

<https://www.kommersant.ru/doc/3168705> (accessed 15.07.2017) (in Russian).

12. **Questions** and answers, *Era-Glonass*, 2017 [Official website]. URL: <http://glonassunion.ru/era-glonass/info>, Era-Glonass (accessed 15.07.2017).

13. **Kitney R.** 5 oblastey, kotorye ismenyat "internet veshey", Orange Business Services, 2017 [Official website]. URL: <http://www.orange-business.com/ru/blogs/get-ready/mobilnost/5-oblastey-kotorye-izmenit-internet-veshchey> (accessed 15.07.2017) (in Russian).

14. **Magyar J.** Trenitalia's IoT Strategy Makes the Trains Run on Time, *SAP* [Official website]. URL: <http://news.sap.com/trenitalia-iot-strategy-makes-the-trains-run-on-time/> (accessed 15.07.2017).

15. **Big Data** in different industries: application scenarios [Electronic resource], *CNews*, 2014, [Official website]. URL: [http://www.cnews.ru/articles/bolshie\\_dannye\\_v\\_raznyh\\_otraslyah\\_stsenarii](http://www.cnews.ru/articles/bolshie_dannye_v_raznyh_otraslyah_stsenarii) (accessed 15.07.2017) (in Russian).

16. **Ermoloh P.** "Smart Road" — Russian market of M2M/IoT in transport infrastructure, *JSON*, 2017 [Official website]. URL: [http://json.tv/ict\\_telecom\\_analytics\\_view/umnaya-doroga-rossiyskiy-rynok-m2miot-v-oblasti-dorojnoj-infrastruktury-20160314040956](http://json.tv/ict_telecom_analytics_view/umnaya-doroga-rossiyskiy-rynok-m2miot-v-oblasti-dorojnoj-infrastruktury-20160314040956) (accessed 15.07.2017) (in Russian).

17. **Heineman K.** Intelligent Traffic Signals Reduce Intersection Wait 40 Percent, *Txchnologist*, GE, 2017 [Official website]. <http://txchnologist.com/post/63090236446/intelligent-traffic-signals-reduce-intersection-online-magazine> (accessed 15.07.2017).

18. **Smigala H., Kress A.** Local Motors Debuts "Olli", the First Self-driving Vehicle to Tap the Power of IBM Watson [Electronic resource], *IBM*, 2016 [Official website]. URL: <https://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/49957.wss> (accessed 15.07.2017).

19. **Perviy** Kamaz s iskustvennym intellektom vypustyat yje v 2017 gody [Electronic resource], *KAMAZ*, 2016 [Official website] <http://www.kamaz-volga.ru/about/smi/39350/> (accessed 15.07.2017) (in Russian).

20. **Internet** of Things [Electronic resource], *American International Group (AIG)*, 2016 [Official website]. <https://www.aig.ru/why-aig/internet-of-things> (accessed 15.07.2017).

21. **Dembinskaya N.** Kak bespilotnie avtomobili izmenyat economy, *RIA Novosti*, 2016 [Official website]. URL: <https://ria.ru/economy/20161205/1482890294.html> (accessed 15.07.2017) (in Russian).

22. **Simpler** and Smarter connections at Germany's Largest Seaport [Electronic resource], *SAP*, 2017 [Official website]. URL: <https://www.sap.com/about/customer-testimonials/public-sector/hamburg-port-authority.html> (accessed 15.07.2017).

23. **Jankowski S., Covello J., Bellini H., Ritchie J., Costa D.** The Internet of Things: Making sense of the next mega-trend, *Goldman Sachs*, 2014 [Official website]. URL: <http://www.goldmansachs.com/our-thinking/outlook/internet-of-things/iot-report.pdf> Goldman Sachs Global Investment Research 2014 (accessed 15.07.2017).

УДК 004.057.4

**Ле Ба Чунг**, аспирант, e-mail: chungbaumanvietnam@gmail.com,  
Московский физико-технический институт (ГУ),

**Ю. А. Холопов**, вед. инженер,  
Институт точной механики и вычислительной техники им. С. А. Лебедева  
Российской академии наук, Москва

## Асимметричный межмодульный интерфейс

*Рассмотрены межмодульные связи в цифровой системе управления, построенной по принципу "вынесенной руки". Предложен простой асимметричный межмодульный интерфейс для передачи информации между периферийными устройствами и вычислителем. Интерфейс отличается несложным механизмом управления обменом, простой структурой пакетов и высокой плотностью данных в пакете, что позволяет организовать быстрые "прозрачные" связи между удаленными устройствами системы управления и центральным вычислителем.*

**Ключевые слова:** цифровая система управления, принцип "вынесенной руки", межмодульные связи, центральный вычислитель, периферийные устройства

### Введение

Аппаратные средства цифровых систем управления (ЦСУ), как правило, конструктивно распределены в нескольких модулях. Модуль реализуется как узел с четко выделенной функцией и минималистичностью интерфейсов. В любой ЦСУ присутствуют модули исполнительных устройств и датчиков, размещенные непосредственно на объекте управления. В точках их размещения воз-

можны неблагоприятные условия эксплуатации [1], такие как высокая температура, вибрация, агрессивная среда и т.п., а сами точки размещения после окончательной сборки объекта управления становятся физически недоступными, что исключает возможность изменения алгоритмов управления модулями через локальные технологические интерфейсы. Тем не менее возможность коррекции управляющих программ должна быть предусмотрена, и функция коррекции должна

быть доступной в течение всего жизненного цикла объекта управления.

Информационная среда ЦСУ с нужными свойствами может быть реализована широко распространенным способом — совмещением функций технологических и рабочих интерфейсов в едином — комплексном — интерфейсе. Но, по мнению авторов, правильным подходом к построению информационной среды с корректируемыми управляющими программами является выбор структуры информационной среды, принципиально не требующей изменения функций удаленных узлов.

Нужным свойством обладает информационная среда ЦСУ, построенная по принципу "вынесенной руки" (далее — ЦСУВР), с единым централизованным вычислителем. В такой системе управления датчики и исполнительные устройства должны быть функционально независимыми от алгоритмов управления, а алгоритмы управления всех уровней реализуются в центральном вычислителе. Периферийные устройства ЦСУВР (датчики и актуаторы) имеют сходный функциональный состав и поэтому могут взаимодействовать с центральным вычислителем через однотипные унифицированные интерфейсы.

Целью работы является создание простого, типового интерфейса для передачи информации между периферийными устройствами и центральным вычислителем в цифровых централизованных системах управления. Свойства разрабатываемого интерфейса, как мы покажем ниже, существенно отличаются от свойств существующих стандартных интерфейсов связи с периферийными устройствами.

### Система управления, построенная по принципу "вынесенной руки"

Идеологически концепция "вынесенной руки" означает возможность дистанционного управления объектом или его разнесенными составными частями в том же масштабе реального времени, что и при непосредственном управлении. То есть время передачи сигналов управления объектом из центрального вычислителя намного меньше времени реакции объекта на их изменение. Аналогичное требование предъявляется для передачи центральному вычислителю параметров состояния объекта управления.

Цифровая система управления с центральным вычислителем может быть реализована несколькими

способами. Уменьшение времени обменов может быть достигнуто за счет использования для управления объектом высокоуровневых команд управления (ВКУ). В такой иерархической системе управления непосредственно с исполнительными устройствами, объектом управления и окружающей средой взаимодействуют контуры регулирования нижнего уровня, реализованные в виде автономных модулей. В наборе параметров состояния, передаваемых в центральный вычислитель (далее — "центр") могут практически отсутствовать данные с датчиков, а сам контур регулирования будет иметь свойства высокоавтономного, почти независимого исполнителя. Алгоритмы функционирования ЦСУ с ВКУ отлаживаются поэтапно: сначала — функции узлов нижнего уровня до их установки на объекте управления и с использованием для перепрограммирования технологических интерфейсов. Затем общие алгоритмы управления объектом (в терминах ВКУ) отлаживаются после монтажа вынесенных узлов на их штатные места. Изменение алгоритмов работы узлов на этом этапе становится невозможным.

Более гибкая реализация ЦСУ — система управления, построенная по принципу "вынесенной руки", — предполагает использование центрального вычислителя как единственного исполнителя алгоритмов управления всех уровней. Необходимость распараллеливания вычислений по нескольким процессорам при использовании современных программно-управляемых вычислителей отсутствует, так как скорость обработки единственным процессором практически не ограничена.

В такой системе управления функциональный состав оконечных устройств минимален (рис. 1) и включает в себя трансиверы межмодульного интерфейса и локальные подсистемы: измерительную и исполнительную, а также не изображенный на рисунке блок быстродействующей автономной защиты от критичных режимов. Реализация защиты такого типа через "центр" может оказаться невозможной из-за критичности

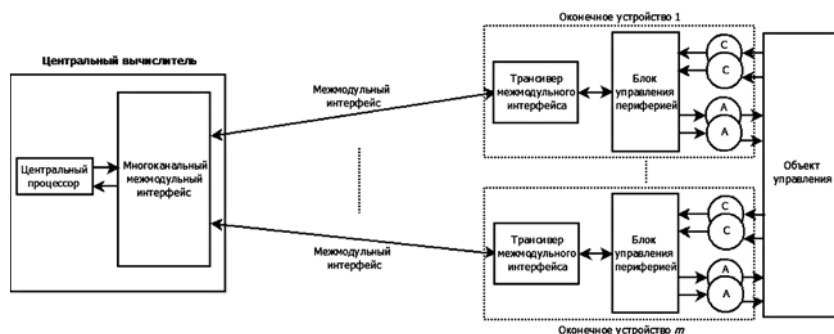


Рис. 1. Структура цифровой системы управления, построенной по концепции "вынесенной руки"

дополнительных задержек в межуровневых связях. Для центрального вычислителя вынесенные периферийные устройства выполняют функции ввода-вывода, а вся переменная алгоритмическая часть, связывающая параметры состояния и управления, оказывается сконцентрированной только в нем. Теперь изменение любого алгоритма в любой подсистеме управления ЦСУВР осуществляется только в центральном вычислителе.

Средства ввода-вывода ЦСУВР размещаются в оконечных устройствах, непосредственно взаимодействующих с объектом управления. Они расположены удаленно относительно центрального вычислителя, но скорость взаимодействия "центра" с периферийными устройствами должна быть такой, чтобы в системе не была заметна эта удаленность.

Традиционно для удаленного подключения используются сетевые или подобные им интерфейсы. Рассмотрим подробнее свойства стандартных интерфейсов сетевого типа и покажем их недостатки при использовании в роли периферийных, межмодульных интерфейсов в системе управления, построенной по принципу "вынесенной руки".

### Анализ существующих стандартных интерфейсов

Разрабатываемый межмодульный интерфейс должен обладать функциональным свойством "прозрачного", практически асинхронного средства пакетного обмена потоками данных между узлами (рис. 2). Объясним это утверждение подробнее. Межмодульный интерфейс осуществляет обмен параметрами состояния и управления между узлами: центральным вычислителем и периферийными устройствами распределенной системы управления. Из-за отсутствия прямой связи между источниками и приемниками параметров обновление переменной в приемнике происходит с задержкой относительно момента ее изменения источником. Кроме того, в при-

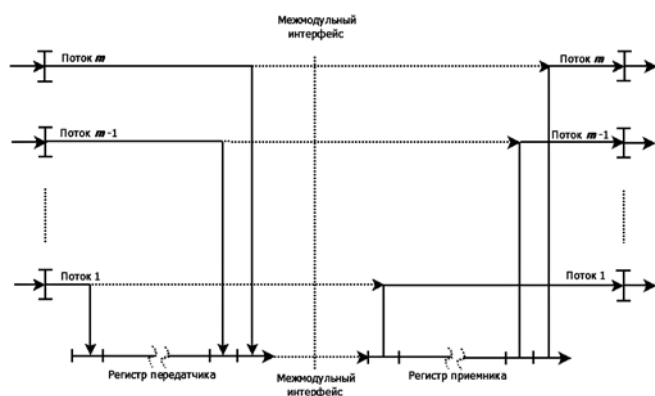


Рис. 2. Пакетный обмен потоками данных

нятой концепции построения связей между узлами ЦСУ ведущий узел не имеет возможности определять момент использования переменных, принятых узлом ведомым. Поэтому стратегия обменов информацией сводится к организации как можно более частого "логического замыкания" связей между всеми источниками параметров и их приемниками. Скоростные характеристики современных приемопередатчиков позволяют организовать обновление информации между узлами с частотой в несколько килогерц, что вполне достаточно, например, для прямого управления ШИМ-генераторами исполнительного устройства из центрального вычислителя.

Прозрачность интерфейса реализуется через цикличность обменов, происходящих с максимально возможной частотой. Другие свойства интерфейса — следствия, вытекающие из этого основного свойства. Поэтому дальнейшее сравнение интерфейсов будет проводиться в терминах оценки их пригодности для реализации описанного выше свойства.

Большая часть стандартных сетевых интерфейсов построена в соответствии с идеологией шинной архитектуры [2], т. е. использует общую среду передачи данных в режиме разделения времени (рис. 3).

Шинная топология связей не позволяет получить максимальную скорость обменов из-за сложностей согласования параметров длинных линий. Поэтому в современных сетевых интерфейсах связи между узлами реализуются в топологии "точка—точка", но на логическом уровне присутствуют следующие структурные свойства, снижающие скорость обменов потоками данных:

- ✓ механизм вхождения в связь;
- ✓ функция восстановления связи в случае возникновения сбоя;
- ✓ механизм разделения пакетов с помощью временных интервалов;
- ✓ наличие лишних полей (адресации, длины данных и т.д.) в коммуникационных пакетах [3];
- ✓ отсутствие цикличности обменов.

Цикличность в таких интерфейсах может быть реализована с использованием внешнего управления: аппаратными средствами, что усложняет интерфейс, или программными, что снижает частоту обменов.

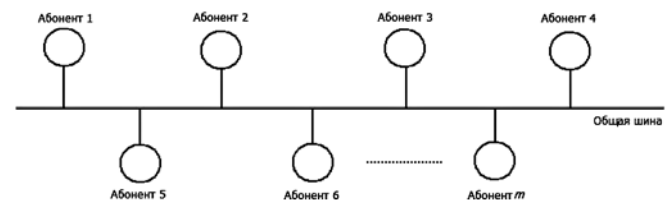


Рис. 3. Шинная топология

Наиболее близким по свойствам к межмодульному интерфейсу является широко распространенный интерфейс SPI [4]. В этом интерфейсе легко реализуются цикличность и переменная длина поля данных. Как недостаток интерфейса SPI можно отметить избыточное число сигнальных связей.

Сформулируем требования к межмодульному интерфейсу, учитывающие его функциональное назначение и свободные от описанных выше недостатков. Разрабатываемый межмодульный интерфейс должен иметь следующие технические характеристики:

- аппаратно реализованную цикличность обменов;
- последовательную пакетную передачу данных с минимальным числом сигнальных связей между абонентами;
- максимальную пропускную способность обменов потоками данных в полудуплексном режиме за счет отсутствия пауз и упрощенного формата пакетов;
- стабильность периода разовой циклической транзакции;
- стабильность фазы транзакций.

Некоторые из перечисленных характеристик не являются очевидными. Их актуальность будет пояснена ниже.

### Асимметричный межмодульный интерфейс

На основе названных требований был разработан "асимметричный" межмодульный интерфейс [5], предназначенный для обменов информацией между периферийными устройствами и центральным вычислителем.

На рис. 4 показана событийно-временная диаграмма циклического взаимодействия ведущего (центрального вычислителя) и ведомого (оконечного устройства). Каждая транзакция обмена информацией между ведущим и ведомым распадается на восемь фаз.

На рис. 4 приняты следующие обозначения:

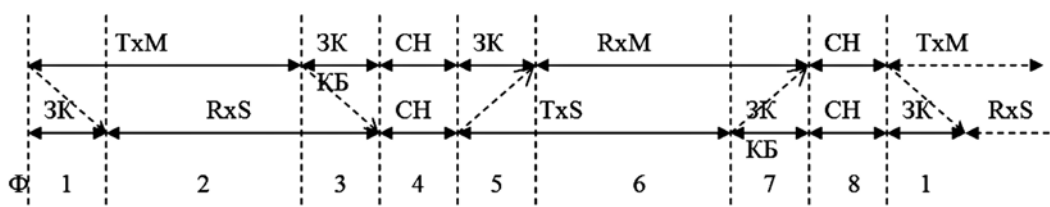
- ✓ Ф — фазы;

- ✓ ЗК — задержка канала, выбрана равной длительности одного битового интервала;
- ✓ ТхМ — данные, передаваемые ведущим;
- ✓ RxS — данные, принимаемые ведомым;
- ✓ КБ — стоповый бит, равный 1, для заряда линии связи в состоянии "пауза" перед переключением направления;
- ✓ СН — битовый интервал смены направления передачи информации;
- ✓ RxM — данные, принимаемые ведущим;
- ✓ ТхS — данные, передаваемые ведомым.

Принцип работы межмодульного интерфейса заключается в следующем: ведущий передает ведомому пакеты вместе с контрольным кодом. Далее наступает межпакетная пауза длительностью в один битовый интервал, которая нужна для смены направления передачи информации. В это время линия находится в состоянии единицы, а ведомый анализирует контрольный код. Если контрольный код правильный, то он выдает в линию нулевой уровень — стартовый бит ответного пакета. Обнаружение ведущим стартового бита подтверждает наличие синхронизации машин состояний абонентов и возможность приема ведущим входящего пакета от ведомого. После приема ведущим ответного пакета сразу начинается очередная транзакция.

Свойство асимметричности межмодульного интерфейса объясняется централизованной структурой системы управления, построенной по принципу "вынесенной руки". В "центре" системы — центральном вычислителе — реализованы не только функция расчетной подсистемы ЦСУ, но и функция управления связью с периферией. В случае сбоя межмодульных интерфейсов реакция на сбой реализуется в центральном вычислителе, следовательно, расположенный в нем трансивер межмодульного интерфейса должен обладать свойством ведущего устройства, а трансивер межмодульного интерфейса в периферийном устройстве — роль ведомого. Поэтому интерфейс имеет в названии определение "асимметричный".

Машина состояния ведущего:



Машина состояния ведомого: |

Рис. 4. Событийно-временная диаграмма взаимодействия ведущего и ведомого



Рис. 5. Структура межмодульного пакета

Межмодульные пакеты управления и состояния имеют одинаковую структуру, показанную на рис. 5.

Каждый межмодульный пакет состоит из четырех полей: стартового бита, поля данных, поля контрольного кода (CRC) и стопового бита (паузы).

*Стартовый бит* от ведущего является признаком начала очередной циклической транзакции. Активный уровень стартового бита от ведомого сигнализирует ведущему, что он корректно принял пакет и машины состояний узлов работают согласованно. В случае сбоя в битовом интервале стартового бита пакета от ведомого выставляется пассивный уровень, и ведущий понимает, что необходимо запустить процедуру восстановления синхронизации машин состояний.

Длина *поля данных* определяется числом потоков передаваемых данных и их разрядностью и выбирается фиксированной в ходе проектирования системы.

Интерфейс контролирует *контрольным кодом*. Набор полей, которые должны циркулировать между двумя модулями, фиксирован для конкретного устройства. Поэтому требование о стабильном периоде транзакции не является для нас ограничивающим.

Функцией *стопового бита* является заряд линии данных до единичного уровня. После окончания передачи единичный уровень сохраняется в линии в течение всего времени смены направления обменов, и на его фоне можно четко распознать нулевой уровень стартового бита ответного пакета.

По сравнению с интерфейсами других типов отдельное поле адреса в пакете межмодульного интерфейса отсутствует. Поскольку выбор абонента выполняет "центр" и обмен всегда осуществляется с конкретным абонентом, адресация проводится по "подключению". Процедура доступа к среде передачи данных отсутствует по той же причине.

Рассмотрим подробнее процедуру восстановления синхронизации машин состояний абонентов. Из-за наличия в интерфейсе одной сигнальной линии для передачи информации о нормализации можно использовать только временные

параметры. При восстановлении синхронизации последовательность фаз переключения машины состояний ведущего сохраняется. Ведомый синхронизируется с ведущим в рамках пакетной транзакции такой же длительности, как рабочая. Для передачи поля синхронизации используется интервал поля данных рабочего пакета.

### Заключение

Асимметричный межмодульный интерфейс предоставляет возможность реализации концепции "вынесенной руки" с небольшими затратами аппаратных средств. Возможность организации быстрых связей с удаленными периферийными устройствами позволяет упростить их до уровня, не требующего модернизации в жизненном цикле системы управления, и исключает тем самым необходимость изменения алгоритмов управления на уровне периферии.

Предлагаемый интерфейс работает циклично и непрерывно, имеет простую структуру пакетов, несложный механизм управления обемами, максимальную пропускную способность в полудуплексном режиме и возможность согласованной работы с информационной средой цифровых систем управления.

### Список литературы

1. Клячко Л. М., Острецов Г. Э. Проектирование высоконадежных систем автоматического управления движением корабля. М.: Физмалит, 2010. 136 с.
2. НОУ ИНТУИТ. Топология шина. Основы локальных сетей. М.: НИЯУ "МИФИ", 2005. 4 с.
3. Холопов Ю. А., Ле Ба Чунг, Нгуен Тхань Чунг, Чан Ван Хань. Особенности реализации распределенных систем управления на основе аппаратных сетевых решений // Информационные технологии. 2016. Т. 22, № 7 (22). С. 494—498.
4. Новицкий А. Синхронный последовательный интерфейс SPI в микроконтроллерах "от А до Я" и его реализация на примере ADuC70xx фирмы Analog Devices. Часть 1 // Компоненты и технологии. 2009. № 3. 7 с.
5. Ле Ба Чунг, Холопов Ю. А. Межмодульный интерфейс // Тезисы докладов 43-й Международной молодежной научной конф. "Гагаринские чтения". Москва, 05—20 апреля 2017 г." М.: МАИ, 2017. 758 с.

**Le Ba Chung**, Graduate Student, e-mail: chungbaumanvietnam@gmail.com,  
Moscow Institute of Physics and Technology (State University),  
**Ju. A. Holopov**, Leader Engineer,  
Lebedev Institute of Precision Mechanics and Computer Engineering

## Asymmetrical Inter-Module Interface

*Inter-module communications in a digital control system based on the principle of "outstretched hand" are considered in this article. A simple asymmetric inter-module interface for transferring information between peripheral devices and a computer is proposed. The interface is characterized by non-complex exchange control mechanism, simple packet structure and high data density in the packet, which allow quick "transparent" communications between remote control system devices and a central computer.*

**Keywords:** digital control system, "outstretched hand" principle, inter-module communication, central computer, peripherals

### References

1. **Kljachko L., Ostrecov G.** Proektirovanie vysokonadezhnyh sistem avtomaticheskogo upravlenija dvizheniem korablja, Moscow, Fizmalit, 2010. 136 p. (in Russian).
2. **NOU INTUIT.** Topologija shina. Osnovy lokal'nyh setej, Moscow, "MIFI". 2005, 4 p. (in Russian).
3. **Holopov Ju. A., Le Ba Chung, Nguyen Thanh Trung, Tran Van Khanh.** Osobennosti realizacii raspredelennyh sistem

upravljenija na osnove apparatnyh setevykh reshenij, *Informacionnye tehnologii*, vol. 22, no. 7, pp. 494—498 (in Russian).

4. **Novickij A.** Sinhronnyj posledovatel'nyj interfejs SPI v mikrokontrollerah "ot A do Ja" i ego realizacija na primere ADuC70xx firmy Analog Devices. Chast' 1, *Komponenty i tehnologii*, 2009, no. 3 (in Russian).

5. **Le Ba Chung, Holopov Ju. A.** Mezhd modul'nyj interfejs, *Tezisy dokladov 43-j Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchnoj konferencii "Gagarinskie chtenija"*. Moskva, 05—20 aprelja 2017 g., Moscos, MAI, 2017, 758 p. (in Russian).