

УДК 004.713, 004.75

Ю. А. Холопов<sup>1</sup>, вед. инженер, Ле Ба Чунг<sup>2</sup>, аспирант, e-mail: chungbaumanvietnam@gmail.com,  
Нгуен Тхань Чунг<sup>2</sup>, аспирант, Чан Ван Хань<sup>1</sup>, канд. техн. наук, инженер,

<sup>1</sup>Институт точной механики и вычислительной техники им. С. А. Лебедева РАН,

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (ГУ)

## Особенности реализации распределенных систем управления на основе аппаратных сетевых решений

*Рассмотрены аспекты внедрения сетевых технологий в распределенные системы управления. Описаны различные приемы аппаратной поддержки сетевых решений, обеспечивающие повышение пропускной способности информационной среды за счет исключения арбитражных процедур, исключения управляющей информации из пакетов, организации обмена центрального процессора и периферийных устройств через укрупненные пакеты состояния и управления. Реализация на FPGA предложенных технологий позволяет достичь минимальных и стабильных задержек передачи данных в бортовых сетях.*

**Ключевые слова:** распределенная система управления, сетевые интерфейсы, коммутатор, конвертор, регистратор, CAN, Ethernet

### Введение

В настоящее время распределенные системы управления (PCY) представляют собой сложные, высокодинамичные системы с разнесением компонентов в пространстве на десятки метров. Эти системы могут включать в себя большое число датчиков, исполнительных устройств, узлов управления-вычисления, связанных между собой через сетевую информационную среду.

В современных PCY отмечается тенденция использования разных цифровых сетевых интерфейсов на всех структурных уровнях. Например, функции связи между модулями, внутри электронных блоков системы могут выполнять интерфейсы SPI, I2C, USB. Для подключения к системе различных датчиков, исполнительных устройств используют такие распространенные последовательные интерфейсы, как CAN, UART, Profibus, Modbus, LIN, HART. В комплексах бортового оборудования высокоуровневые связи между сложными системами и связи с системой управления верхнего уровня организуются с помощью интерфейсов Ethernet, CAN, ARINC, STANAG и т.п.

### 1. Проблемы использования сетевых технологий в распределенных системах управления

Под информационной средой (ИС) распределенной системы управления понимается совокупность технических и программных средств для хранения, обработки и передачи информации. В нее входят следующие компоненты: центральный про-

цессор, оконечные устройства, коммутаторы и совокупность физических связей узлов (сеть). В системах управления используется централизованная сетевая информационная среда, спецификой которой являются гетерогенная структура абонентов с резервированным ведущим и наличие средств документирования трафика для послеаварийного анализа работы системы — регистратора. На каждом уровне иерархии PCY используют разные, обычно стандартные типы сетей, максимально соответствующие функции межсоединений данного уровня. Однако использование разных сетей для обеспечения связей между компонентами системы управления порождает следующие проблемы:

- ✓ наличие разных типов сетей на разных уровнях PCY требует решения задачи их объединения;
- ✓ существующие форматы пакетов не оптимальны для использования в распределенных системах управления вследствие избыточности управляющей информации;
- ✓ в универсальной сети присутствуют механизмы управления обменами, которые не нужны для PCY, например, избыточная размерность системы адресации, механизм контроля доступа к среде передачи данных и т.п.;
- ✓ при проектировании некоторых управляющих сетей, существует "проблема масштаба", когда необходимо комплексировать большое число датчиков и исполнительных устройств, но отсутствует единая методика, которая позволила бы сделать это, не ухудшая динамические характеристики системы управления;

- ✓ наличие большого числа абонентов в ИС РСУ усложняет задачу их контроля и мониторинга стандартными средствами;
- ✓ необходимость использования в РСУ готовых периферийных устройств с разными сетевыми интерфейсами требует разработки типовой технологии их комплексирования.

Современные бортовые сети позволяют не только обеспечить процесс обмена информацией между компонентами РСУ, но и являются ее информационной основой. Для сетевой ИС распределенной системы управления основным требованием является минимальное и известное время передачи информации [1]. Обеспечение прозрачного механизма взаимодействия между узлами сети напрямую сказывается на качестве функционирования всей РСУ. Фактически, будет решаться задача создания бесконфликтной коммуникационной среды между компонентами распределенных систем управления.

Актуальность поставленной задачи обусловлена не только постоянным развитием сложности объектов управления, но и повышенными требованиями к качеству собственно управления объектами. Практическая ценность оптимизации сетевой информационной среды РСУ заключается в том, что она позволяет обеспечить повышенный уровень точности управления и надежности. В единой сетевой ИС РСУ появляется дополнительная возможность децентрализованного протоколирования практически всех информационных событий. При этом незначительно усложняется ее структура, не разрушается основная функциональность системы. Далее рассмотрим методы решения описанных выше проблем на конкретных примерах.

## 2. Объединение разнообразных сетей в высокодинамичных распределенных системах управления

Существует широкий спектр устройств, позволяющих обеспечить решение задачи объединения разных сетей в режиме доступа к абонентам в адресном пространстве одной объединенной сети, это, например, конверторы HD67290 (CAN/RS232), HD67048 (CAN/Ethernet), HD67390-U-D1 (CAN/USB), и т.п.

Недостатки таких универсальных готовых решений заключаются в том, что они имеют невысокий уровень настройки параметров комплексирования через сетевой интерфейс верхнего уровня. В режиме настройки через технологический интерфейс эти универсальные решения избыточны, а поэтому дороги и трудно настраиваемы.

Наиболее целесообразной для объединения двух сетей с разными интерфейсами представляется реализация в рамках системы управления специализированного конвертора, подходящего не только по функциям, но и по способу комплексирования, обладающего возможностью расширения набора функций и внешних интерфейсов. При этом конвертор будет играть роль ведущего узла для одного типа сети (например, сети 1) и ведомого для другой сети

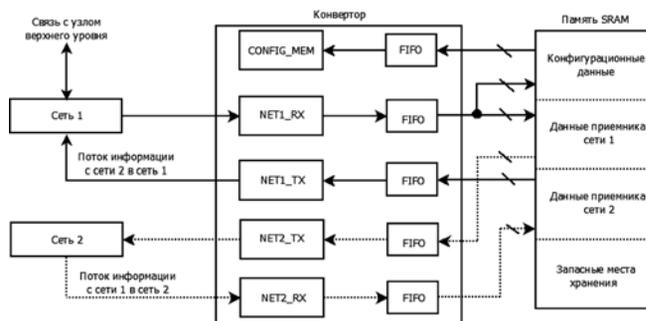


Рис. 1. Обобщенная функциональная схема реализации конвертора, объединяющего две сети



Рис. 2. Обобщенный алгоритм функционирования конвертора

(сети 2). Обобщенная функциональная схема аппаратной реализации конвертора показана на рис. 1.

Комплексирование разных сетей заключается в переформатировании пакетов, соответствующих протоколам сетей 1 и 2, в общей памяти. Буферы FIFO используются для пересинхронизации и согласования скоростей потоков сетевой информации и порта доступа к общей памяти. Обобщенный алгоритм функционирования конвертора показан на рис. 2.

На основе предложенного алгоритма функционирования и обобщенной функциональной схемы аппаратной реализации был разработан конвертор промышленных сетей Profibus и Modbus, как часть логики центрального вычислителя системы управления [2]. В данном случае конвертор играет роль ведущего узла в сети Profibus и ведомого в сети Modbus. Конвертор позволяет объединить одну сеть Profibus с одновременно несколькими равноскоростными сетями Modbus. Аппаратное решение обладает необходимыми значениями компактности, гибкости, экономичности по объему имеющихся логических ресурсов.

## 3. Обеспечение минимального времени передачи данных в высокодинамичных распределенных системах управления

Еще одной проблемой, возникающей в высокодинамичных РСУ, является необходимость обеспечения минимального и стабильного времени передачи данных между узлами системы. Решение данной задачи позволяет не только повысить частоту обработки данных в системе управления, но и уменьшить фазовые искажения (устаревание информации). Для решения данной проблемы требуется применение комплексных методов в сетевом аппаратном и программном обеспечении. Рассмотрим некоторые методы аппаратных решений.

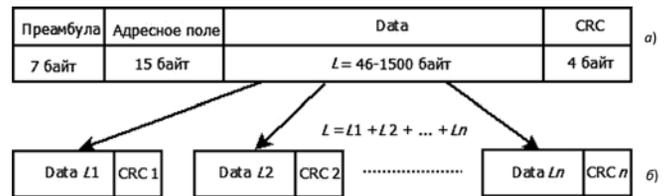
**Построение слабосвязанной распределенной системы управления.** Одним из путей решения про-

блемы "быстрых передач" является построение слабосвязанной РСУ. Распределенная система управления строится таким образом, чтобы все сильные связи, все фазы процесса управления, необходимые для передачи большого объема информации с высокой частотой, замыкались внутри локальных подсистем через высокоскоростные сети. А для межуровневого взаимодействия можно использовать сети с меньшей скоростью передачи информации. По сети связи между подсистемами передаются только высокоуровневые команды управления и укрупненные параметры состояния. Модель слабосвязанной распределенной системы управления является одной из широко используемых концепций разработки бортовых систем управления.

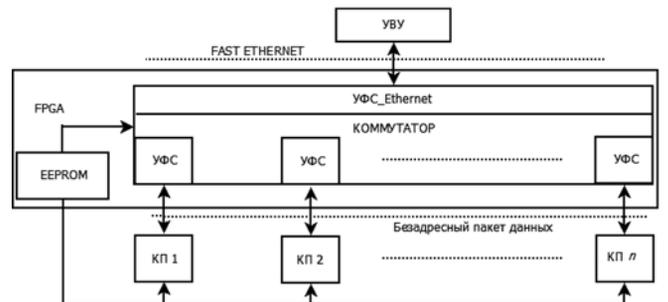
В работе [3] описано решение задачи обеспечения работоспособности системы подвески автомобиля на основе концепции слабосвязанной РСУ. Информационное взаимодействие контуров управления узлами подвески (горизонтальные связи) реализовано через локальную высокоскоростную сеть передачи информации. Связь с узлом управления верхнего уровня не требует такой высокой скорости передачи информации, и поэтому может быть реализована через сеть другого типа.

**Модификация промышленных универсальных сетевых протоколов.** Другой путь решения проблемы "быстрых передач" — это упрощение формата пакета данных, т.е. модификация универсальных сетевых протоколов. Разработанные на сегодняшний день универсальные протоколы не учитывают специфику информационных процессов в РСУ. Избыточность управляющей информации в формате пакетов состояния и управления может ухудшить качество РСУ с точки зрения эффективности и помехоустойчивости системы. Предлагаемая коррекция протоколов базируется на отличных от универсальных сетей характеристиках информационных обменов в РСУ: статичности состава абонентов в системе и цикличности информационных процессов. Эти характеристики означают наличие возможности взаимодействия вычислителя с периферийными устройствами системы по фиксированному расписанию. Отсутствие асинхронности во взаимодействии с периферийными компонентами системы позволяет упростить адресацию абонентов и исключить конфликты между абонентами сети. Рассмотрим подробно эту идею на примере задачи аппаратной реализации коммутатора Fast Ethernet.

Благодаря высокой скорости передачи данных (порядка 100 Мбит/с) и широкому спектру аппаратных решений, Ethernet часто используют в различных современных системах управления. Однако достаточно высокое значение и недетерминированность времени задержки в процессе передачи данных между узлами верхнего и нижнего уровней через обычный коммутатор ограничивает возможности его применения для высокодинамичных РСУ. Предлагается решение данной проблемы путем реализации специального конвертора, связанного с



**Рис. 3. Форматы пакетов:**  
*a* — протокола Fast Ethernet; *б* — нижнего уровня



**Рис. 4. Структурная схема аппаратной реализации конвертора**

узлом верхнего уровня через стандартный протокол Ethernet, и использующего сокращенный формат пакетов для обмена данными с контроллерами нижнего уровня. Фактически, на нижнем уровне РСУ нет необходимости в функциях сетевого протокола, а сетевой протокол вырождается в безадресный пакетный интерфейс: адресация выполняется по "подключению" к каналам конвертора, границы пакетов определяются по паузе между циклами регулирования, процедура доступа к сети отсутствует ввиду режима работы "по расписанию". Формат пакетов протокола Fast Ethernet и формат пакетов нижнего уровня показаны на рис. 3, где  $L$  — длина поля данных пакетов протокола Fast Ethernet, а  $L_1, L_2, \dots, L_n$  — длины полей данных пакетов нижнего уровня. Процессы упаковки и распаковки пакетов в конверторе сопровождаются формированием и анализом контрольных кодов. Структурная схема аппаратной реализации конвертора показана на рис. 4.

Здесь УВУ — узел верхнего уровня; КП 1, КП 2, ..., КП  $n$  — контроллеры периферии; УФС — узел физического сопряжения с линией связи (приемопередатчик). Минимальная задержка достигается благодаря аппаратному преобразованию стандартных пакетов верхнего уровня в несколько сокращенных пакетов для нижестоящих узлов с упрощенной адресацией последних по подключению, что обеспечивается заранее составленным расписанием.

**Аппаратное обеспечение подключения к бортовой сети разнообразных периферийных устройств.** В современных распределенных системах управления широко используют разнообразные периферийные устройства, работающие с разной скоростью и с разными сетевыми протоколами и цифровыми интерфейсами. Поэтому актуальной задачей является разработка типовой технологии комплексирования разнообразных периферийных устройств к бортовой сети. Практические реализации на при-

мере контроллеров широко используемых сетей Profibus DP и CAN [4] показали, что аппаратное решение обеспечивает подключение к сети большого числа периферийных устройств с высокой скоростью передачи данных, в оптимальном формате пакетов данных и с минимальными требованиями к объему аппаратуры. Структурная схема аппаратной реализации контроллера периферии с CAN-интерфейсом показана на рис.5.

В качестве цифровых интерфейсов периферийных устройств могут служить UART, SPI, I2C и т.п. Реализация контроллера периферии зависит от конкретной бортовой сети и интерфейсов периферийных устройств.

Отметим некоторые принципиальные особенности реализации контроллера периферии, порождаемые характеристиками PCY и выбранной стратегией управления контроллером.

- ✓ Благодаря статичности характеристик PCY заранее известны конфигурационные параметры контроллера периферии.
- ✓ Все модули управления периферийными устройствами могут быть реализованы автономно, и большинство из них функционирует независимо от типов интерфейсов бортовой сети.
- ✓ Данные, полученные от разных периферийных устройств, постоянно обновляются в блоке формирования пакетов и всегда готовы для пересылки.
- ✓ Процесс согласования скоростей разнообразных модулей в составе контроллера периферии выполняется либо на основе использования буферов, либо по запросам от сети.

#### 4. Концепция контроля, мониторинга и обеспечения качества распределенных систем управления на основе реализации автономного регистратора

Через сетевую информационную среду PCY передаются все параметры, характеризующие состояние объекта управления в данном цикле регулирования. Одним из абонентов сетевой ИС может быть узел регистрации и контроля (УРК), следящий за всеми обменами (рис. 6).

Узел регистрации и контроля не адресуется в цикле регулирования и является устройством, фиксирующим все обмены независимо от адресации, и работающим автономно вне зависимости от цикла регулирования системы управления. Обращение к УРК возможно только в технологическом режиме при отладке системы. В данном узле сохраняются мгновенные параметры, фиксируемые в каждом цикле регулирования PCY [5].

УРК может быть настроен на запись параметров, выбираемых по заранее заданной маске. Выбор параметров для контроля и мониторинга осуществляет разработчик при настройке УРК через стандартные интерфейсы, например CAN, I2C и т.п. Подключение к коммуникационной среде PCY позволяет независимо от структуры внутренней сис-

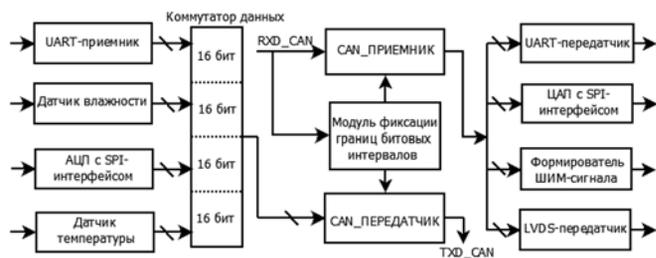


Рис. 5. Структурная схема контроллера периферии с CAN-интерфейсом



Рис. 6. Схема подключения регистратора к системе управления

темы и алгоритмов ее функционирования получить различные параметры системы и данные, циркулирующие внутри системы управления.

### Заключение

В распределенных системах управления актуальной тенденция замены неструктурированных цифровых связей между элементами системы на сетевые интерфейсы. Использование универсальных сетевых протоколов в ИС PCY избыточно. Оптимизация форматов и способов организации связей в информационной среде PCY основана на статичных характеристиках обменов информации между составными частями распределенных систем управления. В обычных PCY синхронизация узлов недостаточно широко распространена. Предлагаемый подход обеспечивает синхронность работы всех составных частей системы управления. Сетевая ИС как однотипное коммуникационное пространство PCY позволяет использовать дополнительные распределенные по объекту управления узлы протоколирования, контроля и функционирования PCY. Реализация предложенных приемов аппаратной поддержки сетевых решений на FPGA необходима для обеспечения максимальной точности механизма синхронизации обменов. Сокращение задержек передачи данных между узлами PCY повышает качество управления объектом.

### Список литературы

1. Преображенский Н. Б., Ле Ба Чунг, Чан Ван Хань, Дам Чонг Нам. Некоторые особенности реализации сетевых решений в системах управления // Международная конференция Инжиниринг & Телекоммуникации — En & T 2014: тезисы докладов. Москва/Долгопрудный, 26–28 ноября 2014. М.: Изд-во МФТИ, 2014. С. 217–218.
2. Дам Чонг Нам. Комплексирование MODBUS и PROFBUS в промышленных сетях. // Сборник "XL ГАГАРИНСКИЕ ЧТЕНИЯ. Научные труды Международной молодежной научной конференции в 9 т. Москва, 7–11 апреля 2014 г." М.: Изд-во МАТИ. 2014. Т. 5. С. 218–219.

3. **Холопов Ю. А., Чан Ван Хань, Преображенский Н. Б.** Аппаратная оптимизация бортовой распределенной системы управления подвеской автомобиля на основе ее свободных степеней информационных связей // Глобальный научный потенциал. 2014. № 11 (44). С. 113—116.

4. **Ле Ба Чунг.** Контроллер периферии с CAN-интерфейсом // Труды 56-й всероссийской научной конференции МФТИ "Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в совре-

менном информационном обществе. Москва, 25—30 ноября 2013 г.". М.: МФТИ, 2013. С. 59—60.

5. **Чан Ван Хань.** Исследование и разработка метода построения высокоавтономного регистратора параметров в цифровой системе управления // XXXIX ГАГАРИНСКИЕ ЧТЕНИЯ: научные труды Международной молодежной научной конференции в 9 т. Москва, 9—13 апреля 2013 г.". М.: МАТИ, 2013. Т. 4. С. 183—185.

**Ju. A. Holopov<sup>1</sup>**, Leader Engineer, **Le Ba Chung<sup>1, 2</sup>**, Graduate Student, **Nguyen Thanh Trung<sup>1, 2</sup>**, Graduate student, **Tran Van Khanh<sup>1, 2</sup>**, PhD,  
<sup>1</sup>Lebedev Institute of Precision Mechanics and Computer Engineering  
<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (State University),  
E-mail: chungbaumanvietnam@gmail.com

## Features of Implementation of Distributed Control Systems Based on Hardware Network Solutions

*The article discusses aspects of the implementation of network technology in distributed control systems. The described various approaches of hardware support for network solutions provide higher throughput capacity in the information environment by: exclusion of arbitration procedures, elimination of control information from the data packages, the organization of exchange between the CPU and peripherals based on a unified packages of state and control. The proposed technology, implemented on FPGA, allows to achieve minimal and stable delay of transfer data in on-board networks.*

**Keywords:** distributed control system, network interfaces, switch, converter, recorder, CAN, Ethernet

### References

1. **Преображенский Н. В., Ле Ба Чунг, Тран Ван Хань, Дам Trong Нам.** Некоторые особенности реализации сетевых решений в системах управления, *Международная конференция Инжиниринг & Телекоммуникации — En & T 2014, Tezisy dokladov*, Moscow/Dolgoprudnyj, 26—28 November 2014, Moscow: MFTI, 2014, pp. 217—218.
2. **Дам Trong Нам.** Комплексование MODBUS и PROFBUS в промышленных сетях, *XL GAGARINSKIE ChTENIJA. Nauchnye trudy Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchnoj konferencii v 9 vol.* Moscow, 7—11 April 2014, Moscow: MATI, 2014, vol. 5, pp. 218—219.
3. **Холопов Ю. А., Тран Ван Хань, Преображенский Н. В.** Аппаратная оптимизация бортовой распределенной системы управления

подвеской автомобиля на основе ее свободных степеней информационных связей, *Global'nyj nauchnyj potencial*, 2014, no. 11 (44), pp. 113—116.

4. **Ле Ба Чунг.** Контроллер периферии с CAN-интерфейсом, *Труды 56-ой всероссийской научной конференции МФТИ "Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в современном информационном обществе"*, Moscow, 25—30 November 2013. М.: МФТИ, 2013, pp. 59—60.

5. **Тран Ван Хань.** Исследование и разработка метода построения высоко-автономного регистратора параметров в цифровой системе управления, *XXXIX GAGARINSKIE ChTENIJA. Nauchnye trudy Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchnoj konferencii v 9 vol.* Moscow, 9—13 April 2013. Moscow, MATI, 2013, vol. 4, pp. 183—185.

УДК 004.942

**А. Ю. Романов**, канд. техн. наук, ст. преп., e-mail: a.romanov@hse.ru,  
Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики"

## Исследование сетей на кристалле с топологией *mesh* с помощью модели *NoCTweak*

*Проанализировано влияние геометрической формы топологии и размещения "горячих точек" на эффективность сетей на кристалле с помощью модели NoCTweak на базе языка SystemC. Результаты моделирования показали, что использование топологий, наиболее близких по форме к квадратной, позволяет до 24,7 % увеличить пропускную способность сети на кристалле, а центральное размещение "горячих точек" дает возможность до 9 % уменьшить задержки прохождения пакетов и до 15,2 % — энергозатраты на передачу каждого из них при увеличении до 19,5 % пропускной способности сети.*

**Ключевые слова:** сеть на кристалле, система на кристалле, регулярная топология сети на кристалле, проектирование сетей на кристалле, язык программирования SystemC, модель сети на кристалле, топология mesh, "горячие точки"