

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)

На правах рукописи

**ЧАН ВАН ХАНЬ**

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ БОРТОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НА  
ОСНОВЕ СЕТЕВОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СРЕДЫ**

Специальность 05.13.01 – «Системный анализ управление  
и обработка информации»

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

**Научный руководитель:**  
д.т.н., профессор Нгуен Куанг Тхыонг

**Москва – 2015**

**СОДЕРЖАНИЕ**

<b>УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ .....</b>	<b>6</b>
<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>7</b>
Актуальность проблемы .....	8
Современное состояние проблемы.....	9
Объект исследования .....	11
Предмет исследования .....	11
Цель исследования .....	11
Задачи диссертации.....	12
Метод исследования.....	12
Основные положения, выносимые на защиту.....	12
Научная новизна исследования .....	14
Практическая ценность результатов .....	15
Областью применения .....	15
Список публикаций.....	16
Апробация и внедрение результатов.....	19
Структура и объем диссертации.....	20
<b>Глава 1. Современное состояние вопроса обеспечения работоспособности и повышения эффективности функционирования бортовых систем управления .....</b>	<b>21</b>
1.1. Перспективные структуры современных бортовых систем управления реального времени.....	21
1.2. Особенности задач управления, регулирования и контроля в современных бортовых системах управления .....	25
1.3. Обеспечение работоспособности сложных высокодинамических бортовых систем управления .....	33
1.4. Современные средства аппаратного проектирования, моделирования и верификации цифровых бортовых систем управления.....	38
1.5. Выводы по главе .....	41

## **Глава 2. Перспективные подходы построения сложных высокодинамических бортовых систем управления, и приемы их оптимизации ..... 43**

- 2.1. Централизованный и распределенный механизмы построения сложных бортовых систем управления ..... 43
- 2.2. Концепции декомпозиции сложных высокодинамических бортовых систем управления ..... 46
- 2.3. Применение сетевой технологии в области разработки сложной бортовой системы управления..... 47
- 2.4. Информационная среда как средство обеспечения качества сложных бортовых систем управления ..... 51
- 2.5. Метод повышения качества сложных бортовых систем управления на основе их сетевой информационной среды..... 53
- 2.6. Концепция построения и реализации автономных блоков управления и контроля на основе сетевой информационной среды ..... 55
- 2.7. Выводы по главе ..... 56

## **Глава 3. Разработка концепций реализации высококачественных бортовых систем управления и их верификации..... 58**

- 3.1. Требования к задаче оптимизации и верификации бортовых систем управления реального времени на аппаратном уровне..... 58
- 3.2. Структурная модель бортовой распределенной слабосвязанной системы управления на примере системы управления пневматической подвеской автомобиля ..... 60
- 3.3. Концепция оптимизации бортовых распределенных систем управления на основе их свободных степеней информационных связей..... 63
- 3.4. Концепция контроля, мониторинга и обеспечения качества бортовых распределенных систем управления на основе организации автономных узлов регистрации и контроля..... 69
- 3.5. Выводы по главе ..... 73

## **Глава 4. Вопросы практической реализации средств, обеспечивающих эффективность функционирования и работоспособность бортовых распределенных систем управления ..... 75**

- 4.1. Аппаратная реализация бортовых систем управления на основе их свободных информационных степеней связей ..... 75
  - 4.1.1. Актуальная задача аппаратной реализации автономного узла регистрации параметров ..... 76
  - 4.1.2. Механизм реализации узла регистрации параметров высокодинамических объектов ..... 77
  - 4.1.3. Структурная схема реализации узла регистрации параметров ..... 78
  - 4.1.4. Применение цифрового узла регистрации параметров. .... 82
- 4.2. Аппаратная реализация метода автономного контроля, мониторинга и обеспечения качества бортовых систем управления на основе организации автономных узлов регистрации и контроля ..... 82
  - 4.2.1. Задача контроля и мониторинга параметров в бортовых распределенных системах управления ..... 82
  - 4.2.2. Традиционный и автономный механизмы контроля и мониторинга параметров в бортовых распределенных системах управления ..... 83
  - 4.2.3. Параметрическая настройка контроля и мониторинга бортовых распределенных систем управления. .... 84
  - 4.2.4. Обеспечение функционирования системы автономного контроля и мониторинга параметров в масштабе реального времени ..... 85
- 4.3. Аппаратная верификация и отладка бортовых распределенных систем управления реального времени ..... 89
- 4.4. Вопросы развития промышленных бортовых сетей и проблемы возникающие ..... 92
  - 4.4.1. Объединение разнообразных сетей в промышленных бортовых системах управления реального времени ..... 92
  - 4.4.2. Обеспечение минимального времени передачи данных в промышленных высокодинамических бортовых системах управления ..... 95

4.4.3. Аппаратное обеспечение подключения к промышленной бортовой сети разнообразных периферийных устройств.....	97
4.5. Выводы по главе .....	99
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>101</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>104</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ .....</b>	<b>114</b>
Приложение 1. Достоинства и недостатки централизованных и распределенных систем управления .....	114
Достоинства и недостатки централизованных систем управления .....	114
Достоинства и недостатки распределенных систем управления .....	115
Приложение 2. Аппаратная реализация таблицы признаков и метод ее моделирования.....	116
Модуль описания таблицы признаков .....	116
Модуль моделирования таблицы признаков .....	117
Приложение 3. Аппаратная реализация механизма управления процессами записи и чтения в двух буферах FRAM памяти и метод ее тестирования....	120
Модуль описания механизма записи и чтения.....	120
Модуль тестирования механизма записи и чтения.....	122
Приложение 4. Схема инструментальной платы STM32F3DISCOVERY на микроконтроллере STM32F303VTCT6 с памятью на 256 КБ Flash, 48КБ RAM .....	125
Приложение 5. Блок-схема MSP430FR5739 с ядом MSP430 и сегнетоэлектрической памятью FRAM.....	126
Приложение 6. Сравнительные характеристики FRAM, SRAM, EEPROM и Flash памятей .....	126

**УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ**

БРСУРВ	- Бортовая распределенная система управления реального времени
ПСУ	-Подсистема управления
ЛПСУ	-Локальная подсистема управления
ЦПСУ	- Центральная подсистема управления
СУПА	-Система управления подвеской автомобилей
БРСУПА	- Бортовая распределенная система управления подвеской автомобиля
СИС	-Сетевая информационная среда
БУК	- Блок управления и контроля
УРК	- Узел регистрации и контроля
ДБСУ	- Дополнительный блок согласования управления
УРП	-Узел регистрации параметров
ПК	-Персональный компьютер
ПЗУ	-Постоянное запоминающее устройство
ЦП	-Центральный процессор
ЦСОВД	-Цифровая система обработки входных данных
ЦСУА	-Цифровая система управления актуаторами
ЦСУИ	-Цифровая система управления индикаторами
КЦС	-Контроллер цифровой сети
АПБСУ	-Автономный параметрический блок согласования управления
ОЗУ	-Оперативное запоминающее устройство
FRAM	-Сегнетоэлектрическая память с произвольным доступом
SRAM	-Статическая память с произвольным доступом
CAN	-Локальная сеть контроллеров (Controller Area Network)
LIN	-Локальная соединительная сеть (Local Interconnect Network)
TCL	-Командный язык программирования (Tool Command Language)

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время, бортовая система управления и контроля может содержать огромное количество узлов датчиков, исполнительных устройств, блоков управления, вычисления и сложную структуру связи. Современная бортовая система управления представляет собой распределенную систему с различными цифровыми блоками, взаимодействующими на основе сетевой технологии реального времени. Благодаря ряду своих преимуществ по сравнению с централизованными системами, внедрение модели распределенной системы управления реального времени являются перспективным подходом для решения задачи управления сложными высокودинамическими системами [1-9]. Бортовые распределенные системы на сегодняшний день обладают очень широким диапазоном требований к управляемости, стабильности управления и контролю технологических процессов.

Постоянное усложнение задачи управления требует поиска приемов и методов для проектирования и реализации высококачественных новых бортовых систем управления, и повышения эффективности функционирования и уровня работоспособности существующих систем. Для решения таких задач широко применяются цифровые аппаратуры и современная сетевая технология. Предлагаемая тема диссертационного исследования включает в себя обобщение существующего опыта использования цифровых систем управления и выработки методики их реализации, направленной на эффективное, надежное и скорейшее получение результатов. Исследование разнообразных объектов управления и существующих методов проектирования и отладки систем реального времени позволяет нахождение перспективных методов построения и реализации высококачественных бортовых систем управления.

## Актуальность проблемы

Поддержание высокоэффективного функционирования и высокого уровня работоспособности системы в целом при наличии отказов в среде связи или сбоях компонентов является очень важным качеством современных систем управления. Для бортовых распределенных систем управления реального времени (БРСУРВ) это качество становится критично востребованным из-за ограничения возможности ремонта или замены отказавшего блока после его монтажа на борту. Сбой системы может привести к трудно исправляемой ошибке, так и к катастрофическим потерям особенно в области управления системами жесткого реального времени. Примерами таких бортовых систем управления могут служить системы управления автомобилями, системы управления космическими аппаратами, подводными лодками, системы управления производства и т.п.

Задача повышения эффективности функционирования и обеспечения работоспособности БРСУРВ является одной из сложнейших технических задач, которые стоят перед разработчиками программного и аппаратного обеспечения. Трудность данной задачи обусловлена не только сложностью функционирования и связи самой БРСУРВ, но и повышенным требованием к простоте, экономичности, автономности и гибкости механизма ее реализации и функционирования. Под требованием экономичности и простоты понимается наименьшее по возможности использование дополнительных ресурсов и усложнения структурной связи существующей системы. Под автономностью будем понимать возможность реализации, отладки данного механизма вне зависимости от существующей системы и автономное функционирование дополнительных внедренных компонентов управления и контроля. Гибкость означает наличие возможности параметрической настройки дополнительных блоков управления и контроля. Иначе говоря, желательно, чтобы после оптимизации и верификации исследуемой системы, полученная новая система может выполнить необходимые режимы управления, причем переключение между такими режимами выполняется простым способом. Автономность дополнительных компонентов управления является желательной характери-

стикой алгоритма решения особенно для рассматриваемых объектов ответственного назначения. Она позволяет сохранить работоспособность оптимизированной системы и не ухудшать ее качества. Поэтому одной из актуальных задач аппаратной оптимизации, верификации и отладки бортовых систем управления, сегодня является создание автономных, с точки зрения внутренней организации и управления исследуемой системы, механизмов оптимизации, верификации и отладки.

### **Современное состояние проблемы**

На сегодняшний день наблюдаются разнообразные методы повышения качества, и обеспечения работоспособности системы управления реального времени. Примерами работы, в которых представлены такие методы, могут служить труды Ю. М. Казаринов, Б. П. Подкопаев, В. Н. Смирнов, П.А. Чукреев, Г. И. Шакун, В. А. Колосков, В. С. Титов, С. А. Долгушев, В. Н. Донианц, В.И. Жиратков, Е. С. Градов, С. Г. Чмовж, М. В. Чижевский и других авторов. В этих работах [10-21] теоретически рассматривается вопрос создания методов анализа технических систем, предлагаются различные подходы к проблеме повышения работоспособности системы на основе принципа резервирования функционирования, связи, и контроля отказов.

Практически такие методы реализуются в процессе проектирования новых бортовых систем. Основным способом построения систем управления сегодня является реализация моделей поведения управляемого объекта с последующим исследованием этих моделей, решением и записью результатов исследования в виде некоторого закона управления в управляющее вычислительное устройство [22]. Однако этот подход наталкивается на существенные трудности, которые состоят в следующем:

- Построить достаточно полное математическое описание (математическую модель или комплекс моделей) объекта управления средствами классической математики удастся далеко не всегда.

- Свойства реальных объектов управления часто могут быть недостаточно хорошо известны до начала их эксплуатации под управлением системы, поэтому заранее рассчитанный закон управления не может быть точным и требует корректировки, доработки, настройки.
- Контроль, ремонт, настройка, а также регламентное сопровождение таких систем и их компонентов в условиях их эксплуатации и частичной замены оборудования выходит за рамки выполненных при проектировании расчетов и не учтены в первоначальных моделях.
- Все чаще возникают задачи реализации систем с достаточно жесткими параметрами реакции в режиме реального времени функционирования управляемых объектов.
- Современные системы управления промышленного, технологического и информационного назначения должны работать в течение продолжительного времени, не утрачивая своей функциональности.
- Свойства реального объекта управления и окружающей среды могут изменяться в процессе эксплуатации систем, что также может влиять на процесс управления и делает первоначально разработанные модели неэффективными.
- Изменяются свойства, состав и функциональность контрольно-измерительных и исполнительных компонентов длительное время сопровождаемой системы.

Исходя из названных обстоятельств, следует сделать вывод, что решение складывающихся проблем может быть найдено только в процессе развития методов построения и эксплуатации современных систем управления, нахождения новых приемов проектирования, наладки, контроля и сопровождения таких систем.

Наличие сетевой информационной среды в процессе управления и контроля является одной из особенных характеристик бортовых распределенных систем управления. Современная сетевая технология взаимодействия в бортовых системах позволяет не только эффективно выполнить процесс приема и передачи дан-

ных, но и является информационной основой для решения различных задач оптимизации, верификации, мониторинга с целью повышения эффективности и обеспечения работоспособности системы управления.

### **Объект исследования**

Объектом исследования является бортовая распределенная система управления реального времени. В качестве примера таких систем, для конкретной реализации, используется цифровая система управления адаптивной пневматической подвеской автомобиля.

### **Предмет исследования**

Предметом исследования являются подходы построения высококачественных бортовых систем управления в масштабе реального времени, методы повышения эффективности функционирования и поддержания работоспособности таких систем, алгоритмы их контроля, мониторинга, верификации, и отладки на основе применения сетевой информационной среды.

### **Цель исследования**

Цель работы состоит в разработке концепции построения и подхода оптимизации высокодинамических сложных бортовых систем управления реального времени, приемов повышения эффективности функционирования и работоспособности таких систем, разработке метода автономного контроля и мониторинга, аппаратной верификации и отладки системы на основе сетевой информационной среды. Техническим результатом является повышение эффективности функционирования, и уровня контролируемости и работоспособности бортовых систем управления.

## **Задачи диссертации**

Исходя из указанной цели исследования и сформулированной научно-технической проблемы, основными задачами диссертационной работы являются:

1. Анализ ряда существующих и перспективных структур, систем связей и закономерностей функционирования компонентов бортовых систем управления.
2. Исследование задачи управления и контроля в бортовых распределенных системах управления.
3. Анализ методов повышения качества и обеспечения работоспособности современных бортовых систем управления и алгоритмы их реализации.
4. Разработка структурной схемы реализации высокодинамических бортовых систем управления, приемов аппаратной оптимизации системы, метода ее контроля и мониторинга, алгоритмы ее аппаратной верификации и отладки.
5. Разработка концепции построения высокодинамической бортовой распределенной системы управления на основе сетевой информационной среды.
6. Разработка методики аппаратной реализации средств, обеспечивающих процессы контроля, регистрации и управления высокодинамическими бортовыми системами на основе их сетевой информационной среды.

## **Метод исследования**

Основные результаты диссертационной работы получены с использованием теории системного анализа, теории автоматического управления, методов обработки цифровых сигналов, методов аппаратного проектирования, моделирования, верификации и описания цифровых блоков управления и контроля, стандарта открытых сетевых протоколов и интерфейсов.

## **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Концепция построения сложных высокодинамических систем управления реального времени на основе модели слабосвязанной распределенной сис-

темы. Преимущества реализации многоуровневой структуры организации системы, алгоритма повышения автономности локальных подсистем управления и применении сетевой технологии связи на различных структурных уровнях системы.

2. Возможность использования современной бортовой сети как информационной основы для обеспечения решения различных задач анализа, оптимизации и верификации системы.
3. Структурная схема многопроцессорной слабосвязанной распределенной системы управления реального времени. Особенности схемотехнической реализации данной схемы на примере цифровой системы управления адаптивной пневматической подвеской автомобилей.
4. Автономный подход оптимизации бортовых распределенных систем управления с целью повышения эффективности функционирования и обеспечения их работоспособности на основе бортовой сетевой информации. Особенность алгоритма реализации данного подхода.
5. Приемы повышения эффективности функционирования и обеспечения работоспособности бортовой системы управления на основе ее свободных степеней информационных связей. Особенности схемотехнической реализации данных приемов на примере бортовой распределенной системы управления адаптивной пневматической подвеской автомобилей.
6. Метод автономного контроля и мониторинга бортовых распределенных систем управления реального времени. Модель высокоэффективных бортовых распределенных систем управления с организацией автономных узлов регистрации и контроля. Особенность схемотехнической ее реализации.
7. Подход аппаратной верификации и отладки бортовых систем управления на основе применения автономных блоков регистрации параметров, особенности структурной реализации этих блоков.

## Научная новизна исследования

Научная новизна исследования, представляемого данной работой, заключается в следующем:

1. Предложен новый подход повышения эффективности функционирования и обеспечения работоспособности БРСУРВ на основе использования информационной сетевой среды. В отличие от традиционного подхода предложенный подход обладает большой степенью автономности и гибкости механизма его реализации и функционирования.
2. Реализован перспективный метод контроля, мониторинга и повышения эффективности функционирования бортовых распределенных систем управления на основе организации автономных узлов регистрации и контроля.
3. Предложены и проверены на практике приемы аппаратной поддержки сетевых решений, обеспечивающие повышение пропускной способности сети, исключение лишних арбитражных процедур, упрощение процедур обмена за счет типизации пакетной структуры передаваемой информации. Подобные аппаратные решения и алгоритмы повышают надежность функционирования систем управления и контролируемость сетевого оборудования.
4. Разработан автономный цифровой регистратор параметров с целью регистрации аварийных событий, переходных и установившихся процессов в БРСУРВ или произведения различного вида измерений и исследований. В отличие от обычных регистраторов данный прибор обладает высокой степенью эффективности, автономности и гибкости функционирования. Он может использоваться как отдельно или в составе БРСУРВ для улучшения качества систем нового поколения.
5. Разработаны приемы построения бортовых систем управления на основе концепции многоуровневой структуры организации системы, алгоритма повышения автономности локальных подсистем управления и применении сетевой технологии связи на различных структурных уровнях системы.

6. Построена структурная схема реализации бортовых систем управления на основе использования их свободных информационных степеней связей и создания автономных параметрических блоков согласования управления.

Основные положения и результаты работы заслушивались и обсуждались на научно-технических семинарах кафедры «Электронные вычислительные машины» при институте точной механики и вычислительной техники имени С. А. Лебедева, на научно-технических конференциях в московском физико-техническом институте МФТИ (ГУ) (Долгопрудный, 2012- 2014 г), на Международных молодежных научных конференциях МАТИ (Москва, 2012-2014г) и на четвертой международной научно-практической конференции «Наука. Общество. Бизнес» (Кипр, Пафос 2014г.).

### **Практическая ценность результатов**

Практическая ценность результатов исследования заключается в том, что разработанные приемы оптимизации, методы автономного контроля и мониторинга, подход верификации и структурные схемы их реализации на основе сетевой информационной среды позволяют обеспечить повышенный уровень эффективности и работоспособности бортовых систем управления. При этом не значительно усложняется структура системы, и не разрушается основная ее функциональность. Подходы обладают высоким уровнем гибкости, автономности функционирования и реализации.

### **Областью применения**

Предлагаемые концепции построения, приемы оптимизации, методы контроля и мониторинга, алгоритмы верификации и отладки и структурные схемы реализации высокодинамических бортовых систем управления реального времени обладают широкой областью применения в процессе проектирования, верификации, отладки и оптимизации бортовых систем управления. Они могут применяться для различных бортовых систем управления и контроля. В качестве таких сис-

тем могут служить системы управления и контроля тяжелых и легких автомобилей, бортовые системы управления космическими и подводными аппаратами, бортовые измерительные системы различных подконтрольных объектов, системы мониторинга и идентификации аварийных ситуаций технических процессов и т.п.

### **Список публикаций**

Основное содержание диссертации отражено в 14 научных работах, объемом 5,1 п.л., в том числе 4 работы, объемом 1,5 п.л. опубликованы в рецензируемых журналах (в соответствии со списком ВАК РФ). Получено свидетельство о победителе конкурса научных работ молодых ученых на 56-й международной конференции Московского физико-технического института в 2013 г.

1. Чан Ван Хань. Разработка перспективного метода верификации и отладки бортовых распределенных систем управления на основе организации автономных узлов регистрации и контроля //Интернет-журнал «Науковедение». - М.: Науковедение, 2014. - №6 (25).
2. Чан Ван Хань. Исследование и разработка перспективных методов оптимизации бортовых распределенных систем управления реального времени // Международный научно-исследовательский журнал. - 2014. - №9(28). - С. 56-59. - ISSN 2227-6017
3. Чан Ван Хань, Преображенский Н.Б., Холопов Ю.А. Реализация высококачественных бортовых систем управления реального времени. // Труды 57-й научной конференции МФТИ с международным участием, посвященной 120-летию со дня день рождения П.Л. Капицы. Всероссийская научная конференция с международным участием «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в области физики». Всероссийская молодежная научно-инновационная конференция с международным участием «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в современном информационном обществе». Радиотехника и кибернетика. - М.: МФТИ, 2014. - С. 21-22. - ISBN 978-5-7417-0554-5

4. Чан Ван Хань. Исследование и построение многопроцессорной распределенной системы управления адаптивной пневматической подвеской автомобилей // Новый университет. Серия "Технические науки" науч. журн./учредитель ООО "Коллоквиум". - 2014, №11(33). - Йошкар-Ола: Коллоквиум, 2014. - С. 53-59. - ISSN 2221-9552.
5. Чан Ван Хань, Холопов Ю.А., Преображенский Н.Б. Исследование и разработка методики контроля перспективных распределенных систем управления в масштабе реального времени // Наука и бизнес: пути развития. - 5/2014. - №5(35). - С. 117-120. - ISSN 2221-5182
6. Чан Ван Хань. Аппаратная реализация высоконадежной сетевой системы сбора и обработки данных. // Сборник «XL ГАГАРИНСКИЕ ЧТЕНИЯ. Научные труды Международной молодежной научной конференции в 9 томах». Москва 7-11 апреля 2014г. - Т. 6. - М.: МАТИ. – 2014
7. Чан Ван Хань, Холопов Ю.А., Преображенский Н.Б. Регистратор параметров высокодинамических объектов [Электронный ресурс] //Технологии техносферной безопасности. - 2013. - №3(49). Режим доступа <http://ipb.mos.ru/ttb>
8. Чан Ван Хань. Исследование и разработка метода построения высокоавтономного регистратора параметров в цифровой системе управления. // Сборник «XXXIX ГАГАРИНСКИЕ ЧТЕНИЯ. Научные труды Международной молодежной научной конференции в 9 томах. Москва, 9-13 апреля 2013г.» - М.: МАТИ. - 2013. - Т.4. - С.183-185. - ISBN 978-5-93271-689-2
9. Чан Ван Хань. Концепция построения сложных высокодинамических бортовых систем управления реального времени // Новый университет. Серия "Технические науки" науч. журн./учредитель ООО "Коллоквиум". - 2014, №9(31). - Йошкар-Ола: Коллоквиум, 2014. - С.27-32. - ISSN 2221-9552. - DOI:10.15350/2221-9552.2014.9.0006

10. Чан Ван Хань, Холопов Ю.А., Преображенский Н.Б. Аппаратная реализация высоко-автономного регистратора параметров в цифровой системе управления. // Труды 56-й научной конференции МФТИ: Всероссийской научной конференции «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в современном информационном обществе», Всероссийской молодежной научно-инновационной конференции «Физико-математические науки: Актуальные проблемы и их решения». Радиотехника и кибернетика. - М.: МФТИ, 2013. - С.74-75. - ISBN 978-5-7417-0492-9
11. Чан Ван Хань, Дам Чонг Нам, Ле Ба Чунг, Преображенский Н.Б. Некоторые особенности реализации сетевых решений в системах управления. Сборник «Международная конференция Инжиниринг & Телекоммуникации – En&T 2014. Тезисы докладов. Москва/Долгопрудный, 26-28 ноября 2014» - М.: МФТИ. - 2014. - С.217-218. - ISBN 978-5-7417-0522-3.
12. Преображенский Н.Б., Чан Ван Хань, Ле БА Чунг, Дам Чонг Нам Сетевые решения в системах управления.//Международный научный институт «Education», Технические науки, Новосибирск, 2014.- №5.
13. Чан Ван Хань, Холопов Ю.А., Преображенский Н.Б. Аппаратная оптимизация бортовой распределенной системы управления подвеской автомобиля на основе ее свободных степеней информационных связей // Глобальный научный потенциал. - 11/2014. - №11(44). - С. 113-116. - ISSN 1997-9355
14. Чан Ван Хань. Исследование и построение многопроцессорной распределенной системы управления адаптивной пневматической подвеской автомобилей // Новый университет. Серия "Технические науки" науч. журн./учредитель ООО "Коллоквиум". - 2014, №11(33). - Йошкар-Ола: Коллоквиум, 2014. - С. 47-52. - ISSN 2221-9552.

## **Апробация и внедрение результатов**

По теме диссертации делались сообщения и доклады на Всероссийских научных конференциях МФТИ, Международных молодежных научных конференциях «Гагаринские чтения» в 2012 - 2015 гг., Международной конференции «Инжиниринг & Телекоммуникации - En&T 2014», Четвертой международной научно-практической конференции «Наука. Общество. Бизнес» Кипр, Пафос 2014, XXXI научной конференции «Research Journal of International Studies», Екатеринбург, 2014. Положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. Международная конференция «Инжиниринг & Телекоммуникации - En&T 2014». Москва - Долгопрудный, 24-29 ноября 2014.
2. 57-ая научная конференция МФТИ с международным участием, посвященной 120-летию со дня день рождения П.Л. Капицы. Всероссийская научная конференция с международным участием «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в области физики». Всероссийская молодежная научно-инновационная конференция с международным участием «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в современном информационном обществе». Москва – Долгопрудный - Жуковский, 24-29 ноября 2014г.
3. Четвертая международная научно-практическая конференция «Наука. Общество. Бизнес» Кипр, Пафос 26-28 мая 2014.
4. XL «Гагаринские чтения». Международная молодежная научная конференция по исследованиям фундаментальных проблем освоения космического пространства, создания и эксплуатации аэрокосмической техники. Москва 9-13 апреля 2014 г.
5. XXXI научная конференция «Research Journal of International Studies». Екатеринбург, октябрь 2014.

6. 56-ая научная конференция - конкурс МФТИ. Всероссийская научная конференция «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в современном информационном обществе». Всероссийская молодёжная научно-инновационная конференция «Физико-математические науки: актуальные проблемы и их решения». Москва – Долгопрудный - Жуковский 25-30 ноября 2013г.
7. XXXIX «Гагаринские чтения». Международная молодежная научная конференция по исследованиям фундаментальных проблем освоения космического пространства, создания и эксплуатации аэрокосмической техники. Москва 9-13 апреля 2013 г.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 90 наименований и 6 приложений. Работа изложена на 127 страницах, содержит 5 таблиц и 29 рисунков.

## **Глава 1. Современное состояние вопроса обеспечения работоспособности и повышения эффективности функционирования бортовых систем управления**

Исследование современного состояния вопроса обеспечения качества бортовых систем управления является одной из важнейших задач в процессе оптимизации таких систем. В данной главе, во-первых, произведено исследование структурных связей, и закономерности функционирования компонентов современных бортовых систем управления. Во-вторых, показаны особенности задачи управления и контроля в бортовых системах на примере системы управления подвеской автомобиля. В третьих, обсуждены различные проблемы и методы проектирования и верификации высококачественных бортовых систем управления реального времени. В четвертых рассмотрены различные современные средства аппаратного проектирования, моделирования и верификации цифровых бортовых систем управления и даны рекомендации по методу их применения. Исследование доказало актуальность поставленных задач диссертации.

### **1.1. Перспективные структуры современных бортовых систем управления реального времени**

В ходе развития сложности функционирования и требования к своему качеству современная бортовая система управления может сочетать в себе не только механические, но и гидравлические, пневматические, электрические, оптические и т.п. элементы. Степень сложности бортовых систем увеличивается не только статически с точки зрения структуры и связи, но и динамически в смысле поведения системы во времени. Характеристиками современной бортовой системы управления являются большая степень иерархии, сложная система связи, многообразие типов поведения, немалая степень случайности, не предсказуемости и различные шкалы времени для различных частей процесса управления и контроля. Современная бортовая система управления реального времени представляет собой сложную высокодинамическую систему с пространственным распределе-

нием различных функционирующих компонентов. Рассмотрим в качестве примера БРСУРВ систему управления современных автомобилей. Современные системы управления автомобилями представляют собой пространственно распределенную структуру [24,81]. На рис. 1.1 показана общая структура бортовых распределенных систем управления автомобилями [71]. Данная структура представляется совокупностью функциональных узлов, которые объединяют между собой сетевыми каналами разных скоростей.

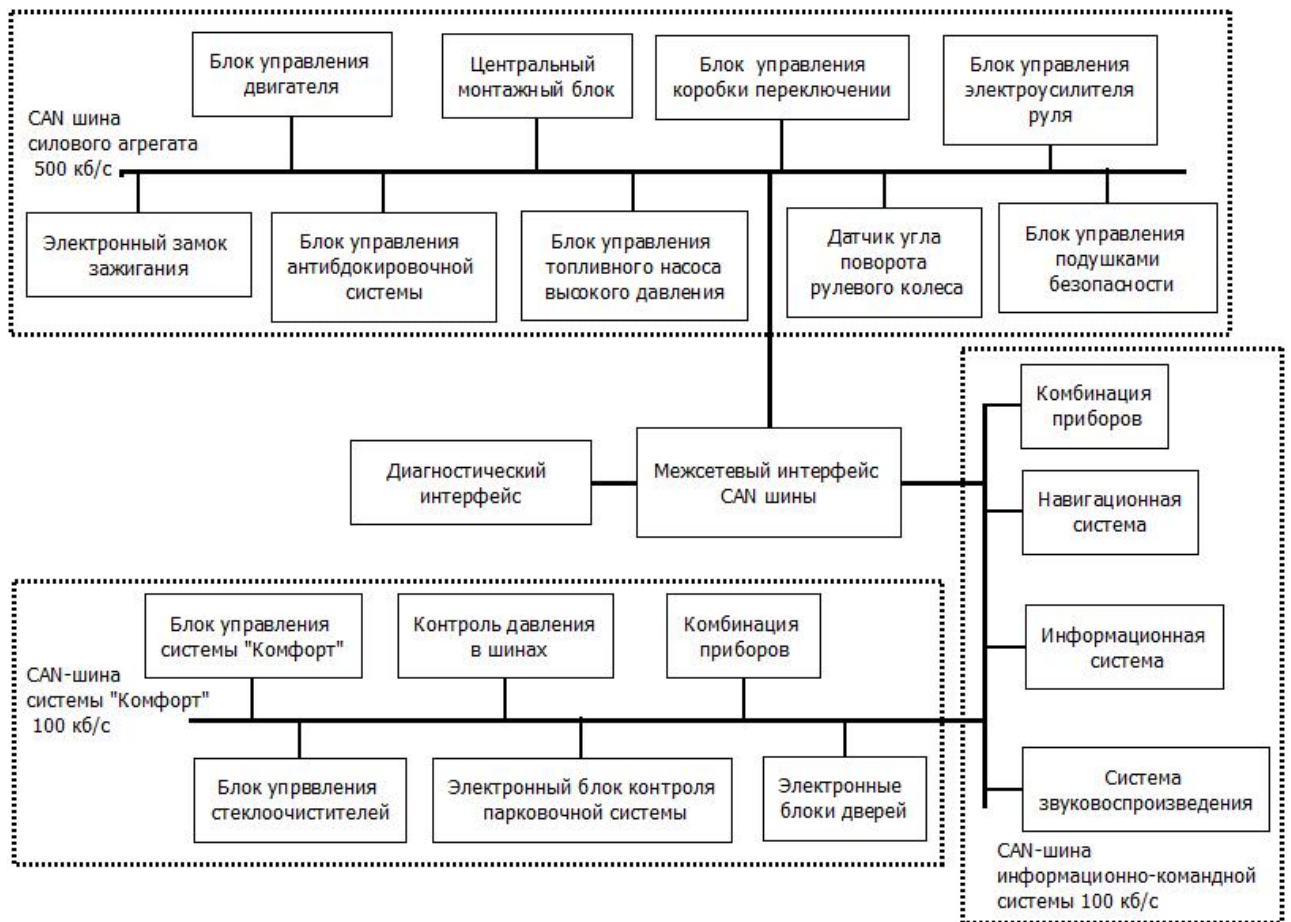


Рис. 1.1 Общая структура бортовых распределенных систем управления автомобилями

В качестве каналов передачи данных в современных автомобилях могут служить сети CAN и LIN [49,51,83]. По сравнению с другими сетевыми технологиями, CAN обладает высокой степенью надежности и устойчивости к электромагнитным помехам. Данное качество сети CAN обеспечивается ее встроенным механизмом обнаружения ошибок. Особенность сети CAN заключается, во-первых, в

ее линейности структуры шины и равноправности (мультимастерности) ее узлов, во-вторых, возможности бесконфликтных передач данных на основе использования идентификатора, записанного в каждом сообщении. В качестве узлов бортовой системы управления автомобиля используются интеллектуальные датчики, исполнительные устройства, блоки управления и контроля, и узлы сбора и обработки входных и выходных данных. Все взаимодействия между такими узлами выполняются на основе бортовой сети CAN, причем обмен информации может осуществляться между двумя или несколькими определенными узлами. LIN является простым асинхронным протоколом. В современных системах автомобилей он широко используется в местах, где не требуется высокая скорость и надежность передачи данных, при этом ему свойственна универсальность, многофункциональность, а также простота разработки и отладки.

Тенденцией развития бортовых систем управления является увеличение степени автономности и независимости в некоторых контурах управления и контроля. Это явление нетрудно заметить из истории создания конструкции систем подвески автомобилей. В общих чертах, все системы подвески похожи по своему составу, но разные по механизму реализации своих свойств [23,24]. В качестве компонентов, входящих в состав систем управления подвеской автомобилей, могут служить упругие и гасящие элементы, различные детали в виде рычагов и цифровые блоки управления и контроля. К таким блокам относятся системы управления процессом обработки входных сигналов от различных измерительных устройств, системы управления силой сопротивления амортизаторов, системы управления жесткостью упругих элементов, система управления клиренсом кузова и другие системы, которые обеспечивают надежность и безопасность функционирования подвески автомобиля [25-27]. В системах подвески, зачастую один элемент может выполнить сразу несколько различных функций. Однако в современных системах подвески практически каждая из этих функций выполняется отдельными конструктивными элементами, чем обеспечивается высокий уровень управляемости и стабильности автомобиля.

Таблица 1.1. Современные модели автомобилей с независимой подвеской.

<b>Марка</b>	<b>Страна</b>	<b>Модель - Год выпуска</b>
<b>ГАЗ</b>	Россия	ГАЗ311055 «Волга» (2005-2007), Газель Next (с 2013), ГАЗ 2330 “Тигр” (с 2005)
<b>ВАЗ</b>	Россия	Lada Granta (с 2011), Lada Kalina II (с 2013), Lada Priora (с 2007)
<b>BAW</b>	Китай	MicroBus BJ6400MAA2, BJ6400MAA1, BJ6420MAA1, SUV 2WD&4WD (с 2013)
<b>BYD</b>	Китай	BYD Flyer II , BYD F0 (с 2008)
<b>Suzuki</b>	Япония	Suzuki XL7 (с 1998), Suzuki Kizashi (с 2009)
<b>Ford</b>	США	Ford C-Max (с 2002), Ford Smax (с 2011), Ford Galax (с 2012)
<b>Jeep</b>	США	Jeep Cherokee (с 2013), Jeep Wrangler (с 2007)

Как известно, в зависимости от способа соединения колес между собой, современные системы подвески автомобилей делятся на зависимую и независимую или индивидуальную систему. Анализируя ряд источников, можно отметить многие современные модели автомобилей с независимой подвеской (таблица 1.1). Зависимая конструкция практически не реализуется в современных легких автомобилях. Она обычно используется в качестве задней подвески на моделях малотоннажных грузовых и некоторых типов коммерческих автомобилей, за исключением некоторых моделей легких автомобилей. Например, в моделях УАЗ 3151, УАЗ 3153 (в 1985-2007 гг.), УАЗ-469Б (в 1972-1986 гг.), УАЗ-315195 (с 2003) крупного российского производителя УАЗ (Ульяновский автозавод), так и в качестве передней и задней подвесок моделей американского автомобиля Ford Excursion (с 1999 по 2005), и ряда других подобных машин. Преимуществами зависимой подвески являются достаточно простая конструкция, высокие уровни устойчивости и прочности. Однако жесткая связь колес является основным недостатком, который

сильно сказывается на управляемости автомобилей, что ограничивает область ее применения.

В отличие от зависимой подвески, особенностью индивидуальной подвески является отсутствие жесткой связи между правым и левым колесом, так что вертикальное перемещение одного колеса не связано с перемещением другого, и толчок, который получается одним колесом, не передается через подвеску на другое. Модель независимой подвески дает возможность уменьшения жесткости упругих элементов, что улучшает качество системы управления. Благодаря своим преимуществам независимая подвеска активно применяется в различных современных автомобилях. Сегодня наблюдаются ее применение практически у всех мировых производителей автомобилей. В таблице 1.1 перечислены некоторые модели современных автомобилей в России, США, Китае и Японии в которых реализуется независимая подвеска. Анализ перспективных конструкций систем подвески на примере патентов мировых производителей показывает что, в качестве упругого элемента для специальных транспортных средств наблюдается тенденция развития гидропневматического и пневматического типа [28], поэтому в своей работе при моделировании и проведении ряда экспериментов мы останавливаемся на рассмотрении цифровых систем управления пневматической подвеской.

## **1.2. Особенности задач управления, регулирования и контроля в современных бортовых системах управления**

Ниже рассматриваются задачи регулирования, управления и контроля в современных бортовых системах управления на примере систем управления пневматической подвеской, повышающих ее качество. В качестве примера автомобилей с такими системами могут служить, например легкие автомобили высшего класса, автомобили повышенной проходимости, автомобили бизнескласса, автомобили «Скорой помощи», автобусы и т.п. Современная система подвески позволяет независимо от кузова эффективно изменить расположения шин и обеспечить постоянный контакт колес с дорогой, чем непосредственно уменьшается износ и

поддерживается эффективность работы системы тормозов и точность рулевого управления.

Перспективная система управления подвеской автомобиля представляет собой цифровую систему управления реального времени. С точки зрения управляемости, существуют пассивные, активные и полуактивные или адаптивные системы. В традиционных пассивных подвесках такие параметры подвески как степень демпфирования, жесткость упругого элемента, высота кузова и т.п. являются постоянными параметрами. В отличие от таких подвесок, активные подвески позволяют автоматически управлять своими параметрами в зависимости от состояния движения и требования водителя с помощью специального привода. Этот привод создает усилие, которое компенсирует величину вибрационных нагрузок. Разница между адаптивной и активной подвесками заключается в том что, вместо генератора силы в адаптивной подвеске используется регулируемый амортизатор. Такой амортизатор в современных автомобилях управляется электронным цифровым устройством. Адаптивная подвеска отличается от активной подвески тем что, для своей работы не требует больших затрат энергии и сложного механизма управления и контроля. Это отличие делает ее более практичной в большинстве случаев. Благодаря возможности сохранения некоторых демпфирующих свойств, при пропадании питания, адаптивная подвеска обладает большой степенью устойчивости и безопасности.

В современных автомобилях, цифровые блоки управления и контроля широко используются в процессе регулирования различных параметров их подвесок. Это обстоятельство позволяет не только обеспечить высокий уровень управляемости, и комфортабельности салона для пассажиров и водителя, но и устойчивости и безопасности функционирования автомобиля. На рис. 1.2 показана обобщенная структурная схема системы управления подвеской автомобиля. В качестве регулируемых параметров подвески служит положение высоты кузова, сила сопротивления амортизаторов и коэффициента жесткости упругих элементов. В большинстве случаев, задача регулирования жесткости подвески обычно реализу-

ется вместе с задачами регулирования высоты кузова и сопротивления амортизаторов. Величины регулирования зависят от информации, полученной из различных датчиков, систем и устройств в составе бортовой системы управления автомобилем. В цифровой системе управления подвеской обычно присутствуют центральный процессор, схема мониторинга параметров и контроля работоспособности компонентов системы, схема обработки входных данных и контроллеры приема и передачи данных. Последняя схема используется с целью осуществления процесса обмена данными между компонентами и связи с внешними системами.

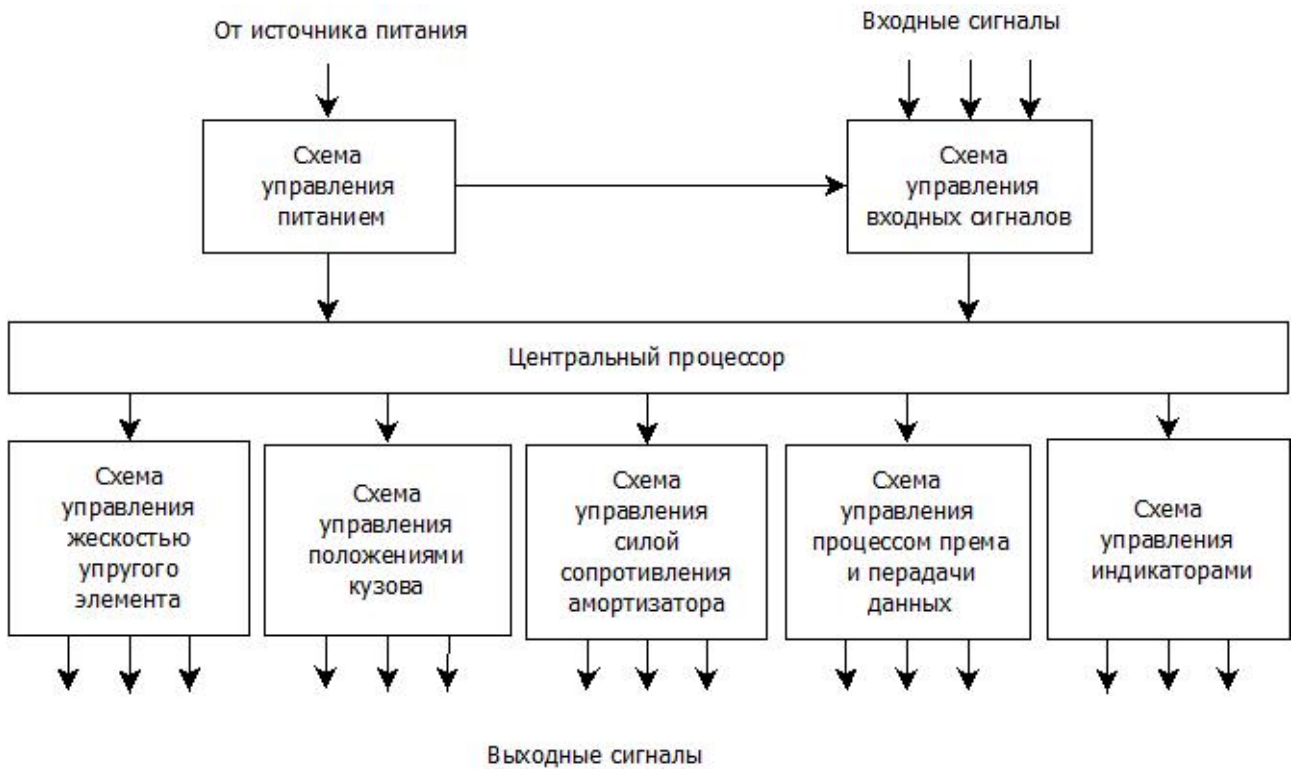


Рис. 1.2. Обобщенная структурная схема системы управления подвеской автомобиля

Задача регулирования положения высоты кузова (клиренса) в зависимости от условий движения является одной из основных задач бортовой системы управления подвеской. Эта задача выполняется путем регулирования давления и соответствующего объема воздуха в пневматических упругих элементах, расположенных на стойках автомобиля. Давление в пневматических упругих элементах в свою очередь изменяется методом подкачки компрессором или выпуска из них

воздуха. Для быстрого и адекватного регулирования давления в малых пределах используется воздушный ресивер. Сущность решения задачи заключается в создании цифрового блока обеспечивающего следующие алгоритмы управления:

1. Поддержание клиренса автомобиля независимо от нагрузки подрессоренной массы.
2. Принудительное изменение клиренса с целью улучшения проходимости, облегчения посадки и загрузки автомобиля.
3. Автоматическое регулирование клиренса в зависимости от скорости автомобиля с целью обеспечения устойчивости и безопасности его функционирования.
4. Временное блокирование возможности регулирования во времени поворота, экстренного торможения, интенсивного разгона, открывания двери или нахождения в неподвижном состоянии.

Таблица 1.2. Обеспеченные режимы регулирования клиренса автомобиля

<b>Название положения кузова</b>	<b>Положение передней части</b>	<b>Положение задней части</b>
<b>Нормальное положение</b>	0 мм	0 мм
<b>Повышенное положение</b>	+60 мм	+50 мм
<b>Пониженное положение</b>	-20 мм	-20 мм
<b>Положение посадки</b>	-40мм	-40мм

В таблице 1.2 показаны различные обеспеченные положения кузова автомобиля LAND ROVER, в котором реализуется пневматическая подвеска. Повышенное положение кузова в документации называется внедорожным положением. Знак « + » означает, что кузов поднят, знак « - » означает что, кузов опущен относительно нормального положения.



Рис. 1.3 Структурная схема регулирования клиренса автомобиля

С помощью датчиков положения двери цифровой блок управления определяет, в каком состоянии (движения или посадки) находится автомобиль. Датчики положение кузова позволяют отслеживать положения углов кузова. Датчик температуры используется для защиты компрессора от перегрева. Датчик давления предназначен для контроля давления воздушного ресивера. Переключательный клапан - это клапан ресивера используется для поддержания его давления. Давлением в каждом пневматическом упругом элементе можно управлять независимо друг от друга с помощью соответствующего клапана. Как отмечали выше, давление пневматического элемента изменяется либо с помощью воздушного ресивера через переключающий клапан или с помощью компрессора через выпускной клапан. С помощью переключателя режимов можно выбрать требуемое положение кузова. В системе обычно рассматривается и возможность мониторинга текущего положения кузова и других контролируемых параметров. В памяти процессора

блока управления записываются пороговые параметры, полученные в процессе реальной эксплуатации автомобиля. Получая данные от датчиков, блок управления сравнивает эти данные с пороговыми и номинальными значениями, записанными в его памяти, и реализует соответствующий алгоритм управления. В процессе работы, цифровая система регулирования высоты кузова может взаимодействовать с другими системами, например системой курсовой устойчивости.

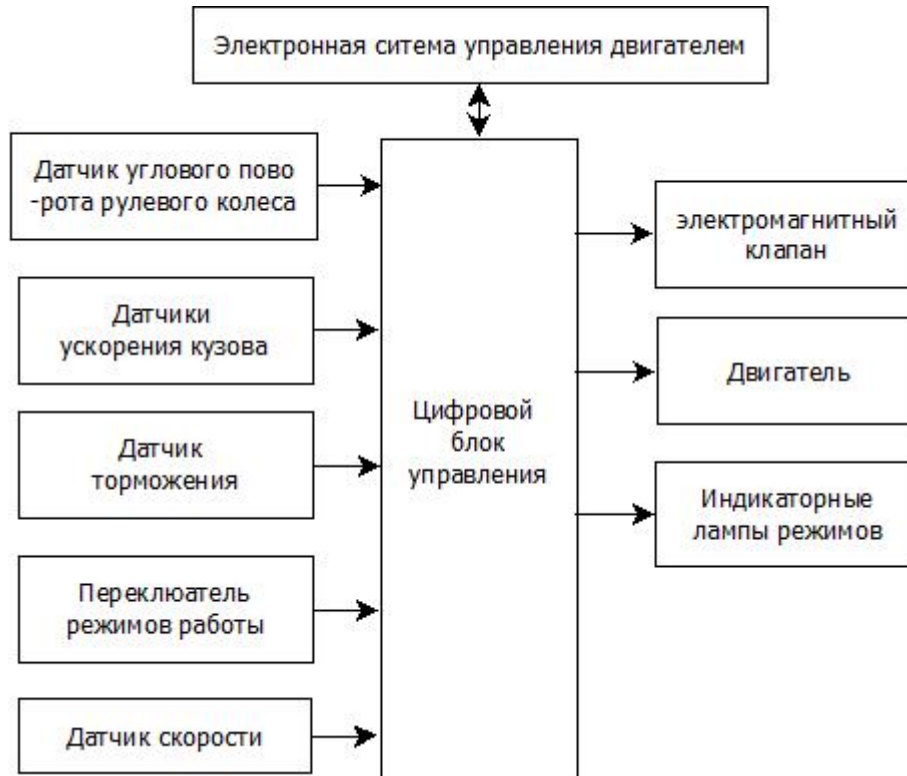


Рис.1.4. Структурная схема электронной системы управления силой сопротивления амортизатора

Задача регулирования сопротивления в пневматической адаптивной подвеске осуществляется путем изменения проходных отверстий поршня в силу зависимости сопротивления амортизатора от скорости движения поршня. Под действием на электромагнитный клапан электрического тока, проходное сечение перепускных отверстий в поршне либо увеличивается, либо уменьшается, что изменяет силу сопротивления амортизатора. Существует и другой вариант реализации адаптивной подвески. В этом случае, вместе электромагнитного регулирующего клапана используется так называемая магнито-реологическая жидкость [29].

Структурная схема электронной системы управления силой сопротивления амортизатора показана на рис.1.4. Переключатель режимов позволяет регулировать сопротивления каждого амортизатора в трех режимах: нормальном, спортивном и комфортном режимах. Качество дорожного покрытия характеризуется датчиком вертикального ускорения кузова. Датчик углового поворота рулевого колеса, датчик торможения и датчик скорости автомобиля предназначены для определения состояния автомобиля в повороте, при торможении или ускорении. На основе показаний датчиков блок управления посылает управляющие сигналы на соответствующие амортизаторы для обеспечения горизонтального положения кузова. Чем резче изменение направления движения, тем больше становится коэффициент сопротивления амортизатора, т.е. устойчивей положения автомобиля. Ситуация аналогична в случае торможения, когда передняя часть кузова опускается ниже задней части, и наоборот в случае ускорения. К исполнительным устройствам, которые используются для регулирования сопротивления амортизаторов, относятся электромагнитные клапаны, магниты и электрические двигатели. В современной адаптивной системе управления подвеской блок управления позволяет регулировать сопротивление каждого амортизатора в отдельности, что увеличивает степень комфортности и безопасности функционирования автомобиля.

На рис. 1.5 показана функциональная схема реализации цифровой системы управления подвеской автомобиля на примере одного колеса. В данной схеме:

- |           |  |
|-----------|--|
| <b>Д1</b> | Датчик угла поворота                                     |
| <b>Д2</b> | Датчик угловой скорости рулевого колеса                  |
| <b>Д3</b> | Датчик давления в тормозной системе                      |
| <b>Д4</b> | Датчик угла крена кузова                                 |
| <b>Д5</b> | Датчик скорости автомобиля                               |
| <b>Д6</b> | Датчик высоты (фотоэлементы или герконы)                 |
| <b>Д7</b> | Датчик положения двери определяет посадка или движение   |
| <b>Д8</b> | Датчик положения педали подачи топлива регистрирует вре- |

мя (для прохождения 10% полного хода педали)

<b>И1</b>	Реле
<b>И2</b>	Компрессор
<b>И3</b>	Электромагнитный клапан
<b>И4</b>	электродвигатель
<b>СУ1</b>	Схема управления компрессором
<b>СУ2</b>	Схема управления электромагнитным клапаном
<b>СУ3</b>	Схема управления электродвигателем
<b>СУ4</b>	Схема управления процессом приема и передатчика
<b>СУ5</b>	Схема управления индикацией
<b>О1</b>	Пневмокамеры
<b>О2</b>	Электромагнитный золотник
<b>О3</b>	Элементы индикации
<b>ЦП</b>	Центральный процессор
<b>ЦОВС</b>	Схема цифровой обработки входных данных

Из рисунка видно что, современная система управления адаптивной подвеской автомобилей представляет собой электронную цифровую систему с пространственным распределением компонентов. Все задачи регулирования клиренса, сопротивления амортизатора, мониторинга параметров и контроля работоспособности компонентов в стойках выполняются в отдельности с помощью одного центрального процессора и некоторых вспомогательных цифровых блоков управления. Все датчики, исполнительные устройства и блоки управления необходимо подключить непосредственно к центральному процессору. Это обстоятельство повышает нагрузку центрального процессора, усложнит процесс отладки, тестирования, оптимизации и верификации системы и ухудшает работоспособность системы при возникновении частичных отказов. Кроме этого, при замене электронной системы управления из-за наличия в ней отказа, необходимо снова реализовать все соединения и связи, в том числе и тестировать их работоспособность.

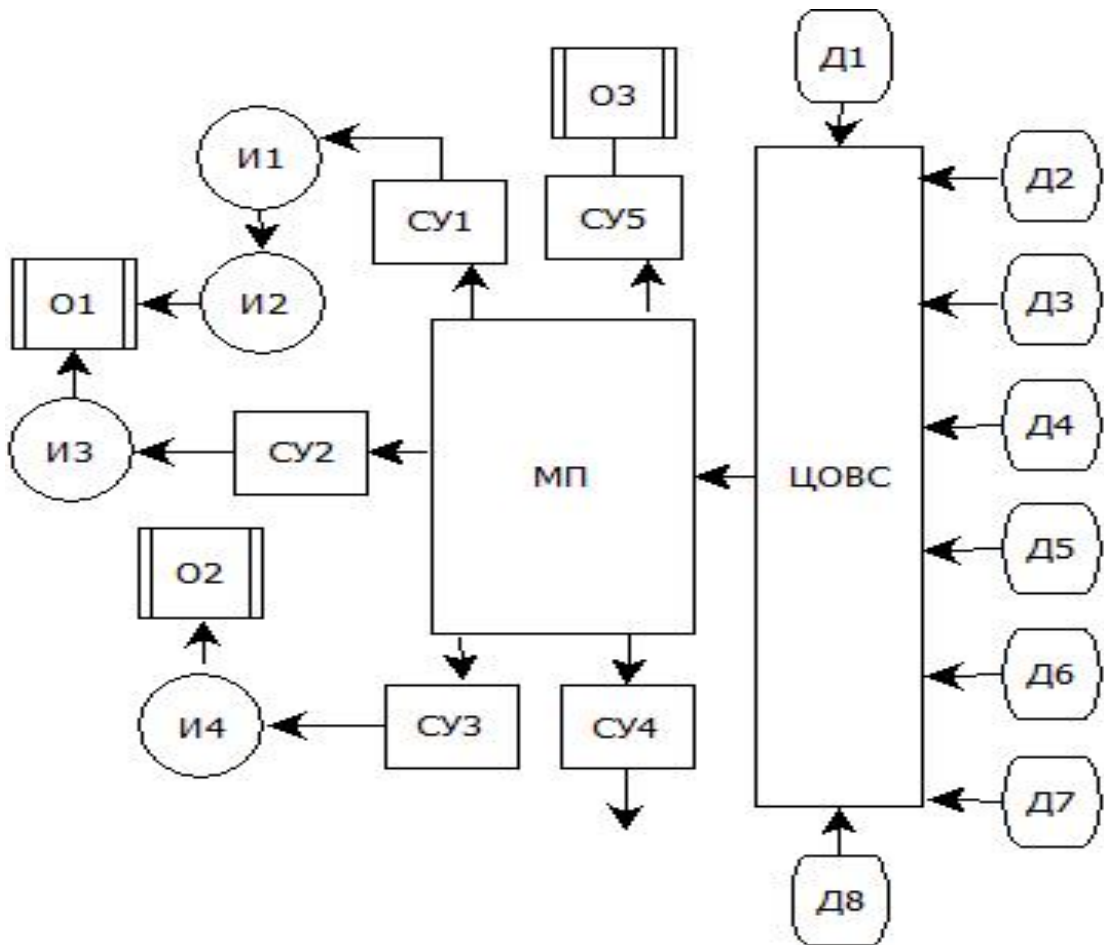


Рис.1.5. Функциональная схема реализации цифровой системы управления подвеской автомобилей на примере одного колеса

### 1.3. Обеспечение работоспособности сложных высокодинамических бортовых систем управления

Бортовая система управления на сегодняшний день представляет собой распределенную сложную высокодинамическую систему. Поддержание высокого уровня работоспособности таких систем при наличии отказов в системе связи или сбоях их компонентов является очень важным качеством современных бортовых распределенных систем управления реального времени (БРСУРВ).

Существуют различные методы обеспечения данного качества в процессе проектирования, эксплуатации и реализации таких систем (рис. 1.6). Качество бортовой системы управления практически закладывается в процессе проектиро-

вания и обеспечивается при ее реализации [30-36]. Одну из важных задач, которые необходимо решать в процессе эксплуатации системы заключается в сборе и обработке статических данных, которые характеризуют причины ухудшения качества системы. Данная техническая задача требует большой степень автономности и гибкости механизма ее реализации, и является одной из главных функций системы контроля и мониторинга. Можно перечислить некоторые эффективные методы повышения качества БРСУРВ, применяемые при проектировании, например, построение систем с использованием высоконадежных элементов и ограниченными их последствиями отказов; применение метода встроенного контроля, автоматических проверок; сохранение состояния системы на основе контрольных блоков с целью восстановления системы при отказе и т.п. К методам обеспечения работоспособности бортовых систем управления, применяемым при реализации, относятся различные методы верификации, контроля, и испытания полной системы и ее частей. Выбор того или иного метода определяется не только эффективностью данного метода, свойствами самой системы управления, но и целями управления и условиями работы исследуемой системы.



Рис.1.6. Методы повышения качества БРСУРВ при проектировании, реализации и эксплуатации

В большинстве случаев, при разработке современных высококачественных бортовых систем, обычно применяют не один метод, а комплекс методов с целью обеспечения необходимого уровня работоспособности. Одним из таких методов является применение механизмов резервирования и контроля в различных процессах проектирования и эксплуатации бортовых систем. Оба механизма можно реализовать на различных этапах разработки системы в программном обеспечении и на аппаратуре. Резервирование является основным и широким используемым методом повышения надежности и безопасности функционирования бортовых систем управления. В некоторых случаях данный метод позволяет не только обеспечить высокий уровень работоспособности системы, но и повысить степень достоверности процесса обработки данных. Существуют различные виды резервирования. На рис. 1.7 показываються различные виды резервирования. Их целесообразно разделять по разным признакам, например, по способу включения или

восстанавливаемости резерва, по степени нагруженности, по способу соединения элементов и т.п. Подробно о конкретном типе резервирования и методах их применения можно смотреть в работах [37-39].



Рис.1.7. Классификация методов резервирования

Отметим некоторые особенности реализации резервирования. Одной из главных задач в процессе его реализации является нахождение отказавшего узла, и обеспечение минимального времени перехода на резерв. Существует механизм тройного резервирования, который широко используется в авиационной технике. Преимущество данного механизма заключается в автоматическом выборе истинного варианта выполнения благодаря возможности обнаружения отказа в одном из трех вариантов. Недостатком данного механизма является требование объемной используемой аппаратуры. Для устранения такого недостатка предлагается метод дублирования с контролем. Сущность данного метода заключается в использовании цифрового узла для контроля и обнаружения отказа вместо третьего

запасного варианта. Для бортовой распределенной системы управления обеспечение надежности процесса приема и передачи данных играет очень важную роль с точки зрения поддержания полной ее работоспособности. Для этого широко используется информационное резервирование в виде многократной передачи информации по каналу связи или добавления избыточных кодов в ее формате кадров данных.

Параллельно с применением резервирования, реализация механизма контроля является мощным подходом обеспечения высокого уровня работоспособности бортовой системы. В отличие от механизма резервирования, основное назначение процесса контроля заключается в обнаружении и предупреждении отказа. На самом деле механизм контроля не повышает качество системы управления, но позволяет возможное долгое сохранение этого качества при эксплуатации системы. Существуют различные методы контроля. Они могут реализовываться в процессе проектирования, изготовления или оптимизации системы. Контрольными аспектами БРСУРВ являются параметры, значения которых характеризуют либо функциональные, т.е. свойства целевого назначения БРСУРВ, либо нефункциональные свойства. Примерами нефункциональных свойств могут служить производительность, безопасность, работоспособность и т.п.

Не смотря на то что, механизмы резервирования и контроля обладают огромными преимуществами в процессе проектирования и реализации высококачественных новых систем управления, они трудно реализуются в процессе аппаратной оптимизации существующих систем. Традиционный подход реализации таких механизмов требует достаточного уровня понимания конструкции и алгоритма функционирования исследуемой системы. Наличие этого требования объясняется необходимостями замены, изменения, или добавления какого-нибудь нового компонента, т.е. модифицирования существующей системы управления в процессе ее оптимизации. Это требование далеко не всегда выполняется в сложных высокодинамических бортовых системах или при наличии их недоступных компонентов.

#### **1.4. Современные средства аппаратного проектирования, моделирования и верификации цифровых бортовых систем управления**

В таблице 1.3 переисляются некоторые средства аппаратных проектирования и реализации цифровых схем. Средства аппаратного проектирования, на сегодняшний день, позволяет не только создать сложные проекты на основе языков описания аппаратуры или графических схем, но и моделировать и тестировать их результаты. Крупнейшими мировыми компаниями в области создания таких средств являются Xilinx, Altera.

В качестве примера продуктов фирмы Altera могут служить Quartus II, Max + Plus II, фирмы Xilinx - это ISE WebPACK и ISE Foundation. Кроме этого, существуют пакет Active-HDL - продукция фирмы Aldec, Modelsim - продукция фирмы Model Technology (подразделение компании Mentor Graphics) и различные другие фирмы. Modelsim является высокоскоростным средством моделирования и верификации цифровых схем. Оно поддерживает не только язык VHDL и Verilog Test Bench, но и командный язык Tcl. САПР Max Plus II обеспечивает выполнение различных этапов проектирования и реализации цифровых устройств. Система обладает удобным средством для создания, синтеза структур, транскодации внутренних связей, компиляции и верификации проектов.

Xilinx WebPACK ISE и Foundation ISE являются полнофункциональными средствами проектирования цифровых устройств. Преимущество Xilinx WebPACK ISE по сравнению с пакетом Foundation ISE является возможность бесплатного скачивания с сайта компании. Однако у него существует ограничение по логической емкости ПЛИС до 1.5 млн. вентилей.

Таблица 1.3. Современные средства аппаратных проектирования, моделирования и верификации цифровых устройств.

Средства	Фирма и год выпуска	Языки поддержки	Особенность
<b>Active-HDL</b>	Фирма Aldec в 1997. Самая новая версия это Active-HDL 8.3 (2010)	VHDL, Verilog, SystemC, System verilog	Возможность моделирования ПЛИС и ASIC на любых вычислительных платформах. Большой степень гибкости при разработке сложных проектов.
<b>Quartus II</b>	Фирма Altera. Последняя версия Quartus II v14.0 (2014)	AHDL, Verilog, VHDL	Высоко-эффективное производительное средство проектирования программируемых логических микросхем FPGA, CPLD, SoC FPGA и специальные ASIC.
<b>WebPACK ISE</b>	Фирма Xilinx в 2001	Verilog, VHDL	Поддерживание большого количества современных ПЛИС фирмы Xilinx типа Virtex, Spartan, CoilRunner, XL9500...
<b>Max + Plus II</b>	Фирма Altera В 2000	AHDL, VHDL	Старый пакет. Главное преимущество является простотой в использовании. Поддерживает ПЛИС MAX9000, FLEX 10K, MAX7000, FLEX8000
<b>Modelsim</b>	Model Technology подразделение компании Mentor Graphics	VHDL, Verilog Test Bench, Командный язык TCL	Высокая скорость компиляции и моделирования.

Средства Active-HDL разработано фирмой Aldec в 1997. В качестве языков описания аппаратуры, средства Active-HDL поддерживают VHDL, Verilog, SystemC. Active HDL 7.3 дает возможность добавления библиотеки цифровых элементов производителей по вкусу разработчиков после завершения установки. По сравнению со средством Quartus, Active HDL обладает мощным ядром моделирования с использованием нового инструмента работы с временными диаграммами (Accelerated Waveform Viewer).

Практически в современных средствах проектирования, моделирования и верификации цифровых устройств, как Max Plus II, WebPACK ISE, Active-HDL, Quatus II и другие поддерживают и текстовый и графический редакторы в качестве средства создания и редактирования. В первом случае проект описывается на основе известных языков описания аппаратуры, например VHDL, Verilog, System Verilog, SystemC, Matlab HDE. Графический редактор позволяет создать проект в виде блока -диаграмм BDE или конечного автомата FSM. Существует возможность описать все то что, нарисовать в схеме текстовым языком, однако не все то что описано на языке аппаратуры легко реализовать в схеме. Можно привести простой пример: В процессе верификации цифровых устройств управления в средстве Active-HDL 7.3 часто вызывается трудность воспроизведения точных входных сигналов когда эти сигналы изменяются по сложному закону. Это обстоятельство делает преимущество использования текстовых языков по сравнению с графическим дизайном. Кроме этого, скорость описания и исправления сложных проектов, у которых существуют например, 1000 модулей, на текстовом языке оказывается на много больше чем скорость описания и исправления их графическим путем.

В современных средствах проектирования и верификации цифровых устройств существует возможность построения собственной библиотеки модулей. Эта возможность позволяет уменьшить нагрузку разработчиков при создании новых похожих проектов. Задача проектирования и верификации сложных проектов обычно состоит из различных задач построения и тестирования каждого

отдельных блоков управления, группы определенных блоков и системы в целом. Входными данными одного блока управления могут быть входными данными другого блока или группы конкретных блоков. Из-за не точности имитационных генераторов, построенных на основе математической модели, корректность функционирования отдельных блоков управления не гарантирует корректность функционирования групп конкретных блоков и полной системы управления. Кроме этого, в нередких случаях, входные данные верифицируемого блока требуется получить непосредственно в процессе функционирования компонентов исследуемого объекта. Однако, прямое подключение к объекту далеко не всегда выполняется из-за ограничения возможности доступа к определенным его компонентам. Эти обстоятельства вызваны актуальностью задачи разработки автономных методов верификации сложной высокодинамических систем.

### **1.5. Выводы по главе**

Современные бортовые системы управления реального времени представляют собой сложные высокодинамические системы с пространственным распределением функциональных компонентов. Анализ задач управления, контроля структурных схем их реализации в современных бортовых системах на примере системы управления пневматической подвеской автомобилей показал что, основными характеристиками бортовых систем управления являются: во-первых, наличие множеств различных подзадач управления, регулирования и контроля в единой системе, во-вторых, широкое применение цифровых электронных устройств и сетевой технологии соединения. Результаты анализа продукции различных мировых производителей автомобилей показали что, одна из главных тенденций развития конструкции и бортовых систем управления подвеской – это повышение степени управляемости, гибкости и работоспособности системы за счет создания автономных и независимых контуров управления и регулирования.

Обсужден вопрос повышения эффективности функционирования и обеспечения работоспособности бортовых систем управления в процессе проектирова-

ния и эксплуатации. Особенное внимание уделено традиционным методам решения: метод резервирования и построения встроенной системы контроля. Показано что, несмотря на огромные преимущества таких методов в процессе проектирования и реализации высококачественных систем, существует ограничения возможности их применения в задачах оптимизации и верификации бортовых систем из-за следующих причин: во-первых, трудность реализации таких методов, например для применения механизма резервирования, требуется достаточный уровень понимания конструкции и алгоритмов функционирования системы. По причине сложности современных бортовых систем и ограничения времени выполнения проекта, это требование далеко не всегда выполняется. Во-вторых, большая вероятность нарушения работоспособности существующей системы при не точном ее модифицировании. Кроме этого, в некоторых случаях, например, когда компоненты системы не доступны, традиционные методы практически трудно реализуются.

Рассмотрены некоторые характеристики современных средств аппаратного проектирования и верификации бортовых цифровых систем управления. Отмечены преимущества построения собственной библиотеки цифровых модулей и использования текстового редактора для проектирования сложных цифровых систем. Показано что, с целью увеличения эффективности процесса верификации и отладки бортовых распределенных систем управления актуальной становится задача исследования и разработки методов автономной регистрации параметров высокодинамических систем.

## **Глава 2. Перспективные подходы построения сложных высокодинамических бортовых систем управления, и приемы их оптимизации**

В данной главе рассмотрены концепции построения сложных высокодинамических бортовых систем управления реального времени на основе модели слабосвязанной распределенной системы. Показаны преимущества реализации многоуровневой структуры организации системы, алгоритма повышения автономности локальных подсистем управления, и применении сетевой технологии связи на различных структурных уровнях системы. Отмечена возможность использования современной бортовой сети как информационной основы для обеспечения работоспособности и повышения качества функционирования бортовых систем управления. Предложены методы решения задачи оптимизации на основе сетевой информационной среды, и механизмы их реализации.

### **2.1. Централизованный и распределенный механизмы построения сложных бортовых систем управления**

Как отметили выше, в ходе развития сложности функционирования и требования к своему качеству, современные бортовые системы управления представляют собой высокодинамические системы, которые могут сочетать в себе не только механические, но и электрические, оптические, пневматические и т.п. элементы. Резкое уменьшение габаритов современных электронных устройств, при одновременном повышении уровня их функциональной насыщенности, во многом изменило идеологию проектирования таких сложных систем. На сегодняшний день наблюдается переход от централизованных систем, в которых все процессы управления реализуются в едином центральном контроллере (рис. 2.1а), к распределенным системам - когда функции управления распределяются по отдельным компонентам, и каждый компонент является активным устройством. В первом случае, в системе используется мощный процессор с большим количеством подключаемых к нему пассивных устройств, а передача информации осуществляется по комплексным каналам (рис. 2.1б). Этот процессор собирает инфор-

мацию о состоянии всех узлов системы, осуществляет ее обработку и выдает управляющую команду каждому узлу.

На рис. 2.1а показана логическая схема организации системы. Здесь  $У1, У2, У3, \dots, Уn$  - функциональные пассивные узлы, ЦСУ - центральная система управления, архитектура которой показана на рис. 2.1б. На этом рисунке: МВВ, МВыв - многоканальные модули ввода и вывода, П, СК, ЗУ - высокопроизводительной процессор, системный контроллер, запоминающее устройство. ША, ШД, ШУ - шины адресов, данных и управления.

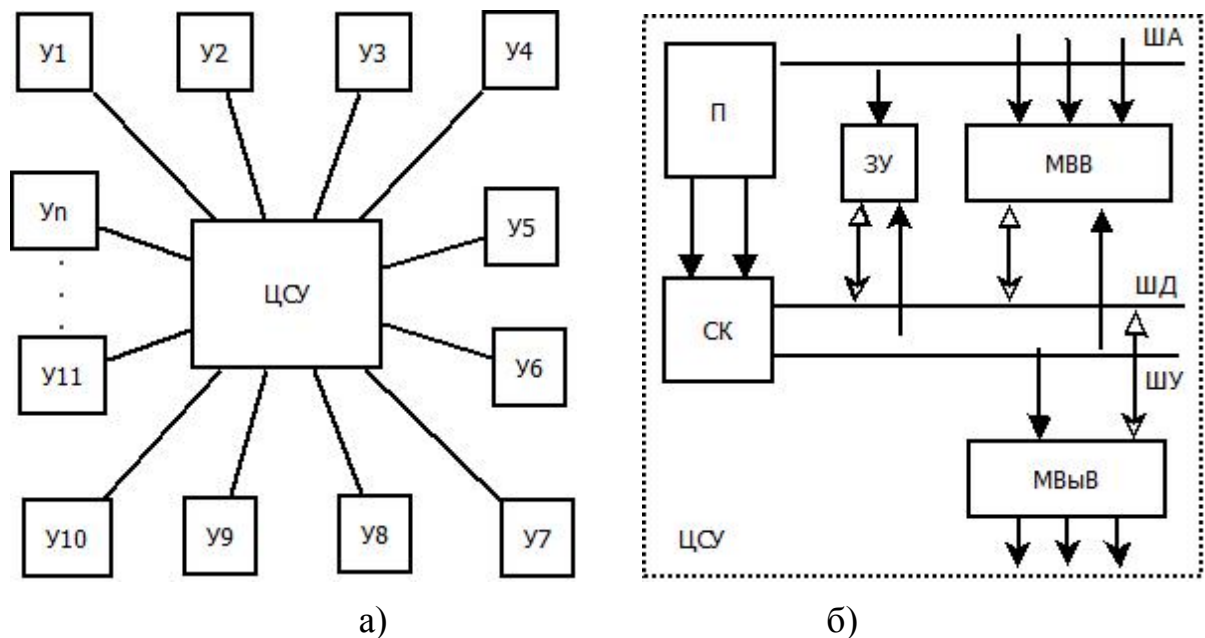


Рис. 2.1. Структура централизованной системы управления  
 а) Логическая схема организации централизованной системы;  
 б) Архитектура центральной системы управления

Главным недостатком централизованной системы управления является необходимость применения мощного процессора, скорость обработки сигналов которого практически не всегда удовлетворяет требованиям задачи. Кроме этого, существует необходимость сбора и обработки чрезвычайно больших объемов информации, что имеет большое требование к объему памяти и организации связи. Такая система трудно расширяется и затрудняет ее моделирование. Централизованная система управления имеет низкую надежность из-за большого числа проводов. Вследствие этого, увеличивается суммарная протяженность и перегружен-

ность каналов связи, возрастает риск помех. Обрыв или замыкание одного провода может приводить к полному отказу системы. Для таких систем, трудно обеспечивается их надежность на основе резервирования аппаратуры.

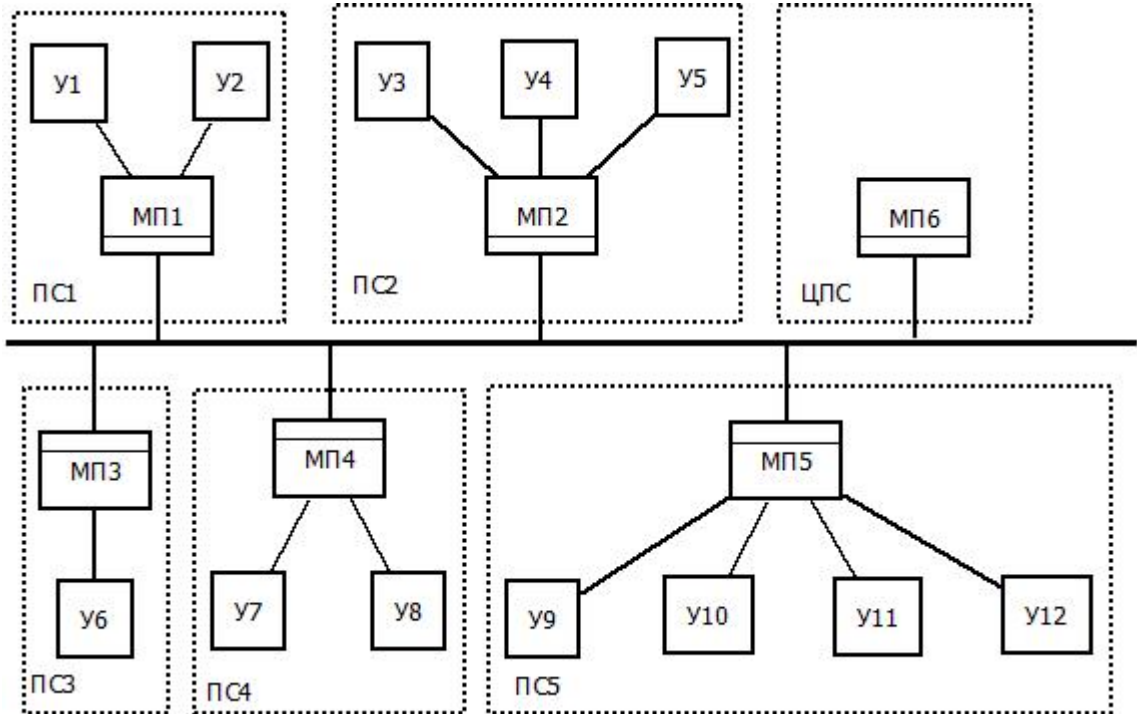


Рис.2.2. Структура распределенной системы управления

Сложные современные системы управления, как правило, представляют собой распределенные системы в смысле функционирования, и распределения компонентов (рис. 2.2). Под распределенной системой управления понимается совокупность нескольких слабосвязанных, в том числе и независимых подсистем. Каждая подсистема обладает своим собственным локальным блоком управления, вычисления, и решает конкретную, определенную типичную, не сложную задачу.

Термин «слабосвязанные подсистемы» означает что, сильные связи между каждой подсистемой и центральной подсистемой управления, и их связи между собой практически отсутствуют. Процесс обращения к центральной подсистеме осуществляется с помощью коротких кадров данных и с небольшой частотой обращения. Иначе говоря, каждая подсистема обладает достаточно большой степенью автономности. На рис. 2.2: МП1, МП2, ..., МП6 это микропроцессоры локальных подсистем управления PC1, PC2, ..., PC5 и ЦПС (центральной подсистемы).

темы управления) соответственно. С точки зрения функционирования полной системы, локальная подсистема управления играет роль ведомого узла при подключении в сети передачи данных, а центральная подсистема управления – роль ведущего. Однако процессы обращения каждой локальной подсистемы к ведущей подсистеме осуществляются с низкой частотой. Каждая локальная подсистема может выполнять свои контуры управления и регулирования в отдельности, т.е. независимо от других локальных подсистем. Скорость обработки данных и передачи информации внутри каждой локальной подсистемы намного больше скорости обмена данных между ведущей и каждой ведомой подсистемой. Подробно о достоинствах и недостатках централизованных и распределенных систем можно в целом смотреть в приложении 1.

## **2.2. Концепции декомпозиции сложных высокодинамических бортовых систем управления**

Первая концепция: многоуровневая структура организации системы управления. Эта концепция позволяет разбить сложную систему управления по уровням, что дает возможность скрытия несущественных относящихся к другому уровню деталей. Кроме этого, данная концепция позволяет повышать эффективность процесса проектирования, моделирования, верификации и аппаратной реализации системы. Благодаря данной концепции, сложная задача управления может быть представлена в виде множества подзадач, которые находятся на разных уровнях и обладают типичным простым решением. Для решения таких задач не требуется применения сложных методов и мощных микропроцессоров. Каждую подзадачу, с точки зрения организации системы, можно рассматривать как локальную систему управления. Благодаря своей простой структуре, для них легче производить применения перспективных механизмов управления, контроля, тестирования и отладки по сравнению с исходной системой. Кроме этого, задача управления и контроля каждой подсистемы обладает типичным решением, так что существует возможность сокращения времени проектирования и верификации полных систем.

Вторая концепция: повышение степени автономности (независимости) локальных подсистем. В соответствии с этой концепцией, для минимизации сложности бортовых систем управления, необходимо максимально повысить степень автономности локальных подсистем. Это означает что, все сильные связи реализуются в рамках локальных подсистем, а взаимодействие между локальными подсистемами на одном уровне и между уровнями, либо отсутствует, либо осуществляется с низкой частотой обращения.

### **2.3. Применение сетевой технологии в области разработки сложной бортовой системы управления**

Бортовые сети - это средство связи между бортовыми подсистемами, компонентами (рис. 2.3), которое обеспечивает надежный процесс приема и передачи информации. В современных бортовых системах управления используются различные цифровые сетевые интерфейсы на различных структурных уровнях:

1. Внутри блоков управления, между функциональными устройствами и модулями.
2. Внутри системы, между блоками.
3. Для подключения к системе различных датчиков, исполнительных устройств.
4. В комплексах бортового оборудования между системами или в глобальных сетях передачи данных.

В первом случае может служить магистральная параллельная шина, интерфейсы SPI, I2C, USB и т.д. Во втором и третьем случаях могут реализовать простые последовательные интерфейсы: CAN, Profibus, Modbus, LIN, HART. В четвертом случае широко используются интерфейсы Ethernet, CAN (у большинства бортовых систем управления автомобилями и подводными аппаратами), ARINC 429, ARINC 629 (для обычных летательных аппаратов) и MIL-STD-1553B, STANAG 319 (для военных самолетов) [40].



Рис.2.3. Бортовая сеть - средство связи и обеспечения процесса приема и передачи информации

Одним из главных преимуществ применения сетевой технологии в области проектирования сложной системы управления является возможность распределения системы управления по объекту вблизи источников информации, что непосредственно уменьшает затраты на монтаж, и дает возможность расширяемости системы. Сетевые технологии позволяют совместно использовать оборудования различных фирм, и повышают степень надежности благодаря возможности резервирования и применения различных методов помехозащищенности на аппаратном уровне. В качестве примера таких методов может служить построение дифференциального приемопередатчика в CAN сетях. Подключение к бортовой сети может получить не только данные, передаваемые между различными компонентами, но и их информационные характеристики из соответствующих систем хранения данных.

Таблица 2.1. Характеристики популярных бортовых сетей реального времени.

	<b>HART</b>	<b>Profibus</b>	<b>Modbus</b>	<b>LIN</b>	<b>ARINC 429</b>	<b>Ethernet IEEE803.2ae</b>
<b>Макс. скорость</b>	1200 б/с	12 Мб/с	9.6-38 Кб/с	20 Кб/с	12.5-100 Кб/с	10Гб/с
<b>Макс. число узлов</b>	15	127	250	-	-	-
<b>Размер сообщ.</b>	10-317 байтов	244 байта	0-254 байта	-	32 бит на слово	64-1518 байтов
<b>Формат сообщ.</b>	Ведущий/ведомый	Profibus DP Master/slave, Profibus FMS Multiaster, Profibus PA Multimaster,	Sigle Master/ Multi slaves	Sigle Master/ Multi slaves	-	Клиент-сервер, точка - точка
<b>Длина линия связи</b>	700-2800м	100м-24км	350м	До 40м	-	10-40км
<b>На основе интерфейса</b>	-	-	RS232C RS422 RS485	UART	-	-

В бортовых распределенных системах управления применяются различные методы передачи данных на основе последовательных, параллельных интерфейсов или их комбинации. По сравнению с параллельной шиной, последовательный интерфейс имеет ряд достоинств таких как, не ограниченное количество модулей из-за конструктивных характеристик контроллера, возможность горячей замены модулей [41].

В таблицах 2.1 и 2.2 показаны характеристики различных популярных бортовых интерфейсов и сетей реального времени[42-52]. Распределенные системы управления на базе последовательного интерфейса обладают высокой производи-

тельностью, простотой настройки. Однако у последовательной сети есть существенный недостаток по сравнению с параллельным интерфейсом – небольшая скорость передачи данных. Вследствие чего на практике в бортовых системах управления часто используются и параллельные и последовательные интерфейсы в зависимости от расстояния между компонентами и требуемой скорости передачи и обработки данных.

Таблица 2.2. Характеристики популярных цифровых интерфейсов в бортовых системах управления реального времени.

	<b>RS485</b>	<b>USB</b>	<b>SPI</b>	<b>I2C</b>	<b>RS232</b>	<b>CAN</b>
<b>Макс. скорость</b>	10 Мб/с	12 Мб/с 480 Мб/с 4.8 Гб/с	-	400 Кб/с	115 Кб/с	1 Мб/с
<b>Макс. число узлов</b>	64 (32 приемов)	-	-	-	1	32
<b>Тип линии связи</b>	Дифференциальная пара	Дифференциальная пара	-	Логический уровень	Потенциальный	Дифференциальная пара
<b>Длина линии связи</b>	1200м	-	15м	1м	15м	1000м
<b>Топология</b>	Полудуплекс, многоточечная	Полудуплекс, точка-точка	-	-	Дуплекс, точка к точке	Полудуплекс, многоточечная

Таким образом, перспективным подходом решения задачи разработки сложных высокодинамических бортовых систем управления является создание модели слабосвязанной распределенной системы. Главные методы создания такой модели основаны на концепциях, которые заключаются в реализации многоуровневой структуры организации системы, повышения автономности локальных подсистем управления, и так же применении цифровой сетевой технологии связи на различных структурных уровнях. Современная бортовая сеть позволяет не только

эффективно выполнить процесс приема и передачи данных между компонентами системы, но и является информационной основой для обеспечения решения различных задач синтеза, анализа, оптимизации и верификации ее качества.

#### **2.4. Информационная среда как средство обеспечения качества сложных бортовых систем управления**

Задача повышения качества существующих бортовых систем управления является сложной технической задачей. Основные методы реализации традиционного подхода оптимизации заключаются в выполнении различных алгоритмов замены, изменения, или добавления какого-нибудь нового компонента, т.е. модифицировании существующей системы. Применение таких методов требует достаточный уровень понимания структуры связи и функционирования бортовых систем управления, что вызывает трудностью из-за следующих причин:

Во-первых, современная бортовая система управления представляет собой сложную высокодинамическую систему с большим количеством цифровых узлов. Один узел может участвовать не только в одной задаче, но и одновременно в различных задачах. Кроме этого, такие узлы обычно соединяются между собой сложной структурой связей. Такие связи могут быть динамическими, т.е. изменяются в зависимости от времени и состояния системы, что повышает степени сложности и трудности процесса исследования и понимания системы, удлиняет время ее оптимизации.

Во-вторых, в процессе разработки бортовой системы управления могут использовать различные механизмы, методы управления, контроля и реализации для различных ее подсистем и компонентов. Такие механизмы и методы могут выполнять различными разработчиками, фирмами, что дополняет степень сложности в понимании исследуемой системы. Тем не менее, конструкция и функционирования системы могут меняться в различных этапах ее модернизации, ремонта, корректирования, пополнения новых качества и функционирования, что делает процесс исследования таких систем более сложным.

В третьих, в процессе обеспечения нового качества или улучшения некоторых характеристик системы, желательно чтобы, не были разрушены полные и частичные функции системы, сохранялся старый режим управления. Существует возможность постепенного использования старого и нового режимов управления системы. Для удовлетворения таких условий требуется большая степень автономности и гибкости механизма реализации методов решения, что отсутствует у традиционного подхода.

В четвертых, в некоторых случаях, когда ряд компонентов системы недоступен, процессы замены, изменения, или добавления нового компонента в рассматриваемой системе невозможно выполнить.

Одной из особенностей современной бортовой системе управления является наличие в ней сетевой информационной среды, к которой подключаются все блоки управления, контроля, датчики и исполнительные устройства. Благодаря такой особенности существует возможность оптимизации бортовой системы на основе ее сетевой информационной среды. Подключение к этой среде позволяет, независимо от структурной связи и функционирования компонентов системы, получить полезную информацию для обеспечения задачи оптимизации и верификации бортовой системы.

Преимущество использования цифровой сетевой информационной среды в задачах повышения эффективности функционирования и уровня работоспособности БРСУРВ заключается в простоте реализации таких задач. Информационная сетевая среда позволяет сократить число дополнительных датчиков, не усложнять структуру системы связи, что улучшает эффективность подхода оптимизации на ее основе с точки зрения экономичности и времени изготовления. Некоторые блоки и подсистемы управления в составе исследуемой бортовой системы могут играть роль эффективных интеллектуальных датчиков. Под такими датчиками понимаются датчики, у которых выходные данные являются не первично измеренной информацией, а обработанной по специальным алгоритмам преобразования.

Таким образом, обеспечение задачи повышения эффективности функционирования и уровня работоспособности БРСУРВ на основе сетевой информационной среды дает новые качества ее решения.

## **2.5. Метод повышения качества сложных бортовых систем управления на основе их сетевой информационной среды**

В целях повышения качества бортовых систем управления целесообразно обеспечить централизованный контроль всех ее подсистем. Эта идея заключается в разработке некоторых блоков, которые контролируют работоспособность отдельных подсистем и полной системы в целом. Центральный блок контроля обычно реализуется в ведущей подсистеме (мастер сети). Связи между мастером сети и различными ее ведомыми назовем центральными, а связи ведомых узлов, если они существуют, горизонтальными. В слабосвязанных распределенных бортовых системах управления, каждый ведомый является достаточной автономной подсистемой управления, поэтому горизонтальные связи практически отсутствуют, существуют только слабые центральные связи. В таких случаях, одним из мощных методов повышения качества систем управления является увеличение горизонтальных связей между подсистемами управления. На рис. 2.4а и рис. 2.4б показан пример структурной схемы бортовых распределенных систем управления реального времени (БРСУРВ) и ее модификации с осуществлением горизонтальных связей. Здесь М обозначается мастер или ведущий узел,  $S_i$  это Slave  $i$  или  $i$ -ой ведомый узел.

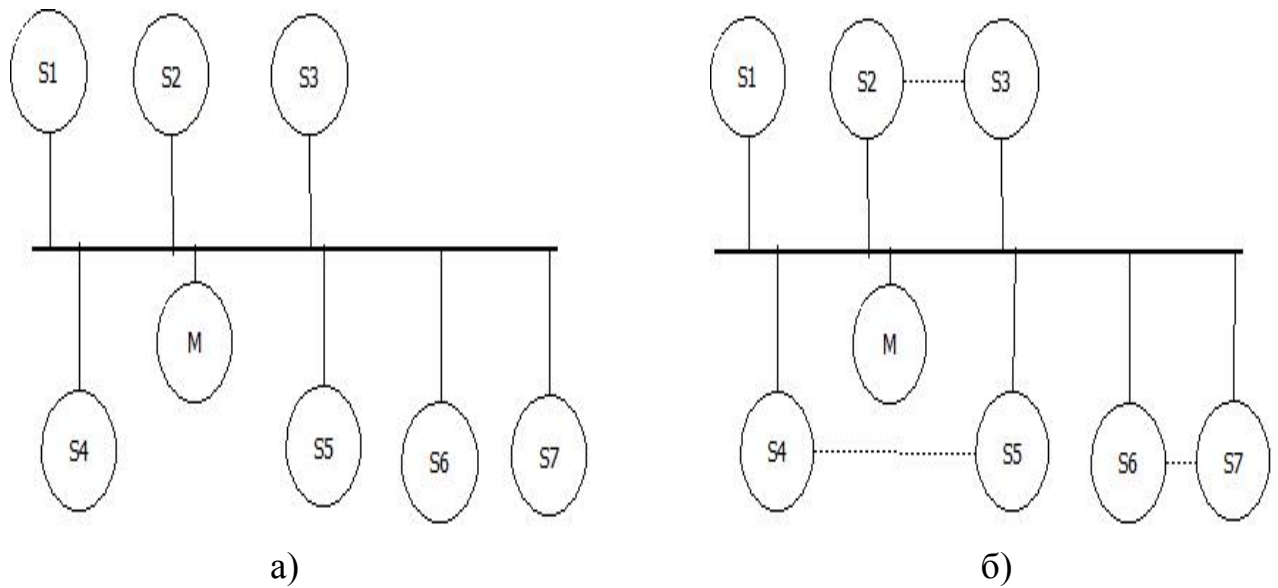


Рис. 2.4. Пример структурной схемы бортовых распределенных систем управления реального времени

а) Исходная схема; б) Модифицируемая структурная схема с осуществлением горизонтальных связей.

Прямые связи между определенными подсистемами используются для выполнения некоторых алгоритмов, с целью повышения скорости и эффективности их функционирования. Кроме этого, эти связи могут использоваться для дальнейшей реализации на них различных методов повышения качества и обеспечения работоспособности системы. При получении требуемой информации с помощью горизонтальных связей, подсистемы управления могут принимать свои решения при отсутствии команд управления мастера. Таким образом, обеспечивает работоспособность полной системы управления, повышает ее эффективность функционирования. Кроме этого, в данном методе некоторая подсистема управления может использоваться как источник информации – своеобразный дополнительный датчик для других подсистем. С точки зрения оптимизации и верификации существующей системы, это обстоятельство позволяет устранить необходимость использования дополнительных датчиков и усложнения схемы управления.

## **2.6. Концепция построения и реализации автономных блоков управления и контроля на основе сетевой информационной среды**

Рассмотрим реализацию автономного механизма оптимизации бортовых систем управления. Сущность данного механизма заключается в создании параметрических логических блоков управления и контроля. Параметры таких блоков должны задаваться простым способом в процессе их настройки. В качестве таких параметров могут служить значения, с помощью которых определяются необходимые данные для сохранения, анализа и обработки в блоках управления и контроля. Параметры могут быть заданы в виде таблицы признаков. В этой таблице предполагается записать адреса данных и соответствующие признаки, которые определяют, использовать ли эти данные – формируется своего рода маска выборки данных. Чтение и запись в таблице признаков выполняются по цифровым интерфейсам.

Данные полученные по адресам и признакам, записанным в таблице признаков, являются входными данными блоков управления и контроля. Задача обработки входных данных выполняется автономным образом. Для этой цели, чтение входных данных в такие блоки заменяется их фиксацией в сечении памяти процессоров рассматриваемой системы, в каждом цикле регулирования. В данном механизме, процесс контроля и управления выполняется параллельно с процессом функционирования существующей системы. Благодаря тому что, необходимые данные для сохранения и анализа определяются интерфейсами и настройками блоков управления и контроля, вне зависимости от мастера и ведомых узлов, данный механизм обладает большой степенью автономности и гибкости реализации и функционирования.

И так, осуществление горизонтальных связей между локальными подсистемами управления, и построения автономных блоков управления и контроля является перспективным подходом повышения эффективности функционирования и обеспечения работоспособности бортовых систем управления. Данный подход

обладает не только высокой степенью автономности и гибкости реализации, но и позволяет с наименьшими затратами аппаратуры и усложнением существующей системы, повышать ее качества.

## **2.7. Выводы по главе**

1. Рассмотрены существующие в настоящее время приемы построения сложных бортовых систем управления реального времени. Показано что, в целях повышения эффективности функционирования и качества бортовых систем управления целесообразно обеспечить слабосвязанные распределенные систем.
2. Представлены предлагаемые концепции декомпозиции высокодинамической бортовой системы управления. Они заключаются в реализации многоуровневой структуры организации системы, и повышении степени автономности (независимости) локальных подсистем. Показана эффективность применения таких концепций в области проектирования сложных бортовых систем управления.
3. Показаны особенности применения цифровых сетей в области управления и контроля сложных бортовых высокодинамических систем. Дан обзор характеристик широко используемых цифровых интерфейсов и сетей реального времени.
4. Обсужден вопрос использования бортовой сетевой среды как информационной основы сложной высокодинамической системы управления. Показана эффективность подхода решения задачи оптимизации и верификации бортовых систем на основе применения сетевой информационной среды. Данный подход обладает не только глобальной, гибкой характеристиками, но и позволяет быстро, экономично получить результаты.
5. Предложен подход повышения качества бортовых систем управления на основе осуществления горизонтальных связей между локальными подсистемами.

темами и создания автономных блоков управления и контроля. Данный метод позволяет не только повысить эффективность функционирования, но и возможно обеспечить полную работоспособность бортовых систем управления при наличии отказов в центральной системе или потере связи с ней.

6. Предложена концепция построения и реализации автономных блоков управления и контроля на основе сетевой информационной среды. Сущность данной концепции заключается в создании параметрических логических блоков управления и контроля. Основные параметры таких блоков задаются простым способом через цифровые интерфейсы при настройке системы, что повышает их степень гибкости функционирования. Работа параметрических логических блоков не зависит от функционирования процессов исследуемой системы, чем обеспечивается высокий уровень автономности и гибкости их реализации и функционирования.

## **Глава 3. Разработка концепций реализации высококачественных бортовых систем управления и их верификации**

В данной главе, перечислены практические требования к задаче оптимизации и верификации сложных бортовых систем управления. Предложен метод построения высококачественных бортовых систем управления на основе модели многопроцессорной слабосвязанной распределенной системы. Отмечены особенности структурной реализации методов повышения эффективности функционирования, и обеспечения работоспособности бортовых систем на основе сетевой информационной среды.

### **3.1. Требования к задаче оптимизации и верификации бортовых систем управления реального времени на аппаратном уровне**

Задача оптимизации и верификации сложных бортовых систем управления, с целью повышения качества и обеспечения их работоспособности, является актуальной технической задачей. Подходы решения данной задачи зависят от конкретных систем и требуемых условий реализации. Ниже формулируются некоторые практические требования к решению данной задачи.

1. Автономность реализации: Процесс аппаратной оптимизации и верификации выполняется таким образом, что не влияет на работу существующей бортовой системы управления.
2. Экономичность и простота: Используется наименьшее по возможности количество дополнительных датчиков, исполнительных устройств, блоков управления и вычисления.
3. Удобство для использования и обучения: Простой пользовательский интерфейс, наличие возможности параллельной работы в существующем и новом режимах работы, т.е. без нарушения привычных существующих режимов управления.

4. Автономность с точки зрения функционирования существующей системы. Работа дополнительных цифровых узлов управления и контроля выполняется автономно вне зависимости от процессоров существующих блоков управления и вычисления.
5. Гибкость функционирования: Возможность изменения параметров функционирования системы простым способом.
6. Обеспечение высокой степени работоспособности и эффективности функционирования полной системы управления.
7. Использование открытых стандартных цифровых интерфейсов.
8. Легкий контроль и мониторинг системы: Наличие возможности контроля и мониторинга параметров системы с целью усовершенствования методов управления бортовыми системами нового поколения.
9. Верификация на основе реальных параметров существующей системы: С одной стороны, задача верификации реализуется автономным образом, вне зависимости от функционирования существующей системы. С другой стороны, процесс верификации выполняется на основе реальных данных от существующей бортовой системы в масштабе реального времени.

Выше названные характеристики, такие как простота, автономность и гибкость механизмов реализации играют очень важную роль в задаче оптимизации и верификации современных бортовых системах. Они позволяют не только обеспечить решение задачи оптимизации и верификации сложных высокодинамических систем, но и сократить время выполнения задачи и затраты на аппаратуру.

### **3.2. Структурная модель бортовой распределенной слабосвязанной системы управления на примере системы управления пневматической подвеской автомобиля**

Как отметили в первой главе, современная система управления адаптивной подвеской автомобилей представляет собой централизованную систему с пространственным распределением компонентов. Все задачи управления, регулирования и контроля для каждой подвески выполняются в отдельности с помощью одного центрального процессора и некоторых вспомогательных цифровых блоков управления. С целью повышения эффективности функционирования и работоспособности полной системы управления, предлагается модель многопроцессорной слабосвязанной распределенной системы управления. Полная структурная схема ее реализации предложена на рис. 3.1. Она построена на основе цифровых узлов управления и контроля, соединяющихся между собой бортовой сетью, и состоит из следующих подсистем.

#### **1. Ведущая подсистема управления, в состав которой входят:**

- Набор датчиков и ЦСОВД – цифровая система обработки входных данных.
- Индикаторы и ЦСУИ – цифровая система управления индикаторами. Индикаторы используются для информирования режимов функционирования подсистемы и контролирования работоспособности некоторых ее компонентов.
- ЦП - центральный процессор. Он осуществляет автоматическое выполнение программы, записанной заранее в оперативной памяти при активации системы управления подвеской. Данная система активизируется сигналом активации от блока управления кузовным оборудованием.

- КЦС – контроллер цифровой сети реального времени. Данный контроллер управляет процессом приема и передачи данных в бортовой сети. В современных системах управления подвеской широко используются сети CAN и LIN. Они дополняют друг друга и позволяют объединить все компоненты системы в единой бортовой сети. Характеристики сетей CAN и LIN показаны в таблицах 2.1 и 2.2 главы второй.

Информация из ведущей подсистемы при желании может быть передана на табло или внешнее устройство, например персональный компьютер (ПК), через цифровые каналы передачи данных. Кроме информации, поступающей от набора датчиков, в качестве входных данных ведущей подсистемы могут служить данные от переключателя режимов работы, от других подсистем в составе системы управления подвески, или от систем управления другими процессами, входящих в состав систем функционирования машины, например от системы управления топливом, от тормозной системы.

2. Четыре ведомых подсистемы контроля и регулирования (по одной на каждое колесо). В качестве параметров регулирования служит уровень жесткости упругих элементов и коэффициент сопротивления амортизаторов. Каждая ведомая подсистема включает: процессор, набор датчиков и цифровую систему обработки входных данных, набор актуаторов и ЦСУА – цифровую систему управления актуаторами и контроллер цифровой сети.

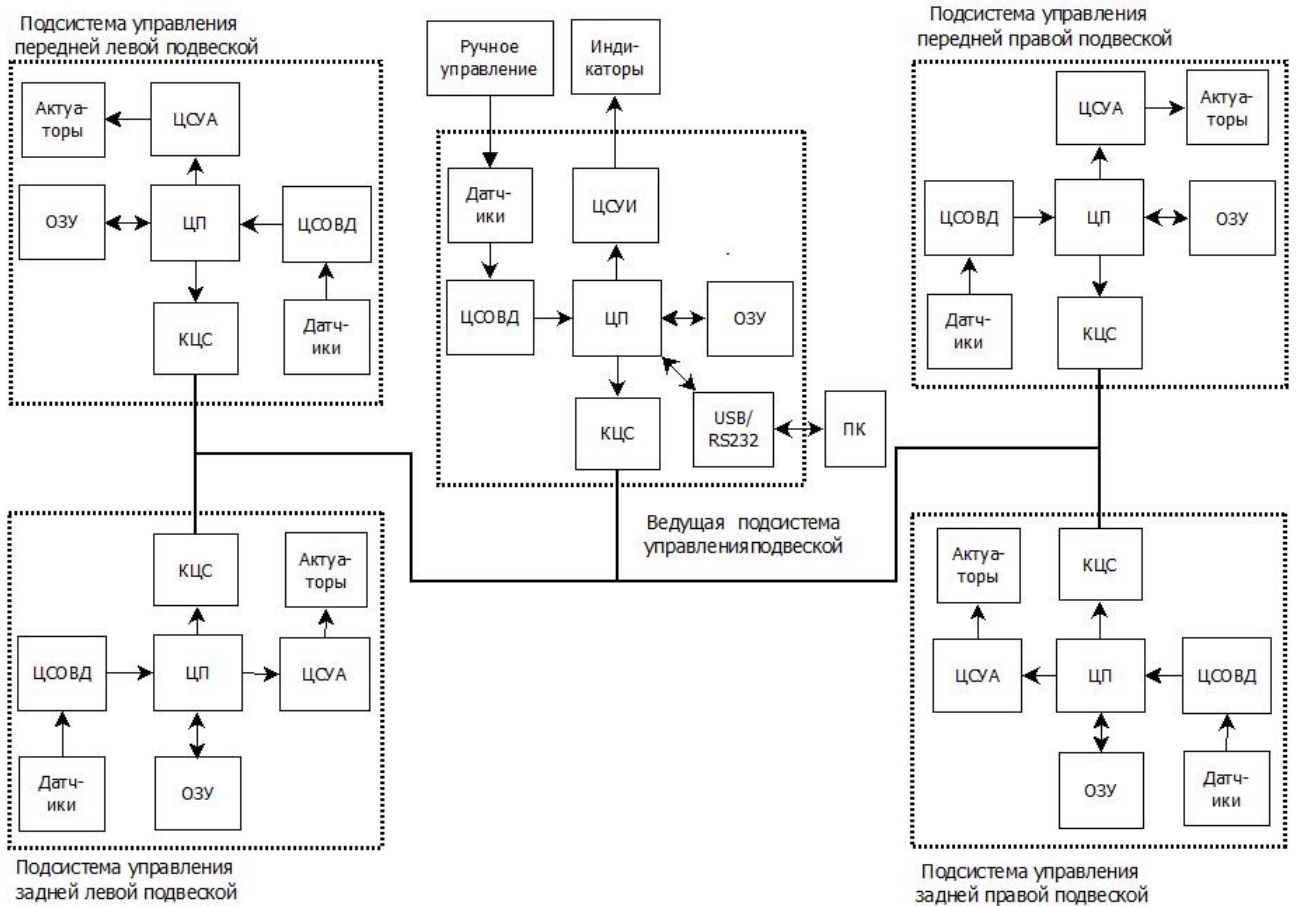


Рис. 3.1. Структурная схема бортовой распределенной системы управления подвеской автомобиля

Каждая ведомая подсистема управления подвеской на рис. 3.1 выделена пунктирными линиями. Они являются автономными, с точки зрения управления, подсистемами. Функционирование внутри одной подсистемы не зависит другой. В качестве датчиков в ведомой подсистеме управления могут служить, например датчики давления ресивера, датчики высоты положения угла кузова, датчик скорости.

С набора датчиков постоянно считываются мгновенные динамические параметры всех опор подвески, например расстояние от колес до кузова, частота вращения колес и т.п. Эти параметры обрабатываются и передаются в ведущую подсистему через контроллер сети. Информация, полученная в процессе эксплуатации автомобиля у каждой ведомой подсистемы, поступает в центральную ведущую подсистему с целью осуществления макрокоманд управления и контроля.

В зависимости от режимов работы, условий движения и полученных данных от ведомых подсистем, ведущая подсистема управления в течение нескольких миллисекунд дает различные макрокоманды на ведомые подсистемы на перестройку амортизаторов и давления пневмоупругих элементов.

Однако высота подвески и коэффициент сопротивления амортизатора обрабатываются индивидуально ведомыми подсистемами, что повышает степень управляемости и гибкости подвески. Кроме этого, благодаря высокой степени автономности локальных подсистем управления, легко осуществляются процессы тестирования, контроля и обеспечения надежности каждой локальной подсистемы, чем повышается уровень работоспособности полной системы. Работа системы начинается с инициализации всех цифровых блоков контроля и управления, датчиков, исполнительных устройств, контроллера цифровой сети и интерфейса связи с ПК. После инициализации, система переходит в режим постоянного опроса датчиков, выполнения процесса обработки входных данных и отправки собранной информации на центральную ведущую подсистему. При поступлении с ведущей подсистемы команды управления.

Таким образом, распределенная слабосвязанная многопроцессорная система управления обладает дополнительной возможностью обеспечения управляемости, гибкости и работоспособности системы.

### **3.3. Концепция оптимизации бортовых распределенных систем управления на основе их свободных степеней информационных связей**

Современная бортовая система управления представляет собой распределенную систему с различными цифровыми блоками управления и контроля, взаимодействующими между собой на основе сетевой технологии реального времени. Одной из актуальных задач в области разработки современной бортовой системы управления является повышение ее эффективности функционирования, и поддержание работоспособности при наличии отказов в среде связи, или сбоях ее компонентов.

Для решения данной задачи существуют различные методы, например, методы резервирования аппаратуры, построения встроенных контрольных узлов, мониторинга процесса и т.п. Недостатки таких методов заключаются в том что, для их реализации, требуется высокая степень понимания исследуемой системы, и использования достаточного количества дополнительных датчиков и цифровых схем управления, что в целом усложняет структуру бортовых систем. Бортовая сетевая среда связей на сегодняшний день позволяет не только эффективно выполнять процесс обмена данных между компонентами системы, но и является ее информационной основой. На основе данного средства эффективно реализуются различные алгоритмы оптимизации и верификации системы.

Сущность метода повышения качества бортовых систем управления, на основе свободных степеней информационных связей, заключается в организации дополнительных связей между локальными подсистемами и создании автономных блоков согласования управления и контроля. Под свободной степенью информационных связей понимается возможность автономного соединения между подсистемами с целью обеспечения решения конкретной задачи контроля и управления. Автономное соединение означает что, это соединение не сильно влияет на процесс функционирования таких подсистем.

Структурная схема реализации данного метода показана на рис. 3.2. Бортовая распределенная система управления подвеской автомобиля (БРСУПА) представляет собой модель 1Master – 4Slaves (один ведущий и четыре ведомых блока управления). В качестве свободных информационных связей в данном случае служат прямые соединения между подсистемами передних и задних подвесок. Данные связи реализуются на основе сети реального времени CAN со скоростью 1 Мб/с. Система позволяет регулировать не только высоты положения угла кузова автомобиля, но и жесткость каждого амортизатора в отдельности. Система управления реализуется на основе модели слабосвязанной распределенной системы управления, в которой каждая ведомая подсистема управления работает автономно независимо друг от друга.

Все подсистемы получают и выполняют различные макрокоманды управления и контроля от ведущей подсистемы. В качестве таких команд может служить, например, команда управления жесткостью амортизатора, или команда регулирования высоты (клиренс). Основные компоненты, входящие в составе каждой подсистеме это:

- ЦСОВД – цифровая система обработки входных данных
- ЦСУИ – цифровая система управления индикаторами
- ЦП - центральный процессор
- КСЦ – контроллер цифровой сети реального времени

В качестве датчиков используемых в таких подсистемах служат датчики давления ресивера, датчики высоты положения угла кузова, датчик скорости и т.п. Индикаторы используются для мониторинга режимов функционирования подсистемы и контролирования работоспособности некоторых ее компонентов. Актуаторы, используемые для регулирования положения кузова по высоте представляют собой клапаны управления давлением упругих элементов.

Повышение степени работоспособности и эффективности функционирования системы управления подвеской выполняется путем осуществления прямых связей между передним и задним мостами, и разработке двух дополнительных блоков согласования управления (ДБСУ). С точки зрения функционирования задних подвесок, подсистемы управления передними подвесками рассматриваются как внешние источники информации. Процесс чтения/записи данных от таких источников и на их основе формулирования команд управления в подсистемах управления задними подвесками выполняется автономным образом, вне зависимости от функционирования подсистем управления передними и задними подвесками. Схемотехническое решение этой задачи рассмотрено в главе 4 и [62-66].

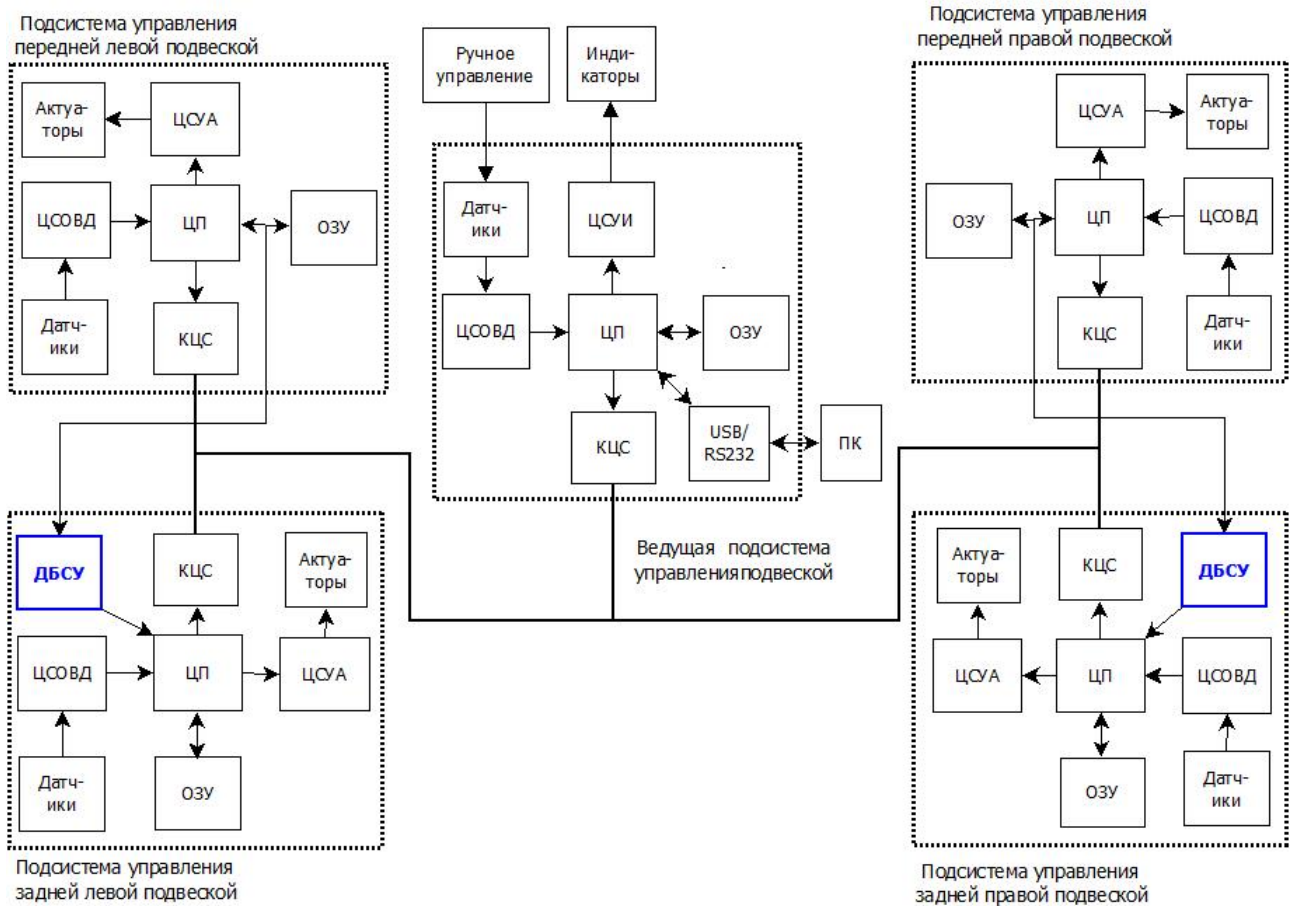


Рис. 3.2. Структурная схема реализации БРСУПА на основе сетевой информационной среды и механизма предсказания

На основе параметров полученных от подсистем управления передними подвесками предсказывается состояние покрытия дороги для задних подсистем управления. В качестве таких параметров может служить, например, значение вертикального ускорения колес передних подвесок. В памяти дополнительных блоков согласования управления сохраняются предельные значения таких параметров. При обнаружении, что полученные параметры превышают предельные значения, записанные в памяти данного блока, задние амортизаторы переводятся в мягкий режим через определенный промежуток времени, который определяется временем отклика двух задних амортизаторов и скоростью автомобиля (информацию о скорости движения автомобиля мы должны получать от центральной системы управления).

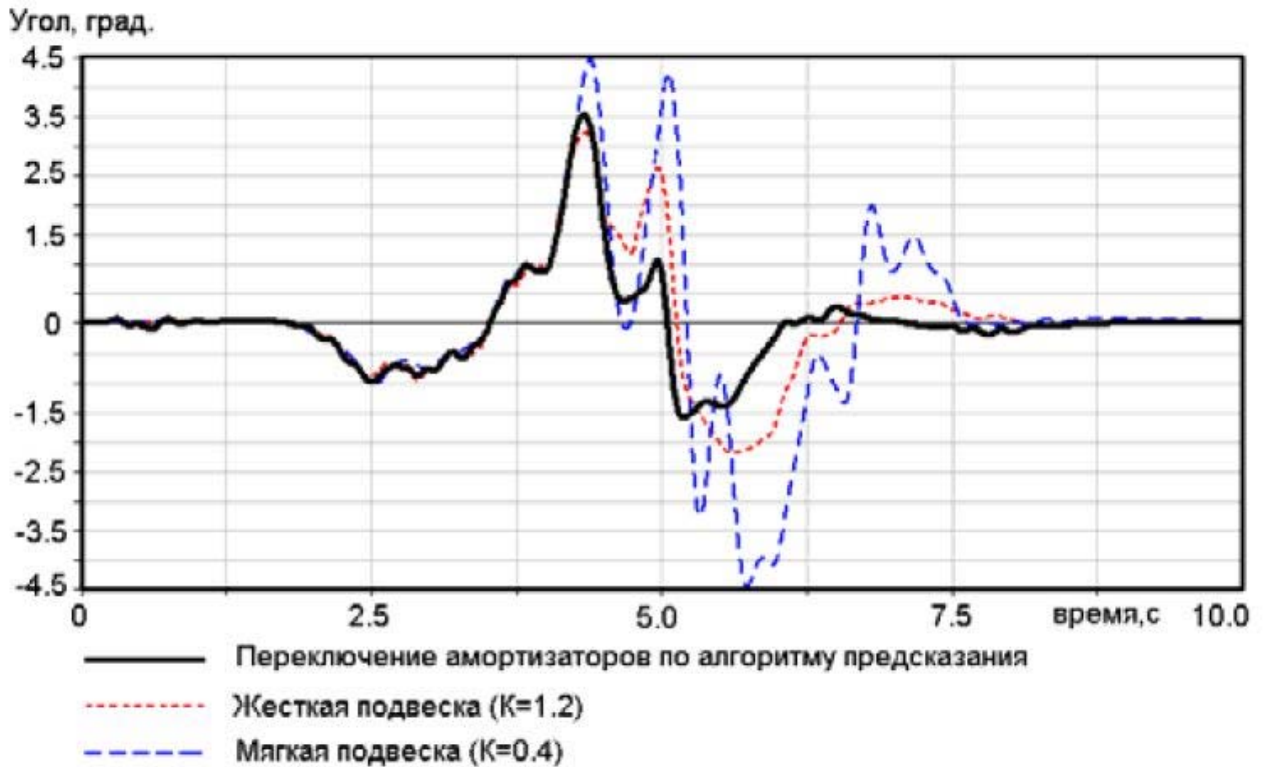


Рис. 3.3. График поперечных колебаний автомобиля [67]

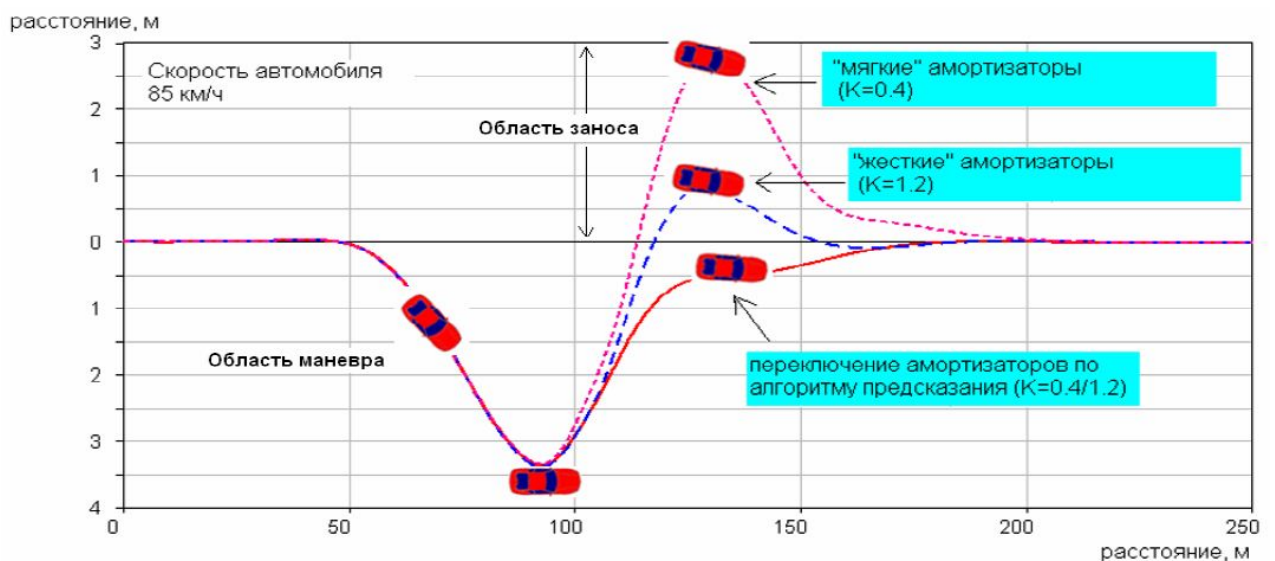


Рис. 3.4. Траектория движения автомобиля с полуактивной подвеской, работающей по алгоритму предсказания, и траектории движения автомобилей с пассивными подвесками [67]

Данный алгоритм управления эффективно работает, если время переключения двух задних амортизаторов с жесткого режима на мягкий режим меньше чем время, на которое задние колеса встретят дорожную неровность. Это требование вполне выполняется в современных амортизаторах. Для улучшения управляемо-

сти, устойчивости и безопасности автомобиля желательно сократить время работы, на ровной дороге, амортизаторов в мягком режиме. В работе Мажея и Ракицкого [67] была проанализирована эффективность полуактивной подвески заднего моста автомобиля, работающей по алгоритму предсказания. Была показана эффективность данного алгоритма в задаче обеспечения высоких уровней управляемости и комфортабельности автомобиля. Основываясь этих данных, мы можем сформулировать элементарное дополнение к алгоритму управления задними подвесками автомобиля.

На рис. 3.3 показан график поперечных колебаний автомобиля в случае жесткой и мягкой подвески, и при переключении амортизаторов по алгоритму предсказания. В последнем случае процесс обработки обладает меньшей амплитудой колебания и коротким временем затухания. Траектория движения автомобиля с полуактивной подвеской, работающей по алгоритму предсказания, и траектории движения автомобилей с пассивными подвесками показаны на рис. 3.4. Возврат автомобиля в случаях пассивной подвески жесткой или мягкой осуществляется со значительным заносом, в то время как использование полуактивной подвески позволяет избежать заноса. Алгоритм был реализован в качестве основного метода управления подвеской автомобиля. Входные данные получают непосредственно с набора датчиков, расположенных на передних колесах. В данном случае предлагается иной подход реализации механизма с целью оптимизации существующей бортовой системы. Схема реализуется на основе информационной бортовой сетевой среды. В отличие от подхода реализации в работе [67], в данном случае входная информация получается автономным методом регистрации от подсистем управления передними подвесками.

Одним из преимуществ данного подхода реализации является возможность ее выполнения без нарушения конструкции и алгоритмов управления внутри системы подвески. Процесс реализации и функционирования дополнительных блоков управления и контроля не влияет на работу существующей системы. Полученная новая система с точки зрения использования водителя не отличается от ста-

рой системы, но обладает повышенным качеством управления, обеспечивает повышение степени работоспособности. Кроме этого, данный подход реализации не разрушает существующие алгоритмы управления системы, позволяет системе управления работать по двум различным алгоритмам управления: существующему алгоритму и алгоритму предсказания. Алгоритм предсказания реализуется в качестве дополнительной возможности управления полной системой. Он преимущественно используется в обычных условиях движения с целью повышения эффективности функционирования системы. В таких условиях, существующий алгоритм может использоваться в качестве запасного варианта для гарантирования полной работоспособности системы, или в исключительных случаях (на поворотах или при движении задним ходом, при которых траектория задних колес не совпадает с траекторией передних колес) когда алгоритм предсказания не достоверно работает. Таким образом, данный подход реализации позволяет полностью устранить недостатки алгоритма предсказания, обеспечивает высокие уровни эффективности функционирования системы и ее работоспособности. Метод аппаратной оптимизации бортовых систем управления на основе свободных степеней информационной связи и подход его реализации может применим не только для распределенной системы управления подвеской и алгоритма предсказания.

### **3.4. Концепция контроля, мониторинга и обеспечения качества бортовых распределенных систем управления на основе организации автономных узлов регистрации и контроля**

Задача контроля, мониторинга и обеспечения качества бортовых систем управления является одной из сложнейших технических задач. Трудность данной задачи обусловлена не только сложностью функционирования и связей самой бортовой системы, но и повышенным требованием к автономности и гибкости механизма ее реализации и функционирования.

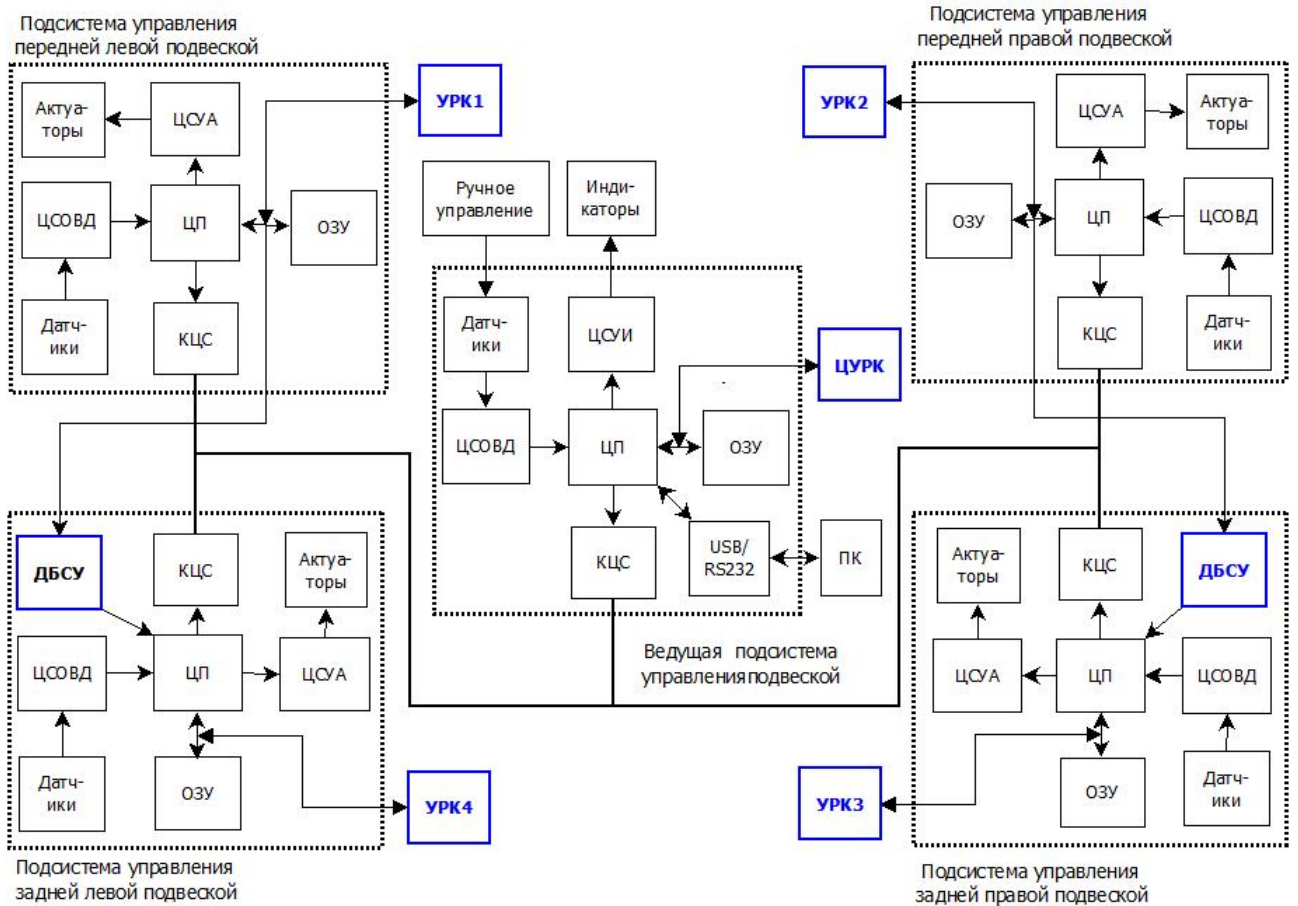


Рис. 3.5. Структурная схема реализации БРСУПА с организацией автономных узлов регистрации и контроля

Автономность является желательной характеристикой алгоритма решения, особенно для рассматриваемых объектов ответственного назначения. Она позволяет сохранить работоспособность рассматриваемой системы, и не ухудшать ее качества. Поэтому одной из актуальных задач в области контроля, мониторинга и обеспечения качества бортовых систем управления, сегодня является создание автономных, с точки зрения внутренних организации и управления системы, механизмов ее решения. На рис. 3.5 показана структурная схема реализации бортовой распределенной системы управления подвеской автомобилей с организацией автономных узлов регистрации и контроля. Здесь ЦСОВД – цифровая система обработки входных данных, ЦСУИ – цифровая система управления индикаторами, ЦП - центральный процессор, КСЦ - контроллер цифровой сети реального време-

ни, ДБСУ - дополнительный блок согласования управления, который используется в целях повышения эффективности функционирования системы.

Данная схема реализации отличается от схемы реализации обычных бортовых систем управления наличием набора автономных узлов регистрации и контроля (УРК). Благодаря своему специальному механизму аппаратной реализации [64] могут работать вне зависимости от функционирования рассматриваемой системы. На основе УРК процесс контроля и мониторинга полной системы выполняется автономным образом, чем не нагружается процессор системы. Сущность данного механизма заключается в следующих алгоритмах функционирования:

Во-первых, узел регистрации и контроля не имеет собственной системы сбора и обработки данных. Он подключается к системе подвески автомобиля через ее цифровые интерфейсы. Таким образом, сокращается количество дополнительных датчиков и блоков обработки входных данных, повышается степень эффективности и экономичности реализации данного метода, не усложняются структурные связи и процесс функционирования основной системы.

Во-вторых, узлы регистрации и контроля, возможно, работают во время функционирования основной системы. Это обеспечивает реальной входной информацией, поступающей в эти узлы, и увеличивает точность процесса контроля и мониторинга. Входные данные, которые характеризуют исследуемые объекты, должны успеть зарегистрироваться в памяти УРК. Для решения применяется механизм параллельного чтения и записи данных в специальной высокоскоростной энергонезависимой памяти FRAM [68-69].

В третьих, выбор информации для записи в энергонезависимых памятьях осуществляется автономным образом вне зависимости от структуры и способа реализации исследуемой системы, что позволяет автоматически осуществлять чтение данных из локальных подсистем, внутренняя конструкция которых не доступна. Режимы работы узла регистрации и контроля задаются параметрическим

образом при их настройке через стандартные цифровые интерфейсы, чем увеличивается степень гибкости и эффективности их функционирования.

Кроме этого, благодаря легкости настройки параметров в каждом узле контроля (пункт 4.1 главы 4), существует возможность выбора требуемой информации для записи и чтения с целью анализа повторения действий на типовых событиях. В качестве таких действий для системы управления подвеской автомобилей может служить, например действие системы подвески при изменении характеристик дороги, профиля дороги или появление преодолимого препятствия. В памяти узлов регистрации сохраняются эти действия. При обнаружении подобных случаев и отсутствии своевременной команды управления от центральной подсистемы, обработка выполняется на основе информации записанной в узле регистрации и контроля. Данный механизм позволяет обеспечить эффективную работу системы даже в случае наличия отказа в центральной подсистеме управления.

Прототип системы управления подвеской построен на основе инструментальной платы STM32F3DISCOVERY. Данная плата работает на микроконтроллере STM32F303VTCT6 с памятью на 256 КБ Flash, 48 КБ RAM (приложение 4). При этом дополнительные блоки согласования управления построены на основе микроконтроллеров MSP430FR5739 с ядом MSP430 (приложение 5). Данный микроконтроллер использует энергонезависимую сегнетоэлектрическую память FRAM с объемом 16 КБ и питанием 3В. На основе анализа аппаратуры можно оценить увеличение объема оборудования при реализации горизонтальных связей и организации два блока согласования управления и 5 автономных узлов регистрации и контроля. Данное увеличение составляет 14 %, что является преимуществом данной реализации по сравнению с традиционным подходом обеспечения работоспособности системы на основе метода полного дублирования аппаратуры. При этом скорость обработки УРК и ДБСУ может достигаться 730 Мб/с. Скорость обмена данных на сетях в современных автомобилях – это 1 Мб/с так что, за один цикл работы сети CAN можно выполнить несколько десятков циклов вычисления.

Эффективность можно оценить сравнением скорости обработки выходных сигналов ДБСУ и скорость обработки ЦП исходной системы при выполнении задачи предсказания профиля дороги. Сравнительные оценки эффективности аппаратной реализации показывают что, скорость обработки в модифицируемой системе может увеличиться на 25%. При этом степень усложнения алгоритмов управления задней подвески по сравнению с передней, не превышает 12% (оценка по количеству команд управления в программном обеспечении передней и задней подвески). Реализация задач повышения эффективности и работоспособности, и так же задач контроля и мониторинга системы на основе ее сетевой информационной среды обеспечивает новые качественные решения.

### **3.5. Выводы по главе**

1. Перечислены требования к задаче оптимизации бортовых систем управления с целью обеспечения работоспособности и повышения их эффективности функционирования управления. Отмечена важность требования простоты, автономности и гибкости механизмов реализации в задачах оптимизации и верификации сложных высокодинамических бортовых систем.
2. Предложена структурная схема реализации многопроцессорной распределенной бортовой системы управления на примере системы управления подвеской автомобиля, и показаны преимущества реализации данной системы. Система построена на основе цифровых блоков управления, соединяющих между собой бортовой сетью CAN, и состоит из ведущей (центральной) и четырех ведомых (локальных) подсистем управления. Каждая подсистема имеет свой центральный процессор, контроллер цифровой сети, блок сбора и обработки данных, набор датчиков и исполнительных устройств. Процессы регулирования высоты положения кузова и жесткости амортизатора в каждой стойке выполняются отдельной локальной подсистемой. Функционирования таких локальных подсистем реализуются автономно, т.е. не зависят друг от друга. Центральная подсистема, в зависимости от состояния

движения автомобиля и требований водителя, может послать определенные макрокоманды управления каждым локальным подсистемам управления. Однако, взаимодействие между центральной и каждой локальной подсистемами осуществляется с низкой частотой обращения.

3. Показаны особенности реализации концепции оптимизации БРСУРВ на основе их свободных степеней информационных связей, на примере системы управления подвеской автомобиля. Сущность данной концепции заключается в создании дополнительных автономных блоков согласования управления и осуществлении прямых связей между передним и задним мостами подвески. Автономные цифровые блоки позволяют управлять и контролировать задние подвески по алгоритму предсказания на основе информации, полученной с сечения памяти центральных процессоров локальных передних подсистем. Преимущество данного подхода заключается не только в сохранении всех достоинств алгоритма предсказания, устранении его недостатков, но и автономности и гибкости метода его реализации и функционирования.
4. Предложен перспективный метод контроля, мониторинга и повышения качества сложных бортовых систем управления на основе организации автономных узлов регистрации и контроля (УРК). Совокупность УРК образует распределенную сетевую систему автономного контроля и управления. В УРК сохраняются мгновенные параметры, фиксируемые в каждой подсистеме подвески, например: скорость автомобиля, угол поворота, угловая скорость рулевого колеса, давление в тормозной системе, высота и положения угла кузова и т.п. Выбор параметров для контроля и мониторинга выполняется разработчиком при настройке УРК через стандартные интерфейсы. УРК способен работать с протоколом CAN, который предусматривался в стандарте бортовой диагностики автомобиля **OBD-II** и является одним из основных рабочих протоколов стандарта **EOBD**. Кроме этого, в памяти каждого УРК тоже сохраняется характеристика ее поведения на типичных со-

бытиях. Благодаря этому, в случаях типичных событий локальная подсистема может быстро выполнять процессы управления и регулирования на основе информации, записанной в своем узле регистрации, и продолжать работать даже при наличии отказов в ведущей подсистеме, чем повышается уровень работоспособности и эффективности функционирования полной системы.

#### **Глава 4. Вопросы практической реализации средств, обеспечивающих эффективность функционирования и работоспособность бортовых распределенных систем управления**

В этой главе обсуждены вопросы практической реализации автоматных средств, обеспечивающих решение задачи оптимизации и верификации бортовых распределенных систем управления на аппаратном уровне. Данные средства представляют собой цифровые блоки управления и контроля, описанные на языке описания аппаратуры Verilog. В качестве средства проектирования, моделирования и верификации использован современный пакет Active HDL версии 8.2 фирмы Aldec. Результаты реализации и моделирования представлены в виде схем реализации, описания аппаратуры на языке Verilog и временных диаграмм.

##### **4.1. Аппаратная реализация бортовых систем управления на основе их свободных информационных степеней связей**

Как отметили в предыдущих главах, сетевая цифровая среда является информационной основой сложных высокодинамических систем управления в масштабе реального времени. На ее основе эффективно решается задача повышения качества и обеспечения работоспособности бортовых систем. Концепция оптимизации системы на основе ее сетевой среды заключается в использовании свободных информационных степеней связи и построении автономных параметрических блоков согласования управления (АПБСУ). Перспективные современные средства аппаратного проектирования позволяют эффективно реализоваться большинство

цифровых блоков управления и контроля при известном алгоритме их функционирования. Поэтому с точки зрения аппаратной реализации, сложность задачи построения АПБСУ не заключается в описании известного алгоритма управления как алгоритма предсказания (пункт 3.3 главы 3), а в создании и реализации автономного механизма регистрации данных от сетевой среды, и на его основе построении различных узлов управления и контроля. Отметим некоторые особенности данной задачи и метод ее реализации.

#### **4.1.1. Актуальная задача аппаратной реализации автономного узла регистрации параметров**

Узел регистрации параметров (УРП) является одной из главных компонентов, которые входят в состав цифровым автономным блоком, который входит в каждом блоке. Главной задачей данного узла является сохранение параметров с высокой плотностью, с наименьшими потерями и с наименьшими требованиями к исследуемой бортовой системе управления, т.е. с большой автономностью функционирования. УРП должен работать таким образом, чтобы по возможности не оказывать никакого влияния на работу системы в целом. Кроме того, он должен успешно сохранять параметры, которые полностью или почти полностью описывают текущее состояние системы. Например, в задаче оптимизации распределенной системы управления подвеской автомобиля (пункт 3.3 главы 3), в качестве таких параметров служат значения вертикальных ускорений колес передних подвесок. Такие параметры описывают динамическую характеристику передних колес и используются в блоках согласования управления с целью повышения качества и работоспособности системы подвески.

Одним из обычных существующих методов решения данной задачи является такое подключение узла регистрации, когда все необходимые для сохранения данные формируются в самой системе управления и передаются в УРП. Защита от выключения питания обычно состоит в использовании дополнительного (автономного) источника питания для УРП. Однако такое решение не всегда корректно и эффективно работает.

Во-первых, в случае аварии обычно система управления теряет способность нормальной работы и не в состоянии формировать корректно данные для записи.

Во-вторых, так как данные, необходимые для сохранения определяются и передаются самой системой управления и объектом по неким правилам, чем уменьшается степень автономности узла регистрации параметров.

В-третьих, учитывая большой объем информации, которую необходимо зафиксировать в УРП, аппаратная реализация системы управления и УРП заметно усложняется, возрастает и время обработки информации, что может повлиять даже на темп работы системы управления в целом. Реализация независимого источника питания для УРП так же не всегда целесообразна.

#### **4.1.2. Механизм реализации узла регистрации параметров высокодинамических объектов**

Рассматриваемый подход заключается в том что, обработка и сохранение параметров выполняется непосредственно в процессе функционирования системы, т.е. информация об объекте постоянно квантами сохраняется во время работы системы. Кроме того, необходимые данные для сохранения определяются не системой управления объекта, а интерфейсом и настройками узла регистрации параметров. Таким образом, увеличивается степень автономности и универсальности узел регистрации. Здесь параметры системы постоянно сохраняются в высокопроизводительной энергонезависимой памяти, благодаря этому данные не теряются при пропадании питания.

По мере увеличения сложности цифровых систем управления, широко распространена тенденция разделения, когда это возможно, сложной системы на локальные подсистемы со слабыми связями. Задача управления полной системой превращается в задачу управления большого количества простых подсистем и задачу согласования управления. В процессе отладки таких систем, оказывается полезно рассмотрение каждой подсистемы, как некоего высокодинамичного объекта, и для ее проверки при выполнении конкретной задачи, в полной системе дос-

таточно использовать подобный узел регистрации параметров. Использование УРП в процессе отладки всей системы также оказывается достаточно эффективным, особенно когда система управления является дистанционной или ряд ее компонент недоступен.

#### **4.1.3. Структурная схема реализации узла регистрации параметров**

Обсудим некоторые особенности реализации УРП. На самом деле, любая энергонезависимая память может использоваться для сохранения информации об объекте. Но, если в момент сохранения параметров системы возможно пропадание напряжения питания, а это одно из очевидных событий при возникновении аварии, то необходимо обеспечить высокоскоростную запись информации без потерь.

Рассматривается метод построения системы сохранения параметров при аварии и потере напряжения питания на примере узла регистрации параметров высокодинамичных объектов. Следует отметить, что подобный подход к построению УРП может быть успешно применен в любой другой цифровой системе управления. Основная идея решения проблемы временного ограничения при построении такой системе заключается в способе выбора типа памяти и механизме управления процессом автоматического сохранения параметров.

Узел регистрации параметров высокодинамичных объектов предназначен для автоматического накопления и сохранения параметров объекта управления, которые могут быть использованы при наладке систем, анализе и восстановлении текущего состояния системы в аварийной ситуации.

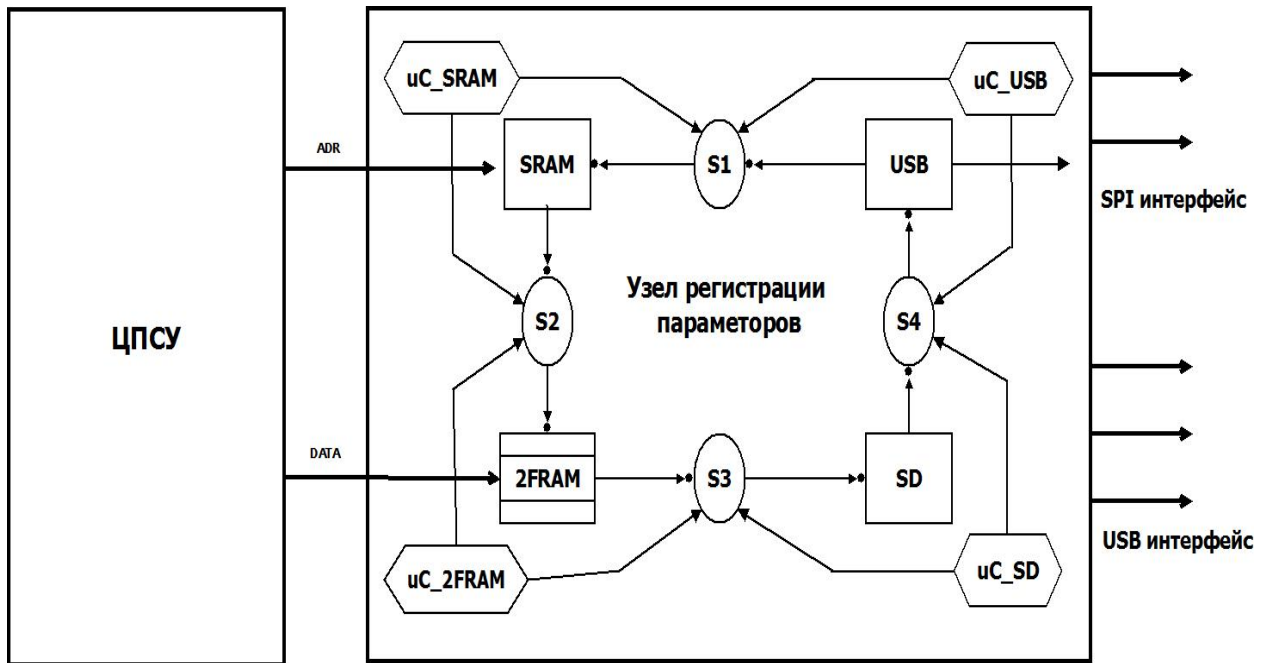


Рис. 4.1. Структурная схема аппаратной реализации узла регистрации параметров

На рис. 4.1 показана структурная схема аппаратной реализации узла регистрации параметров. Данные об объекте управления последовательно на каждом шаге управления сохраняются в блоках памяти FRAM и в SD карте по признакам разрешения, задающимся настройками УРП. При пропадании питания, основная часть информации об объекте управления сохраняется в SD карте, а оставшаяся часть (ее «хвостик») найдется в памяти типа FRAM. Узлы uC\_2FRAM, uC\_SD, uC\_USB, uC\_SRAM в данной схеме играют роль локальных автоматов управления для соответствующих блоков памяти 2FRAM, SD, USB и SRAM.

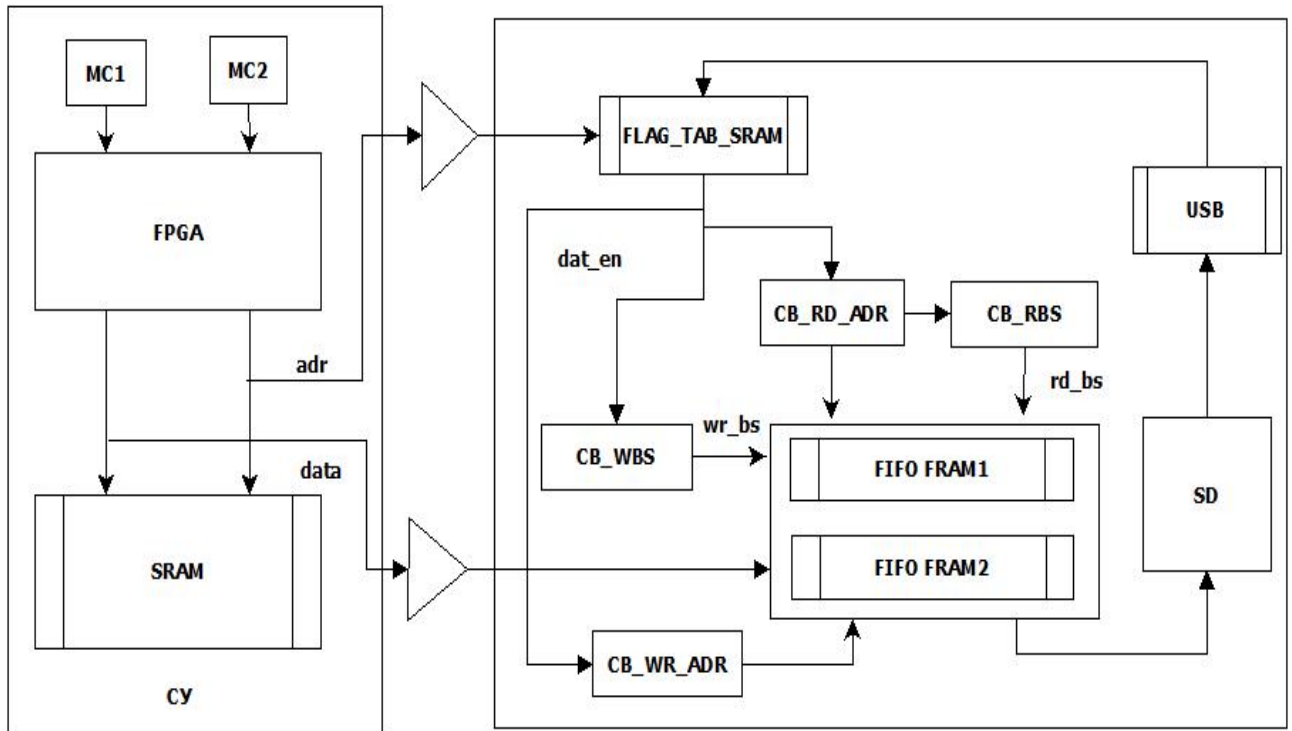


Рис. 4.2. Функциональная схема аппаратной реализации узла регистрации параметров высокодинамических объектов

Блок 2FRAM это два массива FIFO, построенных на сегнетоэлектрической памяти (Ferroelectric RAM или FRAM). В этих массивах записывается текущий кадр - текущее состояние сохраняемых данных или «слово состояния системы». S1, S2, S3, S4 - модули коммутации между названными блоками памяти. Главная функция этих модулей коммутации состоит в переформировании передаваемых пакетов данных. Здесь памяти тип SD карта и USB используются благодаря их высокой скорости чтения и записи и эффективности применения в области отладки сложной системы. Заметим, что для любых систем управления, их время обработки зависит от времени вычисления управляющих воздействий и времени собственного управления, которое включает в себе время передачи, время упаковки и распаковки пакетов, время проверки контрольного кода и т.д., поэтому темп системы существенно зависит от механизма управления. Для ускорения процесса записи информации о состоянии системы используется механизм параллельного чтения и записи данных в две массива FIFO. Механизм управления процессом сохранения информации об объекте показан на рис. 4.2. Заметим, что выбор необходимых для

сохранения данных определяется интерфейсом и настройками узла регистрации параметров, задающимися в узле FLAG\_TAB\_SRAM. В данном узле сохраняется битовая маска, которая определяет, какие из наблюдаемых характеристик подлежат записи. Необходимые для работы маски загружаются при настройке УРП через USB 2.0. Для реализации узла FLAG\_TAB\_SRAM используется память тип SRAM благодаря ее высокой скорости чтения. В блок памяти SRAM может быть записано несколько масок, однако после настройки и включения УРП использоваться будет только одна двоичная маска, управляющая процессом регистрации.

Данные текущего состояния системы записываются в одном из двух массивов FIFO: FIFO\_FRAM1 и FIFO\_FRAM2 в соответствии с маской разрешения из блока FLAG\_TAB\_SRAM. Процессы чтения и записи в FIFO\_FRAM1 и FIFO\_FRAM2 совмещены по времени. Когда в первом массиве выполняется процесс записи очередного кадра, из второго массива данные предыдущего кадра управления будут передаваться в память SD-карты. Таким образом, информация об объекте управления при пропадании питания будет полностью или почти полностью записываться в память SD карты, а оставшаяся часть информации, в худшем случае это последние два кадра сохраняются в двух массивах памяти FIFO\_FRAM1 и FIFO\_FRAM2.

Заметим, что процесс чтения из очередного массива FRAM реализуется только, когда в нем уже сформирован кадр данных. Переключение между массивами памяти осуществляется с помощью двух счетчиков, которые контролируют процессы формирования кадров. Передача очередного кадра данных из FIFO\_FRAM для записи в SD осуществляется последовательным кодом с проверкой контрольного кода. Одновременно с этим процессом перезаписи происходит формирование следующего кадра данных на другом массиве FIFO\_FRAM. Худшей, с точки зрения последующего изучения данных после сбоя или аварии, является ситуация, когда в памяти SD сохранилось N кадров данных. При этом в одном из массивов FIFO FRAM находится следующий N+1 кадр, который не успел переписаться в SD, а в другом массиве FIFO FRAM находится часть несформиро-

ванного еще  $N+2$  кадра данных. Реализованный через USB-интерфейс доступ к блокам памяти УПП позволяет не только осуществлять запись (и чтение) масок в SRAM и чтение данных из SD, но и обеспечивает прочтение последних двух кадров данных из FIFO\_FRAM.

#### **4.1.4. Применение цифрового узла регистрации параметров.**

Предложенный подход аппаратно-алгоритмической реализации цифрового узла регистрации параметров использует стандартные цифровые интерфейсы, обладает большей степенью автономности, и, благодаря гибкому механизму настроек, может быть применен не только в процессе штатного функционирования контролируемого объекта, но и при контроле и наладке сложной распределенной системы управления и ее компонент.

### **4.2. Аппаратная реализация метода автономного контроля, мониторинга и обеспечения качества бортовых систем управления на основе организации автономных узлов регистрации и контроля**

Как отметили в пункте 3.4 главы 3, каждый автономный узел регистрации и контроля может служить в качестве источника информации для контроля, мониторинга и анализа параметров исследуемой системы, памяти для сохранения повторяющихся команд управления на типичных событиях, самой подсистемы управления и ее ведущей подсистемы при наличии в них отказов. Поэтому метод ее реализации сильно зависит от конкретной задачи контроля и управления. В данном пункте обсуждаются особенности структурной реализации автономного процесса управления и контроля. Предложенные схемы и алгоритмы реализации могут применить в различных сложных бортовых системах управления и контроля.

#### **4.2.1. Задача контроля и мониторинга параметров в бортовых распределенных системах управления**

Обеспечение катастрофо-устойчивого решения современных бортовых систем управления является одной из главных научных, технических задач особенно

в условиях усложнения как самых систем, так и объектов, которыми они управляют. Главное назначение данной задачи заключается в сохранении требуемых данных и продолжении работы в условиях частичного разрушения работоспособности системы. На решение задачи направлены многие процессы жизненного цикла системы управления. Одним из основных таких процессов является процесс контроля и мониторинга параметров систем.

Процесс контроля и мониторинга позволяет не только исправлять ошибки в проектировании и эксплуатации систем, повышать их надежность, но и закреплять удачные и избежать неудачных из массы конструкторских и технологических решений. С точки зрения функционирования, главной задачей системы контроля и мониторинга параметров (СКИМ) является накопление и анализа параметров объекта управления в масштабе реального времени с наименьшими потерями и большой степени автономности, т.е. наименьшими требованиями к системе управления. СКИМ должна успешно анализировать и сохранять необходимые параметры, которые полностью или почти полностью описывают текущее состояние системы. В качестве примера таких параметров, например, в системе управления летательным аппаратом, могут служить параметры высоты, скоростей полёта, частоты вращения ротора двигателя, параметры наиболее важных агрегатов и систем, а также подаваемые на объект управляющие воздействия и уставки. Такие типы параметров могут быть использовать в процессе наладки систем, расследовании инцидентов, аварий, анализа и восстановлении текущего состояния системы после аварийной ситуации.

#### **4.2.2. Традиционный и автономный механизмы контроля и мониторинга параметров в бортовых распределенных системах управления**

Заметим что, обычно система контроля и мониторинга представляет собой связанную систему, входящую в состав полной системы управления. В этой системе все необходимые данные для анализа и сохранения формируются и передаются явным образом в блоки контроля и регистрации, что зачастую не обеспечивает уровни автономности и надежности системы, затрудняется процесс отладки

и тестирования работоспособности СКИМ так и самой системы управления. Кроме этого, даже при использовании автономного источника питания для СКИМ задача обеспечения работоспособности СКИМ при отказе не всегда удачно из-за потери способности формирования данных для СКИМ в системе управления.

В автономном подходе, механизм контроля и регистрации параметров выполняется непосредственно в процессе функционирования системы. Чтение параметров заменяется их фиксацией в сечении памяти процессора в каждом цикле регулирования. Необходимые данные для сохранения и анализа определяются интерфейсом и настройками СКИМ, а не системой управления объекта. Таким образом, увеличивается степень автономности и универсальности СКИМ. Отметим, что подобный подход к построению СКИМ может быть успешно применен в любой другой цифровой системе управления.

#### **4.2.3. Параметрическая настройка контроля и мониторинга бортовых распределенных систем управления.**

Выбор необходимых для сохранения данных определяется интерфейсом и настройками системы контроля и мониторинга параметров, задающимися в таблице MEMORY ADDRESS TABLE (приложение 3). В этой таблице сохраняется битовая маска, которая определяет, какие из наблюдаемых характеристик подлежат анализу и наблюдению. Необходимые для работы маски загружаются при настройке СКИМ через USB.

USB и флэш-память используются благодаря их высокой скорости чтения и записи и эффективности применения в области отладки сложной системы. Для реализации таблицы признаков используется высокоскоростную память типа SRAM. Доступ к блокам памяти СКИМ реализуется через USB-интерфейс. Это механизм позволяет не только осуществлять запись и чтение масок в таблице признаков и чтение данных из флэш-памяти, но и обеспечивает прочтение последних двух кадров данных из FRAM-памяти.

Данные текущего состояния системы записываются в одном из двух массивов FRAM-памяти, в соответствии с маской разрешения из таблицы признаков. Процессы чтения и записи в двух таких массивах совмещены по времени. Когда в первом массиве выполняет процесс записи очередного кадра, из второго массива данные предыдущего кадра управления будут передаваться во флэш-память. Таким образом, информации об объекте управления при пропадании питания будет полностью или почти полностью записываться во флэш-память, а оставшаяся часть информации, в худшем случае это последние два кадра сохраняются в двух массивах FRAM-памяти.

#### **4.2.4. Обеспечение функционирования системы автономного контроля и мониторинга параметров в масштабе реального времени.**

Основная идея решения проблемы временного ограничения при построении системы автономного контроля и мониторинга заключается в способе выбора типа памяти и механизме управления процессом автоматического сохранения параметров. Параметры системы постоянно сохраняются в высокоскоростной энерго-независимой памяти типа FRAM перед дальнейшим сохранением и анализом, так что данные не потеряются при нарушении работоспособности системы управления. FRAM - это энергонезависимая высокоскоростная память типа ОЗУ, которая использует сегнетоэлектрический эффект, т.е. возможность материала сохранять электрическую поляризацию в отсутствие внешнего электрического поля, для реализации механизма хранения данных. Этот механизм существенно отличается от используемой в других типах энергонезависимой памяти технологии плавающего затвора. Использование FRAM позволяет системе успешно сохранять текущий пакет параметров при пропадании напряжения питания. Микросхемы FRAM имеют одинаковые длительности циклов чтения и записи с низким энергопотреблением, что позволяют выполнять практически неограниченное число циклов перезаписи. Быстрые циклы записи обеспечивают возможность работы СКИМ, не замедляя темп работы основной системы.

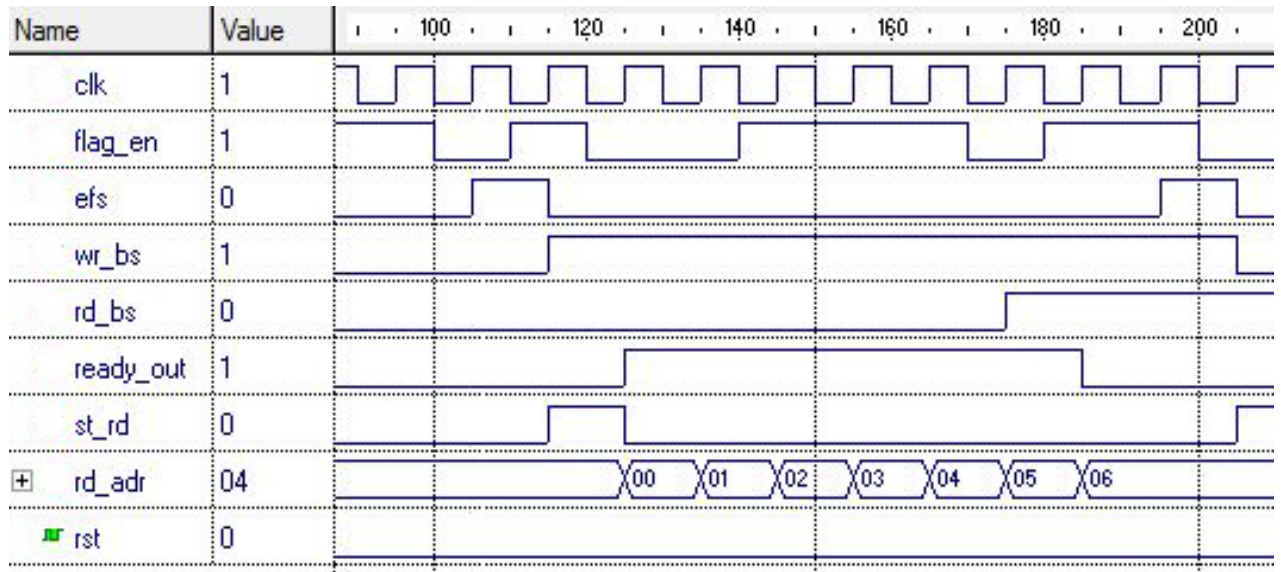


Рис. 4.3. Временная диаграмма моделирования механизма управления процессом параллельного чтения и записи в двух памятьях FIFO-FRAM

На рис. 4.4 показана общая структурная схема аппаратной реализации системы автономного контроля и мониторинга параметров. Данные об объекте управления последовательно на каждом цикле управления сохраняются по очереди в блоках памяти FRAM и во флэш-памяти по признакам разрешения задающимся настройками СКИМ. При пропадании питания, основная часть информации об объекте управления сохраняется во флэш-памяти, а оставшаяся часть (ее «хвостик») найдется в FRAM-памятях. Заметим, что для любых систем управления, их время обработки зависит от времени вычисления управляющих воздействий и собственно управления, поэтому темп системы существенно зависит от механизма управления. Для ускорения процесса записи информации о состоянии системы используется механизм параллельного чтения и записи данных в две памяти FIFO (приложение 2).

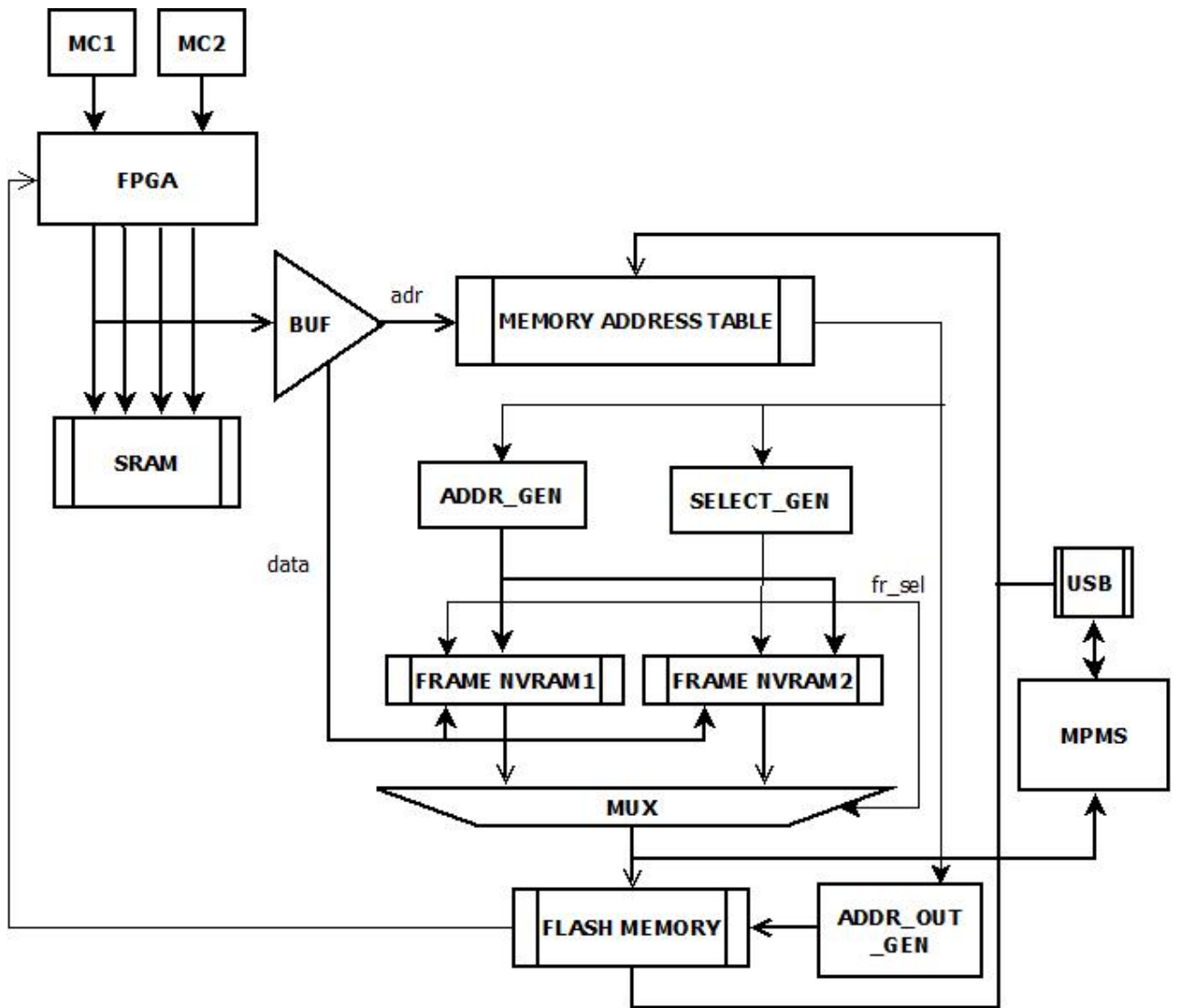


Рис. 4.4. Структурная схема аппаратной реализации системы контроля и мониторинга параметров сложных бортовых систем

На рис. 4.5 и рис. 4.6 показываются результаты моделирования процессы чтения и записи 32 байтов данных в двух массивах FIFO. Здесь *data\_in* - шина входных данных, *flag\_en*- признак разрешения, в его активном состоянии выполняется процесс записи FIFO, *fram1* и *fram2* - первый и второй массив данных, *data\_out* - шина выходных данных. Поток данных поступает в систему со скоростью 1.6 Гб/с. Скорость чтения данных из двух массивов памяти FIFO достигает 1.53 Гб/с. Скорость записи зависит от признаков разрешения, средняя скорость записи достигается 730 Мб/с. Скорость обмена данных на CAN сетях в современных автомобилях – это 1Мб/с так что, за один цикл работы сети CAN можно выполнить несколько десятков циклов управления и вычисления.

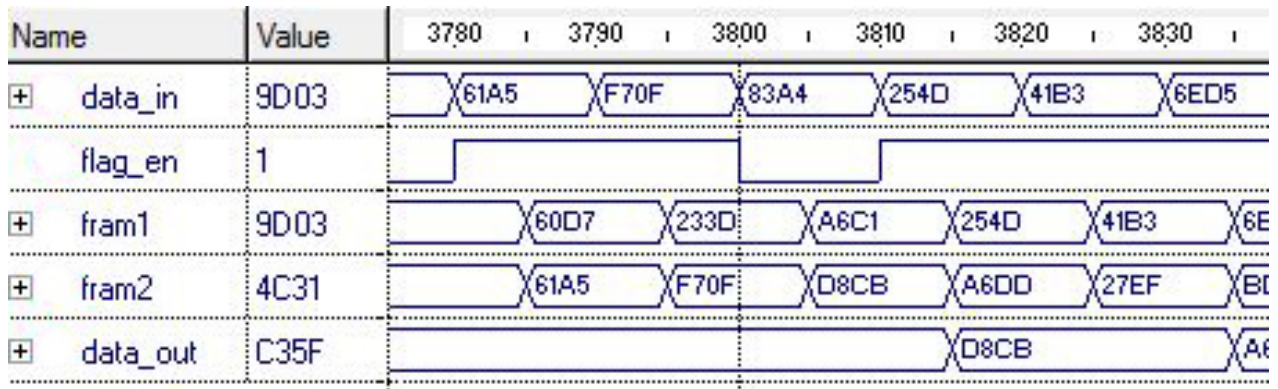


Рис. 4.5. Процесс записи 32 байтов текущих данных в первую память FIFO –FRAM и чтения из второй

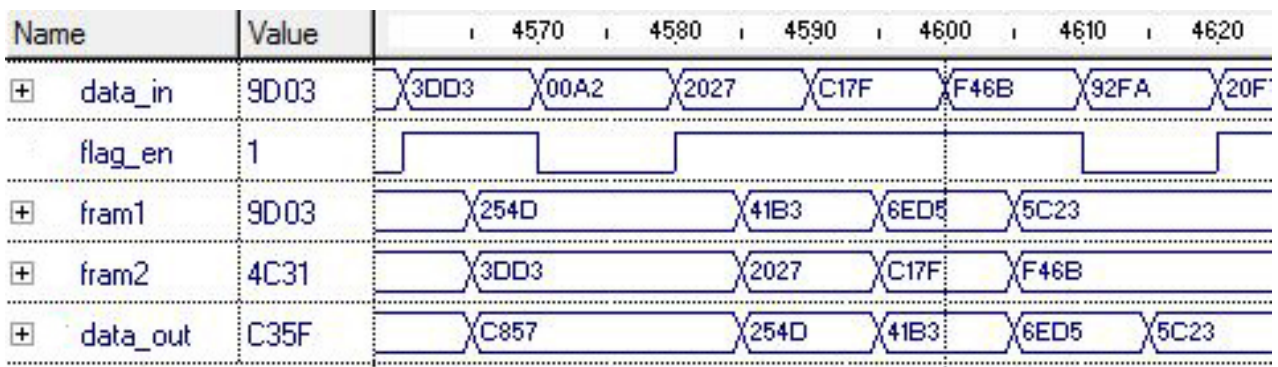


Рис. 4.6. Процесс записи 32 байтов текущих данных во вторую память FIFO –FRAM и чтения из первой

Процесс чтения из очередного массива FRAM реализуется только, когда в нем уже сформирован кадр данных. Переключение между массивами памяти осуществляется с помощью однобитового счетчика SELECT\_GEN, который контролирует процессы формирования кадров. Счетчик ADDR\_GEN генерирует адреса для записи в двух массивах FRAM-памяти. Передача очередного кадра данных из FRAM-памяти для записи во флэш-памяти и дальнейшего анализа в узле обработки и анализа данных MPMS осуществляется последовательным кодом с проверкой контрольного кода. Одновременно с этим процессом перезаписи происходит формирование следующего кадра данных на другом массиве FRAM-памяти. В процессе отладки и испытания сложных бортовых систем управления, особенно когда система является дистанционной или ряд ее компонент недоступен, оказывается полезно использование подобной схемы реализации СКИМ для

контроля и мониторинга функционирования каждого ее компонента. При этом достаточно изменять маски в таблице признаков, а это делать нетрудно при настройке СКИМ с помощью USB интерфейса.

Предложенный подход аппаратно-алгоритмической реализации механизма регистрации, контроля и мониторинга использует стандартные цифровые интерфейсы как USB, SPI, что позволяет легко его оптимизировать и тестировать. Узел автономного контроля и мониторинга, возможно, использоваться как отдельное устройство или встроенный узел в составе сложной бортовой системы управления. Благодаря своему гибкому механизму настроек и большой степени автономности, данная схема реализации может быть применена не только в процессе штатного функционирования контролируемого объекта, но и при контроле и наладке сложной распределенной системы управления и ее компонент.

#### **4.3. Аппаратная верификация и отладка бортовых распределенных систем управления реального времени**

Сущность процесса аппаратной верификации заключается в моделировании работы каждого модуля, каждой подсистемы и системы управления в целом. Для этого необходимо создать средства генерации входных данных. Например, в качестве генераторов входных сигналов для задачи верификации дополнительного блока согласования управления (ДБСУ) могут служить генератор синхронного сигнала, генератор случайных данных и различные генераторы имитационного управления.

В современных средствах проектирования верификации и отладки цифровых устройств, например Active HDL фирмы производителя САПР Aldec [90] существует возможность создания входных данных с помощью пользовательских интерфейсов, однако этот подход применяется только для верификации простых модулей. В сложной системе, алгоритмы верификации описываются в виде файла “testbench” на языке описания верифицируемой модели системы, т.е. на языке описания аппаратуры, например AHDL, VHDL, Verilog [89-93].

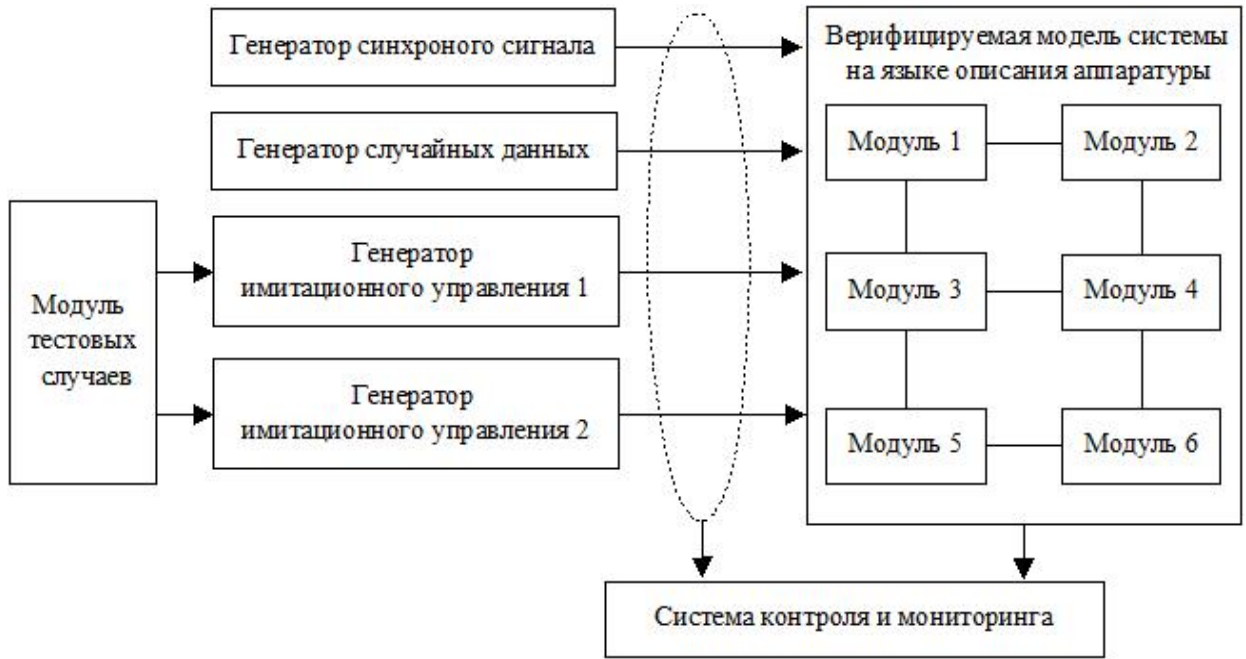


Рис. 4.7. Структурная схема аппаратной верификации дополнительного блока согласования управления

На рис. 4.7 показан пример структурной схемы аппаратной верификации дополнительного блока согласования управления. Данный блок входит в составе подсистем управления задними подвесками. Структурная схема ее верификации состоит из верифицируемой модели системы на языке описания аппаратуры, системы контроля и мониторинга и модуля testbench, к которому относятся различные модули генераторов входных данных и модули тестовых случаев. Верифицируемая модель системы, в процессе верификации рассматривается как черный ящик, входные сигналы которого имитируются, выходные сигналы наблюдаются и проверяются собственно разработчиком, или сравниваются с выходными сигналами эталонной модели. Для их верификации необходимо, как правило, создать генераторы входных сигналов.

В большинстве случаев, такие сигналы не являются случайными, а изменяются по сложной закономерности. Такие закономерности трудно описываются на языке описания аппаратуры. В этой ситуации полезным способом оказывается использование автономных узлов регистрации и контроля в качестве источников входных данных. Узлы регистрации и контроля используются в качестве средства

приема данных от реальных устройств и передачи этих данных в верифицируемую модель системы (рис. 4.8).

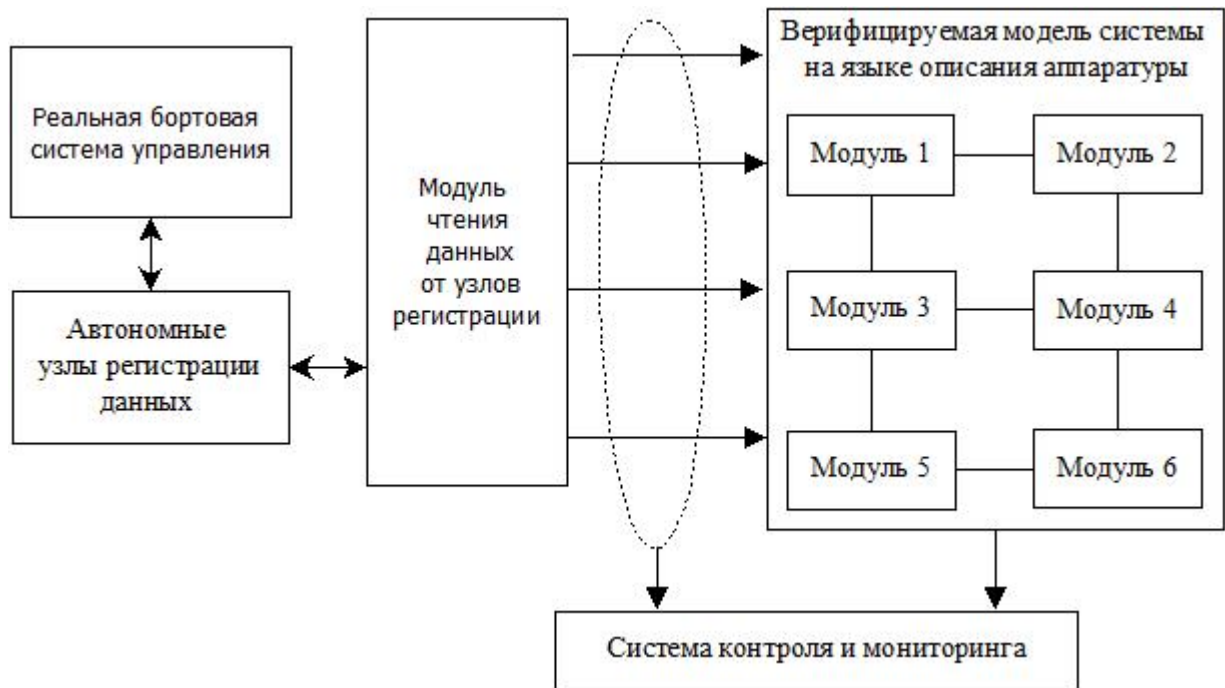


Рис. 4.8. Структурная схема аппаратной верификации ДБСУ на основе применения автономного узла регистрации

Данный подход позволяет получить наиболее точные результаты по сравнению с обычным методом использования генератора случайных чисел, обладает большей степенью гибкости по сравнению с методом непосредственной верификации, не усложняет структуру системы, и не разрушает основную ее функциональность. Кроме этого, данный подход дает возможности выполнения верификации недоступных компонентов системы. В процессе отладки и контроля отдельных подсистем или полной системы узел регистрации и контроля может играть роль соответствующей отсутствующей подсистемы, что позволяет повысить эффективность процесса контроля и отладки полной системы управления, избежать ошибок и отказов локальных подсистем управления из-за неточности процесса соединения и монтажа полной системы.

#### **4.4. Вопросы развития промышленных бортовых сетей и проблемы возникающие**

В предыдущих главах было показано, что современные промышленные бортовые системы управления (ПБСУ) представляют собой сложные высокодинамические системы с пространственным распределением компонентов. На сегодняшний день в ПБСУ используются разнообразные цифровые сетевые интерфейсы на различных структурных уровнях. Например, в качестве интерфейсов, используемых внутри электронных блоков системы, между функциональными модулями, могут служить интерфейсы **SPI, I2C, USB**. Внутри системы, между блоками или для подключения к системе различных датчиков, исполнительных устройств могут быть реализованы такие простые последовательные интерфейсы, как **CAN, Profibus, Modbus, LIN, HART**. В комплексах бортового оборудования между системами или в глобальных сетях передачи данных широко используются интерфейсы **Ethernet, CAN, ARINC, STANAG** и т.п. [85]. Активное использование разнообразных сетей связи в одной ПБСУ позволяет использовать в рамках системы управления большой набор новых алгоритмов обработки информации и управления. Однако это разнообразие используемых в системе интерфейсов одновременно порождает новые проблемы.

##### **4.4.1. Объединение разнообразных сетей в промышленных бортовых системах управления реального времени**

Существуют широкий спектр устройств, позволяющих обеспечить решение задачи объединения различных сетей, для контроля всех процессов и использования всех ресурсов, как узлов одной объединенной сети. Например, конверторы HD67290 (CAN/RS232), HD67048 (CAN/Ethernet), HD67390-U-D1 (CAN/USB), и т.п. - продукция компании «Крона». Недостатки таких универсальных готовых решений заключаются в том, что они имеют недостаточно высокий уровень гибкости комплексования через внутренние интерфейсы. Кроме того, эти универсальные решения из-за наличия избыточности возможностей дороги и трудно настраиваемы.

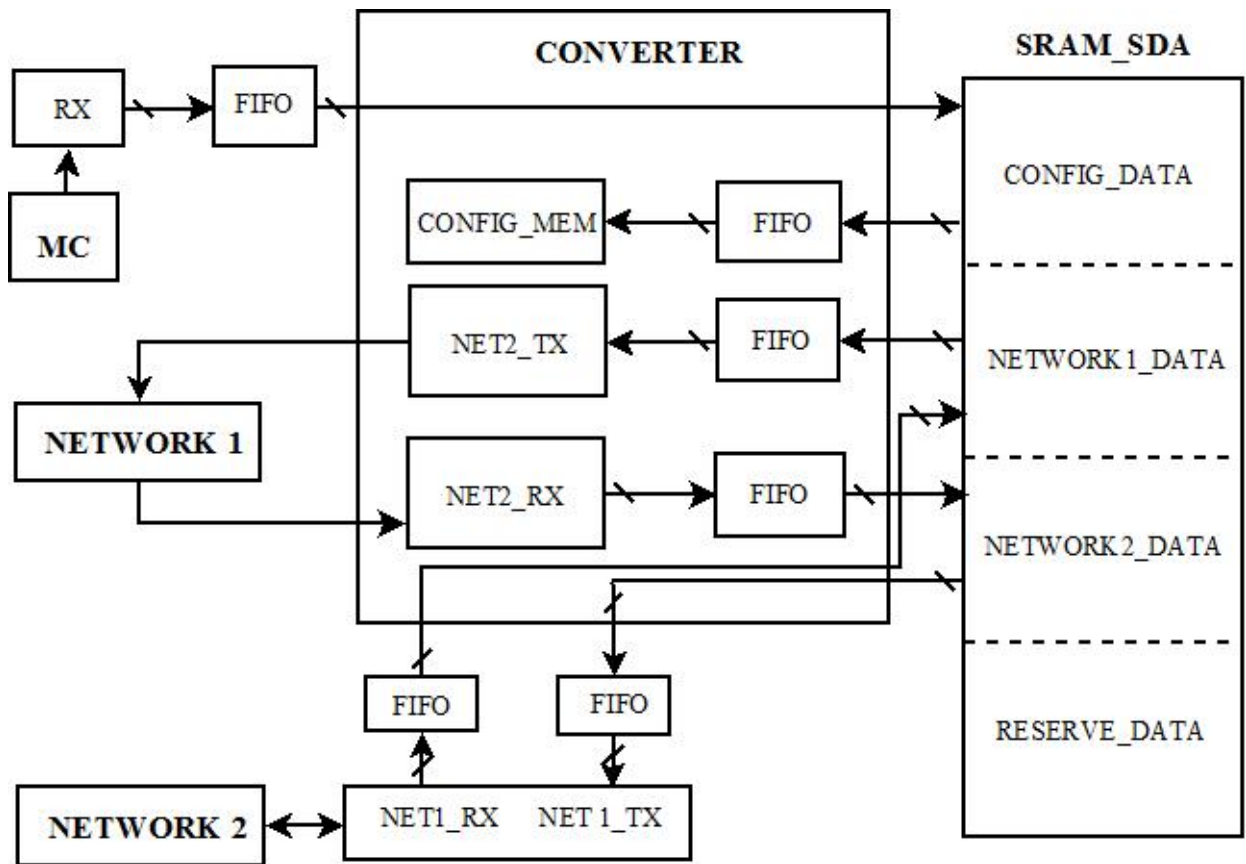


Рис. 4.9. Обобщенная функциональная схема аппаратной реализации конвертора, объединяющего две сети

Наиболее целесообразной для объединения двух сетей с разными интерфейсами представляется реализация в рамках системы управления специализированного конвертора, подходящего не только по функциям, но и по способу комплексирования, обладающего возможностью расширения набора функции и внешних интерфейсов. При этом конвертор будет играть роль ведущего узла для одного типа сети (например, сеть 1) и ведомого для другой сети (сеть 2). Обобщенная функциональная схема аппаратной реализации устройства показана на рис. 4.9. Комплексирование различных сетей обеспечивается на основе формирования пакетов, соответствующих протоколам первой и второй сетей, и управления процессами чтения, записи в памяти общего доступа (ПОД) с пространственным разделением адресов. Буферы FIFO

используются с целью пересинхронизации между запросчиками и памятью общего доступа с пространственным распределением адресов.

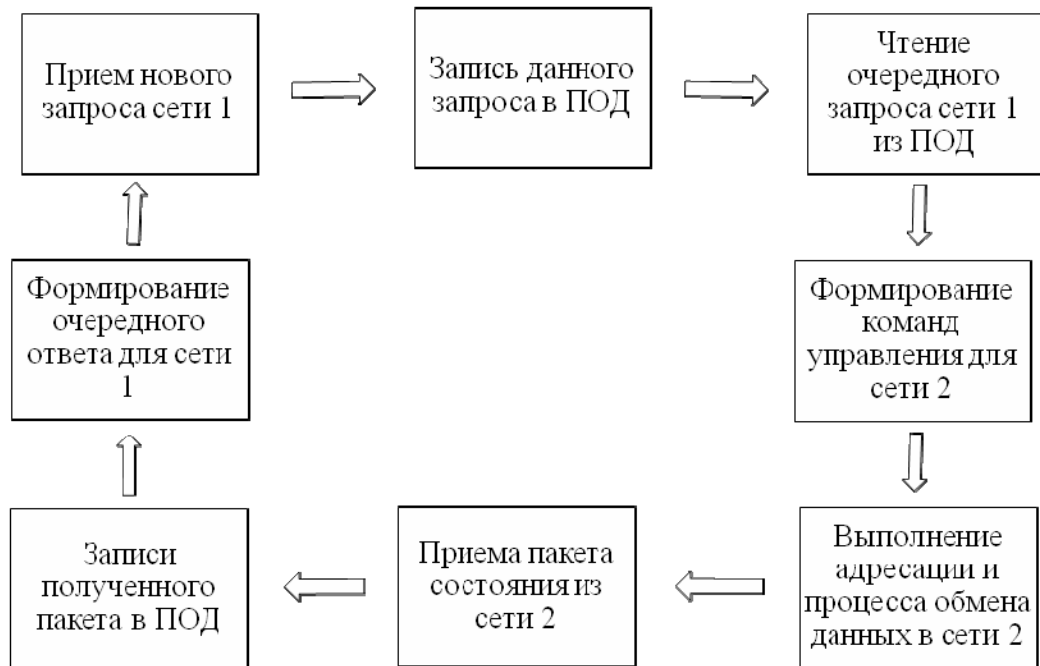


Рис. 4.10. Алгоритмы функционирования конвертора в рабочем режиме

Алгоритмы функционирования конвертора в рабочем режиме показаны на рис. 4.10. Устройство начинает работать после получения требуемых функциональных параметров в процессе конфигурирования. Конфигурация предварительно записана в памяти общего доступа. На основе предложенных алгоритмов функционирования и обобщенной функциональной схемы аппаратной реализации в качестве примера разработан в FPGA, как часть логики центрального вычислителя системы управления, конвертор промышленных сетей **Profibus** и **Modbus**. В данном случае, конвертор играет роль ведущего узла в сети Profibus и ведомого в сети Modbus. Конвертор позволяет объединить одну сеть Profibus с одновременно тремя равноскоростными сетями Modbus. Аппаратное решение обладает повышенной степенью компактности, гибкости, экономичности по ресурсам и по цене.

#### **4.4.2. Обеспечение минимального времени передачи данных в промышленных высокодинамических бортовых системах управления**

Другой проблемой, которая возникает в промышленных высокодинамических бортовых системах управления с пространственным распределением компонентов, является необходимость обеспечения минимального времени передачи данных между узлами системы. Решение данной задачи позволяет не только, повысить частоту обработки данных в системе управления, но и уменьшить вероятность искажения сигналов на линии передачи данных. Для решения данной проблемы требуется применение комплексных методов в сетевом аппаратном и программном обеспечении. Рассмотрим некоторые особенности аппаратных решений данной проблемы.

##### **4.4.2.1. Построение слабосвязанной распределенной системы управления**

Одной из идеологий решения проблемы является построение слабосвязанной распределенной системы управления. Т.е. построить систему управления так, чтобы все сильные связи, все процессы или части процесса управления, связанные с необходимостью передачи большого объема информации с высокой частотой, выполняются на высокоскоростной, не длинной сети локальных подсистем. По обычной сети связи между подсистемами передаются только состояния высокого уровня и команд управления. Модель слабосвязанной распределенной системы управления является одной из перспективных моделей высококачественных бортовых систем управления. Об этом подобно обсуждается в работах [62-66, 84-86].

##### **4.4.2.2. Модификация промышленных универсальных сетевых протоколов**

Другая идея решения проблемы - это упрощение пакета передачи данных, т.е. модификации универсальных сетевых протоколов. Сущность данной идеи заключается в том, что разработанные на сегодняшний день универсальные протоколы не всегда являются оптимальными решениями для конкретных промышленных систем управления. Избыточность управляющей информации в формате пакета данных и команд может ухудшить качество ПБСУ с точки зрения эффективности и помехоустойчивости системы. Данная идея решения базируется на важных характеристиках ПБСУ: цикличности информационных процессов и статич-

ности набора переменных. Эти характеристики означают наличие возможности организации обработки компонентов системы по определенному расписанию и предсказуемости длины пакетов данных. Рассмотрим подобно предлагаемое решение на примере задачи аппаратной реализации коммутатора Fast Ethernet. Благодаря высокой скорости передачи данных (порядка 100 Мб/с) и широкому спектру аппаратных решений Ethernet часто используется в различных современных системах управления. Однако достаточное высокое значение и недетерминированность времени задержки в процессе передачи данных между узлами верхнего и нижнего уровня через обычный коммутатор ограничивает возможности ее применения для высокодинамических ПБСУ. Предлагается решение данной проблемы путем реализации специального конвертора, который обменивается данными с узлом верхнего уровня на основе стандартных пакетов протокола Ethernet, и использует сокращенный формат пакетов для обмена данными с контролерами нижнего уровня. Стандартный и сокращенный форматы пакетов протокола Fast Ethernet показаны на рис. 4.11.

Преамбула	SFD	DA	SA	Length	Data	CRC	EFD
7 байт	1 байт	6 байт	6 байт	2 байт	46 – 1500 байт	4 байт	1 байт

а)

Преамбула	SFD	Length	Data	CRC	EFD
7 байт	1 байт	2 байт	46 – 1500 байт	4 байт	1 байт

б)

Рис. 4.11. Стандартный и сокращенный форматы пакетов протокола Fast Ethernet. а) Стандартный формат пакета; б) Сокращенный формат пакета

Коммутатор был реализован в FPGA на отладочной плате Altera DE2-115. Процессы упаковки и распаковки пакетов при приеме и передаче в сети верхнего и нижнего уровня реализуются с контрольным CRC-кодом. Структурная схема аппаратной реализации конвертора показана на рис. 4.11.

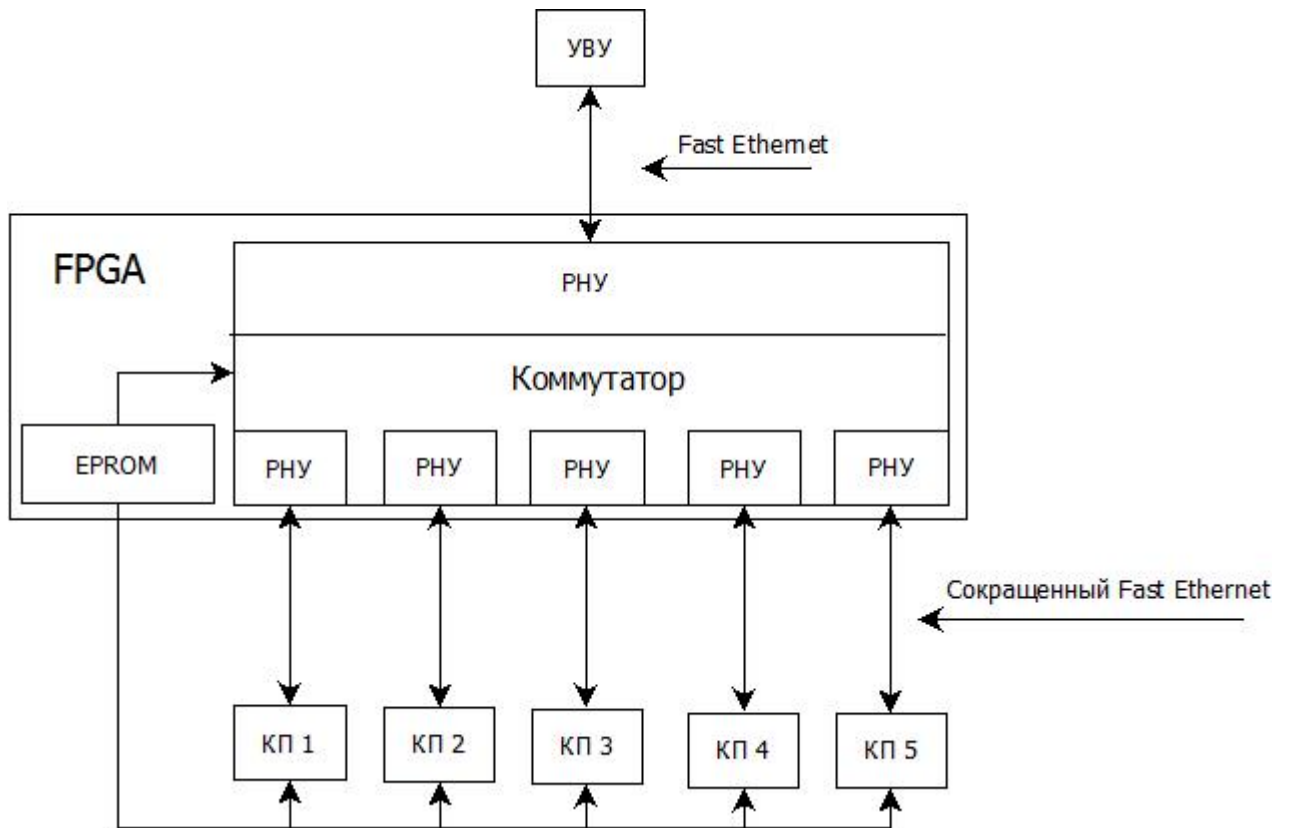


Рис. 4.12. Структурная схема аппаратной реализации конвертора

Здесь УВУ – узел верхнего уровня, КП1, КП2, ...КП5 - контроллеры периферии, РНУ - блок физического интерфейса. Главной задачей блока РНУ является обеспечение подключения контроллеров периферии нижнего уровня к коммутатору. Минимальная задержка достигается благодаря аппаратному преобразованию стандартных пакетов верхнего уровня в несколько сокращенных пакетов для нижестоящих узлов, с упрощенной адресацией последних по подключению.

#### 4.4.3. Аппаратное обеспечение подключения к промышленной бортовой сети разнообразных периферийных устройств.

В современных промышленных системах управления широко используются разнообразные периферийные устройства, работающие с разной скоростью и с разными сетевыми протоколами и цифровыми интерфейсами. Поэтому актуальной задачей является обеспечение подключения к промышленной бортовой сети периферийных устройств. Практические реализации на примере контроллеров

широкоиспользуемых промышленных сетей Profibus DP и CAN показали что, аппаратное решение обеспечивает подключение к сети большого количества периферийных устройств с высокой скоростью передачи данных и минимальным требованием к объему аппаратуры.

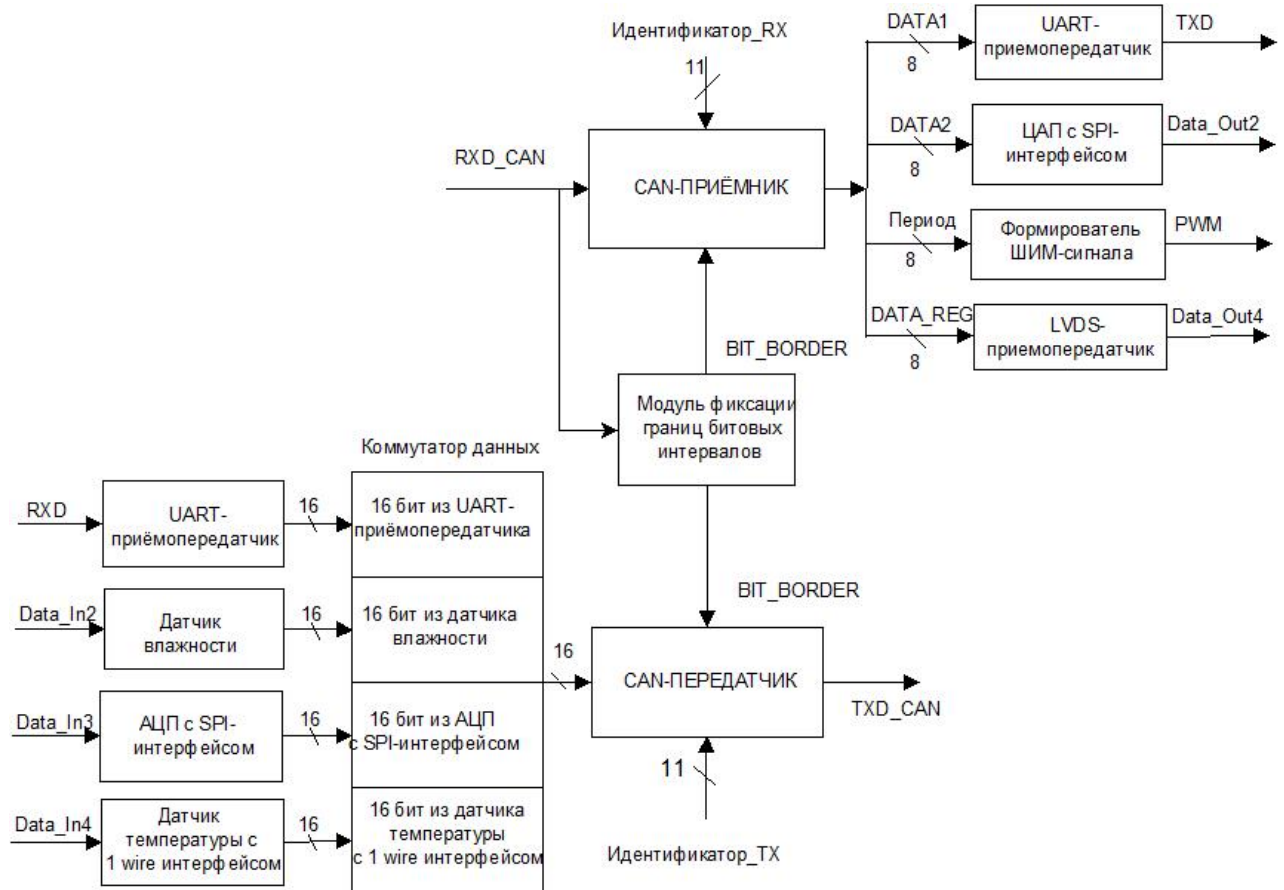


Рис. 4.13. Структурная схема аппаратной реализации контроллера периферии с CAN интерфейсом

Структурная схема аппаратной реализации контроллера периферии с CAN интерфейсом показана на рис. 4.13. В качестве цифровых интерфейсов периферийных устройств могут служить UART, SPI, I2C и т.п. Реализация контроллера периферии зависит от конкретной бортовой сети и интерфейсов периферийных устройств. Здесь перечисляются некоторые принципиальные особенности реализации, порождаемые характеристиками ПБСУ.

- Во-первых, благодаря статичности характеристик ПБСУ заранее известны конфигурационные параметры контроллера периферии. Кроме этого, все модули управления периферийными устройствами могут быть реализованы

автономно, и большинство из них функционирует независимо от типов интерфейсов бортовой сети.

- Во-вторых, данные, полученные в процессе обработки разных периферийных устройств, постоянно поступают в блок формирования пакетов и всегда присутствуют в буфере для отправки.
- Во-третьих, процесс синхронизации работы всех модулей в составе контроллера периферии выполняется либо на основе использования буферов, либо по запросам от сети.

Таким образом, предложенные комплексные приемы аппаратной поддержки сетевых решений, обеспечивающие повышение пропускной способности сети, исключение лишних арбитражных процедур, упрощение процедур обмена данными за счет типизации пакетной структуры передаваемой информации. Подобные аппаратные решения и алгоритмы повышают надежность функционирования систем управления и контролируемость сетевого оборудования.

#### **4.5. Выводы по главе**

1. Показаны назначение и актуальность задачи регистрации, контроля и мониторинга параметров. Показано отличие механизма реализации процесса контроля и регистрации параметров, на основе сетевой информационной среды, от традиционного метода реализации.
2. Предложены методы параметрической настройки автономного узла регистрации, узла контроля и мониторинга параметров.
3. Обсуждены проблема временного ограничения и метод ее решения на основе выбора сегнетоэлектрической памяти в качестве энергонезависимой памяти сохранения данных и реализации механизма параллельного чтения и записи данных.

4. Описана структура аппаратной реализации узлов регистрации и контроля. Показаны результаты моделирования в виде временных диаграмм. Обсуждена область их применения.
5. Обсуждены сущность задачи аппаратной верификации и метод ее выполнения. Отмечена проблема верификации бортовой распределенной системы управления и метод ее решения на основе применения узла регистрации параметров в качестве источник реальных входных данных.
6. Разработаны различные приемы аппаратной поддержки сетевых решений, обеспечивающие повышение пропускной способности сети, исключение лишних арбитражных процедур, упрощение процедур обмена за счет типизации пакетной структуры передаваемой информации. Аппаратная реализация предложенных приемов в промышленных бортовых сетях **CAN, Fast Ethernet, Modbus, Profibus DP** промакетирована на инструментальной плате FPGA. Показано что, подобные аппаратные решения и алгоритмы повышают надежность функционирования систем управления и контролируемость сетевого оборудования. Подобные приемы подключения абонентов и аппаратной организации сложной сети являются в определенной мере новыми для бортовых систем управления.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена актуальной проблеме оптимизации сложных высокодинамических бортовых систем управления на основе сетевой информационной среды с целью повышения эффективности и работоспособности их функционирования.

1. Исследование различных задач управления, контроля и структурных схем их реализации в современных бортовых системах управления, показало эффективность реализации модели слабосвязанных распределенных систем, построенных на основе сетевой технологии связи и двух концепций декомпозиции системы: во-первых, многоуровневой структуры организации системы, во-вторых, повышения степени автономности локальных подсистем.
2. Анализ существующих традиционных методов повышения эффективности и обеспечения работоспособности современных бортовых систем управления показал недостатки таких методов с точки зрения их реализации и функционирования.
3. Развитие сложности и динамических характеристик бортовых систем управления поставило задачу оптимизации сложных бортовых систем управления с повышенными требованиями к простоте, автономности и гибкости механизмов их реализации и функционирования.
4. Показана эффективность использования цифровой сетевой среды в качестве информационной основы для решения задачи обеспечения работоспособности и повышения качества сложных бортовых систем управления.
5. Разработана структурная схема реализации модели слабосвязанной распределенной бортовой системы управления на примере адаптивной пневматической системы управления подвеской автомобиля.

6. Разработаны приемы модификации сложных высокодинамических бортовых систем управления на основе использования свободных информационных связей и построения дополнительных автономных блоков согласования управления, и структурные схемы их аппаратной реализации.
7. Разработан перспективный метод контроля и мониторинга сложных бортовых систем управления на основе организации автономных узлов регистрации и контроля. Построена не только структурная схема его аппаратной реализации, но и предложены алгоритмы. Разработана и подробно моделирована функциональная схема.
8. Разработан подход верификации и отладки сложных высокодинамических бортовых систем управления на основе применения автономных узлов регистрации данных. Внимание уделено вопросам верификации и отладки бортовых систем, ряд компонентов которых не доступен для прямой проверки.
9. Разработан подход аппаратной реализации средств, обеспечивающих задачу повышения работоспособности и эффективности функционирования сложных бортовых систем управления реального времени. В данный подход входят: во-первых, алгоритм параметрической настройки различных автономных блоков согласования управления и контроля, во-вторых, метод решения проблемы временного ограничения, в-третьих, метод реализации механизма параллельного чтения и записи данных.
10. Разработаны и проверены на практике приемы аппаратной поддержки сетевых решений, обеспечивающие повышение пропускной способности сети, исключение лишних арбитражных процедур, упрощение процедур обмена за счет типизации пакетной структуры передаваемой информации. Подобные аппаратные решения и алгоритмы повышают надежность функционирования систем управления и контролируемость сетевого оборудования.

11. Все механизмы и реализуемые схемы описаны на языке описания аппаратуры Verilog. В качестве средства проектирования, моделирования и верификации использован современный пакет Active HDL версии 8.2 фирмы Aldec. Результаты реализации и моделирования представлены в виде схем реализации, описания аппаратуры на языке, временных диаграмм и численных файлов. Для системы управления пневматической подвеской автомобиля, работающей на основе микроконтроллера STM32F303VCT6 и сети CAN 1Мб/с, скорость обработки информации с использованием аппаратных решений достигает 730 Мб/с, так что, за один цикл работы сети CAN можно выполнить несколько десятых циклов вычисления. Эффективность системы (сравнительная оценка по скорости выполнения локальных задач управления и регулирования в системе до и после оптимизации) увеличивается на 25%. При этом, дополнительные затраты аппаратуры при реализации системы управления составят не более 14% от общего объема ее аппаратуры.
12. Основное содержание диссертации отражено в 13 научных работах, в том числе 4 работы опубликованы в рецензированном журнале (в соответствии со списком ВАК РФ). По теме диссертации делались сообщения и доклады на семи международных и всероссийских научных конференциях в 2012-2014гг, в том числе пяти очных и двух заочных конференциях. Получено свидетельство о победителе конкурса научных работ молодых ученых на 56-ой научной конференции - конкурсе МФТИ. Всероссийская научная конференция «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в современном информационном обществе». Всероссийская молодежная научно-инновационная конференция «Физико-математические науки: актуальные проблемы и их решения» 2013г.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Белов А.А., Воронцов Д.В., Зубков Б.В. и др. Прототип распределенной бортовой вычислительной системы. М.: ИКИ РАН, 2003. Пр-2097. 26 с.
2. Александров Е.К. Микропроцессорные системы: Учеб. Пособие / Е.К. Александров, Р.И. Грушвицкий, М.С. Куприянов и др.; Под ред. Л.В. Пузанкова. - СПб.: Политехника, 2002. -935 с.
3. Николайчук О. Архитектура распределенных систем управления. // Компоненты и технологии. -2002. - №1. - С. 100-107.
4. M. Paprzycki, J. Zalewski Eds. Special Issue on Parallel and Distributed Real-Time Systems. // Informatica. - Vol. 19. - No. 1. - February 1995. - ISSN 0350-5596
5. Ахметов М. И. Синтез бортовых информационно-управляющих систем с параллельной архитектурой : дисс. ... канд. техн. наук. Уфа, 2006. - 171 с.
6. А. З. Асанов, Д. Х. Валеев, А. С. Савинков Современная архитектура бортовых информационно-управляющих систем высококомобильных транспортных комплексов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XV международной конференции Самара: СамНЦ РАН.2013 - С.483-488
7. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления / Пер. с англ. Б.И. Кобылова – М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. -832 с.
8. Белов А.А., Воронцов Д.В., Зубков Б.В. и др. Программное обеспечение прототипа распределенной бортовой вычислительной системы. М.: ИКИ РАН, 2003. Пр-2093. - 26 с.
9. Информационно-управляющие системы и сети: Структуры, моделирование, алгоритмы/ Под общ. ред. М.Б. Сергеева. СПб.: Политехника, 1999. -247 с.
10. Зорин В.А. Основы работоспособности технических систем: учеб. для вузов. - М.: ООО «Магистр-Пресс», 2005.-536 с.
11. Градов Е.С. Обеспечение отказоустойчивости вычислительной системы с автоматическим распределением ресурсов : дисс. ... канд. техн. наук. Москва, 2004. – 178 с.

12. Виктория Мамыкина Датчики для автомобилей // Компоненты и технологии. - 2003. -№3. - С. 46-48
13. Отказоустойчивость однородных процессорных матриц : монография / Н.В. Лаходьнова, В.А. Воробьев, Н.Л. Ерёмина. - Томск: Изд-во Томск. архитектур.-строит. ун-та, 2002. – 153 с.
14. Жиратков В.И. Введение в теорию отказоустойчивых вычислительных систем : Учеб. пособие /В.И. Жиратков; М-во образования Рос. Федерации. Новосиб. гос. техн. ун-т. Новосибирск: НГТУ, 2001. -69 с.
15. Архитектура отказоустойчивых сетей самонастраиваемых микроконтроллеров / В. А. Колосков, В. С. Титов ; Курский гос. техн. ун-т. - Курск: КГТУ, 1995. - 175 с.
16. Отказоустойчивые цифровые устройства радиотехнических систем : Учеб. пособие / Ю.М. Казаринов, Б.П. Подкопаев, В.Н. Смирнов, Ленингр. электротехн. ин-т им. В.И. Ульянова Л.: ЛЭТИ, 1991. -60 с.
17. Исследование и разработка методов и средств анализа и обеспечения надежности отказоустойчивых вычислительных систем реального времени: Автореф. дис. канд. техн. наук. / Кхорзом Кхалдун; Моск. гос. техн. ун-т им. Н.Э. Баумана. - М.: 2001. - 16 с.
18. Александровская Л.Н. Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем : учебник для студентов вузов: Учебник / Л.Н. Александровская, А.П. Афанасьев, А.А. Лисов. - М.: Логос, 2003. - 208 с.
19. Исследование надежности измельчительных машин и точности фрикционных планетарных передач. Фундаментальные исследования : отчёт о НИР (заключительный) / МГТУ. НИИ Автоматизации производственных процессов ; рук. нир Леонов И. В. - М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. - 45 с.
20. Мышенков К.С., Васильев А.Г., Трофимов С.А. Методы и средства обеспечения надежности автоматизированных информационных систем. //Сборник докладов Юбилейной международной научно-практической конференции в 2 т.- М.: Издательский комплекс МГУПП, 2001. - Т.2. - С.215-219

21. Проников А.С. Параметрическая надежность машин. - М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2002. – 559 с.
22. Бенькович Е.С., Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б. Практическое моделирование динамических систем. - Изд.: Спб: БХВ-Петербург, 2002. - 464 с.
23. Ляшенко М.В. и др. Электронные системы транспортных средств: учеб.пособ. Доп. УМО вузов РФ по образованию в области транспортных машин и транспортно-технологических комплексов / М.В. Ляшенко, А.В. Победин, О.Д. Косов, В.П. Шевчук, В .В. Шеховцов, А.Е. Бабушкин; В олгГТУ. - Волгоград, 2011. – 115 с.
24. Коваленко О. Л. Электронные системы автомобилей. /О. Л. Коваленко. - Архангельск: Изд-во ИПЦ САФУ. Северного (арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова, 2013. -80с.
25. Новиков В.В. Повышение виброзащитных свойств подвесок АТС за счет изменения структуры и характеристик пневмогидравлических рессор и амортизаторов: автореф.д-р.техн.наук. - Волгоград, 2005. -40 с.
26. Павлов Г.А., Терехов В.Ф., Царьков А.Н. Адаптивное управление жесткостью и демпфирование систем подрессоривания автомобильных транспортных средств. // Машиностроитель. - 2001. - №2. - С.8-13
27. Бородяню В.Н. Первичные измерительные преобразователи в автомобильных системах (датчики на автомобиль): Уч. пособ./ Челябин. гос. техн. ун-т. Челябинск, 1996. - 147 с.
28. Лещинский Д.Ю., Смирнов А.А., Ягубова Е.В. Анализ перспективных конструкций систем подрессоривания транспортных средств на примере патентов мировых производителей. [Электронный ресурс] // Наука и инновации. - 2013. - №12. Режим доступа <http://engjournal.ru/catalog/machin/transport.html>.
29. Жданов А.А., Липкевич Д.Б. AdCAS - система автономного адаптивного управления активной подвеской автомобиля. Труды Института системного программирования: Том 7, Новые подходы в нейроноподобных и основанных на знаниях системах. /Под ред. А.А. Жданова - М.: ИСП РАН, 2004. - С. 119-159

30. Будылина Е.А. и др. Основные принципы проектирования сложных технических систем в приложениях // Молодой ученый. - 2013. - №5. - С. 42-45
31. Требухин А.Г. Принципы проектирования систем автоматизации повышенной отказоустойчивости и надежности // Технические науки: проблемы и перспективы: материалы междунар. науч. конф. (г. Санкт-Петербург, март 2011 г.). - СПб.: Реноме, 2011. - С. 173-177.
32. Гайкович А.И. Основы проектирования сложных технических систем. - СПб.: НИЦ «МОРИНТЕХНИКА», 2001. - 432 с.
33. Гудвин Г.К., Гребен С.Ф., Сальгадо М.Э. Проектирование систем управления. - М.: Бином, Лаборатория базовых знаний, 2004. – 911 с.
34. Антамошкин О.А. Многоатрибутивные методы принятия решений при многоуровневом проектировании бортовых систем обмена информацией : дисс. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2006. - 156 с.
35. Безопасность жизнедеятельности в машиностроении : учеб. пособие для студентов учреждений сред. проф. образования / В. Г. Еремин [и др.] ; под ред. Ю. М. Соломенцева. - М.: Высшая школа, 2002. - 310 с.
36. Заведеев А.И., Ковалёв А.Ю. Диагностика состояния и принципы повышения отказоустойчивости бортовой системы управления космического аппарата. [Электронный ресурс] //Труды МАИ. - 2011. - № 54. Режим доступа <http://www.mai.ru/science/trudy>
37. Денисенко В.В. Аппаратное резервирование в системах промышленной автоматизации. Часть 3 // Современные технологии автоматизации. - 2008. - №4. - С. 92-100
38. Денисенко В.В. Аппаратное резервирование в промышленной автоматизации. Часть 1. // Современные технологии автоматизации. - 2008. - №2. -С. 90-99
39. Денисенко В.В. Аппаратное резервирование в промышленной автоматизации. Часть 2. // Современные технологии автоматизации. - 2008. - №3. -С. 94-98
40. Кучерявый А.А. Бортовые информационные системы: Курс лекций / Под ред. В.А. Мишина и Г.И. Ключева. - 2-е изд. перераб. и доп. - Ульяновск: УлГТУ, 2004. - 504 с. - ISBN/ISSN:5-89146-348-2

41. Игнатъев А.С. Создание распределенных систем управления на базе последовательного высокоскоростного интерфейса // Промышленные АСУ и Контроллеры. - 2008. - № 12. - С. 5-6. - ISSN 1561-1531
42. Вишнеvский В.М., Дмитриев В.П. Жданов В.С. Основы передачи информации в вычислительных системах и сетях. - М.: МГИЭМ. 1998. – 162 с.
43. Артемов Н.И., Низамутдинов О.Б., Гордеев М.В. и др. Принципы построения промышленных микроконтроллерных сетей в стандартах Profibus и P-NET. - Пермь: ПГТУ, НИИУМС, 1996. – 57 с.
44. Любашин А.Н. Промышленные сети. // Мир компьютерной автоматизации. - 1999. - №1. - С. 38-44
45. Эрглис К.Э. Интерфейсы открытых систем. - М.: "Горячая линия - Телеком", 2000. - 256 с.
46. HART field communication protocol. Application guide HCF LIT 34. - HART Communication Foundation, 1999. - 80 p.
47. Денисенко В.В. HART-протокол: общие сведения и принципы построения сетей на его основе // Современные технологии автоматизации. --2010. - №3. - С. 94-97
48. Денисенко В.В. Протоколы и сети Modbus и Modbus TCP // Современные технологии автоматизации. - 2010. - №4. - С. 94-98
49. Джири Кун, Зденек Каспар LIN -2.0 Новая спецификация автомобиля интерфейса // Электронные компоненты. - 2005. - №2. - С. 87-90
50. CAN application layer for industrial application. CiA, DS201-207, ver. 1.1. - 1996. - 182 p.
51. Чунин С.В. Промышленная сеть CAN для построения высоконадежных распределенных систем управления. // Промышленные АСУ и контроллеры. - 1999. - №2. - С. 55-60
52. Орехов Д.И., Чепурнов А.С., Сабельников А.А., Маймистов Д.И. Распределенная система сбора и анализа данных на основе Шины CAN BUS. //Приборы и техника эксперимента. - 2007. - №3. - С. 1-8

53. Зотов В.Ю. Проектирование цифровых устройств на основе ПЛИС фирмы Xilinx в САПР WebPACK ISE -М.: Горячая линия-Телеком, 2003. -624 с.
54. Кузелин М.О. Современные семейства ПЛИС фирмы Xilinx: справочное пособие / М.О. Кузелин, Д.А. Кнышев, В.Ю. Зотов. - М.: Горячая линия-Телеком, 2004. - 440 с.
55. Асанов А.З., Валеев Д.Х., Савинков А.С. Интеграция и интеллектуализация бортовых систем управления большегрузными автомобилями // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XIV международной конференции Самара: СамНЦ РАН. - 2012. - С. 524-531
56. Процессорно-коммуникационные модули для распределенных систем автоматического управления / И.И. Шагурин, М.О. Мокрецов, В.А. Ванюлин, А.Л. Шкуренок. // Промышленные АСУ и контроллеры. - М., 2002. -№12. - С.43-47.
57. Богатырев В. А. Надежность и эффективность резервированных компьютерных сетей. // Информационные технологии. - 2006. - №9. - С. 25-30
58. Половко А.М. Принципы построения абсолютно надёжных технических устройств. - Л.: Знание, 1990. - 24 с.
59. Бородянюк В.Н. Автомобильные измерительные приборы: Учеб. пособ. - Челябинск: Изд-во ЧГТУ, 1997. - 55 с.
60. Калачев С.М, Шкурко Л.С., Калачев А.М. Экспериментально-расчетный метод контроля состояния амортизаторов.// Автомобильная промышленность. – 2005. - №6. - С.26-29
61. Боровских Ю.И. Электрическое и электронное оборудование автомобилей. Системы электроснабжения и контрольно-измерительных приборов: Учеб. пособие./ Фещенко А.И., Матюгин Ф.В.; МАДИ (техн. ун-т). - М., 1994. - 101 с.
62. Чан Ван Хань, Холопов Ю.А., Преображенский Н.Б. Исследование и разработка методики контроля перспективных распределенных систем управления в масштабе реального времени /Чан Ван Хань // Наука и бизнес: пути развития. - 5/2014. -№5(35). - С. 117-120. -ISSN 2221-5182.
63. Чан Ван Хань. Аппаратная реализация высоконадежной сетевой системы сбора и обработки данных. Тезис опубликован на 180-183 страницах 5-ого тома

сборника «XL ГАГАРИНСКИЕ ЧТЕНИЯ. Научные труды Международной молодежной научной конференции в 9 томах. Москва, 9-13 апреля 2014г.». - М.: МАТИ, 2014. - Т. 4. - 196с. - ISBN 978-5-93271-689-2

64. Чан Ван Хань, Холопов Ю.А., Преображенский Н.Б. Регистратор параметров высокодинамических объектов [Электронный ресурс] //Технологии техно-сферной безопасности - 2013. -N3(49). Режим доступа <http://ipb.mos.ru/ttb>

65. Чан Ван Хань. // Сборник «XXXIX ГАГАРИНСКИЕ ЧТЕНИЯ. Научные труды Международной молодежной научной конференции в 9 томах. Москва, 9-13 апреля 2013г.» - М.: МАТИ, 2013. - Т.4. - С.183-185. - ISBN 978-5-93271-689-2.

66. Чан Ван Хань, Холопов Ю.А., Преображенский Н.Б. Аппаратная реализация высоко-автономного регистратора параметров в цифровой системе управления. // Труды 56-й научной конференции МФТИ: Всероссийской научной конференции «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в современном информационном обществе», Всероссийской молодежной научно-инновационной конференции «Физико-математические науки: Актуальные проблемы и их решения». Радиотехника и кибернетика. - М.: МФТИ, 2013. - С.74-75. - ISBN 978-5-7417-0492-9

67. Мажей А.А., Ракицкий А.А. Анализ эффективности полуактивной подвески заднего моста автомобиля, работающей по алгоритму предсказания. Текст доклада, представленного на 47-й международной конференции "Повышение конкурентоспособности автотранспортных средств" 22-23 сен., 2004г. Режим доступа: [automobile.narod.ru/Books/semiactive\\_mazhei.pdf](http://automobile.narod.ru/Books/semiactive_mazhei.pdf)

68. Темченко В. Время использовать FRAM // Электронные компоненты. - 2000. - № 1. - С. 6-10.

69. Козлов А. Микросхемы памяти FRAM для современных электронных средств. // Компоненты и технологии. - 2010. - № 9. - С. 46-48

70. Бухтеев А. Создайте собственный маршрут проектирования ПЛИС в системе компании // Электроника: Наука: Технология, Бизнес. – 2005. - № 3. – С. 64-67

71. Рыбаков В.А., Исмоилов М.И. Шины передачи данных в электронных системах современных автомобилей. - М.: МАДИ (ГГУ), 2008. -50 с.
72. Черкесов Г. Н. Надежность аппаратно-программных комплексов. Учебное пособие. - СПб.: Питер, 2005. - 479 с.
73. Бородин В.Б., Шагурин М.И. Микроконтроллеры. Архитектура, программирование , интерфейс. - М.: Издательство ЭКОМ, 1999. – 400 с.
74. Бесекерский В.А.Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. - Изд. 4-е, перераб. и доп. - СПб.: Профессия, 2004. - 752 с.
75. Дроган С.В. Основы информационных систем: / Дроган С.В., Копанев А.А., Францев Р.Э.; Санк-Петербург гос. ун-т вод. коммуникаций. - СПб., 1998.-88 с.
76. Соловьев В.В. Основы языка проектирования цифровой аппаратуры Verilog. - М.: Горячая линия - Телеком, 2014. - 208 с. - ISBN 978-5-9912-0353-1.
77. Поляков А.К. Языки VHDL и VERILOG в проектировании цифровой аппаратуры М.: СОЛОН - Пресс, 2003. - 320 с.
78. Армстронг Дж.Р. Моделирование цифровых систем на языке VHDL. - М: Мир, 1992. - 175 с.
79. VHDL для моделирования, синтеза и формальной верификации аппаратуры. / под ред. Ж. Мермье - М.: Радио и связь, 1995. – 360 с.
80. Иосиф Каршенбойм, Михаил Косткин. Шпаргалка для перехода от AHDL к VHDL // Компоненты и технологии. - 2003. - № 1. – С 126-128
81. Борщенко Я.А., Васильев В.И. Электронные и микропроцессорные системы автомобилей - Курган: Изд-во Курганского гос. Ун-та, 2007. -207с.
82. Андреев А.Н. Распределенные модели устройств автоматического управления // Вестник ЮУрГУ. - 2005. - №9. - С. 27-28
83. Controller Area Network (CAN) – локальная сеть контроллеров // Электроника. - 1998. - №10. - С 1-25
84. Чан Ван Хань. Исследование и разработка перспективных методов оптимизации бортовых распределенных систем управления реального времени // Международный научно-исследовательский журнал. - 2014. -№9(31). – С. 56-59. - ISSN 2227-6017

85. Чан Ван Хань. Концепция построения сложных высокодинамических бортовых систем управления реального времени // Новый университет. Серия "Технические науки": науч. журн./учредитель ООО "Коллоквиум- Йошкар-Ола": Коллоквиум. - 2014. - №9(25). - С. 27-32. - ISSN 2221-9552. - DOI:10.15350/2221-9552.2014.9.0006
86. Чан Ван Хань, Преображенский Н.Б., Холопов Ю.А. Реализация высококачественных бортовых систем управления реального времени. // Труды 57-й научной конференции МФТИ с международным участием, посвященной 120-летию со дня день рождения П.Л. Капицы. Всероссийская научная конференция с международным участием «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в области физики». Всероссийская молодёжная научно-инновационная конференция с международным участием «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в современном информационном обществе». Радиотехника и кибернетика. - М.: МФТИ, 2014. - С. 21-22. - ISBN 978-5-7417-0554-5
87. Чан Ван Хань, Дам Чонг Нам, Ле Ба Чунг, Преображенский Н.Б. Некоторые особенности реализации сетевых решений в системах управления. Сборник «Международная конференция Инжиниринг & Телекоммуникации – En&T 2014. Тезисы докладов. Москва/Долгопрудный, 26-28 ноября 2014» - М.: МФТИ. - 2014. - С.217-218. - ISBN 978-5-7417-0522-3.
88. Ле Ба Чунг. Контроллер периферии с CAN-интерфейсом. // Труды 56-ой всероссийской научной конференции МФТИ «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в современном информационном обществе. Москва, 25-30 ноября 2013г. » - М.: МФТИ, 2013. - С.59-60. - ISBN 978-5-7417-0492-9.
89. Дам Чонг Нам. Комплексирование MODBUS и PROFBUS в промышленных сетях. // Сборник «ХЛГАГАРИНСКИЕ ЧТЕНИЯ. Научные труды Международной молодежной научной конференции в 9 томах. Москва, 7-11 апреля 2014г.» - М.: МАТИ. - 2014. - Т.5. - С.218-219. - ISBN 978-5-93271-666-3.
90. Дам Ч.Н., Холопов Ю.А. Контроллер периферии с PROFIBUS – интерфейсом. // Труды 56-й научной конференции МФТИ: Всероссийской научной конференции «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в совре-

менном информационном обществе», Всероссийской молодежной научно-инновационной конференции «Физико-математические науки: актуальные проблемы и их решения». Радиотехника и кибернетика. - М.: МФТИ, 2013. - 212 с. - С.62-63. - ISBN 978-5-7417-0492-9.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение 1. Достоинства и недостатки централизованных и распределенных систем управления

#### *Достоинства и недостатки централизованных систем управления*

Достоинства	Недостатки
Минимальная избыточность технических средств	Необходимость применения мощных процессоров.
Достаточно простая реализация процессов информационного взаимодействия	Большие трудности, связанные с расширением системы. Необходимость сбора, обработки чрезвычайно больших объемов информации
Наличие возможности реализации глобально-оптимального управления системой в целом	Низкая надежность. При дублировании в этом случае требуется применение такой же дополнительной шины, что резко увеличивает габариты, вес и стоимость всей системы, но не решает проблему.
Легко осуществимая корректировка оперативно-изменяющихся данных	Большие сроки разработки. При разработке системы заново создаются аппаратная и программная части.
	Необходимость наличия запоминающих устройств очень большого объема
	Высокая суммарная протяженность и перегруженность каналов связи при наличии, территориально разнесенных объектов

*Достоинства и недостатки распределенных систем управления*

Достоинства	Недостатки
Легкая расширяемость. Стандартные протоколы позволяют строить системы с авто-конфигурацией, а также обеспечивают совместимость с оборудованием, производимым другими фирмами.	Возможная «разность» управления при одинаковых объектах
Высокая надежность: Для подключения к сетевому интерфейсу требуется небольшое количество проводов, и используются разъемы с небольшим количеством контактов. При таком количестве сигналов легко обеспечивается гальваническая развязка элементов системы. Ряд сетевых интерфейсов осуществляет коррекцию ошибок на аппаратном уровне	Высокая стоимость системы управления.
Малые сроки разработки, поскольку большая часть аппаратных средств и программного обеспечения не требует модификации.	Сокращение перерабатываемой информации, приводит к снижению качества управления
Легкость тестирования и отладки. Поскольку все элементы системы активны, легко обеспечить самодиагностику и поиск неисправности.	
Возможность распределения системы по объекту, что позволяет уменьшить затраты на монтаж и на использование медного провода.	

## Приложение 2. Аппаратная реализация таблицы признаков и метод ее моделирования

*Модуль описания таблицы признаков*

### Описание портов модуля

Port name	I/O	Signal descriptions
flag_en	I	Признак разрешения записи данных в памяти FRAM
rst	I	Сигнал сброса
eof	O	Отметка конца FIFO
wr_bs	O	Признак выбора FIFO для записи
rd_bs	O	Признак выбора FIFO для чтения
st_rd	O	Признак начала чтения

### Описание модуля на основе текстового языка описания аппаратуры Verilog

```

`timescale 1 ns / 1 ps
module tab_flag ( clk ,cs , we, oe, addr ,flag);
parameter FLAG_WIDTH = 1 ;
parameter ADDR_WIDTH = 8 ;
parameter RAM_DEPTH = 1 << ADDR_WIDTH;
//-----Input Ports-----
Input          clk   ;
input [ADDR_WIDTH-1:0] addr;
input          cs    ;
input          we    ;
input          oe    ;
//-----Inout Ports-----
inout [FLAG_WIDTH-1:0]  flag  ;
//-----Internal variables-----

```

```

reg [FLAG_WIDTH-1:0] flag_out  ;
reg [FLAG_WIDTH-1:0] ram [0:RAM_DEPTH-1];
//-----Code Starts Here-----
// Tri-State Buffer control
// output : When we = 1, oe = 0, cs = 0
assign flag = (cs && oe && !we) ? flag_out : 8'hzz;
// Table flag Write Block
always @ (posedge clk)
    begin : TAB_FLAG_WRITE
        if ( cs && we ) begin
            ram[addr] = flag;
        end
    end
end
// Table flag Read Block
// Read Operation : When we = 0, oe = 1, cs = 1
always @ (posedge clk)
    begin : TAB_FLAG_READ
        if (cs && !we && oe)
            flag_out = ram[addr];
    end
end
endmodule

```

*Модуль моделирования таблицы признаков*

```

`timescale 1ns / 1ps
module uut_tab_flag;
parameter FLAG_WIDTH = 1 ;
parameter ADDR_WIDTH = 8 ;
parameter RAM_DEPTH = 1 << ADDR_WIDTH;
//-----Internal variables-----
reg [FLAG_WIDTH-1:0] flag_in;

```

```

tri [FLAG_WIDTH-1:0] flag = flag_in;
reg [ADDR_WIDTH-1:0]addr;
reg clk,we,oe,cs;
wire flag_sign;
integer f, seed_flag, seed_addr;

//-----Code Starts Here-----
assign flag_sign = (we || oe)&&flag &&cs ? 1:0;
tab_flag tf( .clk(clk) ,.cs(cs) , .we(we), .oe(oe), .addr(addr) ,.flag(flag) );
initial begin
    clk = 1'b0;                flag_in = 8'h25;
    addr = 3'd0;                seed_flag = 2;
    seed_addr = 3;              cs = 1;
    oe = 1'b0;                  we = 1'b1;
end
//-----
initial
    #135 oe = 1'b1;
initial
    #130 we = 1'b0;
initial
    #295 cs = 1'b0;
//-----
always #5 clk = ~clk;
always #10 addr = we? addr+1: oe? addr-1: addr;
always #10 flag_in = !oe&&cs&&we? $random(seed_flag):8'hzz;
Initial #305 $finish;
/-----
initial begin
    f=$fopen("tab_flag.txt");    f=f+1;

```

```
    $fmonitor(f,"%d %d %d %d| %d | |d", $time, clk, we, oe, addr, flag);  
End  
endmodule
```

### Приложение 3. Аппаратная реализация механизма управления процессами записи и чтения в двух буферах FRAM памяти и метод ее тестирования

*Модуль описания механизма записи и чтения*

#### Описание портов модуля

Port name	I/O	Signal descriptions
flag_en	I	Признак разрешения записи данных в памяти FRAM
rst	I	Сигнал сброса
eof	O	Отметка конца FIFO
wr_bs	O	Признак выбора FIFO для записи
rd_bs	O	Признак выбора FIFO для чтения
st_rd	O	Признак начала чтения
ready_out	O	Готовность чтения
rd_adr	O	8 бит адресов для чтения из двух FIFO

#### Описание модуля на основе текстового языка Verilog

```

`timescale 1 ns / 1 ps
module nvram_fifo (clk, rst, efs, flag_en, data_in, data_out, read_bs, write_bs,
ready_out, start_rd, read_adr, write_adr, fram1, fram2);
parameter DATA_WIDTH = 16;
parameter ADDR_WIDTH = 5;
parameter MAX_ADDR = 31;
input clk, rst, efs, flag_en;
input [DATA_WIDTH-1:0] data_in;
reg [ADDR_WIDTH-1:0] wr_addr, rd_addr;

output reg [DATA_WIDTH-1:0] data_out;
output wire read_bs, write_bs, ready_out, start_rd;
output wire [ADDR_WIDTH-1:0] read_adr, write_adr;

```

```
output wire [DATA_WIDTH-1:0] fram1;
output wire [DATA_WIDTH-1:0] fram2;

assign read_bs = rd_bs;
assign write_bs = wr_bs;
assign ready_out = out_ready1;
assign start_rd = rd_start;
assign read_adr = rd_addr;
assign write_adr = wr_addr;
assign fram1 = fifo1[wr_addr];
assign fram2 = fifo2[wr_addr];

reg [DATA_WIDTH-1:0] fifo1 [(2**ADDR_WIDTH)-1:0];
reg [DATA_WIDTH-1:0] fifo2 [(2**ADDR_WIDTH)-1:0];
reg rd_bs, wr_bs, out_ready1;
wire out_ready, rd_start;
assign out_ready = rd_bs ^ wr_bs;
assign rd_start = out_ready & !out_ready1;

always @(posedge clk) begin
    out_ready1 <= out_ready;
    if(rst) rd_bs <= 0;
    if(rd_addr == MAX_ADDR) rd_bs <= !rd_bs;
end

always @(posedge clk) begin
    if(rst) wr_bs = 0;
    else if(efs) wr_bs <= !wr_bs;
end
```

```

always @(posedge clk)begin
    wr_addr = (rst | efs)? 0: flag_en? wr_addr +8'd1:wr_addr;
end

always @(posedge clk) begin
    if(rd_start) rd_addr <= 'd0;
    else if(out_ready)
        rd_addr <= rd_addr + 'd1;
end

always @(posedge clk) begin
    if (!wr_bs) fifo1[wr_addr] <= flag_en? data_in: fifo1[wr_addr];
    else  fifo2[wr_addr] <= flag_en? data_in: fifo2[wr_addr];
end

always @(posedge clk)
    data_out <= out_ready && (!rd_bs)? fifo1[rd_addr]: out_ready && (rd_bs)?
    fifo2[rd_addr] : data_out;
endmodule

```

*Модуль тестирования механизма записи и чтения*

```

`timescale 1 ns / 1 ps
module uut_nvram_fifo ();
//-----
parameter DATA_WIDTH = 16;
parameter ADDR_WIDTH = 8;
parameter MAX_ADDR = 31;
//-----Internal variables-----
reg clk;
reg [ADDR_WIDTH-1:0] cnt_efs;

```

```
reg [DATA_WIDTH-1:0] data_in;
reg flag_en;
integer seed_en, seed_din, f;
reg efs1, efs2, rst;
wire efs = efs1&&!efs2;

initial begin
    clk = 1'b0;
    flag_en = 1'b0;
    seed_en = 2; seed_din = 2;
    efs1 = 0;    efs2 = 0;
    cnt_efs = 8'd0;
    rst = 1'b0;
    data_in = 8'h97;
end

always
    #5 clk = ~clk;

initial begin
    #5 rst = 1'b1;
    #10 rst = 1'b0;
end

always
    #10 flag_en = $random(seed_en );

always
    #10 data_in = $random(seed_din );

always @(posedge clk) begin
```

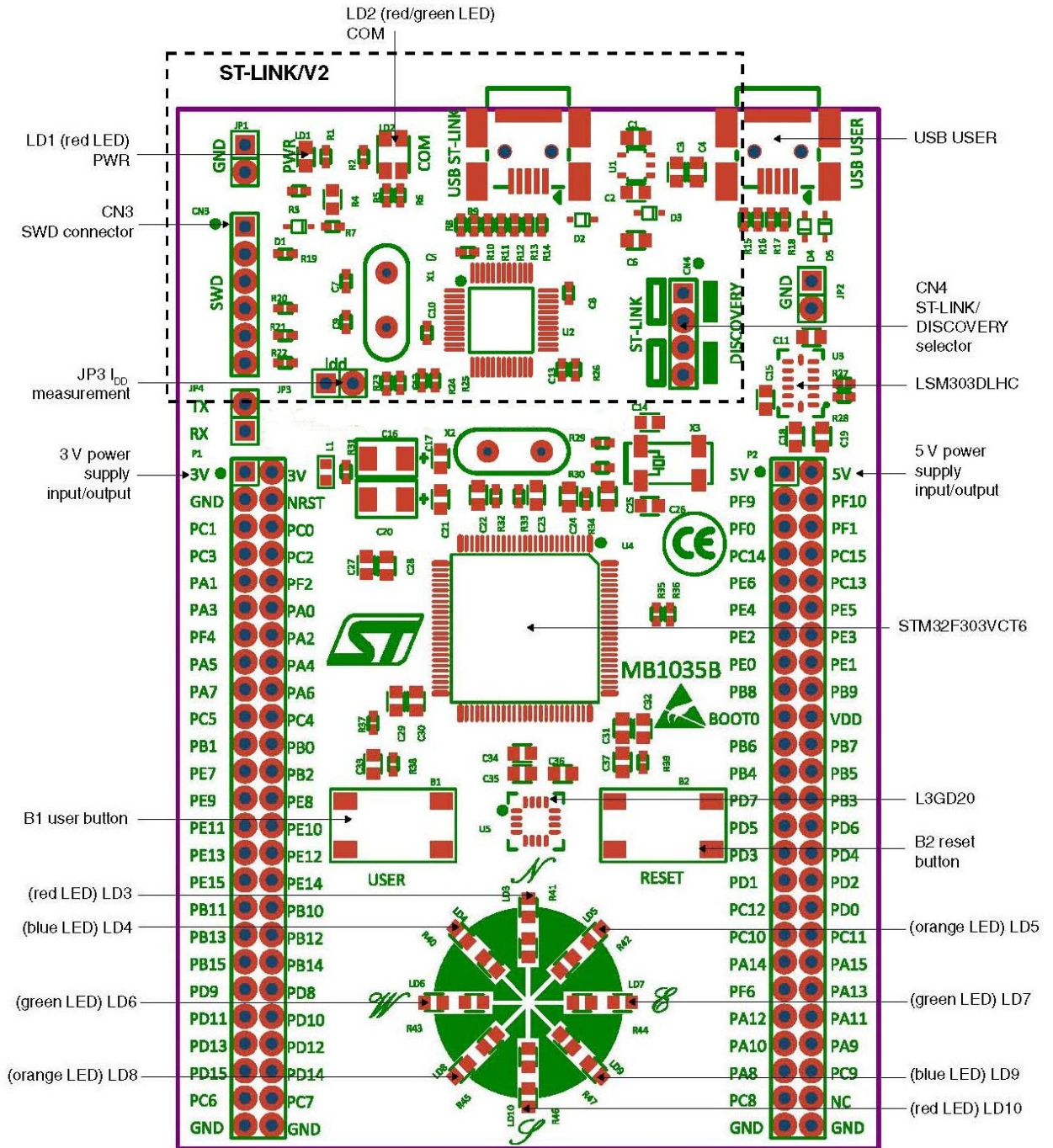
```
cnt_efs <= (rst|efs)? 0:flag_en? cnt_efs+1:cnt_efs;
    efs1 <= rst?0:(cnt_efs == MAX_ADDR)?1:0;
    efs2<=efs1;
end

initial
    #44305 $finish;

initial begin
    f=$fopen("nvram_fifo.txt");
    f=f+1;
    $fmonitor(f,"%d %d %d %d %d", $time, clk, rst, flag_en, data_in);
end

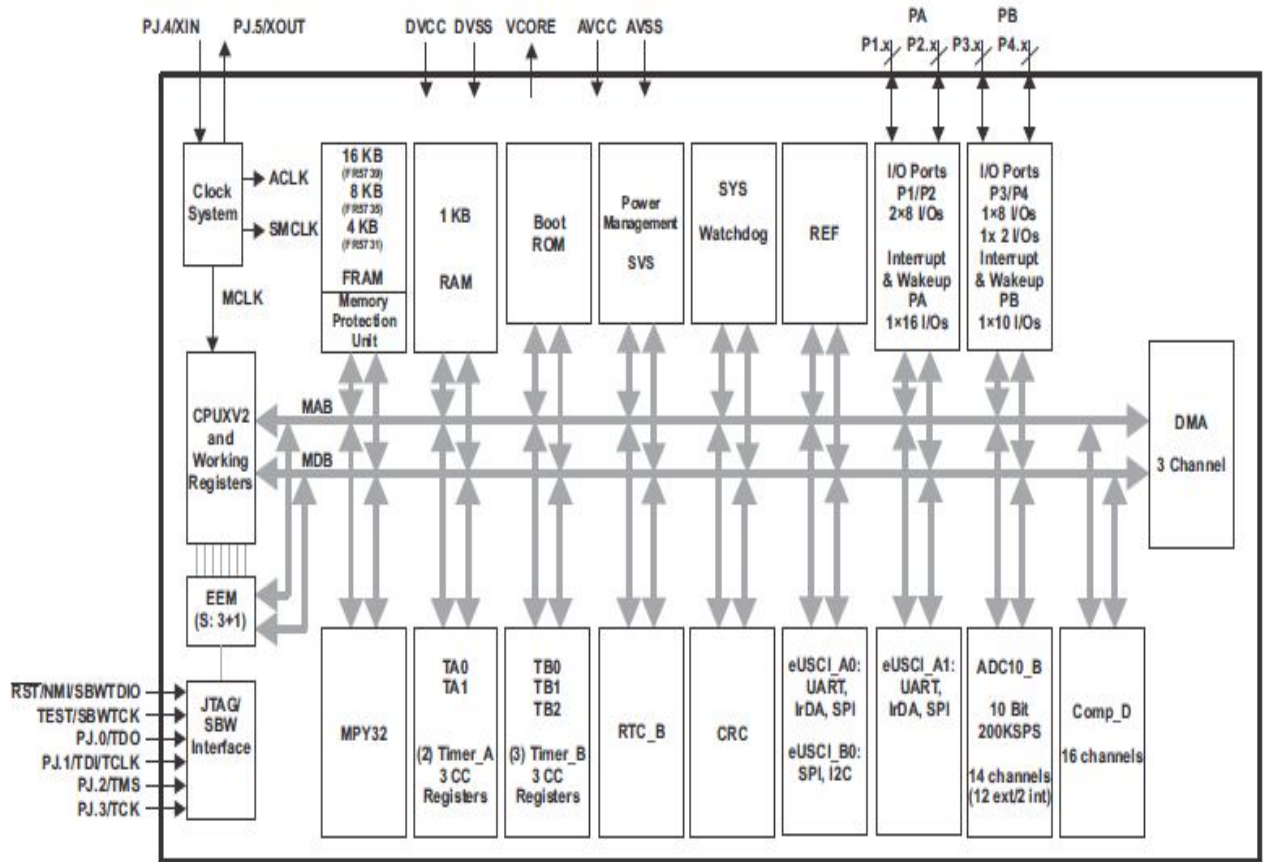
endmodule
```

**Приложение 4. Схема инструментальной платы STM32F3DISCOVERY на микроконтроллере STM32F303VTCT6 с памятью на 256 КБ Flash, 48КБ RAM (\*)**



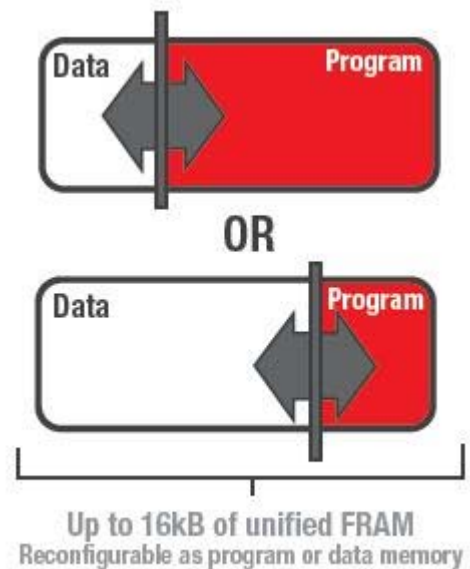
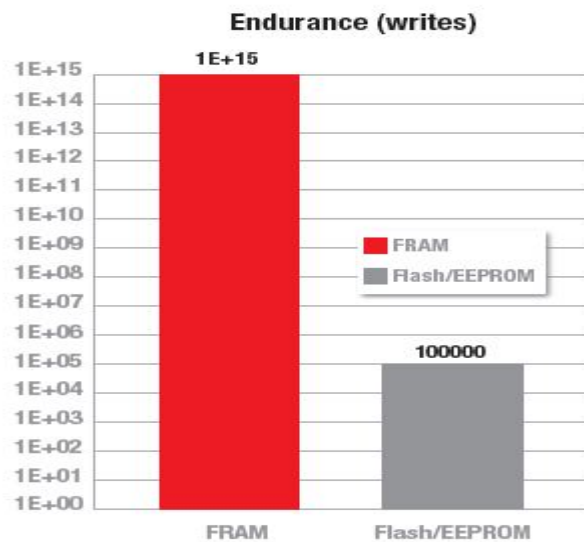
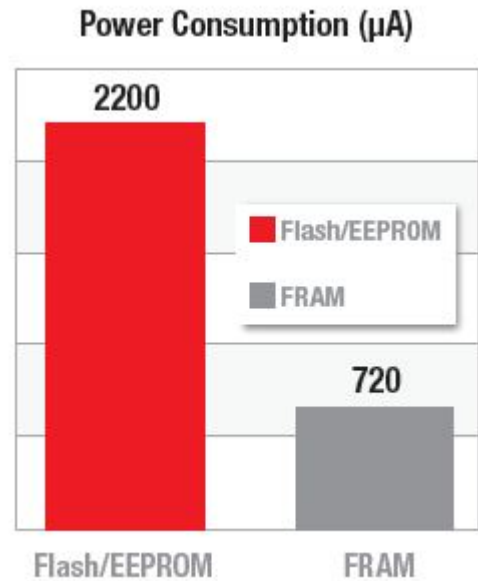
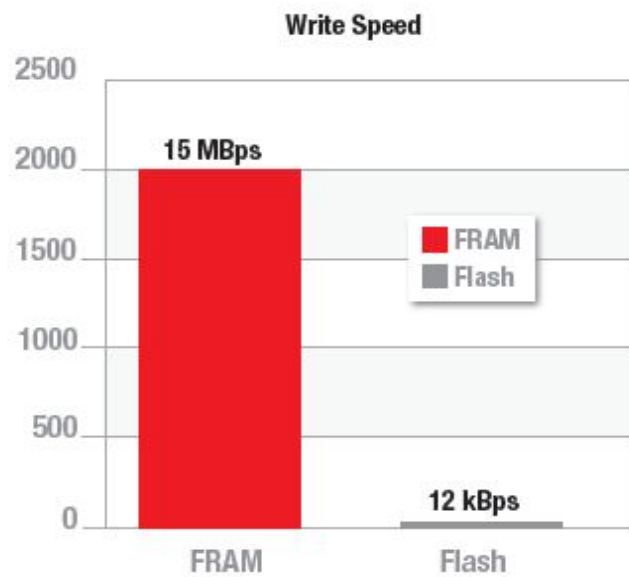
(\*) STM32F3DISCOVERY Discovery kit for STM32F303xx microcontrollers /STMicroelectronics company, - February, 2013. - 36 p. <http://www.st.com/>

Приложение 5. Блок-схема MSP430FR5739 с ядом MSP430 и сегнетоэлектрической памятью FRAM (\*\*)



Приложение 6. Сравнительные характеристики FRAM, SRAM, EEPROM и Flash памяти (\*\*\*)

Specifications	FRAM	SRAM	EEPROM	Flash
<b>Non-volatile</b> Retains data w/o power	Yes	No	Yes	Yes
<b>Write speed</b> (13 KB)	10ms	<10ms	2 secs	1 sec
<b>Average active Power</b> [µA/MHz] 16 bit word access by the CPU	100	<60	50,000+	230
<b>Write endurance</b>	10 <sup>15</sup>	Unlimited	100,000	10,000
<b>Soft Errors</b>	No	Yes	Yes	Yes
<b>Bit-wise programmable</b>	Yes	Yes	No	No
<b>Unified Memory</b> Flexible code and data partitioning	Yes	No	No	No



FRAM является сегнетоэлектрической энергонезависимой памятью с произвольным доступом. Одним из преимуществ данной памяти является ее возможность обеспечения высокой скорости записи и чтения при использовании меньше энергии по сравнению с EEPROM или Flash памятью. Кроме этого, она нечувствительна к наличию электромагнитных полей, обладает огромным количеством циклов перезаписи (в 10-ти порядок больше EEPROM и Flash памяти) и обладает возможностью динамического изменения своего объема для хранения программ и данных.

(\*\*) MSP430FR573x Mixed-Signal Microcontrollers / Texas instruments incorporated. - June 2014. - 116 p. [www.ti.com](http://www.ti.com)

(\*\*\*) [www.ti.com](http://www.ti.com)