секретных ключей, адрес которых определяется по предыдущему коду порции информации. В этом случае код порции информации определяет не только итоговый код, но и адрес секретного колюча.

3. Преобразованное по п. 1,2 сообщение $x(t)$ переводится из двоичного кода в полиадический код.

Спецпроцессор криптографической защиты информации с оригинальной структурной организацией основан на последовательной реализации трех алгоритмов, разработанных в диссертации:

1. Порция сообщения $X(t)$ представляется в виде конкатенации $C(t)D(t)$, где $C(t)$ и $D(t)$ – коды половинной разрядности $I = 1, 2, \dots, n/2$, разряды которых

определяются по правилу $c_i = x_i$ при $b_i = 1$; но при $b_i = 0$ значение $d_i = x_i$. Здесь В – двоичный секретный код разрядностью равной n .

2. Код $X(t+1) = X(t) \oplus R(X(t-1))$, где X – порции сообщения в моменты t , $t-1$, $t+1$ в виде n -разрядного двоичного кода, полученного по пункту 1. $R(X)$ – константа ПЗУ, считанная по адресу X , т.е. содержимое ПЗУ есть набор секретных констант.

3. Информация $X(t)$ после пункта 2 преобразуется по формуле $P = \sum_{i=0}^{n-1} P_i = a_{n-1}L_{n-1}L_{n-2} + \dots + a_3L_3L_2L_1 + \dots + a_2L_2L_1 + a_1L_1 + a_0$ или $P = a_mS_m + a_{m-1}S_{m-1} + \dots + a_2S_2 + a_0$. Здесь символом P обозначено полиадическое число, полученное с основаниями $L_1L_2\dots L_m$ и начальной константой a_0 . Здесь m – не разрядность константы, а количество групп, на которые делится n -разрядное число X . При $m=4$, $n=16$ каждая группа имеет $k=4$ разрядов. Каждой группе соответствует свое основание счисления $L_i \in L$. Причем обязательно $L > 2^k$, но в последовательности $L_1L_2\dots L_m$ соотношение между L_i и L_{i+1} может быть любым, т.е. $L_i \leq L_j$ или $L_i > L_j$. Алгоритм управления спецпроцессором с оригинальной структурной организацией представлен в форме ЛСА:

$$A_0 \downarrow A_1 \overset{1}{A_2} \downarrow A_3 \overset{2}{\alpha_1} \uparrow A_4 \overset{4}{\downarrow} A_5 \overset{5}{\alpha_2} \uparrow A_6 A_7 \overset{8}{\downarrow} A_8 A_9 \overset{6}{\alpha_3} \uparrow A_{10} A_{11} \overset{8}{\downarrow} A_{12} \overset{7}{\alpha_4} \uparrow A_{13} \overset{1}{\alpha_4} \uparrow A_k \cdot \overset{4}{\downarrow} A_{11} \overset{5}{\uparrow}; \overset{7}{\downarrow} A_{15} \overset{6}{\uparrow};$$

Для данного СПР автомат управления относится к классу простых УА. Объем оборудования А – подсистемы снижается в 16 раз. Уникальность СПР определяется оригинальностью его структурной организации и возможностью работы в системах реального времени с быстродействием в единицы микросекунд, с очень высоким уровнем криптостойкости, недостижимым для известных программных и аппаратных средств криптозащиты.

Алгоритм 3. Для точного и сверхбыстрого разворота платформы мехатронной системы на заданный угол в пределах $\pm 90^\circ$ используются реактивные гидро - или пневмоприводы. Специфика управления такими системами заключается в том, что платформа должна подойти к заданному углу практически с нулевой скоростью, несмотря на высокую начальную скорость разворота. Алгоритм управления задается в виде последовательности действий:

1. Если заданный угол разворота меньше определенного минимального значения, то управление реализуется в релейном режиме кратковременными импульсами воздействия;
2. Включается разгоняющая реактивная пара с отключением ее по значению текущего угла и угловой скорости движения;
3. Осуществляется движение по инерции с достигнутой скоростью при отсечке двигателей разгоняющей пары;
4. Включение тормозящей пары;
5. Производится отключение тормозящей пары с проверкой условий п.2;
6. Осуществляется режим удержания платформы на заданной отметке с заданной точностью.

В диссертации разработан оригинальный СПР для управления быстрым разворотом платформы с реактивным пневмоприводом. Алгоритм содержит 38 операторов действия с проверкой 9 логических условий. Для автомата Мура $V = 256$ кбит, а для автомата нового типа со счетчиком в качестве памяти $W = 8$ кбит. Объем ПЗУ сокращается в 32 раза.

Алгоритм 4. Оснащение нефтеперекачивающих станций современными микропроцессорными системами существенно снижает нагрузки на трубопроводы при остановках магистральных насосных агрегатов. Скорость роста давления на входе перекачивающей станции (ПС) определяется временем остановки насосных агрегатов и достигает 0.1-0.3 МПа/с. При такой высокой скорости роста давления образуется крутая волна повышенного давления, распространяющаяся со скоростью звука в направлении предшествующей станции. К моменту прихода крутой волны к расположенной выше по потоку нефти насосной станции на большей части длины линейного участка трубопровода давление успевает достигнуть максимального уровня. Сглаживание волны давления достигается за счет частичного сброса нефти в сбросной резервуар через соответствующие клапаны.

Микропроцессорные системы автоматизированного управления имеют трёхуровневую организацию. Верхний уровень системы автоматизации включает в себя АРМ оператора и служит для мониторинга и оперативного управления технологическими процессами. Алгоритмы среднего уровня обеспечивают закрытие задвижек, автоматическое включение насосов откачки, автоматический ввод резерва насосов откачки и вытяжных вентиляторов.

В диссертационной работе предложен ряд новых процедур управления, причем каждая из процедур в общем алгоритме управления состоит из 3-4х операторов действия с проверкой 1-2х логических условий.

Предложенные доработки алгоритмов позволяют повысить надежность рассматриваемых систем автоматики до уровня более технологичных систем с четырехуровневым контролем объемов нефти в резервуарах, позволяющих избежать отключения НПС при отказах.

Граф переходов управляющего автомата, полученный по доработанному диссертантом алгоритму управления, содержит 40 состояний ($m=6$) при числе логических условий $q = 10$. Для УА Мура $V = 256$ кб, для новой структурной организации автомата управления при использовании универсального счетчика $W = 1$ кб.

Алгоритм 5. Разработано устройство управления турбомеханизмом для генерации горячей струи воздуха (на основе эффекта Ранка) совместно с ультразвуковым воздействием. Такой механизм используется в промышленности для очистки поверхностей от лаковых покрытий, масла и др., а также для очистки стрелок и перегонов на железнодорожном транспорте от слежавшегося снега и льда. Алгоритм содержит более 40 операторов действия ($m=6$) с 9 логическими условиями. Приведены два варианта реализации: в виде единого УА с памятью на счетчике и в виде двух взаимодействующих

автоматов, полученных за счет декомпозиции графа переходов. Первый вариант требует меньших затрат оборудования. Для автомата Мура $V = 128\text{Мб}$, а для нового автомата $W = 1\text{кб}$. В диссертации приведены листинги программ реализации ГСА методом структурно-автоматного программирования.

Алгоритм 6. В области информационно-измерительной техники для обработки радиолокационных и оптических изображений на первом этапе выделяются однородные участки на подстилающей поверхности, которые могут быть в дальнейшем использованы для опознавания образов. Каждая строка радиолокационного изображения формирователя изображения представлена дискретной последовательностью цифровых кодов элементов изображения, соответствующих яркости радиолокационного изображения облучаемой поверхности, значение каждого из которых определяется удельной эффективной поверхностью рассеяния W , соответствующего ему облучаемого участка местности.

Для восьми различных типов участков подстилающей поверхности, в известных устройствах (прототип) потребуется 16 ПЗУ, а при 16 типах необходимо 32 ПЗУ.

Тогда как в разработанном диссертантом СПР независимо от количества участков, всегда используется три ПЗУ. Для УА нового типа со счетчиком ($m = 6$, $q = 7$) объем комбинационных схем по сравнению с УА Мура, уменьшается в 128 раз.

Рассмотрены также вопросы синтеза спецпроцессоров и УА нового типа для управления оригинальным медицинским прибором «Мультимед», подсистемами ж.д. транспорта для управления автоблокировкой и автомобильно-железнодорожным переездом; управление неординарным коммутатором.

Рассмотренные в диссертационной работе практические приложения управляющих устройств спецпроцессоров для различных технологических процессов и сложных технических систем подтверждает высокую эффективность предложенных научных методов структурного синтеза автоматов, составляющих основу методологии проектирования управляющих подсистем спецпроцессоров.

Заключение и основные результаты диссертации

Основным научным результатом диссертационной работы является решение крупной научно-технической проблемы, имеющей важное народно-хозяйственное значение в области разработки систем управления сложными техническими системами и технологическими процессами, а именно создание метода структурного синтеза аппаратно и программно реализуемых управляющих автоматов спецпроцессоров информационно-управляющих систем реального времени.

Разработаны новые методы анализа и синтеза управляющих автоматов, включая синтез взаимодействующих и самоконтролируемых автоматов. Комплекс методов в совокупности составляет основу методологии проектирования управляющих автоматов нового типа – автоматов с выбором одного логического условия из всего множества логических переменных, отличающихся значительным снижением затрат оборудования, энергопотребления и высоким уровнем надежности. Управляющие автоматы нового типа могут входить в состав спецпроцессоров, вычислительных комплексов, информационно - измерительных систем, сверхбольших микроэлектронных интегральных схем и/или иметь самостоятельное значение.

В диссертационной работе получены следующие результаты:

1. Выполнен системный анализ методов и средств синтеза спецпроцессоров и управляющих устройств. Показано, что спецпроцессор представляется в виде функциональной (Ф), информационной (И), логической (Л), адресной (А) и управляющей (У) подсистем. Управляющая подсистема сама может быть представлена моделью ФИЛАУ.

2. Разработан новый метод структурного синтеза управляющих автоматов по заданной операторной схеме алгоритма, основанный на введении пустых операторов для разделения логических условий, если между ними нет операторов действия, а так же если к ним передается управление от нескольких операторов. Предложенный метод применим для синтеза автоматов с любым числом логических условий q при разрядности (m) кода состояний. Метод эффективен для различного уровня сложности управляющих автоматов.

3. На основании предложенного метода синтеза разработана оригинальная структурная организация управляющих автоматов с выбором одного логического условия α_j по коду состояния автомата $a(t)$ через мультиплексор с импульсно-кодовой организацией памяти и дополнительной комбинационной схемой определения кода адреса логического условия. Новый тип автомата отличается снижением объема памяти ПЗУ, требующегося для реализации комбинационных схем в 2^{q-1} раз по сравнению с известным вариантом УА Мура.

4. Предложены варианты реализации УА нового типа, позволяющие дополнительно снизить объем ПЗУ в 2-3 раза в УА, спроектированными по новой методике. Разработаны УА с разделенной комбинационной схемой переходов по значению логического условия, при независимой реализации комбинационных схем переходов для младших и старших разрядов.

5. Рассмотрены модификации иерархических и взаимосвязанных автоматов. Предложен метод декомпозиции ГСА, позволяющий создать единый многорежимный УА с сокращенной разрядностью памяти, с более простым дешифратором и переключением режимов при динамическом функционировании.

6. Предложены новые методы динамического контроля УА:

а) Модификация кода с фиксированным числом единиц (kCn), который преобразован в код pCn , где p – число трехразрядных групп в выходном коде комбинационной схемы переходов.

б) Модификация метода дублирования за счет представления комбинационной схемы УА двумя схемами половинной разрядности ($m/2$) каждая.

в) Новый метод мажоритарного резервирования (троирования) за счет использования третьей схемы не прямого, а обратного преобразования кода состояния $a(t+1)$ к коду состояния $a(t)$.

7. Предложен оригинальный метод динамического контроля УА с памятью на счетчике Грея, отличающийся тем, что сравнение кодов $a(t)$ и $a(t+1)$ ведется раздельно схемами половинной разрядности.

8. Предложен новый метод структурно-автоматного программирования, основанный на использовании структурной модели автоматов нового типа. Ведущая программа, управляющая обращениями к зонам памяти, составляется один раз и не меняется для любых схем алгоритмов. Предлагаемый метод моделирования позволяет создавать простые и эффективные программы для информационно-управляющих систем реального времени.

9. Методы 1-8 определяют основы новой методологии проектирования УА сложных технических систем и технологических процессов. Новая методология проектирования управляющих автоматов спецпроцессоров сложных технических систем реального времени представлена в виде ГСА.

10. Разработаны оригинальные спецпроцессоры с УА нового типа для криптографической защиты информации, корреляционно-экстремальной навигации, классификации типов подстилающей поверхности радиолокационного зондирования местности, управления реактивным пневмоприводом, управления подсистемами транспортной безопасности, управления медицинским прибором.

Дальнейшим развитием исследований может быть решение задач функционального и электрического синтеза управляющих автоматов нового типа, а так же синтез адаптивных систем автоматического управления и регулирования с использованием нечеткой логики и нейронных сетей с аппаратно-программной перестройкой их структурной организации на базе предложенной в диссертации методологии проектирования управляющих автоматов.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монография

Мухопад, А.Ю. Теория управляющих автоматов технических систем реального времени / А.Ю. Мухопад.- Новосибирск: Наука, 2015. – 176с.

Список публикаций в журналах из списка ВАК

1. Мухопад, А.Ю. Контроль и диагностика автоматов управления / А.Ю. Мухопад, Т.С. Бадмаева и др. // Журнал «Современные технологии. Системный анализ. Моделирование». – Иркутск: ИрГУПС, 2005.– Вып.5.- С.78-81.
2. Мухопад, А.Ю. Встроенный контроль в автоматах управления / А.Ю. Мухопад, Т.С. Бадмаева // Вестник Иркутского гос. технического университета. – Иркутск: ИрГТУ. – 2006. - № 2. – С. 148-150.
3. Мухопад, А.Ю. Динамический контроль автоматов / А.Ю. Мухопад. - Новосибирск: Сборник научных трудов НГТУ. - № 3. - 2008. - С. 55 – 58.
4. Мухопад, А.Ю. Организация микроэлектронных средств управления сложными техническими системами / А.Ю. Мухопад, Ю.Ф. Мухопад / Журнал «Современные проблемы науки и образования».- Москва: ИД «Академия естествознания» - № 6, 2009.- С. 30-32.
5. Мухопад, А.Ю. Синтез автоматов управления для систем реального времени / А.Ю. Мухопад, А.Ф. Полетаев и др. // Журнал «Современные технологии. Системный анализ. Моделирование». - Иркутск: ИрГУПС, 2010. № 3. – С 161-168.
6. Мухопад, А.Ю. Структурные методы повышения надежности автоматов управления / А.Ю. Мухопад // Системы. Методы. Технологии. – Братск: БГУ. - № 3(11), 2011. – С.95 -100.
7. Мухопад, А.Ю. Структурная организация самоконтролируемых автоматов для систем реального времени / А.Ю. Мухопад, Ю.Ф. Мухопад // Проблемы информатики.- Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, 2013. - №1. - С.4-15.
8. Мухопад, А.Ю. Анализ мехатронных систем ударного действия / Мухопад А.Ю., Мельников А.В. и др. // Фундаментальные исследования РАЕ, № 8,ч.6.- Москва, 2013.- С.1337-1343.
9. Мухопад, А.Ю. Использование теплогенераторов в вагонном депо / Ванчиков В.Ц., Мухопад А.Ю. и др. // Журнал «Современные технологии. Системный анализ. Моделирование». - №3 (39). - Иркутск: ИрГУПС, 2013.- С. 267-369.
10. Мухопад, А.Ю. Моделирование источника электромагнитного излучения / Р.А. Данеев, А.Ю. Мухопад и др. // Журнал «Современные технологии. Системный анализ. Моделирование». – Иркутск: ИрГУПС, № 4, 2013. – С. 146-151.
11. Мухопад, А.Ю. Ассоциативный автомат адаптивного управления технологическими процессами на основе нейронных сетей / В.Н. Сизых, А.Ю. Мухопад // Научный вестник НГТУ. – Новосибирск.- № 1 (54), 2014. - С. 34-45.
12. Мухопад, А.Ю. Автоматизация управления системой очистки технологических сред с применением вихревого эффекта и ультразвука / Д.А. Филатов, А.Ю. Мухопад и др. // Журнал «Современные технологии. Системный анализ. Моделирование» Иркутск: ИрГУПС, 2015.-№ 3(47). - С.64-72.

13. Мухопад, А.Ю. Микропрограммное управление турбомеханизмами / Д.А. Филатов, А.Ю. Мухопад // Журнал «Совр. технологии. Системный анализ. Моделирование» Иркутск: ИрГУПС, 2015.-№3 (47). - С.78-89.

14. Мухопад, А.Ю. Сравнительный анализ комбинационных схем управляющих автоматов / А.Ю. Мухопад // Журнал «Совр. технологии. Системный анализ. Моделирование» Иркутск: ИрГУПС, 2015.-№4 (48). - С.106-112.

Научные статьи, доклады на конференциях и др. публикации

15. Мухопад, А.Ю. Статистическая обработка данных о нестационарных процессах / А.Ю. Мухопад, Ю.Ф. Мухопад // Сб. «Асимптотические методы в задачах проектирования летательных аппаратов». – Иркутск: ИрГТУ, 1996. – С. 45 – 47.

16. Мухопад, А.Ю. Динамически модифицируемые матрицы для кодирования информации / А.Ю. Мухопад, Т.Б. Агафонов и др. //Сб. науч. трудов «Информационные системы контроля и управления на транспорте». – Иркутск: ИрГУПС, 2001.- Вып 9.- С. 159-161.

17. Мухопад, А.Ю. Таблично-алгоритмический кодер / А.Ю. Мухопад, Т.Б. Агафонов и др. // Сб. науч. трудов «Информационные системы контроля и управления на транспорте». - Иркутск: ИрГУПС, 2002. – Вып. 10.- С. 171-175.

18. Мухопад, А.Ю. Структурная организация автоматов с контролем / А.Ю. Мухопад // Сб. науч. трудов «Информационные системы контроля и управления на транспорте». - Иркутск: ИрГУПС, 2005. - Вып. 13. – С. 75 – 78.

19. Мухопад, А.Ю. Структурная организация программной модели сложных автоматов управления мехатроникой / А.Ю. Мухопад // Труды IV Между-нар. конференции «Проблемы механики современных машин». – Улан-Удэ: ВСГТУ, 2009. - том 3. – С. 88 – 94.

20. Мухопад, А.Ю. Структурная организация программной модели сложных автоматов систем реального времени / А.Ю. Мухопад //Труды XXII Между-народной конференции «Математические методы в технике и технологиях». – Псков: ППИ, 2009. - том 2. – С. 83 – 86.

21. Мухопад, А.Ю. Синтез сложных автоматов управления мехатроникой / А.Ю. Мухопад //Труды VII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и современные информационные технологии». Томск: ТПУ, 2009. - ч. 2. – С. 70 – 71.

22. Мухопад, А.Ю. Динамический контроль микропрограммных автоматов / А.Ю. Мухопад // Сб. науч. трудов «Информационные системы контроля и управления в промышленности и на транспорте». – Иркутск: ИрГУПС, 2009. - Вып. 16. - С. 78 - 82.

23. Мухопад, А.Ю. Обеспечение надежности сложных автоматов управления мехатроникой / А.Ю. Мухопад // Труды Международной научной школы «Фундаментальные и прикладные проблемы надежности и диагностики машин и механизмов». – СПб: Научный совет РАН по проблемам машиноведения и технологических процессов ИПМаш РАН, 2009. – С. 17 – 19.

24. Мухопад, А.Ю. Методы повышения безотказности электронного комплекса самолетов / А.Ю. Мухопад, М.П. Дунаев и др. // «Актуальные проблемы развития гражданской авиации России». – Иркутск, Москва: МГТУГА, 2009.- С. 78-83.

25. Мухопад, А.Ю. Минимизация кодового представления переходов в сложных автоматах / А.Ю. Мухопад в кн. Ю.Ф. Мухопада «Микроэлектронные системы управления». – Братск: БГУ, 2009. - С. 171 - 178.

26. Мухопад, А.Ю. Контроль функционирования автоматов управления / А.Ю. Мухопад в кн. Ю.Ф. Мухопада «Микроэлектронные системы управления. - Братск: БГУ, 2009. – С. 185- 193.

27. Mukhopad, A.Yr. Microelectronic controlling of realtime complicated technical systems / A.Yr. Mukhopad, Yr. F. Mukhopad //International journal of applied and fundamental research (JSSN 1996- 3955). - № 2, 2009. - p. 26 – 29.

29. Мухопад, А.Ю. Обеспечение надежности сложных автоматов управления мехатроникой. Тр. Международной научной школы «фундаментальные и прикладные проблемы надежности и диагностики машин и механизмов» / А.Ю. Мухопад // СПб: Научный совет РАН по проблемам машиноведения и технологических процессов, ИПМашРАН, 2009. – С. 17 – 19.

30. Мухопад, А.Ю. Системный анализ и моделирование автоматов управления систем обработки информации реального времени / А.Ю. Мухопад, А.Ф. Полетаев и др. // Сб. «Системный анализ в проектировании и управлении» ч.2 – СПбПУ, 2010.- С 151-159.

31. Мухопад, А.Ю. Метод динамического контроля автоматов управления / А.Ю. Мухопад // Сб. науч. трудов «Информационные системы контроля и управления в промышленности и на транспорте». – Иркутск: ИрГУПС, 2010. - Вып. 17. - С. 139-142.

32. Мухопад, А.Ю. Структурный синтез автоматов управления системами обработки информации реального времени: автореф. дис. канд. техн. наук / А.Ю. Мухопад - Братск, 2010.-19с.

33. Мухопад, А.Ю. Синтез быстродействующих автоматов / А.Ю. Мухопад в кн. Ю.Ф. Мухопада «Теория дискретных устройств» - Иркутск: ИрГУПС, 2010. – С. 102-111.

34. Мухопад, А.Ю. Моделирование автоматов управления / А.Ю. Мухопад в кн. Ю.Ф. Мухопада «Теория дискретных устройств» - Иркутск: ИрГУПС, 2010. – С 150-155.

35. Мухопад, А.Ю. Методы синтеза автоматов управления на больших интегральных схемах / А.Ю. Мухопад, Ю.Ф. Мухопад // Проблемы информатики Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, №4, 2011.- С.17- 28.

36. Мухопад, А.Ю. Методы повышения надежности автоматов управления / Сб. научн. трудов « Информационные системы контроля и управления в промышленности и на транспорте». - Иркутск: ИрГУПС, 2011.- Вып.19.- С. 111-117.

37. Мухопад, А.Ю. Система управления коммутацией сигналов / А.Ю. Мухопад, Т.С. Бадмаева и др. // Сб. научн. трудов «Информационные системы контроля и управления в промышленности и на транспорте». – Иркутск: ИрГУПС. - Вып.19, 2011.- С. 101-110.

38. Мухопад, А.Ю. Аппаратная реализация микропрограммных средств защиты информации / А.Ю. Мухопад, В.С. Жигунов и др. // Труды международной конференции «Транспорт XXI века: исследования, инновации, инфраструктура».- Екатеринбург: Уральский гос.университет путей сообщения.- Вып.97(180) Том 1, 2011.- С.17-21.

39. Мухопад, А.Ю. Методы повышения надежности автоматов управления / Проблемы Транспорта Восточной Сибири: материалы научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов электромеханического факультета, ч.2.- Иркутск: ИрГУПС, 2012.- С.90-95.

40. Мухопад, А.Ю. Структурная организация самоконтролируемых автоматов для систем реального времени / А.Ю. Мухопад, Ю.Ф. Мухопад // Проблемы информатики.- Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, 2013. №1.- С.4-15.

41. Мухопад, А.Ю. Методика разработки программного обеспечения микропроцессорных информационно-управляющих систем / Информационные системы контроля и управления в промышленности и на транспорте. - Иркутск: ИрГУПС, 2013.- Вып.23.- С. 107-120.

42. Мухопад, А.Ю. Автоматный контроль оборудования авиационной техники / Сб. тр. IV научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации России». - Иркутск: Ирк. филиал МГТУГА, 2014.- С.91-95.

43. Мухопад, А.Ю. Адаптивное управление одним классом абсолютно устойчивых систем / В.Н. Сизых, А.Ю. Мухопад и др. // Сборник Всероссийской научно-практической конференции «Авиатор» Актуальные вопросы исследований в авионике: Теория, обслуживание, разработки.- Воронеж: Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е.Жуковского и Ю.А. Гагарина, 2014.- С.144-145.

44. Мухопад, А.Ю. Автоматизированное программирование микроконтроллерных средств управления технологическими процессами и сложными техническими системами / А.Ю. Мухопад, Е. А. Безрукова // Информационные системы контроля и управления в промышленности и на транспорте. - Иркутск: ИрГУПС, 2014.- Вып.24.- С. 5-23.

45. Мухопад, А.Ю. Автоматическое управление турбо-механизмами / А.Ю. Мухопад, Д.А. Филатов // Сб. научн. трудов II Международной научно-практической конференции «Проблемы и достижения в науке и технике». - Омск: ИЦРОН (IDCES), 2015.- С.13-22.

46. Мухопад, А.Ю. Управление комбинаторно-нейронной сетью / А.Ю. Мухопад, В.Н. Сизых // Информационные системы контроля и управления в промышленности и на транспорте. - Иркутск: ИрГУПС, 2015.- Вып.25.- С.11-17

Авторские свидетельства, патенты.

47. Патент на полезную модель № 63588. Самоконтролируемый автомат управления / А.Ю. Мухопад, Т.С. Бадмаева и др.; заявитель и патентообладатель Иркут. гос.ун-т путей сообщения.- № 2006143930/22; заявл. 11.12.2006; опубл. 27.05.2007, Бюл. №15.- 10 с.: ил.

48. Патент на полезную модель № 82889 МПК(51) G06 12/16. Устройство криптографической защиты информации / А.Ю. Мухопад, Б.Н. Антошкин, и др.; заявитель и патентообладатель Иркут. гос.ун-т путей сообщения.- № 2008150879/22; заявл. 22.12.2008; опубл. 10.05.2009, Бюл. № 13.- 12с.: ил.

49. Патент на полезную модель № 82890.МПК (51) G06F 12/16. Устройство криптографической защиты информации / А.Ю. Мухопад, Б.Н. Антошкин и др.; заявитель и патентообладатель Иркут. гос.ун-т путей сообщения.-2008150881/22; заявл.22.12.2008; опубл. 10.05.2009, Бюл.№ 13.- 2с.:

50. Патент на полезную модель № 82888. МПК (51) G06F 9/00. Микро-программный автомат / А.Ю. Мухопад, Ю.Ф. Мухопад; заявитель и патенто-обладатель Иркут. гос.ун-т путей сообщения.- 2008149344/22; заявл.15.12.2008; опубл. 10.05.2009, Бюл.№ 13.- 2с.: 1 ил.

51. Патент на полезную модель № 82974. МПК(51) H04L 9/00. Устройство криптографической защиты информации / А.Ю. Мухопад, Т.Б. Агафонов и др.; заявитель и патентообладатель Иркут. гос. ун-т путей сообщения.- 2008149331/22; заявл. 15.12.2008; опубл. 10.05.2009, Бюл. № 13.- 23с. : ил.

52. Патент на полезную модель № 111760. МПК(51) A61H 9/00, A61N 2/02. Медицинский прибор «Мультимед» / Г.К. Хомяков, А.Ю. Мухопад и др.; заявитель и патентообладатель ООО «Байкальский научно-инженерный центр» - № 2010128849/14; заявл. 12.07.2010; опубл. 27.12.2011, Бюл. № 36.-2с.: 1ил.

53. Патент на изобретение № 2475816 Российская Федерация МПК(51) G06F 9/00. Управляющий автомат / А.Ю. Мухопад, Ю.Ф. Мухопад; заявитель и патентообладатель Иркут. гос.ун-т путей сообщения. - № 2011145137/08; заявл. 07.11.2011; опубл. 20.02.2013, Бюл. №5.-13с.: 5ил.

54. Патент на изобретение № 2475838 Российская Федерация МПК(51) G06F 21/00, H04L 9/00. Устройство криптографической защиты информации / А.Ю. Мухопад, Ю.Ф. Мухопад; заявитель и патентообладатель Иркут. гос.ун-т путей сообщения.-№ 2011145012/08; заявл. 07.11.2011; опубл. 20.02.2013, Бюл. №5.-16с.: 5ил.

55. Патент № 2527190 Российская Федерация МПК(51) G06F 9/00. Микропрограммный автомат / А.Ю. Мухопад, Д.Ц. Пунсык - Намжилов и др.; заявитель и патентообладатель Иркут. гос.ун-т путей сообщения.- № 2013110986/08; заявл. 12.03.2013; опубл. 27.08.2014, Бюл. № 24. -20 с.: 12 ил.

56. Свидетельство о регистрации электронного ресурса №15737 от 11.05. 2010. Алгоритм моделирования автомата в системе управления операционным устройством / А.Ю. Мухопад, А.Ф. Полетаев и др.

57. Патент № 2502121 Российская Федерация МПК (51) G06F 9/22, G06F 11/00. Самоконтролируемый автомат / А.Ю. Мухопад, Ю.Ф. Мухопад; заявитель и патентообладатель Иркут. гос.ун-т путей сообщения № 2011148883/08; заявл. 30.11.2011; опубл. 20.12.2013, Бюл. № 35.- 29с. : 15ил.

58. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015615404 от 18.05.2015. Программа управляющего автомата автоматизированной системы очистки технологических сред с применением вихревого эффекта и ультразвука / Д.А. Филатов, А.Ю. Мухопад и др.

59. Патент №158425 РФ МПК (51) H04N 19/00. Устройство классификации изображений / А.Ю. Мухопад, В.С. Марюхненко, Б.М. Миронов заявитель и патентообладатель Иркут. гос.ун-т путей сообщения.- №2015111830/08; заявл. 01.04.2015; опубл. 27.12.2015 Бюл.№36