

## ПРИМЕНЕНИЕ INDUSTRIAL ETHERNET В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ НА АЭС

Кишкин В.Л., Новиков А.А., Еремин Ю.А.,  
Смирнов В.В., Белова Т.Н. (ВНИИАвтоматики),

Шагурин И.И., Смирнов А.В., Мокрецов М.О., Тихонов Ю.Н. (МИФИ)

*Рассмотрен комплекс аппаратно-программных средств (EN-шина), предназначенный для использования в системе управления ТПТС51, применяемой на российских АЭС. Аппаратно-программный комплекс обеспечивает обмен информацией по каналам Industrial Ethernet между системами автоматики нижнего уровня, шлюзовыми устройствами и соответствующим функциональным сегментом шины.*

АСУ сложными объектами такими, как энергоблоки АЭС имеют ряд особенностей, связанных с размещением объекта на значительной территории, необходимостью контроля большого числа параметров, повышенными требованиями по надежности, скорости получения и обработки данных. Поэтому связь в этих системах реализуется на базе надежных каналов обмена с достаточно высокой пропускной способностью. Кроме высоких технических характеристик шина связи должна обеспечивать детерминированность передачи данных, а также возможность построения резервированных структур для повышения надежности функционирования системы. В настоящее время технология Industrial Ethernet занимает ведущую позицию на рынке оборудования для полевых шин [1]. Широкий ассортимент аппаратных средств, поставляемых различными производителями, позволяет строить высокоскоростные, надежные и относительно дешевые Ethernet-сети, удовлетворяющие промышленным стандартам. Поэтому многие разработчики АСУ для сложных объектов используют в своих проектах шину Ethernet и процессорно-коммуникационные модули, поддерживающие стандартные протоколы обмена данными, а также специализированное ПО для организации взаимодействия оборудования и выполнения различных служебных процедур (инициализация, самотестирование и др.). Рассмотрим комплекс аппаратно-программных средств (EN-шина), разработанный специалистами Всероссийского НИИ Автоматики и Московского инженерно-физического института (Москва) для использования в системе управления ТПТС51, которая применяется на ряде российских АЭС [2]. Аппаратно-программный комплекс обеспечивает обмен ин-

формацией по каналам Industrial Ethernet между системами автоматики нижнего уровня, шлюзовыми устройствами и соответствующим функциональным сегментом шины.

### Структура сети Ethernet системы ТПТС51

Основными абонентами EN-шины являются:

- приборные стойки систем автоматики нижнего уровня, которые подключаются к шине с помощью связанных модулей EN-EAS и обеспечивают управление объектом и сбор данных о его состоянии;

- шлюзовые устройства, выполненные на базе ПК, которые подключаются к шине с помощью связанных модулей EN-PCI и служат коммуникационным звеном между шиной Ethernet и системой верхнего уровня.

Типовой вариант подключения резервированной приборной стойки (ПС) к шине Ethernet показан на рис. 1. В ПС устанавливаются функциональные модули (ФМ), выполняющие прием и обработку информации от датчиков (Д), а также формирующие необходимые управляющие сигналы исполнительным устройствам, например, электроприводам (П). Базовые модули ввода/вывода (БМ) связаны по внутренней шине с ФМ стойки и с помощью связанных модулей (СМ) осуществляют обмен информацией между ПС и другими абонентами шины. В резервированной системе каждая ПС содержит два БМ: Master-модуль (может принимать и передавать информацию на шины) и Slave-модуль (может только принимать информацию с шин). Каждый БМ имеет один СМ. Связные модули EN-EAS и EN-PCI, выполненные в виде платы-носителя с установленным на ней мезонинным процессорно-коммуникационным модулем, подключаются к портам коммутаторов Sw (Switch), образующих магистраль Ethernet.

Для повышения надежности основных абонентских звеньев сети каждый СМ подключается к магистрали по двум каналам – основному и резервному. Выход из строя основного канала обнаруживается программным модулем самоконтроля, который является частью прикладного ПО процессорного модуля. В этом случае производится переключение на резервный канал СМ.

Отказоустойчивость основной магистрали обеспечивается встроенными механизмами контроля целостности сети и управления резервированием [3]. Ма-

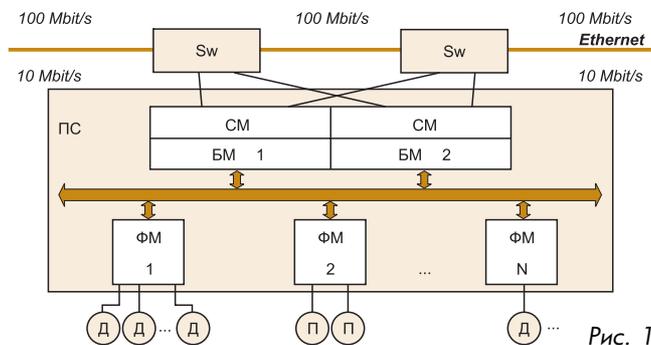


Рис. 1

гистраль Ethernet образуется последовательным включением коммутаторов Sw, к которым подключаются абонентские звенья. Один из коммутаторов служит также менеджером резервирования

Два конца магистрали подключаются к двум портам менеджера резервирования, который постоянно посылает в один из магистральных портов диагностические кадры и контролирует их прием по другому порту. В исходном состоянии связь между двумя магистральными портами внутри менеджера резервирования разъединена. Такая структура магистрали называется виртуальным кольцом. В случае, если менеджер резервирования после отправки очередного диагностического кадра не получает его на другом конце магистрали, то он замыкает шину внутри себя, восстанавливая тем самым целостность линии. Время восстановления целостности линии зависит от числа последовательно включенных коммутаторов и составляет величину порядка 500 мс при использовании в виртуальном кольце 50 коммутаторов. Такой механизм отказоустойчивости реализован в промышленных коммутаторах фирм Hirschmann, Moxa, Siemens, которые могут использоваться для организации EN-шины.

Для повышения надежности связи между абонентами каждый СМ подключается к магистрали по двум каналам (основному и резервному) к разным коммутаторам. Нарушение связи в результате отказа абонентской линии или выхода из строя коммутатора обнаруживается программой самоконтроля модуля. При этом производится переключение на резервный канал, который подключен к другому коммутатору.

Абоненты сети, совместно решающие задачи управления одним объектом, объединяются в функциональные группы. Абоненты одной функциональной группы подключаются к смежным коммутаторам, которые образуют функциональный сегмент. Функциональные сегменты можно либо объединять в общее виртуальное кольцо, либо организовывать отдельное виртуальное кольцо для каждого функционального сегмента. В первом случае система получается более экономичной (за счет использования меньшего числа коммутаторов), во втором – более отказоустойчивой (за счет сегментирования сети, рис. 2). К виртуальным кольцам первого уровня подключены СМ шлюзовых устройств (СМШУ) и приборных стоек (СМПС), образующих данную функциональную группу. В составе каждого виртуального кольца содержится один коммутатор Sw, конфигурируемый для работы в режиме менеджера резервирования (на рис. 2 эти коммутаторы заштрихованы). Объединение сегментов осуществляется посредством виртуального кольца второго уровня.

Для объединения двух кольцевых сегментов в коммутаторах предусмотрены средства резервирования – отдельная контрольная линия, объединяющая два коммутатора, по которой в случае обрыва линии связи основной коммутатор переводит резервный в

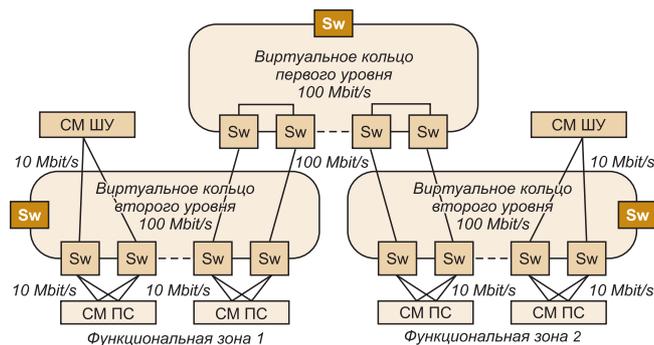


Рис. 2

активное состояние. В структуре на рис.2 контрольной линией соединена каждая пара коммутаторов виртуального кольца второго уровня, обеспечивающая подключение одного виртуального кольца первого уровня.

Объединение абонентов в функциональные группы позволяет повысить пропускную способность сети, поскольку основной объем информационных потоков в данном случае передается в пределах функционального сегмента.

**Реализация процессорно-коммуникационных модулей**

Разработанные процессорно-коммуникационные модули входят в состав связанных модулей шлюзовых устройств (EN-PCI) и приборных стоек (EN-EAS). Процессорно-коммуникационный модуль выполнен в виде платы-мезонина согласно стандарту IEEE1386. Мезонинная конструкция позволяет унифицировать высокопроизводительный процессорно-коммуникационный модуль для применения в качестве процессорного ядра в СМ EN-EAS, EN-PCI, а также в СМ EN-CPIC, выполненном в формате CompactPCI.

На рис. 3 показана общая структура аппаратной части процессорно-коммуникационного модуля и его место в составе СМ. В СМ приборных стоек EN-EAS используется плата-носитель формата 6U, в СМ шлюзовых устройств EN-PCI – плата-носитель короткого формата спецификации PCI. Платы-носители выполняют интерфейсные функции, обеспечивая выход в сеть Ethernet и обмен данными через двухпортовую память с базовым модулем (СМ EN-EAS) или шиной PCI ПК (связной модуль EN-PCI).

При проектировании процессорного модуля наиболее предпочтительным оказалось использование коммуникационного контроллера MPC860EN компании Freescale Semiconductor (Motorola), который имеет совмещенные на одном кристалле высокопроизводительное процессорное ядро и специализированный коммуникационный контроллер, реализующий протокол Ethernet и поддерживающий четыре канала обмена со скоростью до 10 Мб/с, необходимые для реализации резервирования [4]. Контроллер содержит три основных блока, объединенных внутренней 32-разрядной шиной: процессорное ядро PowerPC, блок системной интеграции

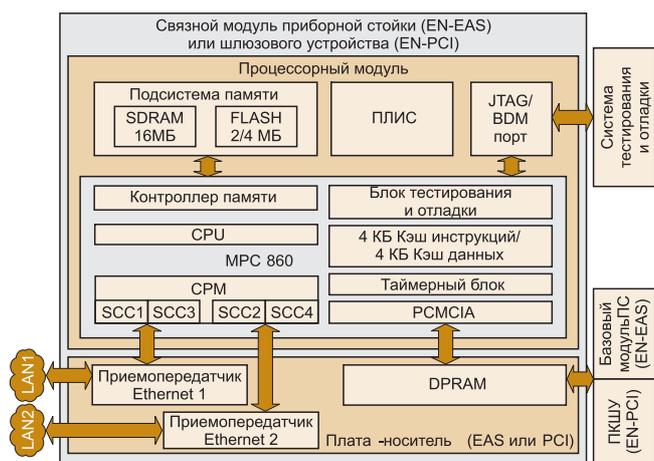


Рис. 3

SIU и модуль коммуникационного процессора СРМ. Производительность ядра PowerPC, которое имеет RISC-архитектуру, составляет 87 MIPS при тактовой частоте 66 МГц.

Модуль системной интеграции SIU выполняет интерфейсные функции, обеспечивая взаимодействие с внешней памятью и периферийными устройствами, которые подключаются к системной шине и параллельным портам. Этот модуль содержит контроллер, который реализует обмен с внешними устройствами в соответствии с протоколом PCMCIA. В процессорно-коммуникационном модуле контроллер PCMCIA используется для подключения двухпортовой памяти DPRAM, размещенной на плате-носителе, с помощью которой обеспечивается связь с шиной PCI ПК или шиной EAS приборных стоек. В состав SIU входит также ряд блоков, выполняющих конфигурирование контроллера, контроль его функционирования и ряд других задач.

Коммуникационный процессор СРМ обеспечивает управление обменом данными по нескольким независимым каналам, каждый из которых можно настроить на реализацию одного из распространенных протоколов, в том числе Ethernet (стандарт IEEE802.3). Модуль СРМ управляется отдельным 32-разрядным RISC-ядром. Это позволяет освободить процессорное ядро PowerPC от низкоуровневого управления обменом данными и таким образом повысить эффективность работы контроллера.

Основные функции обмена данными в СРМ выполняют четыре коммуникационных контроллера SCC1-4, которые индивидуально настраиваются на требуемый протокол (Ethernet, HDLC/SDLC, AppleTalk, UART, BYSINC, Transparent и др.). Для каждого контроллера последовательного обмена выделяется два канала прямого доступа к памяти – для приема и передачи данных. Используя эти каналы, контроллер может автономно (без участия процессорного ядра) принимать блоки данных, которые записываются в подключенную к системной шине внешнюю оперативную память, и передавать блоки данных, выбираемых из этой памяти. Частота обмена для каждого

контроллера задается с помощью одного из четырех программируемых генераторов синхроимпульсов BRG1-4, входящих в состав СРМ. Внутреннее двухпортовое ОЗУ емкостью 5 Кбайт, доступ к которому имеют как процессорное ядро, так и модуль СРМ, служит для хранения параметров, задающих режимы работы контроллеров, дескрипторов принимаемых и передаваемых блоков данных, служебных данных, записываемых и считываемых процессорным ядром. В состав СРМ входят также четыре 16-разрядных таймера и несколько портов для параллельного обмена.

Коммуникационный контроллер MPC860EN имеет порт отладки BDM, позволяющий эффективно осуществлять отладку ПО, для реализации которой используется внешний BDM-адаптер и инструментальный компьютер, на котором установлено соответствующее ПО. Для подключения BDM-адаптера на плате предусмотрен стандартный 10-контактный разъем.

Подсистема памяти процессорно-коммуникационного модуля состоит из энергонезависимой постоянной FLASH памяти емкостью 4 Мбайт и оперативной динамической памяти SDRAM емкостью 16 Мбайт, которые подключены к системной шине контроллера MPC860EN. FLASH память используется для хранения программ пользователя и таблиц результатов тестов, выполняемых при каждом включении модуля. При включении питания процессорно-коммуникационного модуля обеспечивается возможность загрузки системы из FLASH памяти.

На этапе инициализации системы из энергонезависимой FLASH памяти в оперативную память SDRAM загружаются модули системного и прикладного ПО, а также данные, необходимые для работы программных модулей. Остальной объем SDRAM используется для временного хранения информации, передаваемой и принимаемой по сети Ethernet. Начальная конфигурация контроллера MPC860EN задается с помощью установленной на плате процессорно-коммуникационного модуля программируемой логической интегральной микросхемы (ПЛИС), которая также формирует ряд системных сигналов, необходимых для работы модуля.

Процессорный модуль-мезонин имеет четыре разъема расширения для подключения к плате-носителю. Тип и расположение разъемов соответствует требованиям стандарта IEEE1386. На плате имеется дополнительный пятый разъем, на который выведены сигналы портов контроллера MPC860EN. Требуемый физический протокол обмена с шинами EAS или PCI реализуется с помощью ПЛИС, установленных на платах носителях. В связанных модулях EN-EAS и EN-PCI используются только два канала интерфейса Ethernet, реализованных на контроллерах SCC1 и SCC2 процессорно-коммуникационного модуля. Для подключения этих контроллеров к шине Ethernet на физическом уровне на платах носителях устанавливаются микросхемы-трансиверы, трансформаторы и разъемы.

**Системное ПО процессорно-коммуникационного модуля**

Системное ПО выполняет следующие основные функции: начальная загрузка и инициализация модулей системы; распределение памяти; обеспечение гарантированной доставки сообщений; управление задачами; реализация служебных процедур (управление питанием, запись-стирание FLASH памяти и др.).

Ввиду достаточной сложности этих функций разработчики во многих случаях используют для управления системой коммерческие или свободно распространяемые ОС. Однако специфика управления такими сложными и ответственными объектами, как АЭС, значительно ограничивает возможности применения этих ОС. Возможным путем решения этой проблемы является выборочное использование компонентов ОС, свободно распространяемых в исходных кодах (Linux [5], RTEMS [6] и др.), с добавлением многочисленных дополнительных программных модулей, учитывающих особенности решаемых задач. При этом доля разрабатываемых дополнительных модулей оказывается весьма значительной — около 60% общего объема системного ПО [5]. Кроме того, необходимо проведение верификации и аттестации выбранных компонентов используемой ОС с целью определения степени их защищенности и стабильности работы.

В связи со спецификой решаемых задач для управления работой процессорно-коммуникационного модуля в системе ТПТС51 используется специализированное системное ПО. В реализуемой системе каждая прикладная задача создается для управления одним физическим объектом и необходимые ресурсы выделяются для каждой задачи на стадии проектирования. Поэтому разработанное системное ПО не производит распределение физических ресурсов между прикладными процессами. В случае необходимости разделение ресурсов осуществляется на стадии проектирования или модернизации системы путем введения дополнительной задачи, единолично владеющей определенным физическим ресурсом и имеющей доступ к ресурсу остальных задач через обменные буферы, размещенные в памяти.

В процессе проектирования системы разработан сценарий выполнения прикладных задач. Поэтому системное ПО не выполняет сложные алгоритмы планирования передачи управления между прикладными задачами, которые реализованы в ОС общего применения — QNX, VxWorks, RTEMS и др. Использование собственного системного ПО позволяет эффективно распределять системное время на решение задач, выполняемых связным модулем [7].

На рис. 4 показана общая структура системного ПО. При включении питания из обработчика события Reset производится переход к программному модулю инициализации и начальной загрузки, который осуществляет настройку блока системной интеграции SIU контроллера MPC860, проверку шин адреса и данных, инициализацию среды, необходимой для

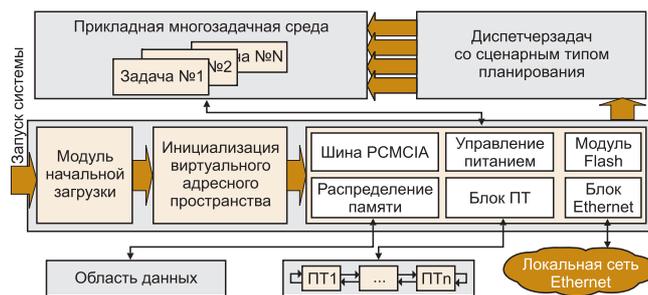


Рис. 4

работы программы, написанной на языке Си, и копирование основной программы из FLASH памяти в оперативную память SDRAM. Далее вызывается модуль инициализации виртуального адресного пространства, формирующего таблицы дескрипторов для реализации страничной трансляции логических адресов в физические.

Модуль распределения памяти осуществляет выделение и освобождение блоков памяти определенных размеров из набора статических буферов в динамической памяти SDRAM. Для гарантированной доставки сообщений по каналу Ethernet в системном ПО реализован блок программных таймеров (ПТ), которые контролируют время от момента отправки пакета отправителем до момента получения подтверждения от адресата. Системный модуль Ethernet выполняет инициализацию контроллеров коммуникационных каналов SCC, подготавливая каналы передачи данных для использования их более высоким логическим уровнем LLC, протокол которого реализован в прикладном ПО.

Модуль PCMCIA осуществляет инициализацию и поддержку интерфейса PCMCIA, который входит в состав блока SIU коммуникационного контроллера MPC860EN и обеспечивает связь с внешними шинами через двухпортовую память DPRAM, расположенную на плате-носителе. Модуль управления питанием реализует набор функций, обеспечивающих переход в режимы работы с пониженным энергопотреблением. Модуль Flash выполняет процедуры записи-стирания при работе с энергонезависимой FLASH памятью.

Диспетчер задач запускается после инициализации вышеперечисленных системных модулей. Величина кванта времени при работе системы задается таймером Decrementer, который содержится в контроллере MPC860EN. Диспетчер осуществляет очередную передачу управления прикладным задачам согласно сценарию их выполнения. Ресурсы, используемые каждой прикладной задачей, выделяются для нее на стадии проектирования программных модулей, реализующих данную задачу.

**Прикладное ПО****процессорно-коммуникационного модуля**

Прикладное ПО процессорно-коммуникационного модуля решает следующие задачи:

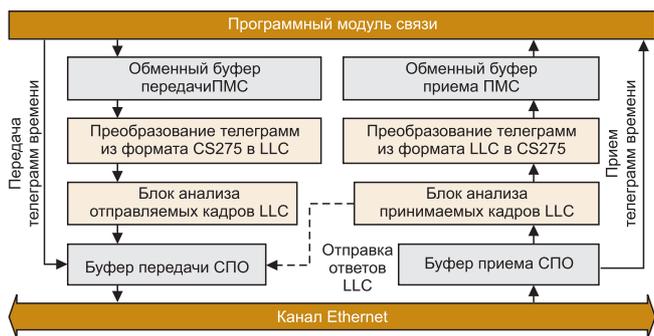


Рис. 5

- взаимодействие модуля с пользователем, в роли которого выступает базовый модуль ввода/вывода приборной стойки или шлюзовое устройство (обеспечивается программным модулем связи);
- обеспечение передачи информации по шине Ethernet в соответствии со стандартным LLC-протоколом управления логическим звеном (реализуется сетевым ПО);
- реализация самотестирования и самодиагностики.

Аппаратно взаимодействие процессорно-коммуникационного модуля с контроллером базового модуля ввода/вывода или процессором шлюзового устройства реализовано с помощью двухпортовой памяти DPRAM, которая располагается на плате-носителе и подключается к контроллеру MPC860EN через интерфейс PCMCIA. Программный модуль связи (ПМС) обеспечивает обмен данными между сетевым ПО (СПО), которое реализует связь с каналом Ethernet, и памятью DPRAM в соответствии со специализированным протоколом шины CS-275. Этот модуль задает также ряд параметров, определяющих конфигурацию системы: номер активного канала Ethernet, установку дуплексного или полудуплексного режима работы каналов, перевод связанного модуля в режим работы только на прием (используется для реализации горячего резервирования) и др.

В состав ПМС входит программный модуль самоконтроля, реализованный как отдельная задача, работающая под управлением диспетчера задач. Задача самоконтроля проверяет работоспособность наиболее важных узлов микроконтроллера MPC860EN, оперативную память SDRAM, FLASH-память, двухпортовую память DPRAM и каналы Ethernet. В случае отказа какого-либо из контролируемых компонентов базовому модулю передается сообщение об ошибке. Если отказывает один из каналов Ethernet, то процессорно-коммуникационный модуль переключается на второй канал. Если отказывает и второй канал, то передается сообщение об ошибке и ожидается команда от базового модуля.

Общий контроль работы процессорно-коммуникационного модуля осуществляется при помощи сторожевого таймера Watchdog, входящего в состав MPC860EN. Watchdog срабатывает при нарушении нормального хода выполнения штатной программы. При этом возникает сигнал сброса, по которому мо-

дуль заново инициализируется. Структура СПО показана на рис. 5. Взаимодействие ПМС и СПО осуществляется через обменные буферы, расположенные в оперативной памяти SDRAM процессорно-коммуникационного модуля. Взаимодействие может также осуществляться посредством специальных вызовов, позволяющих производить обмен информацией между прикладными задачами СПО и ПМС в обменных буферах. Этот вид взаимодействия используется, например, при синхронизации всех абонентов сети, когда время оповещения пользовательского уровня каждого абонента о поступлении телеграммы времени (синхронизирующей телеграммы) должно быть минимальным.

СПО содержит два функциональных модуля: приема и передачи. Оба они реализованы как независимые задачи, работающие в многозадачной среде под управлением диспетчера задач.

Модуль приема выполняет прием сообщений по сети Ethernet, контроль принимаемых сообщений, оповещение ПМС об ошибках и отказах сети, распаковку сообщений и передачу информации в ПМС в формате CS275 через обменный буфер приема. На этапе инициализации сетевых интерфейсов для каждого из используемых каналов Ethernet CM выделяется массив приемных буферов в оперативной памяти SDRAM. Во внутренней двухпортовой памяти DPRAM, которая входит в состав модуля СРМ контроллера MPC860EN, резервируются таблицы дескрипторов, которые имеют кольцевую реализацию. Число таблиц равно числу используемых каналов Ethernet. Каждый из дескрипторов описывает один буфер в соответствующем данному каналу массиве приемных буферов. Модуль передачи выполняет прием сообщений от ПМС в формате телеграмм CS275 через обменный буфер передачи ПМС, формирует LLC-кадр, в который инкапсулируется принятая от ПМС телеграмма, помещает сформированный кадр в буфер передачи СПО и готовит дескрипторы для отправки данных модулем СРМ.

Поскольку задержки установления логического соединения перед отправкой информации должны быть минимальны, то протокол управления логическим звеном реализован только для двух типов процедур: LLC1 (сервис без установления соединения и без подтверждения) и LLC3 (сервис без установления соединения, но с подтверждением). Протокол LLC реализуется блоками анализа кадров LLC сетевого ПО. Каждый модуль прикладного ПО, являющийся отдельным процессом в многозадачной среде исполнения, имеет циклическую архитектуру – его выполнение непрерывно повторяется. Если необходима синхронизация между прикладными задачами, используются семафоры и ряд системных вызовов, поддерживаемых диспетчером задач и позволяющих задаче, остановившейся на семафоре, передать управление диспетчеру до истечения выделенного ей кванта времени.

Для проверки соответствия разработанных аппаратно-программных средств требованиям технического задания проведено их тестирование на испытательном стенде. В реальных условиях функционирования загрузка каналов модуля при вводе данных составляет  $\leq 15...17\%$ , при выводе данных –  $\leq 2...3\%$ , при этом потери данных не наблюдалось. Испытания подтвердили работоспособность системы и показали, что при 90% общей загрузки в сети не происходит потери кадров. Таким образом, данная система может быть использована в составе АСУТП АЭС.

**Список литературы**

1. Industrial Ethernet – наиболее используемая промышленная шина 2003 г. // Автоматизация в промышленности. 2004. №7.

*Кишкин В.Л. – к.т.н., первый зам. главного конструктора, Новиков А.А. – начальник лаборатории, Еремин Ю.А. – с.н.с., Смирнов В.В. – с.н.с., Белова Т.Н. – главный специалист (ВНИИАвтоматики), Шагурин И.И. – д.т.н., профессор, Смирнов А.В. – инженер, Мокрецов М.О. – ассистент, Тихонов Ю.Н. – аспирант МИФИ.*

*Контактный телефон: (095)324-01-84. E-mail: motlab@d406.micro.mephi.ru*

**СИНТЕЗ РОБАСТНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ В КАСКАДНОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ**

**А.М. Джараган, В.В. Сыроквашин, А.Л. Фокин, В.Г. Харазов (СПбГТУ)**

*Рассмотрен синтез робастной системы управления с каскадной структурой, осуществляющийся без традиционной для этих систем итерационной процедуры проектирования. Это достигается за счет использования виртуального управления, что позволяет синтезировать внутренний и внешний контуры по отдельности. Рассмотрены методы робастного синтеза регуляторов стабилизации для этих контуров с учетом специфики их работы.*

Каскадная структура системы управления часто используется при автоматизации ТП. Такие системы возникают, когда при наличии одного управления имеется возможность измерения двух и более переменных процесса. Это увеличивает количество информации о процессе, что позволяет улучшить качество регулирования и увеличить быстродействие системы.

Рассмотрим каскадную систему, показанную на рис. 1. Она имеет один вход  $\bar{y}$  и один выход  $y$ , а также промежуточную переменную  $z$ . На основании измерения пары  $(z, y)$  формируется управление  $u$ , которое реализуется при помощи двух регуляторов: внутреннего контура с передаточной функцией  $W_{p1}(p)$  и внешнего контура с передаточной функцией  $W_{p2}(p)$ .

Наличие двух регуляторов при одном управляющем сигнале определяет специфику синтеза системы управления. Традиционно [1] используется итерационная процедура проектирования. На каждом этапе рассматривается одноконтурная система с одним регулятором для эквивалентного объекта, передаточная функция которого включает передаточную функцию смежного регулятора, полученного на предыдущем этапе. Это усложняет процедуру проектирования. Поэтому обычно заранее задаются структурой регуляторов, а итерационную процедуру используют для параметрического синтеза.

**Синтез каскадной системы**

Если в передаточных функциях объекта  $W_{01}(p), W_{02}(p)$  присутствует неопределенность, то синтез осуществляет-

2. Технические предложения по модернизации шинной системы ТПТС51, ВНИИА, 2003.  
 3. *Кругляк К.В.* Локальные сети Ethernet в АСУТП: быстрее, дальше, надежнее // Современные технологии автоматизации. 2003. №1.  
 4. *Шагурин И.И.* Современные микроконтроллеры и микропроцессоры Motorola. М.: Горячая линия. Телеком. 2004.  
 5. *Мосолкин С.И., Промыслов В.Г., Жарко Е.Ф. и др.* Системное ПО LICS как компонент подсистем АСУТП АЭС // Автоматизация в промышленности. 2004. №10.  
 6. *Шагурин И.И., Ванюлин В.А., Смирнов А.В.* Исполнительное ядро реального времени RTEMS и особенности его применения // Мир компьютерной автоматизации. 2001. №4.  
 7. Патент №2239228 (РФ) Способ распределения времени центрального процессора между задачами в АСУТП / Еремин Ю.А., Кишкин В.Л. // Бюл. 2004. №30.

ся в классе робастных регуляторов, которые в большинстве случаев являются более сложными, чем традиционные. Поэтому актуальна задача построения процедуры проектирования без итераций. Для синтеза будем использовать номинальные передаточные функции объекта  $W_{01}^0(p), W_{02}^0(p)$ , которые считаются известными. Сначала рассмотрим внешний контур регулирования.

Для построения безытерационной процедуры проектирования воспользуемся идеей построения виртуального регулятора [2], который обеспечивает требуемое поведение замкнутой по входу  $z$  системы с передаточной функцией объекта  $W_{02}^0(p)$ . Пусть желаемое движение по переменной  $y$  обеспечивается при регулировании по закону

$$z(p) = W_b(p) \cdot 2(p), \tag{1}$$

где  $W_b(p)$  – передаточная функция виртуального регулятора.

Тогда для номинального объекта в соответствии со структурной схемой на рис. 1 получим

$$z(p) = W_{01}^0(p) \cdot W_{p1}(p) \cdot [\bar{z}(p) - z(p)],$$

$$\bar{z}(p) = W_{p1}(p) \cdot \varepsilon_2(p)$$

Отсюда 
$$z(p) = \frac{W_{01}^0(p) \cdot W_{p1}(p) \cdot W_{p2}(p)}{1 + W_{01}^0(p) \cdot W_{p1}(p)} \cdot \varepsilon_2(p). \tag{2}$$

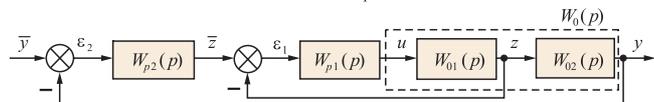


Рис. 1