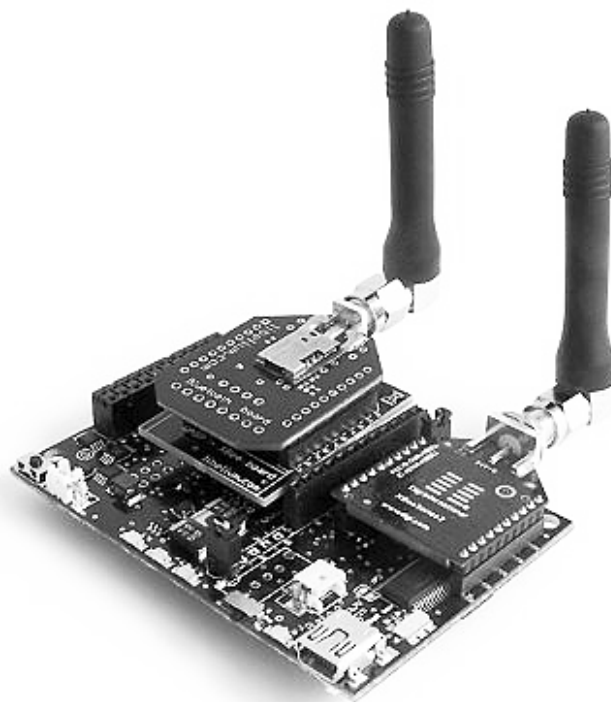


А. О. Ключев, П. В. Кустарев, А. Е. Платунов

**РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ
ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ
СИСТЕМЫ**



Санкт-Петербург

2015

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

А. О. Ключев, П. В. Кустарев, А. Е. Платунов

**РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ
ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ
СИСТЕМЫ**

Учебное пособие

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

Санкт-Петербург

2015

А. О. Ключев, П. В. Кустарев, А. Е. Платунов. Распределенные информационно-управляющие системы. Учебное пособие. — СПб.: Университет ИТМО, 2015. — 58 с.

Учебное пособие является введением в организацию распределенных информационно-управляющих систем. В нем рассматриваются основные понятия и характеристики таких систем, особенности архитектуры, аппаратные и программные средства, используемые для построения РИУС.

Для подготовки бакалавров по направлению 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника», 09.03.04 «Программная инженерия».

Рекомендовано к печати заседанием ученого совета факультета КТиУ Санкт-Петербургского государственного научно-исследовательского университета, протокол № 3 от 10.03.2015.



Университет ИТМО — ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО — участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО — становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2015

© Ключев А. О., Кустарев П. В., Платунов А. Е., 2015

Содержание

Введение	5
1 Понятие информационно-управляющей системы	8
1.1 Системы реального времени	9
1.2 Вычислительный базис современных РИУС	10
2 Структура РИУС	17
2.1 Оконечные устройства	17
2.2 Подсистема управления процессом	18
2.2.1 Логические контроллеры	19
2.2.2 Устройства сопряжения с объектом	20
2.2.3 Элементы интерфейса оператора	20
2.3 Подсистема диспетчерского управления	22
2.4 Коммуникационная подсистема	22
2.4.1 Сети датчиков и исполнительных устройств	23
2.4.2 Сети управления процессом	24
3 Организация взаимодействия элементов РИУС	29
3.1 Организация общей памяти	29
3.1.1 Разделяемая память с временным разделением шины	29
3.1.2 Разделяемая память с перекрестным переключа- телем	30
3.1.3 Система с многовходовой памятью	31
3.2 Организация связи между компонентами РИУС	32
3.2.1 Классификация протоколов по способу доступа к среде	32
3.2.2 Виды топологий	33
3.2.3 Системы с шинной топологией	34
3.2.4 Петлевые системы	35
3.2.5 Системы с топологией звезда	37
3.2.6 Иерархические системы	38
3.2.7 Системы с коммутацией	39
3.2.8 Протоколы со случайным доступом	40

3.2.9	Протоколы с управляемым доступом	43
3.2.10	Протоколы с уплотнением каналов	50
Литература	54

Введение

Данное пособие построено на базе учебных материалов, используемых на кафедре вычислительной техники Университета ИТМО. В пособии рассматриваются общие идеи построения распределенных информационно-управляющих систем (РИУС), а также особенности проводных и беспроводных РИУС.

Зарождение информационно-управляющих систем (ИУС) происходило в начале пятидесятых годов. Компьютеры тогда делались на громоздкой элементной базе и были крайне ненадежны. Для нормальной работы таким машинам требовались идеальные условия эксплуатации.

В СССР разработкой управляющих ЭВМ занимались в двух институтах: в институте электронных управляющих машин (ИНЭУМ) и в институте точной механики и вычислительной техники (ИТМиВТ). В конце 50-х годов двадцатого века был разработан УВК М40 для работы в составе системы ПРО. Позднее был разработан УВК М4 для управления комплексом РЛС. М-4 была одной из первых в СССР машин, построенных на базе отечественных транзисторов и полупроводниковых диодов. Разработанная позднее УВК М7 использовалась для управления энергоблоками ГРЭС (Щекинская и Славянская ГРЭС).

В середине 60-х годов была разработана агрегатная система средств вычислительной техники (АСВТ) специально для автоматизации технологических процессов.

В 70-е годы появились первые управляющие вычислительные машины семейства СМ-ЭВМ. Первые версии машин этой серии были основаны на серии АСВТ, позднее в СССР взяли курс на копирование западных образцов вычислительной техники. Семейство СМ-ЭВМ, начиная с СМ-3, было построено на базе американского компьютера PDP-11 фирмы DEC.

Проблема разработки теории, принципов построения и применения управляющих машин была поставлена в СССР членом-корреспондентом АН СССР И.С. Бруком в 1957 – 1958 гг. Управляющие ЭВМ разрабатывались и выпускались предприятиями Минприбора СССР и других министерств, занимавшихся промышленной автоматизацией. Средства промышленной автоматики в СССР бы-

ли объединены Государственной системой промышленных приборов и средств автоматизации (ГСП), определяющей принципы организации ИУС, функции, аппаратные и программные средства сопряжения.

С появлением компьютерных сетей, примерно в 70-е годы, появилась возможность строить распределенные или сетевые ИУС. Появление интегральных микросхем и микропроцессоров дало возможность приблизить ИУС непосредственно к объекту управления или даже встроить в него ЭВМ. Так появились первые встроенные системы (Embedded System). Постепенно, по мере удешевления элементной базы, увеличения степени её интеграции и повышения уровня надёжности вычислительных устройств, появилась возможность устанавливать ЭВМ в различные места объекта управления, объединяя все вычислительные узлы в единую сеть. В процессе дальнейшего развития появились так называемые киберфизические системы (КФС, по англ. Cyber Physical System, CPS). КФС характеризуются глубоким сращиванием с механическими, оптическими, химическими и биологическими системами.

Таким образом, по степени проникновения вычислительной системы в объект управления можно выделить:

- Информационно-управляющие системы (ИУС) ;
- Распределенные информационно-управляющие системы (РИУС);
- Встроенные системы (Embedded System, ES);
- Сетевые встроенные системы (Networked Embedded System, NES);
- Киберфизические системы (КФС).

Киберфизическая система — специализированная вычислительная система, имеющая физические средства взаимодействия (электрические, химические, оптические, механические, биологические и т. п.) с объектом контроля и управления, выполняющая одну функцию. В качестве вычислительной платформы для реализации киберфизической системы может использоваться любое компьютерное оборудование, включая оборудование класса SOHO (например, персональный компьютер, смартфон или планшет).

В последнее время, из-за прогресса в области вычислительной техники, смысл термина «встроенная система» достаточно сильно видоизменился и размылся. По мере развития техники происходила эволюция обозначения класса управляющих компьютерных систем: от информационно-управляющей системы — к встроенной, от встроенной — к встроенной сетевой, а от встроенной сетевой — к киберфизической. В процессе развития происходила плавная интеграция вычислительной системы и объекта управления. Если первые информационно-

управляющие системы представляли собой систему, практически не связанную с объектом управления, то современные киберфизические системы очень тесно интегрированы с объектом управления.

1 Понятие информационно-управляющей системы

Информационно-управляющая система (ИУС) или встроенная система (ВсС) — система специального назначения, в которой вычислительный элемент полностью встраивается в устройство, которым она управляет. В отличие от универсального компьютера, встроенная система выполняет одну или несколько predetermined задач, обычно с очень конкретными требованиями. В техническом смысле встроенная система взаимодействует с окружающей средой контролируемым образом, удовлетворяя целому ряду требований на способность реагировать в смысле качества и своевременности. Как правило, она должна удовлетворять таким требованиям как стоимость, потребляемая мощность и использование ограниченных физических ресурсов. [1].

Распределенная информационно-управляющая система - пространственно-рассредоточенная система. Такие системы характеризуются наличием слабой связи между компонентами.

Слабо связанная система — система, в которой интенсивность обмена данными в рамках одного вычислительного процесса значительно выше интенсивности обмена данными между разными вычислительными процессами.

Тенденция усложнения ВсС проявляется в том, что большинство систем реализуются в виде многопроцессорных распределенных ВС или контроллерных сетей. Это дополнительно усложняет задачу проектировщика. Рассмотрим основные свойства современных распределенных ВсС:

- множество взаимодействующих узлов: более двух (интерес сегодня представляют системы с единицами тысяч взаимодействующих встроенных компьютеров);
- работа в составе систем управления без участия человека.

В таких системах оператор может присутствовать, он может получать информацию и частично иметь возможность воздействовать на работу системы, однако основной объем работ по управлению выполняет распределенная ВсС. Степень функциональной и пространственной децентрализации управления может изменяться в широких преде-

лах. Вычислительные элементы ВСС выполняют задачи, отличные от задач вычислений и коммуникаций общего назначения.

Распределенные ВСС используются в составе масштабных технических объектов (например, самолет или здание) или взаимодействуют с объектами естественной природы (например, комплексы мониторинга окружающей среды). Распределенные ВСС могут характеризоваться узлами с ограниченным энергопотреблением, иметь фиксированную или гибкую топологию, выполнять критичные для жизнедеятельности человека функции, требовать высокотехнологичной реализации или создаваться как прототип.

1.1 Системы реального времени

Система реального времени — вычислительная система с гарантированным временем реакции на события.

Система реального времени (СРВ) — вычислительная система, в которой время формирования выходного воздействия является существенно важным. Примеры СРВ: управление технологическими процессами, встроенные вычислительные системы, кассовые торговые системы и т. д.

Принципиальное отличие информационных систем (Information Technology) от систем реального времени (real-time) в трактовке параметра «реакция вход-выход»: «The right answer late is wrong» («Правильный ответ поздно = неправильный»).

К особенностям ИУС относится необходимость обеспечения надежности, безопасности и гарантированного времени реакции. Соблюдение гарантированного времени ответа обычно называют работой в реальном времени. Исходя из того, что ОС РВ работает в ИУС, к ОС РВ предъявляются аналогичные требования.

ИУС получает информацию об объекте управления посредством датчиков. В ответ на полученную информацию ИУС вырабатывает управляющие сигналы и передает их объекту управления через УСО. Время, протекающее между получением информации от ОУ и выдачей сигнала управления от ИУС, мы назовем временем реакции ИУС.

Система реального времени не обязательно должна быть быстрой. Это распространенное заблуждение. Система реального времени должна выдавать управляющие сигналы в ответ на информацию, поступающую от датчиков, в гарантированные промежутки времени.

По степени важности последствий несоблюдения времени реакции обычно выделяют две группы систем реального времени:

- Система мягкого реального времени;

– Система жесткого реального времени.

В первом случае, несоблюдение требований реального времени не является катастрофическим по отношению к цели работы СРВ. Во втором случае, несоблюдение требований реального времени приводит к невозможности выполнения целевой функции системы.

1.2 Вычислительный базис современных РИУС

Стремительный прогресс в полупроводниковой электронике вместе с появлением совершенно новых областей ее применения неизбежно приводит не только к повышению требований со стороны вычислительной техники, но и к большей зависимости этих требований от решаемой задачи. Повышение уровня интеграции микросхем позволяет разместить сотни миллионов транзисторов на одном кристалле, но это также приводит к ужесточению требований к процессу разработки и к средствам проектирования, увеличивая полное время разработки и единовременные затраты на создание интегральных схем. Традиционные задачи теперь могут быть решены с большей эффективностью. Технологически возможной и экономически оправданной стала возможность реализации множества новых видов систем. В особенности, большой импульс в развитии получили системы для встраиваемых применений, требующих миниатюризации, работы в реальном масштабе времени, высокой производительности, автономности вычислений и беспроводной или удаленной связи. С другой стороны, этот впечатляющий прогресс приводит к неведомой ранее степени сложности проектируемых систем. Сложность и высокая плотность компоновки устройства и его коммуникационной системы, небольшой физический размер устройства, большая длина межсоединений, уменьшенное напряжения питания, работа на высоких частотах (более 100 МГц) приводят к тому, что многие ранее игнорируемые явления начинают оказывать существенное влияние на схему, безошибочное функционирование системы, производительность и ряд других аспектов качества конечной системы. Это приводит к появлению множества новых трудноразрешимых проблем, в том числе кризиса в энергопотреблении и потребляемой мощности, увеличения токов утечки, доминирующее влияние коммуникационной среды на основные физические характеристики системы, снижение надежности системы, размера выработки и т. д. В результате, все более сложные встроенные вычислительные системы должны надежно выполнять вычисления в реальном масштабе времени с никогда ранее не требовавшимся энергопотреблением, размерами и потребляемой мощностью. Существует общее мнение, что

прогресс в микроэлектронных технологиях сам по себе не может гарантировать удовлетворение растущих вычислительных, физических и экономических требований большинства современных задач. Возможности, связанные с современными технологиями, могут быть эффективно использованы только при применении специализированных систем и интегральных схем, базирующихся на адекватных концепциях вычислений, хранения и обмена.

Для этого требуются эффективные методы проектирования и системы автоматизированного проектирования (САПР) для синтеза аппаратного обеспечения и отображения целевой задачи на аппаратную платформу.

На рисунке 1.1 показаны три различных подхода к проектированию вычислительных программно-аппаратных комплексов и проиллюстрирован компромисс между эффективностью и гибкостью. Текущей тенденцией в компьютерной архитектуре является акцентирование внимания на гибкость программирования с высокой эффективностью процессоров общего назначения. Поэтому архитектура процессора общего назначения наиболее широко изучена, и основным направлением ее улучшения является повышение производительности процессора на ватт потребляемой энергии. На процессоры общего назначения можно отобразить большой набор приложений путем написания программного обеспечения для него. За то, что процессоры общего назначения могут быть запрограммированы на выполнение практически любой вычислительной задачи, приходится платить высоким энергопотреблением и значительными накладными расходами на выборку, декодирование и выполнение потока инструкций над данными, пересылаемыми по сложным коммуникационным шинам. Энергопотребление из-за этих накладных расходов в несколько раз превышает энергопотребление целевых вычислительных процессов.

Целью специализированных интегральных схем (ASIC) является оптимизация общей экономической эффективности системы, а не только производительности. Применение специализированных решений представляет собой наиболее эффективный способ снижения энергопотребления. Выполнение сложной обработки мультимедийных данных на специализированных аппаратных средствах, которые оптимизированы с точки зрения энергопотребления, позволяет снизить количество потребляемой энергии на несколько порядков по сравнению с программным выполнением всех операций на процессоре общего назначения. Однако недостатком специализированных аппаратных средств является отсутствие гибкости и возможности их программирования, кроме того их функциональные возможности ограничены возможно-

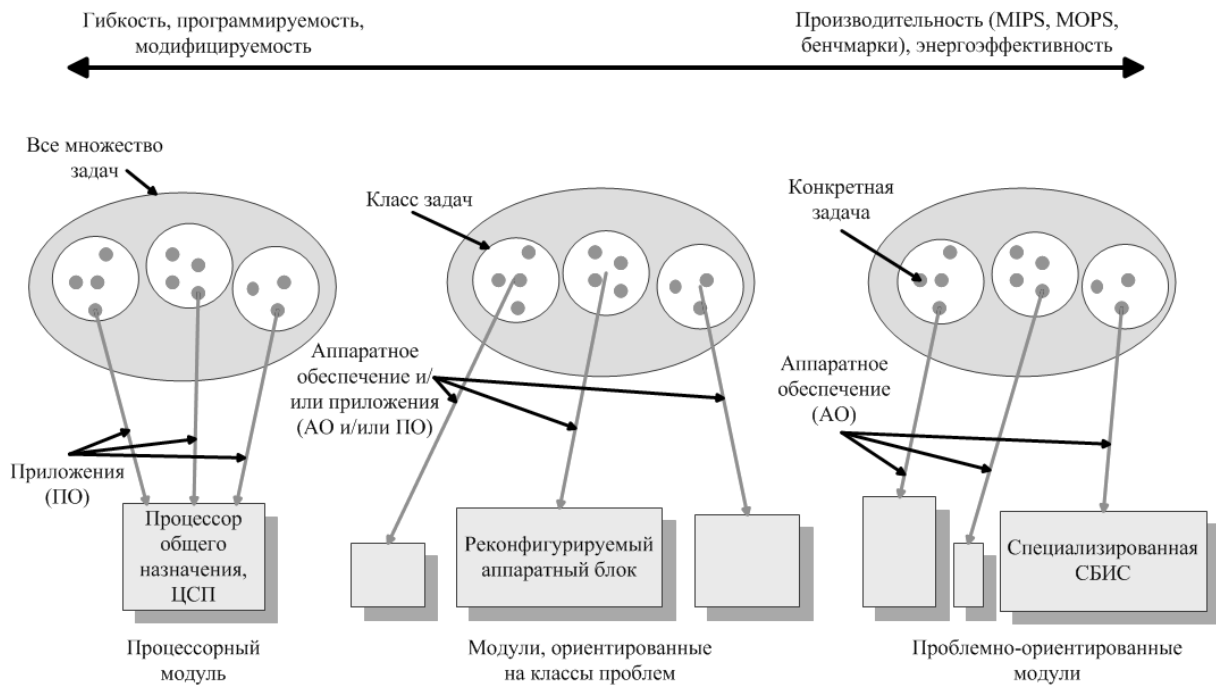


Рисунок 1.1: Спектр вычислительных систем.

стями реализованных аппаратных средств. Технологические проблемы в проектировании пользовательских специализированных интегральных схем, как правило, значительно меньше, чем у интегральных схем общего назначения. Это означает, что высокопроизводительные специализированные микросхемы могут быть изготовлены по относительно низкой цене. Тем не менее, за эту производительность приходится расплачиваться меньшей гибкостью и, следовательно, необходимостью проектирования новых чипов даже для самых маленьких изменений в функциональных требованиях.

Множество встроенных вычислительных систем и исследовательских проектов показали, что гетерогенные вычислительные системы, использующие традиционные модели вычислений на основе машины Фон-Неймана совместно с реконфигурируемой параллельной обработкой больших массивов данных, способны обеспечить более высокую производительность при снижении энергопотребления по сравнению с традиционными процессорами общего назначения и сохранении возможности программирования по сравнению со специализированными аппаратными средствами. При этом достигается значительная экономия затрат на выпуск данной продукции, и уменьшаются сроки выхода на рынок, по сравнению с решением на основе аппаратных схем без возможности реконфигурации. Кроме того, они обеспечивают гибкость, которая часто требуется для адаптивных и отказоустойчивых

систем (например, для адаптации к новому стандарту, к изменениям в окружающей среде, для совместного использования ресурсов и т. д.). Благодаря гетерогенности, гибкости и большому потенциалу для оптимизации приложения под конкретную задачу, такие системы способны исполнять широкий класс приложений в различных промышленных секторах. Для многих областей применения гетерогенные параллельные реконфигурируемые вычислительные системы могут быть на несколько порядков быстрее, чем традиционные вычислительные системы, потребляя в несколько раз меньше энергии (например, при анализе ДНК, криптографии, обработке сигналов, проводной и беспроводной связи и т. д.) [2–4].

Основной проблемой на пути распространения парадигмы реконфигурируемых вычислительных систем является отсутствие адекватных методологий программирования и САПР для этого вида систем. В идеальном случае это должна быть трансляция высокоуровневой спецификации вычислительного процесса (например, на языке C или Simulink/Matlab) в оптимизированные машинные коды для выполнения на процессорах общего назначения, специализированных реконфигурируемых процессорах и аппаратных ускорителях для параллельной обработки потоков данных. Огромное количество исследований и разработок направлены на решение данной проблемы, но до сих пор не существует эффективных методологий и инструментальных цепочек для совместного синтеза программной и аппаратной компоненты [5]. На сегодняшний момент все реализуемые алгоритмы должны быть проанализированы с использованием автоматизированных или частично автоматизированных инструментов профилирования с целью выделения вычислительно-интенсивных ядер и векторной обработки данных для последующей реализации их на (реконфигурируемых) аппаратных ускорителях. В дальнейшем, эти выделенные части должны быть реализованы в виде аппаратных модулей (например, на языке описания регистровых пересылок — RTL) или скомпилированы из промежуточного представления на существующие аппаратные ускорители. Как можно было заметить, на всех этих этапах проектирования существует достаточно большой риск ошибки проектирования и получения неэффективной системы. Поэтому разработка консистентных, взаимосвязанных и качественных инструментов для этой цепочки проектирования и программирования имеет решающее значение для удовлетворения разнообразных требований встроенных и высокопроизводительных приложений.

Все вышеупомянутые тенденции, вкуче с ограничением по энергопотреблению и стремлением к уменьшению времени выхода продукта

на рынок, приводят к необходимости наличия реконфигурируемости и гибкости в будущих проектах специализированных интегральных схем. Реализация определенного функционала аппаратно дает лучшую энергоэффективность с точки зрения количества операций на потребляемую мощность за единицу времени, но данный подход имеет ограниченную гибкость для удовлетворения будущих или изменчивых требований к системе. Архитектуры на основе процессоров, в особенности на основе процессоров общего назначения, обеспечивают лучшую гибкость, но имеют низкую энергоэффективность с точки зрения количества операций на потребляемую мощность за единицу времени. Реконфигурируемые архитектуры должны занять пустующую нишу между специализированными системами и системами общего назначения.

Большинство современных задач по обработке мультимедийных данных, цифровой обработки сигналов, компьютерному зрению, навигации и т. д. требуют все более возрастающую вычислительную мощность и способность адаптироваться к изменению алгоритмов, лежащих в основе этих задач, параметров окружающей среды и требований к системе. Кроме того, современные условия требуют уменьшения времени выхода законченных вычислительных систем на рынок, снижения затрат на их проектирование и снижение энергопотребления систем, а также увеличение степени повторного использования как в целом систем, так и их отдельных подсистем.

В качестве примера изменяющихся требований к системе можно рассмотреть задачи из области аэрокосмических встроенных систем. Аэрокосмические встроенные системы должны выполнять множество алгоритмов: навигацию, обработку изображений и сигналов, обеспечение коммуникации с Землей, автономное и удаленное управление всеми подсистемами и т. д., при этом существуют жесткие ограничения на габариты, энергопотребление и надежность этих систем. В большинстве космических миссий одновременное выполнение различных классов алгоритмов с различными вычислительными скоростями крайне необходимо для успеха. Допустим, когда космический аппарат с аэрокосмической встроенной системой на борту попадает в облако астероидов или оказывается на пути космического мусора, то ему необходимо быстро оценить состояние всей системы, выполнить навигацию в межзвездном пространстве и начать маневр по уходу от столкновения. В это время любые задачи по приему и обработке изображений могут быть замедлены или полностью приостановлены. В противоположной ситуации, когда космический аппарат наблюдает быстро протекающий космический феномен: столкновение астероида с красным гигантом, взрыв сверхновой и т. д., то ему необходимо переориентировать как

можно больше вычислительных ресурсов на прием и обработку изображений, спектральный анализ и другие цели, позволяющие зафиксировать более детальную информацию о наблюдаемом феномене. В это время задачи по навигации и маневрированию отходят на второй план, более того, ради редчайших феноменов можно пожертвовать космическим аппаратом. Применение специализированных микропроцессоров в аэрокосмических встроенных системах до сих пор является основным способом решения приведенных выше задач. Однако, как уже было упомянуто, повышение требований к вычислительной мощности аэрокосмических встроенных систем наряду с повышением требований к гибкости этих систем для будущих космических миссий приводит к тому, что подход на основе специализированных микропроцессоров перестает удовлетворять новым требованиям. Использование реконфигурируемых вычислительных систем в данной области видится наиболее перспективным решением возникшей проблемы.

На данный момент в области реконфигурируемых вычислительных систем одну из ведущих ролей играют программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС, FPGA). Коммерчески доступные ПЛИС представляют собой матрицу реконфигурируемых вычислительных ячеек, как правило, с битовой (мелкозернистой) гранулярностью, взаимодействующих между собой посредством программируемой коммуникационной сети. Благодаря подобной архитектурной организации, программируемые логические интегральные схемы обеспечивают высокую степень параллелизма, контроль со стороны пользователя над низкоуровневыми ресурсами схемы и эффективное представление пользовательских форматов данных в аппаратуре. Недостаток данных схем вытекает из поддержки битовой гранулярности, что приводит к использованию большого количества ресурсов (вычислительных ячеек, линий коммуникационной сети) при реализации поддержки многобитовых операций. Это приводит к большим накладным расходам при маршрутизации обрабатываемых данных и низкой эффективности в использовании программируемой логической интегральной схемы. Другим недостатком программируемых логических интегральных схем является большой объем конфигурационных данных необходимых для конфигурирования вычислительных ячеек и коммуникационной среды. Данное обстоятельство значительно увеличивает необходимое на реконфигурацию время и потребляемую схемой мощность, особенно когда для вычислительной задачи необходима поддержка множества аппаратных конфигураций. Подобные особенности делают программируемые логические интегральные схемы слишком дорогими и недостаточно эффективными для большинства мультимедийных приложений

и некоторых задач обработки сигналов. Однако стоит отметить, что крупные производители ПЛИС в последнее время начали стремиться уменьшить влияние данных проблем путем внедрения в структуру производимых схем специализированных блоков для многобитовых операций (сложение, умножение) и выделение в структуре производимых схем областей, поддерживающих независимую частичную реконфигурацию. К сожалению, поддержка данных возможностей в инструментальных системах отсутствует (требуется ручная настройка) или находится в зачаточном состоянии.

2 Структура РИУС

Основными подсистемами типовой промышленной или транспортной РИУС являются (см. рисунок 2.1):

- Оконечные устройства: датчики (sensor) и исполнительные устройства (actuator), подключенные к объекту управления.
- Подсистема управления процессом: логические контроллеры, устройства сопряжения с объектом (УСО), панели оператора.
- Подсистема диспетчерского управления, в том числе системы диспетчерского управления и сбора данных (Supervisory Control And Data Acquisition, SCADA), серверы печати, серверы СУБД, шлюзы в смежные системы и др.
- Коммуникационная подсистема – специальные или адаптированные универсальные вычислительные сети.

2.1 Оконечные устройства

Оконечные устройства являются портом доступа вычислительных систем к электрическому или механическому оборудованию контролируемого объекта. Оконечные устройства подразделяются на датчики и исполнительные устройства.

Датчики преобразуют и нормируют физические характеристики объекта управления (положение, перемещение, температуру, давление, ток, напряжение и др.) в электрическую величину или цифровой код для ввода в управляющую систему через УСО.

Исполнительные устройства — реле, силовые электронные ключи, двигатели, соленоиды, электромагнитные клапаны и т. п.

Оконечные устройства обычно интегрируются в состав конструкции управляемого объекта и подключаются к УСО с помощью аналоговых или цифровых интерфейсов. Элементы исполнительных устройств могут конструктивно объединяться с УСО, например, реле или твердотельные ключи.

В современных системах развивается направление объединения УСО с оконечными устройствами. Например, двигатель со встроенным контроллером и внешним цифровым (в том числе сетевым) интерфей-

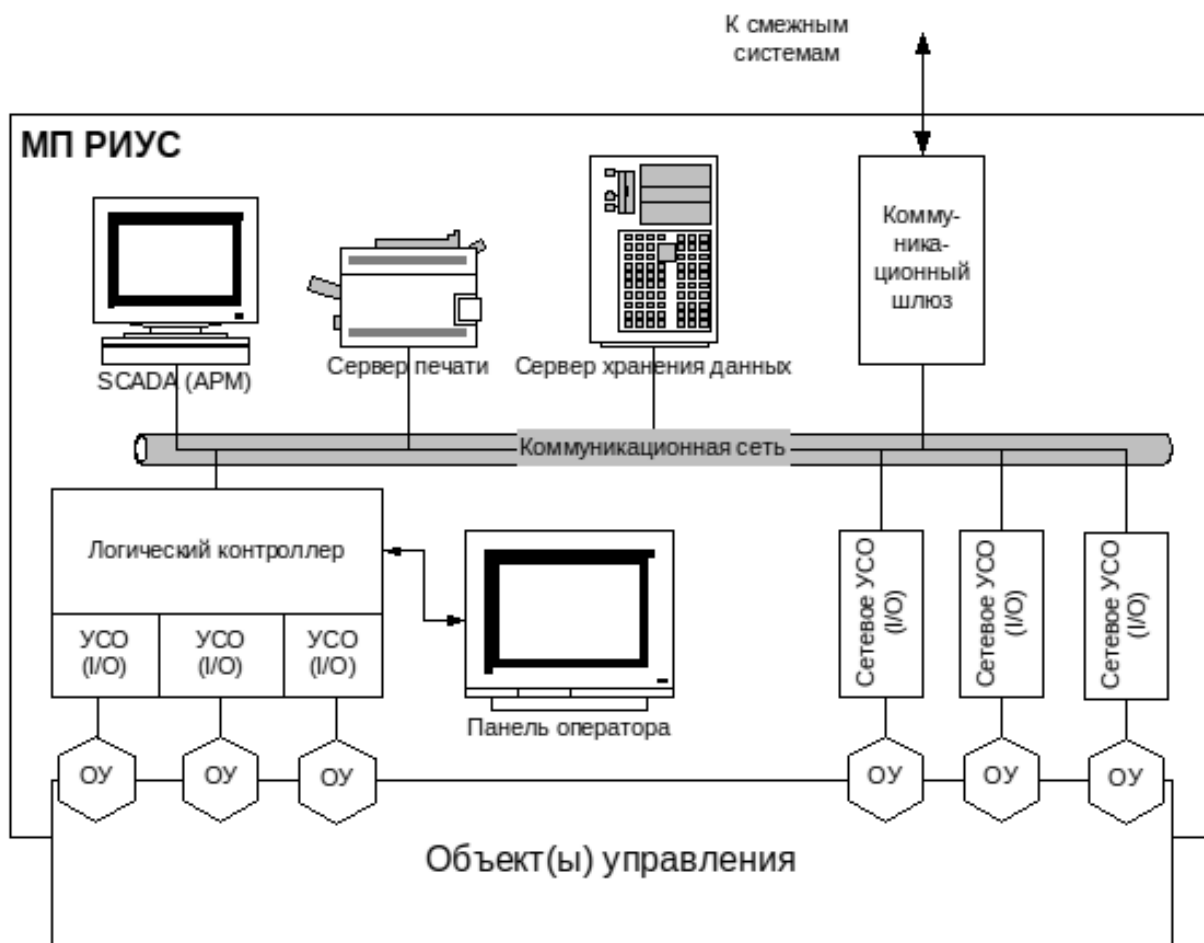


Рисунок 2.1: Структура РИУС

сом; или датчик со встроенным контроллером и внешним цифровым в том числе сетевым) интерфейсом. Такие оконечные устройства называют интеллектуальными приводами или датчиками.

2.2 Подсистема управления процессом

Подсистема управления процессом обеспечивает управление оборудованием контролируемого объекта в реальном масштабе времени. Через оконечные устройства реализовано прямое взаимодействие контроллеров данной подсистемы с объектом управления. Аппаратура монтируется в непосредственной близости от управляемых установок — в цехах, на транспортных средствах и т. п. — для того чтобы сократить длину линий связи с оконечными устройствами или УСО и время доступа к ним.

2.2.1 Логические контроллеры

Логические контроллеры — вычислительные модули, управляющие и координирующие работу части или всей РИУС, то есть задающие логику функционирования РИУС. Алгоритм работы задается программным обеспечением логического контроллера. Программирование обычно осуществляется конечным пользователем или специалистами фирм — «интеграторов АСУ ТП» на специальных «технологических» языках (например, на языке релейных схем, функциональных блоков и других). Через локальные или удаленные УСО логические контроллеры считывают показания датчиков и управляют исполнительными устройствами - реле, двигателями, соленоидами и т. п. Логические контроллеры, используемые в РИУС, имеют разъемы подключения локальных УСО, имеют порты различных интерфейсов связи с удаленными УСО (RS485, CAN, Profibus DP, Interbus-S, LON и др.), производят сетевые порты (Ethernet, Profibus) для связи с другими логическими контроллерами, с панелями оператора, со SCADA-системами. В последнем случае широко используется интерфейс USB.



Рисунок 2.2: Логический контроллер Advantech APAX-6572 [6].

2.2.2 Устройства сопряжения с объектом

Устройства сопряжения с объектом (УСО), которые также называют модулями ввода-вывода, выполняют функции адаптера датчиков и исполнительных устройств. Они имеют специальные аппаратные каскады сопряжения с оконечными устройствами и поддерживают алгоритмы управления ими. УСО могут выполнять функции первичной обработки данных с датчиков: фильтрацию, усреднение и накопление. УСО являются подчиненными по отношению к логическим контроллерам и самостоятельно не реализуют каких-либо алгоритмов контроля объекта управления.

Локальные или мезонинные УСО. Локальные или мезонинные УСО конструктивно выполнены в виде модулей расширения, вставляющихся в слоты логического контроллера. От такой конструкции, по аналогии с архитектурной конструкцией, пошло название «мезонинные УСО» или просто «мезонины». Обычно локальные УСО подключены к периферийной шине логического контроллера в качестве устройств ввода-вывода. В большинстве случаев это параллельная шина (например, VME, PC104, CompactPCI), но могут использоваться и последовательные периферийные интерфейсы.

Удаленные или сетевые УСО. Удаленные или сетевые УСО взаимодействуют с логическим контроллером по сетевому каналу и являются конструктивно независимыми от логических контроллеров. В качестве сетевых каналов используются специальные интерфейсы, такие как RS485, CAN, Profibus DP, Interbus-S, LON и др. Удаленные УСО поддерживают мощные, но достаточно сложные в реализации коммуникационные протоколы, что увеличивает сложность и стоимость проектирования удаленных УСО по сравнению с локальными.

По сравнению с локальными УСО, удаленные УСО чаще являются законченными, автономно функционирующими контроллерами, которые могут реализовывать в том числе и простейшие функции регулирования без участия логических контроллеров, но обычно остаются не программируемыми конечным пользователем.

2.2.3 Элементы интерфейса оператора

Панели оператора и другие элементы интерфейса оператора (Human-Machine Interface, HMI) реализуют функции отображения текущих режимов и параметров работы системы, позволяют переключать

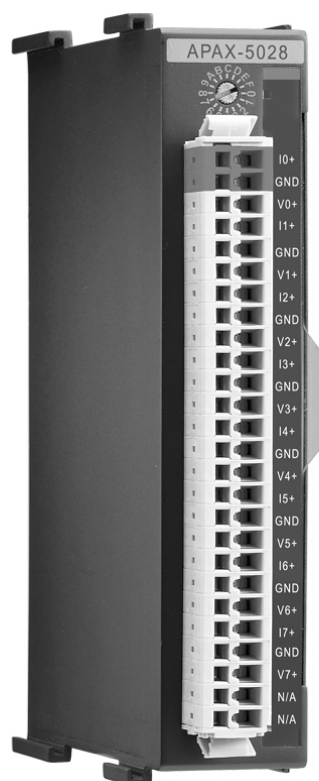


Рисунок 2.3: Локальный модуль ввода-вывода Advantech APAX-5028 [7].

чать эти режимы, вводить новые значения параметров. Панели оператора могут быть символьными или графическими, могут иметь механическую встроенную или выносную клавиатуру или управляться с помощью сенсорной экранной панели (Touch Panel, Touch Screen). Кроме панелей оператора часто используются простейшие модули индикации без функций ввода или модули управления: кнопочные пульты, джойстики. Панели обычно выполнены как независимый модуль, для монтажа в панель приборного шкафа, в настенный или настольный корпус. Панели оператора бывают периферийные, сетевые, совмещенные с логическим контроллером. Периферийные панели оператора подключаются к логическому контроллеру с помощью периферийных интерфейсов, RS232 (чаще), USB. Сетевые имеют встроенный сетевой адаптер Ethernet, ProfiBus, RS485, CAN или другой и могут располагаться удаленно от логического контроллера. Панели, совмещенные с логическим контроллером реализуют функции обоих модулей (панели и контроллера) одновременно.

2.3 Подсистема диспетчерского управления

Подсистема диспетчерского управления обеспечивает расширенный набор средств управления работой сложных РИУС. К ним относятся отображение и протоколирование состояния объекта управления и самой РИУС, индикация экстренных ситуаций, архивирование протоколов работы системы, взаимодействие со смежными компьютерными системами иного назначения и т. п. Диспетчерское управление не обеспечивает режим реального времени.

Ключевым элементом подсистемы диспетчерского управления обычно является SCADA. Обычно SCADA представляет собой стандартный персональный компьютер в офисном или промышленном исполнении со специальным программным обеспечением. Взаимодействие с логическими контроллерами выполняется через локальную сеть: чаще через сеть Ethernet, реже через специализированные контрольные сети.

Функции серверов печати, серверов хранения данных, сетевых шлюзов в несложных системах возлагаются на компьютеры SCADA. В сложных системах эти функции переносятся на отдельные вычислительные машины.

2.4 Коммуникационная подсистема

Коммуникационная подсистема (КПС) РИУС — специализированная вычислительная сеть, ориентированная на решение задач интеграции:

- Отдельных вычислительных узлов (контроллеров, панелей оператора и рабочих станций, серверов и т. д.) в кластеры (кластер управления технологической установкой, контроля отдельного помещения и т. д.).
- Кластеров в функциональные подсистемы (управления процессом, диспетчерского управления и др.).
- Функциональных подсистем в единую РИУС.
- Несколько смежных РИУС между собой или РИУС со смежными подсистемами.

КПС является структурным и функциональным «скелетом» РИУС, во многом определяет топологию, параметры, характеристики и возможности модернизации РИУС. Соответственно структура КПС похожа на структуру РИУС в целом.

В соответствии с выделением различных функциональных уровней и задач КПС, перечисленных выше, КПС также не является однород-

ной и монолитной, а представляет собой комплекс связанных между собой подсетей.

Наиболее жесткие и специфичные требования предъявляются к коммуникационной подсистеме уровней конечных устройств и управления процессом. Соответственно на этих функциональных уровнях выделяются два типа сетей:

- Сети датчиков и исполнительных.
- Сети управления процессом (Process Network).

2.4.1 Сети датчиков и исполнительных устройств

Сети датчиков и исполнительных устройств (sensor-actuator network (bus)) предназначены для организации взаимодействия УСО с логическими контроллерами. По ним в реальном времени передаются данные, полученные от датчиков, и команды для исполнительных устройств. Размеры передаваемых данных/пакетов соответственно будут небольшими — единицы/десятки байт (например, шина CAN 2.0 передает пакеты до 8 байт, протокол ModBus ориентирован на передачу битов, байтов или двухбайтовых слов), но будут высокие требования по времени (задержке) доставки — единицы/десятки миллисекунд. С другой стороны, требования дешевизны, эксплуатация в условиях сильных помех и другие факторы приводят к тому, что скорость передачи в каналах сетей SA-Net находится на уровне от десятков Кбит/сек до единиц Мбит/сек.

Т. к. к одному логическому контроллеру могут подключаться много УСО (до нескольких десятков), то, чтобы уменьшить число проводов и разъемов у логического контроллера, в качестве SA-net широко используются шины (Bus), например, CAN 2.0, ModBus over RS485, 1-Wire Bus (uLAN).

В связи с развитием систем мониторинга объектов, контроля передвижения людей/товаров/грузов и иных подобных систем, требующих сбора информации с большого (сотни и тысячи) числа датчиков по каналам со сложной топологией, в последнее время выделился отдельный подкласс сетей датчиков (Sensor Net) и, в частности, беспроводные сети датчиков (Wireless Sensor Net). Для них характерна ячеистая (сотовая) структура (mesh network), двойственная функция узлов сети — они выступают и как узлы сбора информации и как коммутаторы сети, в каждом таком узле наличествуют функции динамической маршрутизации.

2.4.2 Сети управления процессом

Сети управления процессом (Process Network) объединяют несколько логических контроллеров и обеспечивают процесс распределенных вычислений и управления.

К сетям уровня управления процессом также предъявляются требования передачи данных в реальном масштабе времени, с минимальными задержками, в жестких условиях эксплуатации: в этом они похожи на SA-Net. С другой стороны, блоки данных, передаваемые логическими контроллерами, могут достигать больших объемов — уровня единиц-десятков килобайт, т. к. логические контроллеры концентрируют данные от многих УСО. Для удовлетворения перечисленных требований и, учитывая достаточную вычислительную мощность логических контроллеров, коммуникации уровня Process Network удобно строить на базе универсальных сетей типа Ethernet, что часто и делается. Однако сети Ethernet не являются сетями реального времени и могут использоваться в приложениях Soft Real Time (низший уровень требований реального времени функционирования) только в режиме нагрузки единиц процентов.

В случае Hard Real Time — требований (жесткое реальное время), сети Process Network строятся на базе специализированных каналов, например, LON, CAN, ProfiBus, Interbus-S, Fieldbus Foundation и других. В последнее время часто пытаются использовать на уровне процесса каналы беспроводной связи, например, GSM/GPRS, IEEE 802.15.4/ZigBee и другие.

Т. к. и сети датчиков и исполнительных устройств, и сети управления процессом обычно применяются на промышленных, транспортных и иных подобных объектах, как говорят «в поле», то за ними закрепилось общее название «полевые сети или шины» — FieldNet/FieldBus. В некоторых случаях к FieldNet/Bus относят только сети уровня управления процессом, т. е. FieldBus считают эквивалентом ProcessNetwork. Кроме того применяются термины ControlNet (управляющие сети) и CellNet (сети ячейки или кластера), также обозначающие сети класса Process Network.

В несложных системах подуровни объединяются в одну сеть, чаще на базе протоколов типа Sensor-Actuator Network, т. к. не эффективно поддерживать в простых УСО достаточно мощные сетевые каналы и сложные протоколы уровня Process Network.

На уровне диспетчерского управления обычно используется сеть Ethernet. В качестве шлюза между сетью управления процессом и диспетчерского управления выступает логический контроллер с несколь-

кими сетевыми портами или SCADA-система. Чтобы использовать SCADA-системы различных разработчиков с любыми типами низовых контроллеров и сетей, были разработаны унифицированные протоколы между подсистемами (уровнями) управления процессом и диспетчерского управления. Наибольшее распространение получил протокол OPC.

В системах небольшой сложности сеть подсистемы диспетчерского управления и подсистемы управления процессом делают объединенной.

Достаточно часто для связи логических контроллеров с УСО, с панелями управления или со SCADA используются периферийные интерфейсы RS232 или RS422. Это делается ради упрощения и удешевления системы.

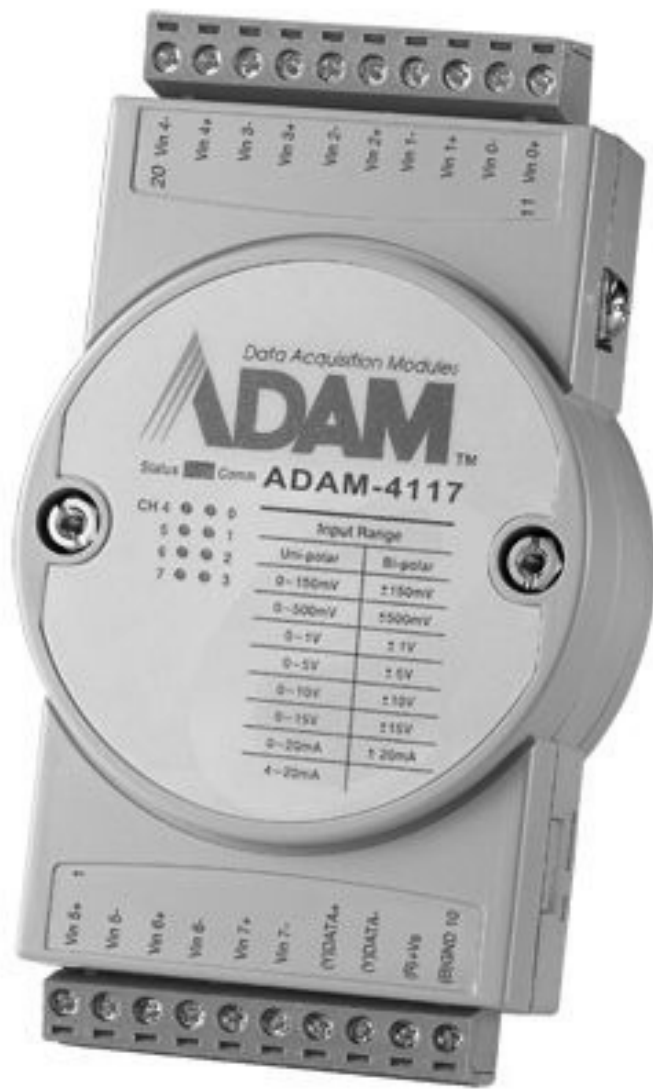


Рисунок 2.4: Модуль удаленного ввода-вывода Advantech ADAM-4117 [8].

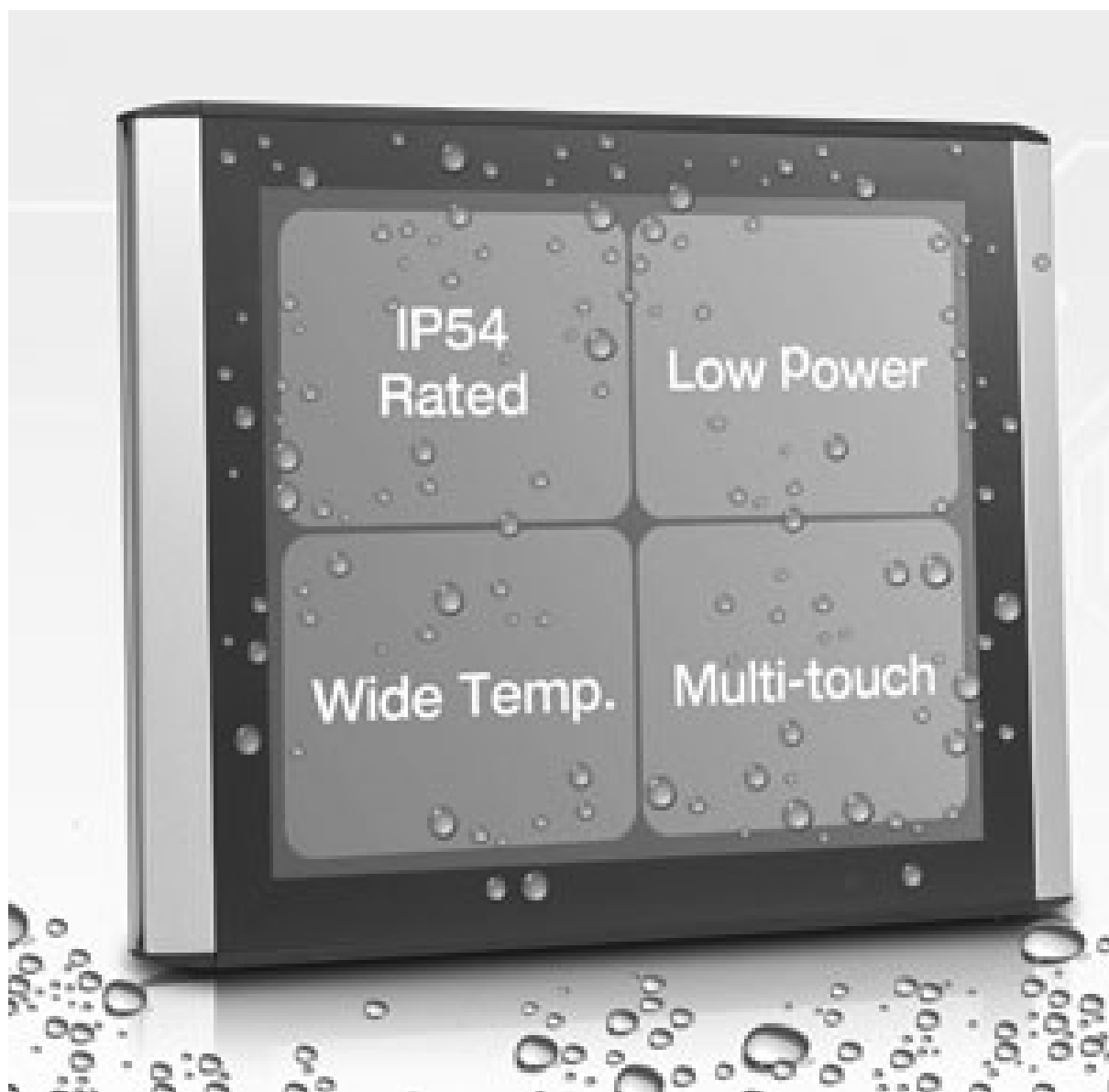


Рисунок 2.5: Панель оператора Advantech ITM-5112 [9].

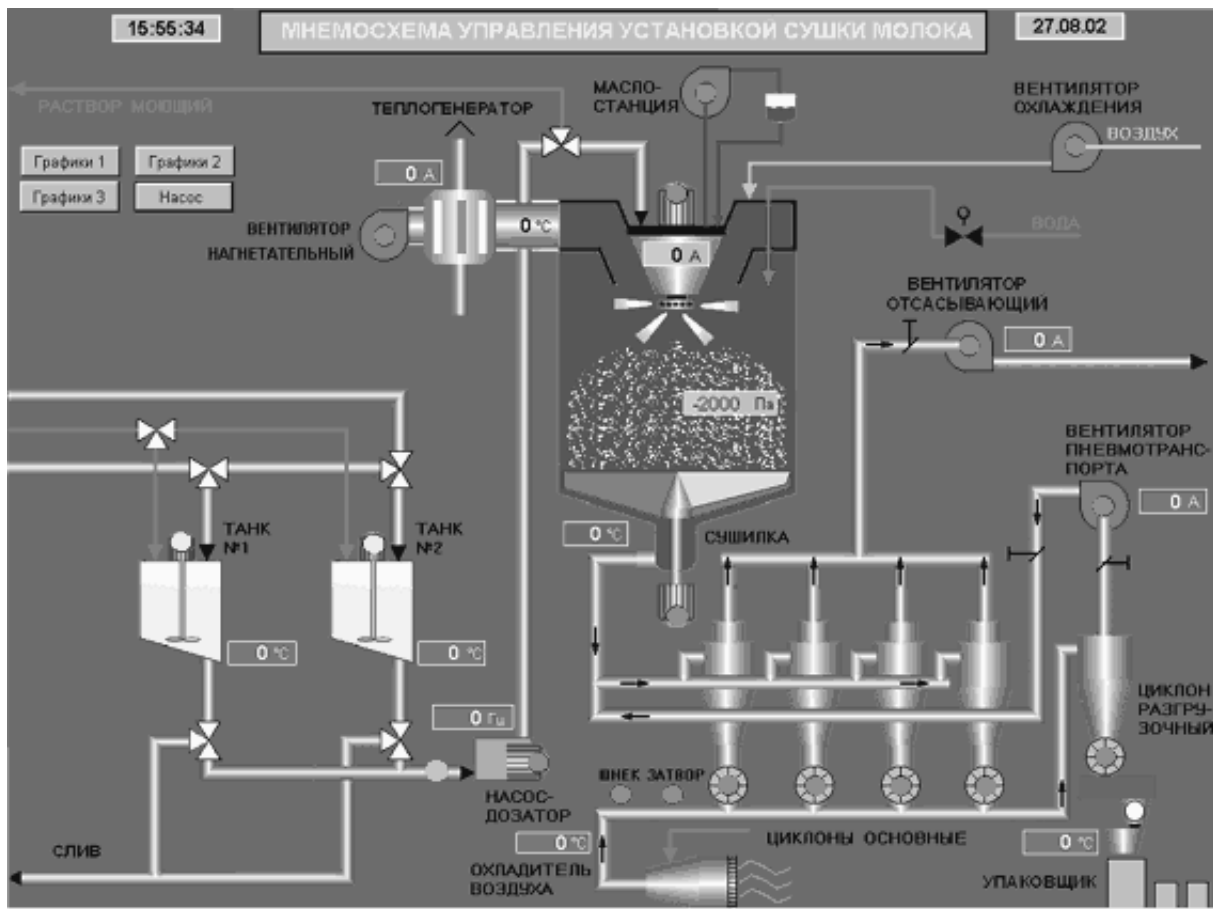


Рисунок 2.6: SCADA система Trace Mode.

3 Организация взаимодействия элементов РИУС

3.1 Организация общей памяти

Общая память используется для взаимодействия между несколькими вычислителями. Устройства ввода-вывода могут быть как активные — выступают в роли активных вычислителей, так и пассивные — выступают в роли РП. В отличие от многопроцессорных централизованных систем, в РИУС вычислители имеют свою личную память и ПО, а так же разделяемую память, которая используется для обмена данными и служебной информацией (например, для синхронизации). Системы с общей памятью обычно обладают высоким быстродействием каналов связи за счет малого времени доступа к памяти.

Бывают следующие основные варианты систем с общей памятью:

- С общей шиной с разделением времени;
- С перекрестным переключателем;
- С многовходовой памятью.

«Поверх» структур с физически разделяемой памятью может быть реализовано логическое представление разделяемой памяти, упрощающее и делающее более эффективными процедуры доступа к общей памяти:

- Логическое представление общей памяти с виртуальной памятью;
- Логическое представление общей памяти с почтовым ящиком.

3.1.1 Разделяемая память с временным разделением шины

Это простейшая схема с общим коммуникационным путем, связывающим элементы системы. Общая шина (как и память) является разделяемым ресурсом, и в составе активных устройств должны быть средства диспетчеризации ее использования (например, поддерживающие приоритетные или FIFO дисциплины доступа).

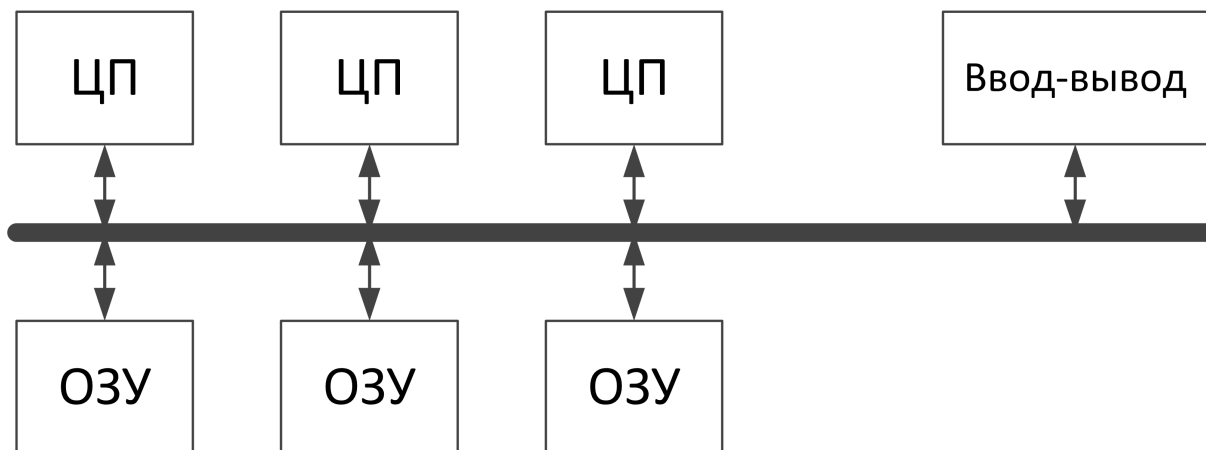


Рисунок 3.1: Вычислительная система с общей шиной.

Достоинства:

- Простая (в основном пассивная шина) система коммутации;
- Легко добавлять новые узлы (модульность системы).

Недостатки:

- Значительная общая стоимость аппаратуры (в каждом узле — арбитр);
- Выход из строя шины приводит к неработоспособности всей системы;
- Суммарная скорость потоков данных в системе ограничена пропускной способностью шины, что ограничивает расширение числа узлов.

Конфигурация с разделением шины имеет наименьшую эффективность комплексирования, используется в системах небольшой размерности с относительно невысокими требованиями к производительности.

3.1.2 Разделяемая память с перекрестным переключателем

В данной конфигурации каждое устройство имеет отдельную магистраль. Такая схема называется перекрестной матрицей, коммутатором или кроссбаром. Структурные элементы системы (процессоры, память, УВВ) требуют минимальной логики связи с шиной, так как не осуществляют сами арбитраж. Функции арбитража осуществляет переключатель-матрица.

Достоинства:

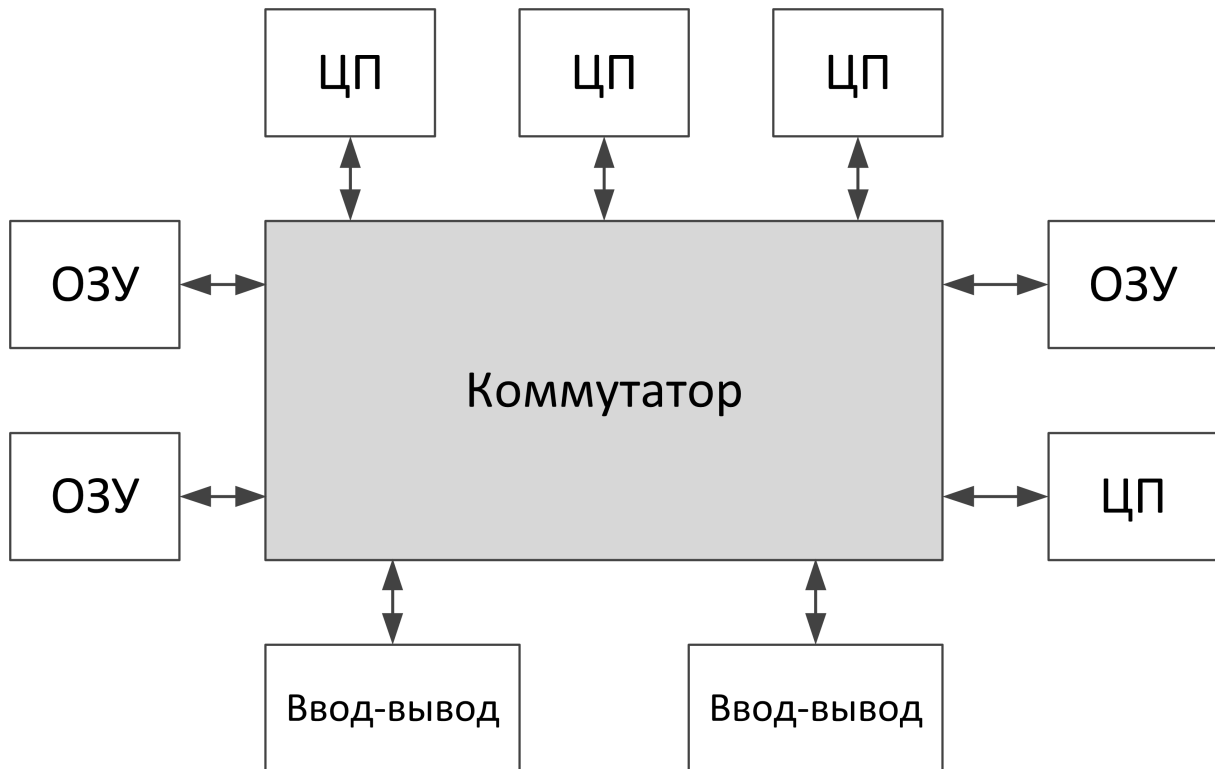


Рисунок 3.2: Разделяемая память с перекрестным переключателем (коммутатором).

- Комплексируемые узлы — простейшие, без логики арбитража;
- Высокая скорость и эффективность обмена за счет многопоточности;
- Несложно повысить надежность переключателя за счет введения в него избыточности.

Недостатки:

- Высокая сложность и стоимость переключателя-матрицы, растущая экспоненциально при увеличении ее размерности.

Система с перекрестным переключателем используется в высокоэффективных, реконфигурируемых, надежных системах.

3.1.3 Система с многовходовой памятью

В данной системе, в отличие от предыдущих вариантов, логика управления доступом к пассивным устройствам (памяти, УВВ) реализована в составе их устройств управления. Любой из пассивных элементов имеет несколько портов, по одному для подсоединения каждого активного устройства.

Достоинства:

- Низкая реактивность, высокая скорость обмена и, как результат, высокая производительность системы;
- Простота подключения активных элементов (вычислителей);

Недостатки:

- Наиболее сложные элементы (ИМС) памяти;
- Большое количество коммутаций;
- Ограниченное число комплексируемых вычислителей.

Системы с многовходовой памятью широко распространены в одноплатных МП РИУС, в силу доступности ИМС памяти. Блоки многовходовой памяти встраиваются в современные ПЛИС, что повышает популярность подобного подхода к комплексированию.

На логическом уровне доступ к РП для всех рассмотренных вариантов может быть модифицирован (но не обязательно) по двум основным сценариям:

- Виртуальная РП. В данном случае происходит настраиваемое преобразование адреса от процессора в адрес памяти таким образом, чтобы коммутировать каналы взаимодействия (разделяемые блоки в памяти) различных вычислителей. При этом узлы-вычислители существуют в своем виртуальном адресном пространстве, не зная текущей физической конфигурации памяти, а часто и узлов с которыми взаимодействуют.
- РП типа «почтовый ящик». В данном случае достигается та же цель — скрытия физической конфигурации памяти и узла-адресата, но при этом не требуется процедура ретрансляции адреса — используются несложные процедуры арбитража: FIFO, LIFO.

Общие недостатки систем с РП. :

- Большое число коммутационных линий (применяются в основном параллельные шины);
- Пространственная локализованность.

3.2 Организация связи между компонентами РИУС

3.2.1 Классификация протоколов по способу доступа к среде

Media access control (MAC) это уровень управления доступом к среде, относящийся ко второму уровню модели OSI (см. таблицу 3.1).

MAC обеспечивает адресацию и механизмы управления доступом к каналам, что позволяет нескольким узлам общаться между собой.

Таблица 3.1: Семиуровневая модель OSI

№	Тип данных	Уровень	Описание
7	Данные	Прикладной (application)	Доступ к сетевым службам
6	Поток	Уровень представления (presentation)	Представление и шифрование данных
5	Сеансы	Сеансовый (session)	Управление сеансом связи
4	Сегменты	Транспортный (transport)	Прямая связь между конечными пунктами и надежность
3	Пакеты	Сетевой (network)	Определение маршрута и логическая адресация
2	Кадры	Канальный (data link)	Физическая адресация
1	Биты	Физический (physical)	Работа со средой передачи, сигналами и двоичными данными

По способу доступа к среде можно выделить три группы протоколов (см. рисунок 3.3):

- Протоколы со случайным доступом;
- Протоколы с управляемым доступом;
- Протоколы с уплотнением (образованием каналов).

3.2.2 Виды топологий

По топологии, выделяют следующие варианты объединения:

- Шина (магистраль);
- Кольцо (петля);
- Звезда;
- С коммутатором (в том числе, каждый с каждым);
- Смешанная (сложная) топология (Mesh).

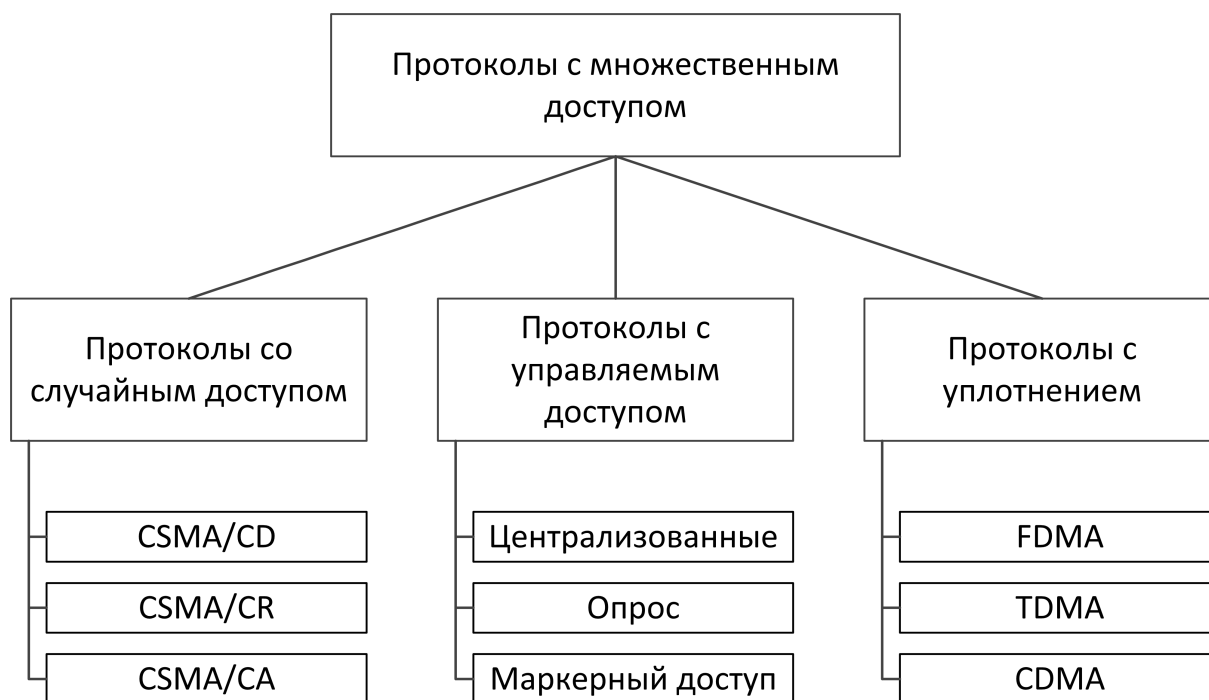


Рисунок 3.3: Классификация протоколов по способу доступа.

3.2.3 Системы с шинной топологией

Система на базе разделяемой шины (РШ) или магистрали представляет собой структуру, в которой комплексированные системы связаны и взаимодействуют через общий канал с помощью сквозной адресации приемников и/или передатчиков. Каждое сообщение в системе содержит уникальные адреса, которые позволяют отличать их друг от друга по пункту назначения или системе источнику. Так же может использоваться только идентификатор сообщения, без адреса, и приемник сам решает — принимать или нет сообщение с данным идентификатором.

Шина может быть параллельной или последовательной. Параллельные шины используются в жесткосвязанных, пространственно локализованных системах, последовательные — в слабосвязанных, с пространственно разнесенными модулями. В последние годы начинают превалировать последовательные шины, в том числе и в одноплатных системах (например, шина LVDS или PCI Express).

Управление шиной может быть двух видов:

- Централизованное — управление прохождением по шине сообщений (доступом к шине) выполняется одним выделенным узлом. Функции централизованного управления выполняет либо выделенный контроллер шины, либо один из узлов, совмещающий

управление шиной с иными прикладными функциями. Управление может подразумевать или собственно передачу сообщения — ретрансляцию — от источника к приемнику, или только координацию этого процесса, когда пересылка данных идет напрямую от источника к приемнику;

- Децентрализованное — логика управления в значительной степени распределена по всем узлам системы. Отсутствует единый центр, координирующий порядок использования шины и синхронизацию взаимодействующих узлов. В связи с этим, узлы сами должны поддерживать механизмы множественного доступа, например, с временным или частотным разделением, со случайным доступом и арбитражем.

Производительность систем с РШ в разной степени определяется шириной полосы пропускания физического канала, скоростью передачи данных, числом узлов, методами доступа, протоколом, средним и максимальным трафиком в системе, его равномерностью.

3.2.4 Петлевые системы

Классические петлевые (кольцевые) системы содержат однонаправленный канал связи, замкнутый в виде петли или кольца. Узлы подключаются к петле с помощью специальных сетевых интерфейсов (адаптеров), которые в свою очередь включены в разрыв кольцевого канала связи, умеют пропускать транзитом «чужие» сообщения, передавать и принимать «свои». «Свои» и «чужие» сообщения приемник различает по адресу, содержащемуся в сообщении.

Посланное сообщение проходит по кольцу от узла к узлу, пока не дойдет до узла-адресата или не вернется к передатчику. Соответственно, сообщение удаляется или приемником (1-й вариант) или передатчиком, пройдя круг (2-й вариант). В обоих вариантах приемник, приняв сообщение со своим адресом, проверяет ошибки в сообщении по контрольному коду и, если проверка прошла успешно, приемник принимает сообщение на обработку. Если обнаружена ошибка — сообщение отклоняется. Квитирование сообщения — уведомление об успешном принятии или ошибке в принятом сообщении — для первого варианта выполняется протоколами более высокого уровня путем послышки нового сообщения, но уже от приемника передатчику. Во втором случае, когда передатчик не снимает сообщение с петли, квитанция вставляется в специальное поле сообщения, и передатчик, получивший обратно сообщение, прошедшее петлю, знает, было ли принято сообщение и были ли в нем ошибки. Второй вариант также

позволяет передавать широковещательные сообщения, так как сообщение проходит через все узлы петли. Установка квитанций при этом осуществляется по принципу логического ИЛИ: ошибка хоть в одном узле приводит к установке признака ошибки сообщения.

Достоинства:

- Отсутствует проблема маршрутизации, так как существует единственный путь передачи сообщений.
- Достаточно просто реализовать передачу широковещательных сообщений (см. описание выше).
- На базе петлевых систем можно просто реализовать системы с различным вариантом доступа: запрос-ответ или с произвольным доступом узлов.
- Петлевые системы характеризуются высокой производительностью, так как имеется возможность одновременной передачи данных между различными парами узлов по различным сегментам сети.
- В классическом варианте петли используются однонаправленные физические каналы и симплексный режим передачи. Это существенно упрощает аппаратуру связи, позволяет избежать проблем организации множественного доступа к каналу и, соответственно, упростить контроллеры сетевого интерфейса. Можно использовать популярные физические каналы «точка-точка», не допускающие многоточечного подключения, например, RS232 или RS422.
- Если узлы расположены в пространстве «друг за другом», то суммарная длина проводных линий в петле значительно меньше, чем, например, для звездообразных топологий, при сохранении таких достоинств как каналы «точка-точка». Это упрощает монтаж и резко снижает стоимость системы.
- Можно строить сети значительной протяженности и площади охвата, так как длина каждого физического сегмента будет невелика, что ограничивает использование шинных систем.
- Упрощается механическое подключение кабелей — не требуется делать отводы проводов от шины для подключения узлов сети.

Недостатки:

- Потенциально невысокая надежность. Узким местом является разрыв кольца при выходе из строя любого узла сети. В связи с этим сетевой интерфейс (СИ), реализующей прием, передачу или ретрансляцию пакетов стараются делать автономно функциони-

рующим относительно основного вычислителя, чтобы при выходе из строя последнего СИ работал и кольцо не разрывалось. СИ делают относительно простым, но с повышенными требованиями к надежности функционирования, а также предусматривается, чтобы даже при выходе из строя СИ разрыв петли физически «закорачивался», и аварийный узел исключался из цепочки. Кроме этих базовых мер существуют и другие подходы к повышению надежности петлевой системы (см. ниже).

- Высокая и равномерная загрузка всех узлов сети: даже если передает один — в ретрансляции сообщений участвует несколько или все узлы сети. Обычно эту «сетевую» нагрузку возлагают на СИ, не затрагивая самих узлов. При этом относительно высокая сложность сетевых функций в каждом узле (в СИ): узел должен выступать как передатчик, приемник, буфер-накопитель, маршрутизатор.
- Большое количество сегментов, к каждому из которых должен быть доступ при наладке и техническом обслуживании системы. Для шинной топологии достаточно доступа в одной точке, из которой можно проводить мониторинг всей сети и опрос любого узла.

Петлевые системы широко используются в управляющих системах, требующих значительной площади охвата. В силу хорошо проработанных методов повышения надежности, петли часто используют в системах с повышенными требованиями к надежности.

Для популярных типов сетей СИ выпускаются в виде завершенных микросхем-контроллеров, например, для сети Interbus.

С точки зрения организации доступа к каналу существуют три базовых типа петель: петли Ньюхолла, Пирса и петля с введением задержки.

3.2.5 Системы с топологией звезда

В звездообразных системах один узел S (ведущий, переключатель, центр звезды) связан выделенными коммуникационными каналами (лучами) с несколькими периферийными вычислителями. При этом ведущий вычислитель выполняет функции коммутатора передаваемых данных между периферийными узлами, функции мастера сети: принимает и обрабатывает запросы на передачу от периферийных узлов, определяет приоритеты, отключает лучи при их неисправности, и, кроме того, может выполнять функции «рабочего» вычислителя.

При необходимости передачи сообщения от узла А к узлу В, первый посылает запрос переключателю S, тот передает запрос В и дожидается его готовности (он может быть занят связью с другим узлом С или просто не готов к приему данных), после чего устанавливает канал связи А-В.

В звездообразных системах могут применяться различные способы установки связи:

- По опросу со стороны ведущего;
- По прерыванию со стороны периферийных узлов.

Достоинства:

- Высокая надежность при отказе лучей и периферийных узлов. Отказ луча не мешает работе остальной системы.
- Невысокие требования по пропускной способности каналов, так как обычно для каждого узла используется свой выделенный канал и нет необходимости уплотнения данных, передаваемых несколькими узлами.
- Нет конкуренции и конфликтов при доступе к каналу между узлами.

Недостатки:

- Большое количество линий связи;
- Сложность узла-переключателя: большое число канальных интерфейсов, высокая производительность, чтобы обслуживать много каналов одновременно;
- Ненадежность при отказе переключателя.

3.2.6 Иерархические системы

Системы с иерархической конфигурацией имеют древовидную структуру. Каждый уровень — система с одним из рассмотренных ранее методов комплексирования: звездообразная, кольцевая или шинная. Подсистемы связаны через узел-шлюз. Иерархические системы применяются в основном там, где прикладная задача также имеет иерархический характер: на каждом уровне выполняется часть общей функции системы, а результаты работы используются на верхнем уровне. Передача данных и команд между нижестоящей и вышестоящей подсистемой идет через узел-шлюз, причем в вышестоящей системе виден только этот узел. Если же возможны произвольные связи между вычислителями различных уровней, то иерархическая организация неэффективна. В управляющих системах могут выделяться сле-

дующие уровни: сбора показаний с датчиков, управления (контроллеров), центрального диспетчерского отображения данных и управления, другие.

Достоинства:

- Выделение классов прикладных задач позволяет выбрать конфигурацию и параметры каждого уровня так, чтобы максимально эффективно использовать распределенную систему при решении именно этих задач;
- Отключение (неисправность) подсистем («веток») не приводит к остановке всей системы;

Недостатки:

- Выход из строя узла-шлюза или идущего к нему сверху коммуникационного канала приведет к отключению всех нижестоящих подсистем;
- Высокая загрузка узла-шлюза функциями «концентратора» подсистемы, особенно если требуется установить связь вышестоящих узлов с нижестоящими (функции коммутации). Это требует повышенной вычислительной мощности узлов-шлюзов.

3.2.7 Системы с коммутацией

В реальных системах структура логических связей между комплексированными вычислителями может быть нерегулярна и неустойчива, и при этом невозможно установить физические связи соответственно логическим. Например, нельзя все узлы подключить к общей шине или нельзя установить между каждой парой логически взаимодействующих узлов физический канал точка-точка, в пределах построить полностью связную систему. В таких случаях строятся сети с коммутацией: данные от передатчика к приемнику передаются через промежуточные коммутирующие узлы. В принципе, системы «кольцо», «звезда» и «дерево» являются частными случаями систем с коммутацией.

Существует несколько вариантов коммутирующих сетей, в зависимости от уровня сетевой модели ISO, на котором эти функции поддерживаются:

- Коммутация каналов — на физическом уровне. Между приемником и передатчиком через транзитные узлы устанавливается сквозной физический канал связи, используемый монополюбно на время сеанса связи. Достоинство — высокая скорость передачи данных. Недостаток — значительное время доступа к каналу,

невозможность параллельной передачи нескольких информационных потоков.

- Коммутация кадров (канальный уровень). Сообщение разбивается на кадры, которые передаются независимо друг от друга. Транзитные узлы коммутируют кадры, могут их временно сохранять, проверять достоверность, направлять по разным маршрутам. Коммутация кадров требует простых коммутаторов, так как используются кадры фиксированного, небольшого размера, которые проще и быстрее обрабатывать. Однако обычно требуется однородный физический/канальный протокол во всех сегментах сети. В управляющих сетях такой метод применяется в системах взаимодействия контроллеров с оконечными устройствами.
- Коммутация пакетов (сетевой уровень) аналогична коммутации кадров, но используются сетевые пакеты. Коммутация пакетов более гибкая, допускает пакеты различной длины, базируется на гетерогенных физических каналах, но требует больших затрат в коммутаторах и дороже. В управляющих системах используется для связи мощных контроллеров между собой и с другими системами, например, офисными сетями.
- Коммутация сообщений (прикладной уровень) предполагает полную сборку прикладного сообщения из пакетов в каждом транзитном узле. Это требует значительной вычислительной мощности коммутаторов, но позволяет проверять безошибочность сообщения «на маршруте», объединять подсистемы с различным сетевым уровнем, устанавливать многоточечные связи. В управляющих системах используется достаточно редко: в случаях повышенных требований к эффективности использования канала и для связи разнородных подсистем.

3.2.8 Протоколы со случайным доступом

Протокол с множественным доступом и определением коллизий.

Наиболее часто встречающаяся модификация — шина CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection — Множественный доступ с обнаружением несущей и определением коллизий). Относится к системам с децентрализованным управлением. Каждый узел такой шины может инициализировать передачу. Перед началом передачи узел проверяет, свободна ли шина (обнаружение несущей), и если да — начинает передачу, а если шина занята — ждет окончания передачи пакета другим узлом. В процессе передачи, если она начата одновременно несколькими узлами, возникают конфликты на шине.

Конфликты определяются либо самим узлом передатчиком, который прослушивает линию и сравнивает то, что он передает и что реально в линии, либо могут использоваться специальные устройства для обнаружения конфликтов, что является элементом централизованного управления. При обнаружении конфликта «столкнувшиеся» узлы прекращают передачу и освобождают шину. Повторную попытку делают через некоторый временной интервал, различный и псевдослучайный для каждого узла. Например, в сетях Ethernet интервалы вычисляются как функция предыстории конфликтов данного узла. По прошествии этого интервала узел снова пробует передавать. Таким образом, удачная передача пакета будет определяться некоторой вероятностью, уменьшающейся при росте трафика различных узлов [10].

Достоинства:

- Логически неограниченное число узлов. Подключение новых узлов не требует перенастройки системы.
- Высокая пропускная способность: нет затрат на передачу маркеров, синхронизирующих и других служебных пакетов, нет сложных, медленных механизмов разрешения конфликтов. Максимальная скорость ограничивается только параметрами среды передачи.

Недостатки:

- Недетерминированность максимального времени передачи;
- Непригодность для систем РМВ с жесткими ограничениями.

Протокол с множественным доступом и предотвращением коллизий. CSMA/CR относится к системам с децентрализованным управлением. Работа такой шины сходна с шиной CSMA/CD, но после обнаружения конфликтов на шине реализуется механизм исключения возникновения повторных конфликтов. Таким образом, добиваемся детерминированного времени передачи, а не вероятностного, как у CSMA/CD. Существует несколько модификаций такой шины.

Протокол с множественным доступом, обнаружением несущей и предотвращением коллизий с резервированием. Шина RCSMA/CA (Reservation Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance — множественный доступ с обнаружением несущей и предотвращением коллизий с резервированием). В данной модификации после обнаружения коллизии выделяется несколько временных

слотов (промежутков), следующих друг за другом. За каждым узлом жестко закреплен (зарезервирован) свой временной слот, в течение которого он может передавать. В зависимости от порядкового номера слота изменяется приоритет узла. Если узел в своем временном слоте обнаруживает, что линия занята, т. к. начал передавать узел с более ранним слотом, то ожидает окончания передачи и отсчет слотов повторяется, как после коллизии.

Достоинства:

- Гарантированное время доставки для высокоприоритетных сообщений.
- Нет повторных коллизий.
- Простота назначения приоритетов узлам.

Недостатки:

- Необходимо конфигурировать распределение слотов между узлами. Нельзя подключить узел без реконфигурации назначений.
- Затраты времени на временные слоты, даже если узел не воспользуется своим слотом. При большом числе узлов эти затраты значительны.

Протокол с множественным доступом, обнаружением несущей и предотвращением коллизий без резервирования. Шина CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance — множественный доступ с обнаружением несущей и предотвращением коллизий (без резервирования)) (например, LON). Способ аналогичный RСSMA/CA, но временных слотов меньше, чем узлов и отсутствует жесткое распределение узел-слот. Распределение узлов по слотам выполняется динамически или статически таким образом, чтобы минимизировать повторные коллизии. Таким образом, этот вариант занимает промежуточное положение между CSMA/CD и RСSMA/CA.

Достоинства относительно RСSMA/CA: меньше временные затраты на слоты.

Недостатки относительно RСSMA/CA: появляется вероятность повторных коллизий, замедляющих работу шины.

Протокол с двоичным обратным счетчиком. Шина с двоичным обратным счетчиком (Binary Countdown) (например, шина CAN). При данном подходе при возникновении коллизии прерывают передачу не все узлы – один узел продолжает и завершает передачу. После того

как линия освободится, оставшиеся узлы снова осуществляют попытку передачи и ситуация повторяется. У шин Binary Countdown используется следующий механизм арбитража коллизий: на физическом уровне значения бит различают как доминантные и рецессивные (например, «0» — доминантный, «1» — рецессивный). Если узлы выставляют различные значения бит, то на шине реально присутствует доминантное значение. Как только узел определил, что бит на шине не соответствует переданному биту, то он прекращает передачу до следующей попытки. Таким образом, передачу завершает только один узел. Для корректной работы этого механизма должны быть реализованы специальные механизмы синхронизации передачи бит различными узлами. На практике арбитраж выполняется обычно не по всем битам, а только по полю идентификации (приемника, передатчика, типа пакета) в начале пакета, например, для протокола CAN это поле идентификатора узла (ID).

Достоинства относительно RCSMA/CA: высокая эффективность использования шины: передача при коллизиях не прерывается и нет потерь на прерванные передачи, нет «холостых» затрат на временные слоты.

Недостатки относительно RCSMA/CA: дополнительные механизмы синхронизации бит, относительно сложные и медленные.

3.2.9 Протоколы с управляемым доступом

Шина с опросом типа «перекличка» (polling). Узлы начинают передачу данных только по запросу контроллера шины. Если в очередном узле нет готового сообщения, то он возвращает контроллеру шины свое состояние, информируя о работоспособности. Сообщения передаются непосредственно от узла к узлу без участия контроллера шины. Загрузка шины складывается из потока прикладных данных и потока управляющих сообщений контроллера шины — запросов и ответов.

В некоторых системах могут быть выделены отдельные линии для опроса узлов. Это упрощает алгоритм и снижает трафик по шине, но увеличивает количество линий.

Достоинства:

- Простота алгоритма доступа, отсутствие коллизий;
- Фиксированное время передачи сообщения по системе, простота изменения приоритетов узлов;
- Не нужно дополнительной аппаратуры.

Недостатки:

- Узкое место системы — контроллер шины;
- Затраты пропускной способности на передачу сообщений-запросов;
- Неэффективна для узлов с импульсными потоками данных: пропускная способность между узлами распределена фиксированно и невозможно начинать передачу по инициативе узлов.

Шина с опросом типа «раструб». Механизм опроса «раструб» применяется на протяженных шинах для снижения временных затрат на передачу запросов удаленным узлам. Контроллер шины не опрашивает каждый узел, а только инициирует цикл опроса, посылая запрос — маркер — одному, самому удаленному узлу. Далее узел либо передает сообщение, либо передает маркер следующему, расположенному рядом узлу. Если узел передал сообщение, то цикл опроса также продолжается со следующего узла, и т. д., пока маркер не пройдет все узлы. Тогда контроллер шины начинает новый цикл.

При такой системе передачи запроса-маркера, передача запросов будет осуществляться на короткие расстояния — между соседними узлами.

Передавать маркер узел может либо самостоятельно, либо используя контроллер шины как вспомогательное устройство, например, когда передача данных идет через контроллер и узел не может отследить момент освобождения шины.

Достоинства относительно варианта с опросом:

- Разгрузка контроллера шины, что необходимо при выполнении его функций одним из узлов, например, в системах телеметрии — узлом-концентратором данных;
- Разгрузка шины за счет ликвидации управляющих сообщений, таких, как сообщение состояния, и сокращение времени передачи на длинных линиях (передача будет между соседними узлами).

Недостатки относительно варианта с опросом:

- Более сложный механизм установки порядка доступа и распределения приоритетов. Например, трудно сделать каждый второй запрос к какому-либо определенному узлу.
- Контроллер шины должен отслеживать, чтобы логическое кольцо не разорвалось из-за неисправности одного из узлов.

Шина с доступом по прерываниям (Event Triggered). Относится к РШ с централизованным управлением. Физически аналогична системе с опросом с выделенными линиями запросов, но по этим линиям

передаются запросы в обратную сторону: от узлов к контроллеру шины. Запросы посылают узлы, готовые передавать данные. Полученные запросы контроллер ставит в очередь и, по мере освобождения шины, выдает подтверждения разрешения передачи узлам. Если по прошествии тайм-аута узел не принимает подтверждения, то он либо повторяет запрос, либо отказывается от передачи (например, если данные устарели).

Доступ по прерываниям предпочтителен для систем, где в течение интервала времени, который потребовался бы на опрос узлов, процент готовых систем от их общего числа невелик, или если требуется малое время доставки асинхронных сообщений.

Достоинства:

- Потенциально малое время реакции на запрос;
- Простота реализации различных дисциплин арбитража, в том числе приоритетного;
- Ликвидация дополнительной загрузки шины за счет сообщений запроса-передачи маркера.

Недостатки:

- Дополнительные линии прерывания;
- Более сложный контроллер шины, чем при опросе, так как ему надо обрабатывать асинхронные события — запросы и поддерживать очереди.

Шина с разделением времени (Time Triggered). Шина с разделением времени (тактируемая шина) с централизованным управлением (Time Division Multiplexing (TDM)) относится к РШ с централизованным управлением. Узлы системы подключены к шине через специальные устройства доступа к шине (УДШ). Управление передачей осуществляется двумя специальными устройствами — контроллером шины и шинным повторителем. В TDM шине, время разделено на интервалы (Event — такты). Тактирующие сигналы (маркеры) формируются контроллером шины и передаются всем узлам. Такты объединены в кадры. Каждый кадр начинается со стартового такта и включает фиксированное количество тактов для передачи данных. За каждым узлом в системе закреплены такты с определенным порядковым номером в кадре. Закрепленных за узлом тактов может быть от одного до всех тактов в кадре; закрепление сохраняется в каждом следующем кадре. Узлы подсоединены параллельно к двум однонаправленным шинам —

выходящей и входящей. Выходящая шина ретранслируется во входящую через шинный повторитель. Передающий узел посылает сообщение в назначенные ему такты во входящий кабель. Шинный повторитель ретранслирует такты в выходящий кабель принимающему узлу. В зависимости от числа закрепленных за узлом тактов определяется пропускная способность шины для этого узла. Если сообщение от передающего узла не готово, то его такты остаются неиспользованными. Таким образом, чем более неравномерен трафик узла, тем шина TDM больше работает вхолостую и менее эффективна.

Повышение равномерности загрузки шины достигается за счет динамического изменения распределения тактов, которое может выполняться контроллером шины по запросам узлов или автоматически, на основании оценки трафика шинным повторителем. В данном случае запросы и конфигурационная информация для узлов передаются в специально отведенные такты, что снижает полезную загрузку шины.

Другой способ повышения эффективности шины — использование тактируемой двухрежимной шины множественного доступа. В данном варианте ряд тактов жестко закреплен за узлами с равномерным трафиком, а ряд тактов разделяется между несколькими узлами с неравномерным трафиком. Таким образом, ряд узлов конкурирует. Физически это осуществляется подключением нескольких узлов к одному устройству доступа к шине. При этом устройство доступа поддерживает определенную дисциплину, согласованную с контроллером шины.

Достоинства:

- Минимальная дополнительная нагрузка и простота синхронизации работы узлов, что позволяет повышать скорость и эффективность шины.
- Фиксированное время доступа к шине;
- Простота распределения производительности шины между узлами;
- Однонаправленные физические каналы: более простая аппаратура связи. Кроме того, некоторые типы каналов бывают только однонаправленные, например, волоконно-оптические.
- Возможность фильтрации трафика в шинном повторителе.

Недостатки:

- Две линии связи — прямая и обратная;
- Специфические устройства связи — шинный повторитель, устройства доступа к шине.

- Достаточно сложный механизм распределения шинного трафика между узлами, включая само распределение и передачу этих настроек узлам.
- Фиксированное распределение узлов по тактам. Изменение числа узлов требует повторного перераспределения тактов.

Петля Ньюхолла (маркерное кольцо, token ring). По петле от узла к узлу передается специальное служебное сообщение — маркер. Только тот узел, который получил маркер, может передавать данные, остальные узлы в этот момент могут только принимать. Если узел хочет передавать данные, он должен ждать получения маркера, даже если свободна требуемая часть петли. После передачи, или если передавать нечего, узел передает маркер в следующий узел вниз по кольцу.

Существуют два варианта передачи данных:

- При получении маркера узел передает все сообщения из своей очереди, какой бы длины она не была. Такой вариант увеличивает размер очередей в узлах, но уменьшает общее время передачи сообщения.
- При получении маркера узел передает только одно сообщение из своей очереди. Относительно первого варианта меньше размер очередей, но больше время передачи группы сообщений, так как за каждый цикл передается только одно.

Достоинства:

- Невозможны конфликты узлов, так как в каждый момент времени может быть активен только один передатчик.
- Длина сообщений может быть различной.

Недостатки:

- Не допускается одновременного использования двух непересекающихся участков кольца разными узлами, что снижает время доступа узлов к передаче и общую производительность системы.

Петля Пирса (кольцо с тактируемым доступом, тактируемое кольцо). Системы на базе петли Пирса функционируют по принципу временного уплотнения — TDM. Выделяются временные такты фиксированной длины, в течении которых передаются контейнер-пакеты. В контейнер-пакеты могут быть помещены пакеты данных. Для упрощения часто под термином такт подразумевают контейнер-пакет. Обычно

такты формируются централизованно специальным узлом – контроллером сети. В каждом такте имеется флаг занятости, устанавливаемый передатчиком. Каждый узел должен разбить передаваемые сообщения на пакеты фиксированной длины, соответствующей размеру такта, дожидаться свободных тактов и поместить туда пакеты данных. Существуют два способа размещения (уплотнения) пакетов по тактам:

- Уплотнение по требованию (Demand Multiplexing, DM). Пакеты передаются асинхронно, занимая любые свободные такты. В каждом пакете содержится адресная информация. Этот способ обеспечивает большую загрузку канала и меньшее время доставки, но менее эффективно использует пакет, что проявляется при коротких сообщениях, и требует адресной селекции в приемниках, усложняя обработку пакетов в узлах.
- Синхронное временное уплотнение (STDM). За каждым узлом закрепляются «свои» такты. При этом не требуется адресной селекции, но время доставки, особенно для больших пакетов, больше за счет ожидания «своих» тактов.

Достоинства:

- Допускается передача по нескольким сегментам одновременно.
- Разделение по времени предотвращает конфликты узлов.
- Смешанный поток сообщений от нескольких узлов повышает загрузку и, соответственно, эффективность использования сети передачи.
- Снижается время доступа к сети, что для коротких сообщений приводит к общему снижению времени доставки.
- Простота назначения приоритетов при синхронном временном уплотнении за счет выделения дополнительных тактов.

Недостатки:

- Централизованное управление (формирование тактов) потенциально снижает надежность.
- Необходимо поддерживать селекцию «свободных» тактов.
- Взаимное влияние узлов на доступный им трафик (особенно при уплотнении по требованию).

Петля с введением задержки. Как и в предыдущем варианте, здесь пакеты имеют фиксированную длину. В системе есть два регистра: RSR — регистр принимаемого сообщения, TSR — регистр передаваемого сообщения. Если узел не имеет сообщения для передачи — коммутатор в состоянии 1. Если узел имеет сообщение для передачи, то

коммутатор переводится в состояние 2, пакет из TSR передается и одновременно принимается пакет в RSR. После окончания передачи TSR (на следующем такте), коммутатор переводится в состояние 3 и передается сохраненный в RSR пакет. Таким образом, производится раздвижка пакетов. Максимальное число задерживаемых пакетов определяется размером RSR.

После того как пакет дошел до узла-приемника или узла-передатчика (в зависимости от варианта снятия пакета с петли, см. выше), тот «снимает» его с петли, приняв в RSR, но не передав дальше.

Достоинства:

- Максимальная загрузка и эффективность использования канала;
- Минимальное время доставки сообщения: узел может задержать весь поток данных, пропустив вперед свои пакеты;

Недостатки:

- Сложная аппаратура и алгоритмы управления кольцевым интерфейсом;
- Взаимное влияние узлов на времена доступа и доставки.

Методы повышения надежности петлевых систем. Принципиальный подход к повышению надежности петлевых систем — резервирование, то есть введение дублирующих путей передачи.

- Метод обвода. Используются две параллельных петли. В случае отказа участка одной из них сообщения обводятся вокруг этого участка по второй петле через специальные устройства реконфигурации, равномерно расположенные по кольцу и исполняющие роль шлюза-маршрутизатора между кольцами.
- Метод самоисключения. также использует две параллельные петли и устройства реконфигурации. Однако петли работают в противоположном направлении и в случае обрыва участка кольца, сообщения идут полкольца в одном направлении, потом через реконфигуратор, полкольца в противоположном направлении по параллельной петле, снова через реконфигуратор, и так далее.
- Многоступенчатые петли. Строится иерархическая система петель. Узлы подключаются только к нижнему уровню иерархии, верхние уровни объединяют нижестоящие петли. В случае выхода из строя одной из петель она отключается, а работоспособность остальных сохраняется. Возможны варианты разделения системы на несколько петель, если оборвалась высокоуров-

невая петля. На практике эффективны системы с двумя или тремя уровнями иерархии. Дальнейшее повышение не приводит к значительному росту надежности, но усложняется аппаратура.

- Сплетение. Так же используются дублирующие петли, но не параллельные основной «полной» петле, а соединяющие узлы через один, два, или иной интервал. При том возникают варианты нескольких замкнутых дублирующих петель или дублирующей цепочки. Относительно двойных петель в сплетениях не существует узлов-реконфигураторов, где возможен разрыв обоих колец одновременно. При отказе любого реконфигуратора остается вспомогательный путь.

3.2.10 Протоколы с уплотнением каналов

Виды уплотнения каналов. Уплотнение каналов обеспечивает возможность одновременного доступа нескольких узлов к каналу связи. Основные виды уплотнения канала показаны на рисунке 3.4.

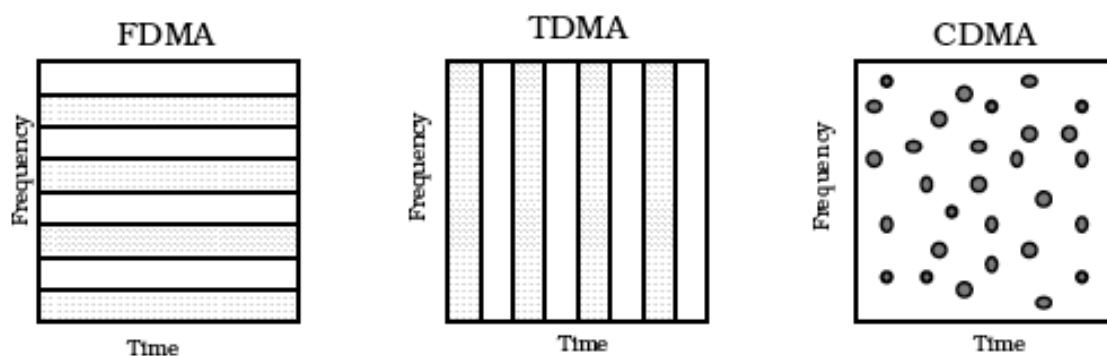


Рисунок 3.4: Виды уплотнения: FDMA, TDMA, CDMA.

- FDMA — Частотное уплотнение;
- TDMA — Временное уплотнение;
- CDMA — кодовое уплотнение.

Технологии FDMA, TDMA, CDMA в настоящий момент активно используются в спутниковой и сотовой связи.

Существуют также ряд более сложных технологий, таких как SDMA (Space-division multiple access) — множественный доступ с пространственным разделением, PDMA (Polarization division multiple access) — множественный доступ с поляризационным разделением, PAMA (pulse-address multiple access) — множественный доступ с импульсной адресацией [11]. Данные технологии используются в основ-

ном в спутниковой связи и их обсуждение выходит за рамки данного учебного пособия.

Шина с частотным уплотнением. Шина с частотным уплотнением (Frequency Division Multiplexing (FDM, FDMA)) относится к РШ с децентрализованным управлением. По шине передаются модулированные пакеты с различными несущими частотами. То есть в полосе пропускания шины выделяется несколько частотных каналов. У каждой пары передатчик-приемник модулятор и демодулятор настроены на одинаковую несущую частоту — частотный канал — и могут обмениваться сообщениями. Частотные каналы на одной шине могут работать одновременно. Количество каналов тем больше, чем шире полоса пропускания шины и меньше шаг между каналами. Обычно для каждой пары взаимодействующих узлов выделяются прямые и обратные каналы, первые имеют более высокую несущую частоту. Несущие частоты — от единиц до нескольких сотен МГц, ширина канала — несколько десятков КГц, общее количество прямых и обратных каналов в системе — до нескольких тысяч.

Достоинства:

- Малое время доступа;
- Всегда свободный канал;
- Не нужно механизмов арбитража шины.

- Сложная аппаратура модемов. Для связи одного узла с несколькими другими узлами требуются многоканальные или перестраиваемые модемы;
- Качественный кабель связи.

Шина с разделением времени и множественным доступом. Шина с разделением времени и множественным доступом (Time Division Multiple Access (TDMA)) относится к РШ с децентрализованным управлением (ДЦУ). Децентрализованная TDMA шина функционирует аналогично TDM шине с централизованным управлением, но по двунаправленному каналу. При передаче по шине TDMA также выделяются кадры и такты, присутствуют тактирующие сигналы, выдаваемые шинным мастером, но нет ретрансляции тактов через шинный повторитель.

В системах с TDMA-шиной возможна рассинхронизация доступа к шине нескольких узлов в виду их различной удаленности от источника тактирования. В TDM-шине с централизованным управлением эта проблема решалась за счет повторителя, связанного с контроллером шины: сигнал тактирования не передавался, пока не завершена посылка предыдущих данных. В системах TDMA в периоде тактирования заранее необходимо учитывать задержку на обмен с удаленными узлами. Обычно проблему сдвига времени решают за счет локальной временной базы в узле (таймера). Все локальные временные базы синхронизируются в начале каждого цикла обмена с введением поправки на задержку передачи данных от данного узла, а после этого самостоятельно вырабатывают сигналы тактирования.

Системы TDMA в настоящее время широко используются в беспроводных сетях, включая спутниковые.

Достоинства:

- Отсутствие централизованного управления повышает надежность работы шины.
- Одна линия связи.
- Фиксированное время доступа к шине.

Недостатки:

- Необходимо учитывать сдвиг времени между узлами с различной удаленностью от источника тактирования.
- Фиксированное распределение узлов по тактам. Изменение числа узлов требует повторного перераспределения тактов, статического или динамического.
- Механизмы динамического распределения тактов, автоматического или по запросам узлов, достаточно сложные.
- Невозможно фильтровать трафик, как в TDM-шине с централизованным управлением.

Множественный доступ с кодовым разделением (CDMA). CDMA (Code Division Multiple Access) — множественный доступ с кодовым разделением. CDMA отличается от доступа с частотным разделением и доступа с временным разделением. CDMA не использует для разделения каналов ни частоту, ни время, хотя по многим признакам она напоминает частотный доступ.

Каждый входной цифровой сигнал складывается («модулируется») с отдельной «несущей», в качестве которой выступает псевдослучайная последовательность (ПСП). ПСП передается со скоростью боль-

шей, чем скорость исходного сигнала, после чего полученные сигналы объединяются в единый поток. При этом полоса частот, используемая в радиоканале, гораздо шире, чем полоса исходного сигнала. Этот процесс получил название расширение спектра (Spreading Specter). Псевдослучайные последовательности выбираются таким образом, чтобы на приемном конце их можно было разделить (отфильтровать) и отделить сигнал от его псевдослучайной последовательности («несущей»). Передача единого объединенного потока осуществляется в одной полосе частот с помощью одного из видов фазовой манипуляции. Поэтому системы, основанные на CDMA, не требуют деления полосы частот на отдельные каналы, что, в свою очередь, облегчает процесс хэндовера (переход из одной соты в другую) [12].

Технология CDMA используется в сотовой и спутниковой телефонной связи.

Достоинства:

- Гибкое распределение ресурсов. При кодовом разделении нет строгого ограничения на число каналов. С увеличением числа абонентов постепенно возрастает вероятность ошибок декодирования, что ведёт к снижению качества канала, но не к отказу обслуживания.
- Более высокая защищённость каналов. Выделить нужный канал без знания его кода весьма трудно. Вся полоса частот равномерно заполнена шумоподобным сигналом.

Литература

1. Sangiovanni-Vincentelli Alberto. Quo Vadis, SLD? Reasoning About the Trends and Challenges of System Level Design // Proceedings of the IEEE. 2007. Т. 95, № 3. С. 467–506. — Режим доступа: <http://ieeexplore.ieee.org/articleDetails.jsp?arnumber=4167779>, свободный.
2. Hiroaki Shikano Yuki Suzuki. Performance evaluation of heterogeneous chip multi-processor with MP3 audio encoder.
3. A 90 nm embedded single DRAM chip LSI with a 3D graphics, H.264 codec engine, and a reconfigurable processor / Y Kurose, I Kumata, M Okabe [и др.] // Proc. Hot Chips. 2004.
4. Adaptive computing on the dynamically reconfigurable processor / S Abe, Y Hasegawa, T Toi [и др.] // Proc. COOL Chips. 2006. С. 409–421.
5. Nedjah N, Mourelle L M. Co-Design for System Acceleration: A Quantitative Approach. Springer-Verlag, 2007.
6. Advantech APAX-6572. — Режим доступа: http://www.advantech.ru/products/1-CYXW62/APAX-6572/mod_A11A3013-6173-4089-A94F-246B92BF6DCB.aspx, свободный.
7. Advantech APAX-5028. — Режим доступа: http://www.advantech.ru/products/1-DOJH97/APAX-5028/mod_060BF0E4-8564-43DB-B372-36E518DFCD66.aspx, свободный.
8. Advantech ADAM-4117. — Режим доступа: http://www.advantech.ru/products/1-2MLC85/ADAM-4117/mod_9161079D-563C-428C-8DF4-AA29FFFA995D.aspx, свободный.
9. Advantech ITM-5112. — Режим доступа: http://www.advantech.ru/products/1B947DE0-9E96-463C-87EC-E36DEA80A2ED/ITM-5112/mod_5ABE2947-4D54-4750-9B04-9B64D334B4CC.aspx, свободный.

10. Семенов Ю.А. телекоммуникационные технологии 2014. — Режим доступа: <http://book.itер.ru/>, свободный.
11. Jo Kenneth Y. Satellite Communications Network Design and Analysis. 2011. — Режим доступа: http://books.google.ru/books/about/Satellite_Communications_Network_Design.html?id=nvWN11j_d2YC&pgis=1, свободный.
12. Берлин Александр, Ефименко Владимир. Сотовые системы связи. 2009. — Режим доступа: <http://www.intuit.ru/studies/courses/551/407/info>, свободный.

Миссия университета — генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

КАФЕДРА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Кафедра ВТ СПбНИУ ИТМО создана в 1937 году и является одной из старейших и авторитетнейших научно-педагогических школ России.

Традиционно основной упор в подготовке специалистов на кафедре делается на фундаментальную базовую подготовку в рамках общепрофессиональных и специальных дисциплин, охватывающих наиболее важные разделы вычислительной техники.

Кафедра является одной из крупнейших в университете. Учебными курсами и научно-исследовательскими работами руководят 8 профессоров и 16 доцентов. На кафедре обучаются более 500 студентов и 30 аспирантов.

Кафедра имеет собственные компьютерные классы и специализированные исследовательские лаборатории, оснащенные современной вычислительной и оргтехникой, уникальным инструментальным и технологическим оборудованием, измерительными приборами и программным обеспечением.

В 2007-2008 гг. коллективом кафедры была успешно реализована инновационная образовательная программа СПбНИУ ИТМО по научно-образовательному направлению «Встроенные вычислительные системы».

Начиная с 2009 года кафедра вычислительной техники является активным участником реализации программы развития национального исследовательского университета СПбНИУ ИТМО, вошла в состав крупнейшего в СПбНИУ ИТМО научно-исследовательского центра «Интеллектуальные системы управления и обработки информации».

Аркадий Олегович Ключев
Павел Валерьевич Кустарев
Алексей Евгеньевич Платунов

РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Учебное пособие

В авторской редакции
Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО
Зав. РИО
Подписано к печати
Заказ №
Тираж
Отпечатано на ризографе

Н. Ф. Гусарова

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49