

На правах рукописи

Королев Евгений Валерьевич

**Разработка унифицированного стека сетевых
протоколов для полевых шин корабельных систем
управления техническими средствами**

Специальность 05.13.06 . Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами (судостроение)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2011

Работа выполнена в ОАО «Концерн «НПО «Аврора»

Научный руководитель кандидат технических наук
Третьяков Владимир Александрович

Официальные оппоненты доктор технических наук
Хвощ Сергей Тимофеевич
кандидат технических наук
Михайлов Вадим Олегович

Ведущая организация Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН

Защита диссертации состоится 26 декабря 2011 года в 12 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 411.003.01 при ОАО «Концерн «НПО «Аврора» по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Карбышева 15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОАО «Концерн «НПО «Аврора».

Автореферат разослан 25 ноября 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор

А.А. Шальто

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Структура корабельных систем управления техническими средствами (СУ ТС) в большинстве случаев является распределенной, что обусловлено размерностью объекта управления и требованиями по живучести и надежности СУ ТС. Функции управления при такой структуре реализуются вычислительными приборами, объединенными с помощью межприборных сетевых каналов обмена. Время реакции такой системы на изменения состояния объекта управления и управляющие воздействия должно быть детерминированным, поскольку процессы управления, реализуемые в СУ ТС, выполняются в реальном времени. В свою очередь, время реакции данной системы во многом определяется эффективностью межприборных сетевых каналов. Эффективность сетевых каналов принято характеризовать такими статистическими параметрами, как средняя задержка передачи пакетов, пропускная способность и средний коэффициент загрузки канала. Эффективность является одним из показателей качества сетевого канала, определяющих выбор того или иного типа канала. Другими показателями качества, влияющими на выбор канала, являются отказоустойчивость, обеспечение гарантированного времени доставки сообщений, наличие резервирования, автоматическая реконфигурация, цена.

Анализ используемых в корабельных системах управления межприборных сетевых каналов, относящихся к разряду полевых шин, выявил в их числе несколько наиболее распространенных типов. К ним относятся каналы *МАНЧЕСТЕР* (ГОСТ 52070-2003, ГОСТ 26765.52-87, *MIL-STD-1553B*), *CAN* (*CAN2.0A*, *CAN2.0B*), *RS-485*. В дальнейшем изложении эти каналы будут называться **типовыми**. Канал *МАНЧЕСТЕР* обеспечивает физическое резервирование линий связи и детерминированный доступ к среде передачи. Он обладает повышенной помехоустойчивостью. Канал *CAN* позволяет минимизировать загрузку процессора за счет аппаратно реализованных функций уровня передачи данных и транспортного уровня. К таким функциям относятся: приоритетный доступ к среде передачи, контроль достоверности данных посредством циклических избыточных кодов (*CRC*) и достоверная доставка пакетов. К достоинствам канала *RS-485* можно отнести низкую стоимость и высокую распространенность.

Следует отметить, что ко всем рассматриваемым базовым сетевым каналам при их использовании в СУ ТС предъявляются особые требования в части обеспечения гарантированного времени доставки сообщений, доставки сообщений с размером, превышающим максимально допустимый размер пакета для канального уровня, резервирования каналов обмена и автоматической реконфигурации сети в случае отказов. Данные сетевые каналы не обеспечивают реализации перечисленных требований или обеспечивают их не в полной мере. Для реализации этих требований используются программные средства. Однако главной проблемой, возникающей при использовании этих каналов, является несовместимость протоколов верхних уровней (здесь и далее имеется в виду эталонная семиуровневая модель взаимодействия открытых систем) и, как следствие этого, отсутствие единого программного интерфейса для функциональных программ. Это не позволяет использовать одинаковые программные модули для различных каналов.

Опыт эксплуатации и особенности существующей реализации типовых каналов позволили выявить следующие недостатки. Передачей сообщений в канале *МАНЧЕСТЕР* может управлять только один абонент, называемый контроллером канала. Эта особенность затрудняет использование канала в распределенных корабельных системах, где требуется высокая отказоустойчивость. Другая особенность этого канала заключается в малой эффективности его использования, возникающей из-за сложности оптимизации планирования обмена в системах с различными конфигурациями сетей.

Канал *CAN* не позволяет передавать полезные данные объемом более восьми байт, не гарантирует время доставки низкоприоритетных сообщений, а протоколы верхних

уровней для этого канала не обеспечивают резервирование каналов обмена и автоматическую реконфигурацию.

Протоколы верхних уровней для канала *RS-485* не обеспечивают программный интерфейс, единый с каналами *МАНЧЕСТЕР* и *CAN*.

На основании указанных выше особенностей, разработка и отладка сетевого программного обеспечения становится довольно сложной задачей для каждой вновь разрабатываемой системы. Это связано с необходимостью использования различных конфигураций и типов сетей, определяемых особенностями конструкций конкретных типов кораблей.

Таким образом, актуальной задачей является разработка набора взаимосвязанных сетевых протоколов различных уровней, называемого стеком, унифицированного для типовых каналов с обеспечением более высокого, по сравнению с существующими протоколами, уровня эффективности использования сетевых и вычислительных ресурсов.

Целью диссертационной работы является разработка унифицированного стека сетевых протоколов для типовых каналов, обеспечивающего эффективность использования сетевых и вычислительных ресурсов, снижение стоимости разработки корабельных систем управления техническими средствами. Разрабатываемый стек сетевых протоколов должен обладать высокой эффективностью и, вместе с тем, обеспечивать межсистемную и межканальную унификацию, надежность и отказоустойчивость.

Для достижения указанной цели в диссертации решены следующие задачи:

- 1) выполнен анализ протоколов типовых сетевых каналов;
- 2) разработана структура многоуровневого унифицированного стека сетевых протоколов с оптимальным распределением функций между уровнями;
- 3) исследованы дисциплины планирования и разработан эффективный способ планирования обмена для канала *МАНЧЕСТЕР*;
- 4) разработан универсальный метод передачи функций контроллера канала для канала *МАНЧЕСТЕР*;
- 5) разработано программное обеспечение, реализующее унифицированный стек сетевых протоколов;
- 6) выполнен анализ показателей эффективности передачи данных при использовании унифицированного стека сетевых протоколов.

Научная новизна работы. В процессе работы получены следующие научные результаты, которые выносятся на защиту:

- 1) способ оптимального распределения функций между уровнями;
- 2) структура унифицированного стека сетевых протоколов;
- 3) способ планирования обмена для канала *МАНЧЕСТЕР*, обеспечивающий равномерное распределение времени использования канала между абонентами и гарантирующий доступ к каналу в течение детерминированного временного интервала;
- 4) универсальный метод передачи функций контроллера для сетей с выделенным узлом обслуживания доступа к каналу.

Методы исследования. В работе использованы элементы теории массового обслуживания и методы моделирования на основе языка *GPSS*, предназначенного для имитационного моделирования систем массового обслуживания.

Публикации и апробация работы. Универсальный метод передачи функций контроллера канала и способ планирования обмена для канала *МАНЧЕСТЕР* защищены патентом РФ № 2209521, МПК 7, Н 04 L12/00, Н 04 L12/28 от 29.04.2002. По теме диссертации опубликованы девять научных работ, одна из которых — в издании из перечня ВАК (журнал «Морской вестник»). Основные результаты диссертационной работы докладывались на научных конференциях в ФГУП «НПО «Агат» (М., 2005) и ЦКБ МТ «Рубин» (СПб., 2006), а также на конференции «МОРИНТЕХ-2008» (СПб., 2008).

Практическая ценность работы состоит в разработке унифицированного стека сетевых протоколов для корабельных систем управления техническими средствами и его программной реализации, обеспечивающей интерфейс прикладного уровня, унифицированный для различных типовых сетевых каналов. Использование унифицированного стека сетевых протоколов и его программной реализации позволяет существенно уменьшить объем и стоимость вновь разрабатываемого ПО для различных корабельных СУ ТС, уменьшить затраты на отладку и сопровождение сетевых аппаратно-программных средств, обеспечив высокую эффективность использования сетевых каналов обмена и вычислительных ресурсов. Результаты работы внедрены в большом числе корабельных систем управления техническими средствами, созданных и создаваемых в настоящее время в ОАО «Концерн «НПО «Аврора».

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка источников, приложения. Объем диссертации 141 страница. Она содержит 34 рисунка и шесть таблиц. Список источников содержит 60 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обозначены основные недостатки существующих подходов к использованию сетевых каналов *МАНЧЕСТЕР* (*ГОСТ 52070-2003*, *ГОСТ 26765.52-87*, *MIL-STD-1553B*), *CAN*, *RS-485*, относящихся к разряду полевых шин, которые широко используются в корабельных системах управления. Обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы **цель** и **задачи**, которые необходимо решить для её достижения, а также приведены **научные результаты**, выносимые на защиту, и сведения о **научной новизне**, **практической ценности**, **внедрении** и **апробации** результатов работы.

В первой главе рассмотрены особенности применения эталонной модели взаимодействия открытых систем – *OSI (Open System Interconnection)* для базовых межприборных каналов *CAN*, *RS-485*, *МАНЧЕСТЕР*, используемых в системах управления реального времени. Для протоколов обмена, рассматриваемых в данной диссертационной работе, различия между *MIL-STD-1553B*, *ГОСТ 26765.52-87* и *ГОСТ Р 52070 – 2003* не являются существенными, поэтому любой из каналов по этим стандартам в тексте данной работы обозначается словом «*МАНЧЕСТЕР*». Приведен обзор традиционных подходов к планированию обмена в канале *МАНЧЕСТЕР* на основе статического расписания.

В главе проведен сравнительный анализ протоколов верхнего уровня для указанных межприборных каналов и предложен показатель относительной функциональности сетевого уровня.

Каждому уровню в эталонной модели соответствует вес, равный единице. Тогда показатель относительной функциональности сетевого уровня F удобно задать числом уровней, функциональность которых реализована на данном уровне. В результате анализа данных, приведенных в первой главе, получено распределение функций по уровням сетевых протоколов для ряда рассмотренных межприборных каналов и протокола *TCP/IP*.

На основании соотнесения уровней функциональности рассматриваемых межприборных каналов и стека протоколов *TCP/IP* показана необходимость реализации трехуровневой модели для унифицированного стека сетевых протоколов, поскольку в этом случае обеспечивается независимость прикладного уровня от типа канала при минимальном числе сетевых уровней.

Вторая глава работы посвящена обзору существующих дисциплин планирования обмена применительно к возможности их использования для планирования обмена в канале *МАНЧЕСТЕР*. В ней рассмотрены как традиционные дисциплины планирования *FCFS – First Come First Send* (первым пришел, первым послан), приоритетные очереди, так и современная дисциплина, такая как *WFQ – Weight Fair Queuing* (взвешенная справедливая очередь).

Недостатком дисциплины планирования *FCFS* является зависимость времени обслуживания от статистических характеристик входящих потоков из-за наличия общей очереди для пакетов различных абонентов. Поэтому, при наличии нерегулярного (среднеквадратичное отклонение больше среднего значения интенсивности входного потока) входного потока хотя бы от одного из абонентов, данный способ планирования не сможет одновременно обеспечить малую задержку в очереди и малый процент потерянных пакетов.

Дисциплина планирования приоритетных очередей не обеспечивает гарантированной задержки обслуживания, поскольку непрерывно поступающие более приоритетные пакеты могут полностью заблокировать обслуживание менее приоритетных пакетов.

Основным преимуществом дисциплины *WFQ* по отношению к дисциплинам *FCFS* и приоритетной очереди является гарантированная пропускная способность и предсказуемая задержка передачи независимо от статистических характеристик входных потоков.

Однако эта дисциплина не обладает достаточной простотой реализации, что важно для применения в канале *МАНЧЕСТЕР*. Кроме того, использование весовых коэффициентов приведет к нежелательной зависимости уровня передачи данных, на котором должен реализовываться алгоритм планирования обмена, от прикладного уровня. Другим недостатком такого решения является сложность определения весовых коэффициентов, связанная со сложностью оценки требуемых пропускных способностей для различных абонентов при непериодическом режиме обмена.

На основе изложенного делается вывод о необходимости разработки оригинального алгоритма планирования обмена, совмещающего преимущества дисциплины *WFQ* и простоту реализации.

Третья глава работы посвящена разработке многоуровневого унифицированного стека сетевых протоколов для типовых межприборных каналов. Унифицированный стек сетевых протоколов для типовых межприборных каналов обмена, применяемых в системах управления реального времени, должен обеспечивать эффективную передачу данных по используемым в корабельных системах управления каналам. Одним из показателей эффективности является пропускная способность канала на прикладном уровне. Чем меньше затраты времени на поддержку протоколов, лежащих между физическим и прикладным уровнями, тем ближе значение максимальной пропускной способности на прикладном уровне к пропускной способности физического уровня, которая, как правило, указывается в характеристиках сетевых каналов. Очевидно, что для этого размер заголовка, в котором передается информация, необходимая для реализации унифицированного стека сетевых протоколов, должен быть минимален и не должен превышать размер пакета, наименьший из допустимых для используемых каналов.

Оптимальное распределение функций между уровнями является необходимым условием для минимизации размера заголовка пакета и затрат процессорного времени на выполнение всех сервисов, реализуемых протоколом. Очевидно, что чем большее число сетевых уровней реализовано в стеке сетевых протоколов, тем больше избыточной информации потребуется передавать в заголовках пакетов и тем выше накладные расходы времени. Поэтому семиуровневая эталонная модель сетевого взаимодействия *OSI* не может быть применена непосредственно для унифицированного стека сетевых протоколов реального времени. С другой стороны, как было показано в главе 1 диссертации, уменьшение числа уровней в стеке протоколов до двух (не считая физический уровень) приводит к высокой зависимости между прикладным уровнем и уровнем передачи данных, что не позволяет создавать единые программные интерфейсы прикладного уровня.

Прямое использование протокола *TCP/IP*, обладающего необходимыми свойствами в части унификации, невозможно как по причине низкой эффективности для

канала *МАНЧЕСТЕР* (длина заголовка только сетевого уровня составляет 20 байт – почти треть от максимального размера пакета), так и ввиду невозможности передачи заголовка такого размера по сети *CAN*. Поэтому в работе предложен другой способ разделения функций между уровнями, предполагающий выделение в унифицированном стеке сетевых протоколов трех реализуемых программно уровней — расширения уровня передачи данных, транспортного и прикладного.

В протоколе расширения уровня передачи данных должны быть программно реализованы функции, не обеспечиваемые базовым уровнем передачи данных. Например, для канала *МАНЧЕСТЕР* в протоколе расширения уровня передачи данных должны быть программно реализованы сетевая адресация пакетов (разрядность адреса восемь бит), равноправный доступ к среде передачи данных, гарантированная доставка пакетов для адресных посылок и ряд других функций, подробно описываемых в разд. 3.4 диссертации. Для канала *CAN* перечень функций, программно реализуемых протоколом расширения уровня передачи данных, может быть гораздо меньше в силу наличия более развитого аппаратного сервиса уровня передачи данных.

В качестве прототипа для набора реализуемых транспортных протоколов оптимальным выбором является стек протоколов *TCP/IP*, обладающий наибольшей универсальностью. Поэтому на транспортном уровне унифицированного стека сетевых протоколов предлагается реализовать несколько функциональных аналогов транспортных протоколов из стека протоколов *TCP/IP*:

- протокол передачи пакетов (функциональный аналог *IP*-датаграммы без фрагментации);
- протокол передачи массивов с дополнительной логической адресацией (функциональный аналог *User Datagram Protocol (UDP)*, совмещенного с *IP*-фрагментацией);
- протокол эхо-контроля доступности абонента (функциональный аналог *Internet Control Message Protocol (ICMP)*).

Транспортные протоколы должны допускать использование различных протоколов расширения уровней передачи данных помимо канала *МАНЧЕСТЕР*, в частности, протоколов расширений уровней передачи данных, реализованных для *CAN* и *RS-485*. Структура уровней унифицированного стека сетевых протоколов показана на рис.1.

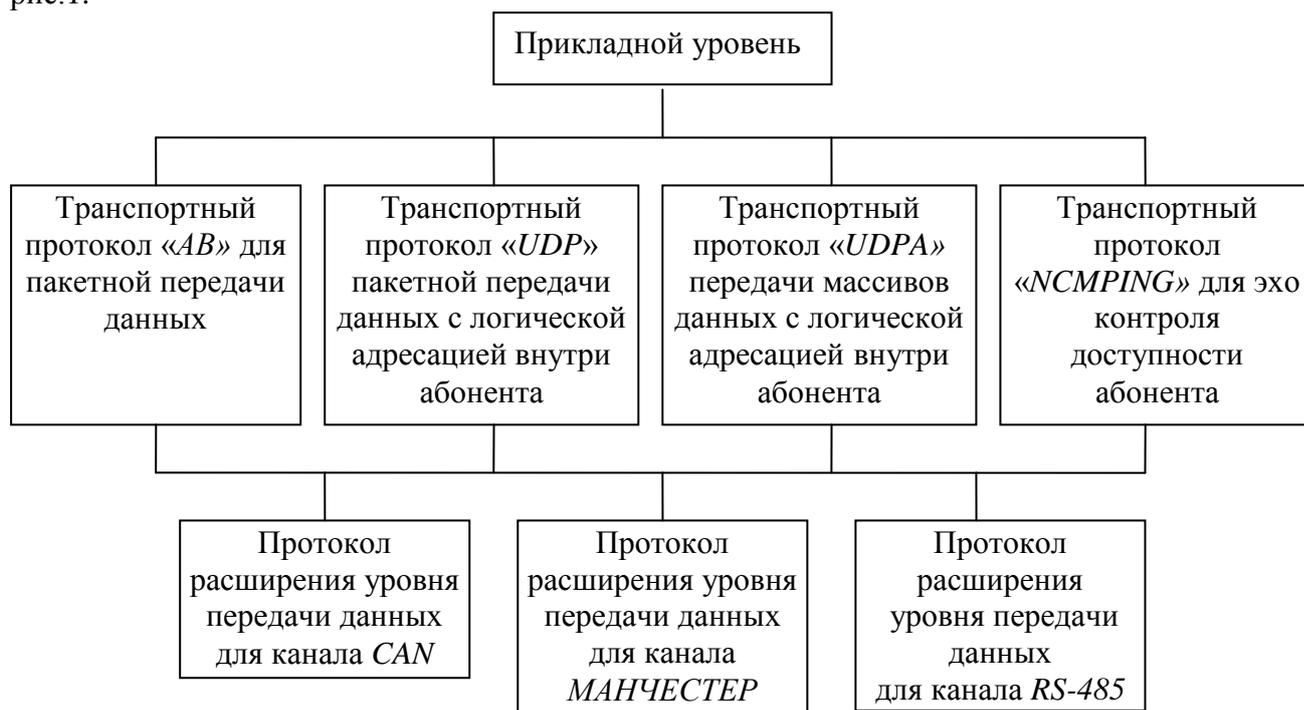


Рис. 1. Структура унифицированного стека сетевых протоколов

Для приведенной структуры унифицированного стека сетевых протоколов в настоящей работе предложен способ перераспределения функций между уровнями стандартной *OSI*-модели. Это перераспределение, приведенное в табл.1, обеспечивает минимизацию издержек на передачу заголовков пакетов. Необеспечиваемые стандартным уровнем передачи данных функции реализуются в расширениях уровней передачи данных. Перечень функций, реализуемых в этих расширениях, зависит от канала передачи. Для канала *CAN* объем этих функций минимален, для канала *RS-485* – максимален в силу отсутствия пакетизации данных.

Таблица 1. Распределение функций по уровням унифицированного стека сетевых протоколов

Прикладной уровень	Приложения прикладного уровня		
Уровень представления	1. Программы удаленной отладки <i>nftp, ntelnet</i> на базе протокола <i>UDPA</i>		
Сеансовый уровень	2. Программа получения времени <i>timeasker (NCMPING)</i>		
	3. Программы обмена управляющими сигналами и данными <i>СУТС (AB, UDP, UDPA)</i>		
Транспортный уровень	Унифицированные протоколы транспортного уровня <i>AB, UDP, UDPA, NCMPING</i>		
Сетевой уровень	Расширение уровня передачи данных	Расширение уровня передачи данных	Унифицированный уровень передачи данных
Уровень передачи данных	<i>CAN</i>	<i>МАНЧЕСТЕР</i>	для <i>RS-485</i>
Физический уровень			<i>RS-485</i>

На рис. 2 приведено распределение относительной функциональности по уровням для унифицированного стека сетевых протоколов, полученное на основе табл. 1.

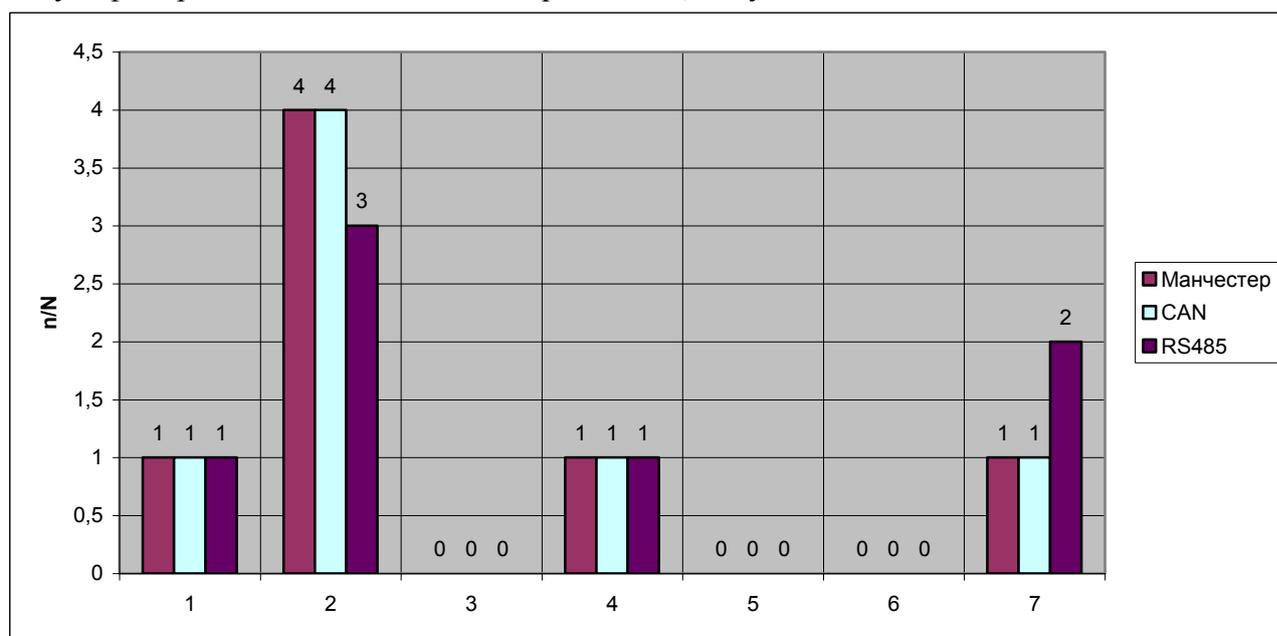


Рис. 2. Распределение относительной функциональности уровней эталонной модели для унифицированного стека сетевых протоколов

Из этого распределения следует, что относительная функциональность прикладного уровня для любого из поддерживаемых каналов не превышает 2.5. Согласно

полученным в главе 1 диссертации результатам, такое значение относительной функциональности прикладного уровня является необходимым условием для обеспечения независимости прикладного уровня от канала обмена.

Таким образом, предложенное распределение функций можно считать оптимальным, поскольку за счет введения всего одного дополнительного транспортного уровня и введения дополнительных уровней расширения передачи данных удалось добиться независимости прикладного уровня от уровня передачи данных и обеспечить достаточно малый размер служебных данных, что позволяет применить унифицированный стек сетевых протоколов для канала *CAN*.

В расширении протокола уровня передачи данных для канала *RS-485* реализована функция пакетизации двоичных данных, адресации и защиты данных от искажения контрольным кодом. Число информационных бит в передаваемых символах должно быть равно восьми, а число стоп-бит должно быть одинаковым для всех абонентов. Структура пакетов, передаваемых по магистрале *RS-485*, показана на рис. 3.

1 байт признак начала пакета	3 - 8 байт заголовка расширения уровня передачи данных и транспортного уровня	0 – 255 байт поле данных	2байта CRC16	2 байта признак конца пакета
------------------------------	---	--------------------------	--------------	------------------------------

Рис. 3. Структура пакета для магистрала *RS-485*

При передаче пакета для идентификации начала и конца пакета используются соответственно символ признака начала (*0x1F*) и символ признака конца пакета (*0x2F*). Если в полях пакета (в том числе в поле *CRC16*) содержится символ признака начала или символ признака конца пакета, то он удваивается (вставляется его копия). Если символ признака конца пакета находится в конце пакета, то за ним следует стоп-символ (*0x55*), необходимый для упрощения процедуры приёма пакета. При приёме пакета копии символов *0x1F* и *0x2F* в полях пакета удаляются. Протоколу верхнего уровня пакет передаётся без байт идентификации начала и конца пакета.

Приём пакета абонентом канала осуществляется только при совпадении адреса в поле *DST* заголовка уровня передачи данных (рис. 4) с адресом абонента или с широковещательным адресом.

1 байт DST	1 байт SRC	3 бит Type	2 бит Резерв	1 бит Lcsc	2 бит Резерв	0 - 5 байт заголовка транспортного уровня
Адрес приёмника	Адрес источника	Тип протокола верхнего уровня		Бит длины CRC		

Рис. 4. Формат заголовков уровня передачи данных и транспортных уровней

Каждый абонент имеет уникальный адрес в диапазоне от 0 до 254 включительно. Адрес 255 используется для широковещательных посылок. Если после приёма признака начала пакета и поля *DST* обнаруживается несовпадение адреса абонента со значением поля *DST*, и при этом поле *DST* не равно 255 — не совпадает с широковещательным адресом, то дальнейший анализ содержимого пакета останавливается вплоть до приёма признака начала следующего пакета. Если адреса совпали, то выполняется сборка пакета, удаление управляющих символов из потока байт и вычисление *CRC16*. Поле *CRC16* находится в конце пакета и содержит циклический избыточный код, вычисляемый начиная с поля адреса и заканчивая последним байтом поля данных по стандартному (*CCITT*) алгоритму *CRC16*, с начальным значением 0. Длина поля *CRC16* может составлять один или два байта, в зависимости от значения бита длины *CRC16*. При обнаружении признака конца пакета и совпадении вычисленной *CRC16* со значением

поля *CRC16* пакет передаётся протоколам транспортного уровня в соответствии со значением поля типа протокола.

Для канала *МАНЧЕСТЕР* расширение протокола уровня передачи данных обеспечивает сетевую адресацию пакетов (разрядность адреса восемь бит); равноправный доступ к среде передачи данных и эффективное использование всей полосы канала для различных конфигураций сети и сетевых потоков за счет оригинальной дисциплины обслуживания; гарантированную доставку пакетов для адресных посылок, надежность и отказоустойчивость сети.

Надежность обеспечивается автоматической передачей функций контроллера канала между абонентами сети (без необходимости использования выделенных контроллеров). Эффективность использования полосы канала обеспечивается за счет предоставления всей полосы канала одному абоненту, если нет других абонентов, нуждающихся в передаче данных, и в равномерном распределении полосы между несколькими абонентами, одновременно передающими данные.

Предлагаемая дисциплина обслуживания состоит в том, что полосу канала делят на заданное число временных сегментов, в начале каждого из которых из выделенного узла обслуживания (далее контроллера) выдают ширококвещательную синхронизирующую посылку, в которой содержится собственный адрес A_k . При этом адреса абонентов, в том числе контроллера, выбирают в диапазоне $[0..A_m]$, где A_m – максимально возможное число обслуживаемых абонентов, и переход абонента с адресом A в режим контроллера осуществляют при отсутствии ширококвещательных синхронизирующих посылок через интервал времени T_n , который отсчитывают от момента приема последней ширококвещательной синхронизирующей посылки и вычисляют по формуле:

$$T_n = \begin{cases} T_k + K * T_{\zeta}(A - A_k), & A_k < A \\ T_k + K * T_{\zeta}(A_m + A - A_k), & A_k > A \end{cases}, \quad (1)$$

где T_k – длительность перехода в режим контроллера, K – число циклов обслуживания, в течение которых не было приема синхронизирующих посылок, T_{ζ} – длительность периода цикла обслуживания, A_m – максимальное значение адреса абонента.

Затем происходит опрос доступных абонентов и определение суммарного числа N_c ответов, содержащих заявки на обслуживание. Число заявок N_z от каждого абонента, обрабатываемых в одном цикле обслуживания, определяется по формуле:

$$N_z = 1 + \text{mod} \left[\frac{T_{\zeta}}{T_o + T_z * N_c} \right], \quad (2)$$

где T_z – время обслуживания одной заявки, T_o – среднее время опроса абонентов, T_{ζ} – период цикла обслуживания.

Период цикла обслуживания T_{ζ} выбирается из условия:

$$T_{\zeta} > (T_o + T_z * A_m) / 2. \quad (3)$$

Обслуживание каждого абонента продолжается до достижения равенства числа обслуженных заявок вычисленной ранее величине N_z . После этого происходит переход к обслуживанию другого абонента.

Реализация данной дисциплины обслуживания сводится к выполнению определенных действий со стороны программы по отношению к устройству интерфейса *МАНЧЕСТЕР*. Программа, выполняемая на выделенном узле обслуживания, перед началом циклического опроса всех доступных абонентов сети с периодом T_{ζ} формирует в памяти устройства последовательного интерфейса командное слово сообщения формата 10^1 и слово данных, которое содержит собственный адрес контроллера A_k . Адреса абонентов, в том числе и контроллера, как отмечено выше, выбираются в

¹ Групповая команда управления со словом данных (согласно стандарту *МАНЧЕСТЕР*)

диапазоне $[0..A_m]$. Далее выдается команда на передачу сообщения по формату 10, в результате которой устройство выдает на шину широковещательную синхронизирующую посылку. На стороне оконечного устройства выполняется прием каждой такой посылки и синхронизация (обнуление) внутреннего таймера в момент этого приема. Необходимость перехода в режим контроллера для абонента с адресом A , работающего в режиме оконечного устройства, наступает при отсутствии широковещательных синхронизирующих посылок через интервал времени T_n , отсчитываемый от момента приема последней широковещательной синхронизирующей посылки. На рис. 5 приведена временная диаграмма передачи функций контроллера абоненту с адресом $A_n > A_k$.

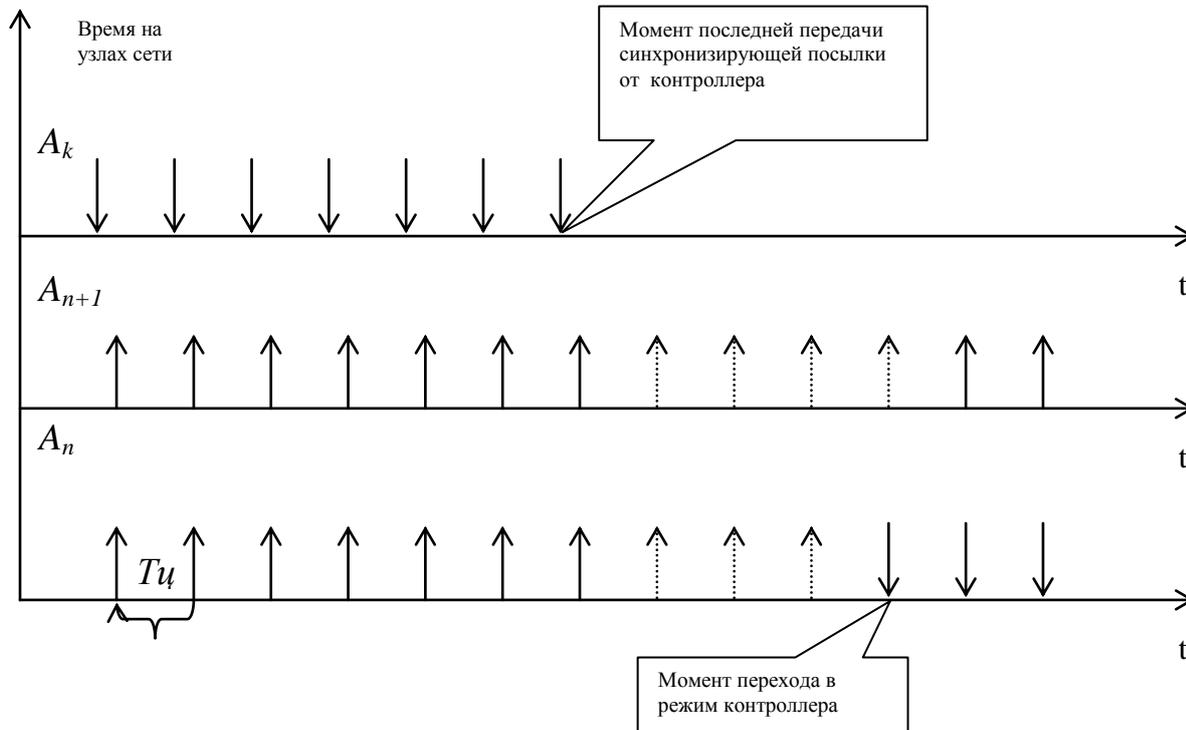


Рис. 5. Временная диаграмма передачи функций контроллера

Дальнейшая последовательность действий программы на стороне контроллера выглядит следующим образом. В памяти устройства формируется цепочка запросов формата 5 для всех доступных абонентов. Подается команда на выполнение первого запроса в цепочке. Далее происходит автоматическое выполнение цепочки запросов, в результате которого в памяти устройства сохраняются данные, принятые от оконечных устройств. Если в принятом слове содержится признак запроса на передачу, то данный запрос сохраняется в таблице запросов на обслуживание. После анализа всех полученных данных происходит опрос абонентов, запросы от которых были помещены в таблицу. Если какой-либо абонент не ответил два раза подряд, то он помечается как недоступный. После получения всех ответов и определения суммарного числа ответов N_c , содержащих заявки на обслуживание, контроллер определяет числа заявок N_z от каждого абонента, которое он сможет обработать в одном цикле обслуживания с длительностью периода T_u по формуле (2).

Согласно этой формуле в случае $N_c = A_m$ целая часть будет равна нулю и, следовательно, контроллеру необходимо обработать в цикле только одну заявку. Период T_u выбирается из условия (3), что обеспечивает баланс между средней задержкой на обслуживание в случае полной загрузки сети и в случае минимальной загрузки. Обслуживание каждого абонента продолжается до достижения равенства числа обслуженных заявок вычисленной ранее величине N_z . После этого контроллер переходит к обслуживанию другого абонента. Независимость алгоритма обслуживания от числа доступных абонентов и максимизация полосы пропускания обеспечиваются за счет

удаления из списка обслуживания абонентов, которые не ответили два раза подряд, и за счет перемещения в список доступных всех возможных абонентов с периодом большим, чем $T_{ц}$, как минимум в два раза, и минимально необходимым для требуемой задержки восстановления обмена с абонентом.

Таким образом, предлагаемый способ организации обмена обеспечивает автоматическую передачу функций контроллера абонентам, находящимся в режиме оконечного устройства, с обеспечением автоматического выбора одного из абонентов, готовых перейти в режим контроллера. При этом для всех оставшихся абонентов сохраняется возможность обмена информацией с абонентом, перешедшим в режим контроллера.

Как следствие вышеуказанных функциональных характеристик, эта дисциплина обмена может без каких-либо модификаций применяться в системе с переменным числом абонентов. При этом обеспечивается эффективное использование канала обмена.

В четвертой главе работы проведен анализ эффективности разработанного стека протоколов в части пропускной способности, задержек передачи, потребных вычислительных ресурсов и эффективности использования цифрового сжатия данных для повышения пропускной способности. Получены выражения, позволяющие оценить пропускную способность для каналов *МАНЧЕСТЕР*, *CAN* и *RS-485* на канальном и прикладном уровнях. Пропускная способность на канальном уровне ниже, чем на физическом, а на прикладном уровне ниже, чем на канальном. Это снижение пропускной способности связано с тем, что, помимо полезных данных, передаваемых в канал, каждый уровень добавляет служебные данные. Дополнительный вклад в снижение скорости передачи вносят интервалы времени, в течение которых запрещена передача данных в канал.

В работе показано, что максимально достижимая пропускная способность V_c на канальном уровне для канала *МАНЧЕСТЕР* составляет 91116 байт/сек. Пропускная способность унифицированного стека сетевых протоколов для канала *МАНЧЕСТЕР* на прикладном уровне при обмене между двумя оконечными устройствами и максимальном числе абонентов в сети составляет 54895 байт/сек.

Для канала *CAN* пропускная способность на канальном уровне в случае использования 11-битного идентификатора и физической скорости передачи 1 Мбит/сек составляет 62992 байт/сек. Для 29-битного идентификатора пропускная способность V_c составит 53691 байт/сек. На прикладном уровне унифицированного протокола при использовании протокола *AB* и 11-битного идентификатора пропускная способность V_c составит 55118 байт/сек.

Пропускная способность унифицированного стека сетевых протоколов на прикладном уровне для канала *RS-485* составит:

$$V_c = \frac{N * V_p}{(N + N_{be} + N_{crc} + N_{pkt} + N_{stuff}) * 10},$$

где N — число байт данных в пакете, V_p — битовая скорость передачи, N_{be} — байты признаков начала и конца пакета (три байта), N_{crc} — байты контрольного кода *CRC16* (два байта), N_{pkt} — байты заголовка пакета (три байта), N_{stuff} — байты, добавленные при обнаружении в данных признаков начала и конца пакета.

Для пакета с 58 байтами данных, пропускная способность составит:

$$V_c = \frac{58 * V_p}{(58 + 8,5) * 10} = 0,0872 * V_p \text{ (байт/сек)}.$$

Для сравнения пропускных способностей на прикладном уровне для каналов *МАНЧЕСТЕР*, *CAN* и *RS-485* предложен показатель эффективности использования канала, определяемый как отношение пропускной способности на прикладном уровне к скорости передачи:

$$K_{\text{э}} = \frac{V_c * 8}{V_p},$$

где V_c – пропускная способность (байт в секунду), V_p – битовая скорость передачи.

Максимальная эффективность соответствует значению $K_{\text{э}} = 1$, когда пропускная способность равна физической скорости передачи. Для расширения протокола уровня передачи данных канала *RS-485* показатель эффективности $K_{\text{э}} = 0,7$ (для пакета, содержащего 58 байт данных). Показатели эффективности унифицированного стека сетевых протоколов для каналов *МАНЧЕСТЕР* и *CAN* составят соответственно 0,452 и 0,441.

Сравнение эффективности использования канала для унифицированного стека сетевых протоколов на прикладном уровне между каналами *МАНЧЕСТЕР* и *CAN* показывает, что при большем уровне сервиса в части доступа к каналу передачи расширение протокола уровня передачи данных для канала *МАНЧЕСТЕР* обеспечивает большую эффективность использования. Большее значение эффективности для канала *RS-485* объясняется меньшим уровнем сервиса, реализованного в расширении уровня передачи данных. В частности, отсутствием механизма равноправного доступа к каналу, который реализуется средствами прикладного уровня.

Проведено экспериментальное измерение загрузки процессора в зависимости от интенсивности сетевого потока. Согласно результатам, приведенным на рис. 6, загрузка наименее производительного из используемых процессоров (*Pentium 133*) не превышает 16 % при потоке в 40 Кбайт в секунду между двумя каналами, обслуживаемыми одним процессорным модулем.

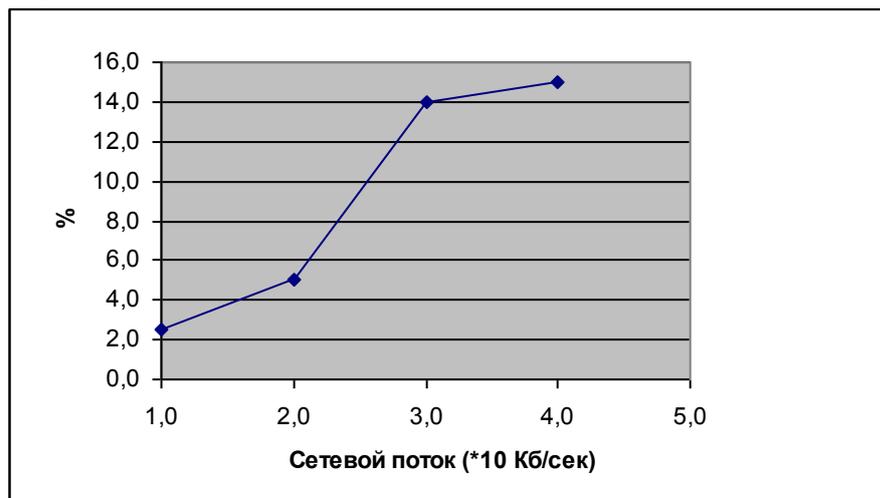


Рис. 6. График зависимости загрузки процессора от сетевого потока

Такая загрузка вполне допустима для выполнения требований по реакции системы управления реального времени. С другой стороны, практика использования данного канала показывает, что реальная средняя загрузка канала не превышает 10 Кбайт в секунду. Загрузка процессора при такой загрузке канала составляет около 2,5 %, благодаря чему выполнение унифицированного сетевого ПО практически не влияет на работу прикладных программ в реальном времени. Наблюдаемый на графике нелинейный рост загрузки и уменьшение этого роста с её увеличением можно объяснить влиянием механизмов кэширования памяти.

С использованием языка *GPSS* и пакета программ *GPSS World* создана моделирующая программа, и с её помощью проведено моделирование алгоритма планирования обмена, реализованного в расширении протокола уровня передачи данных для канала *МАНЧЕСТЕР*.

В результате моделирования получен сравнительный график зависимостей средних времен ожидания в очереди от среднего времени между заявками для

статического расписания и для способа обмена, реализованного в расширении протокола уровня передачи данных для канала *МАНЧЕСТЕР*. Этот график приведен на рис. 7.

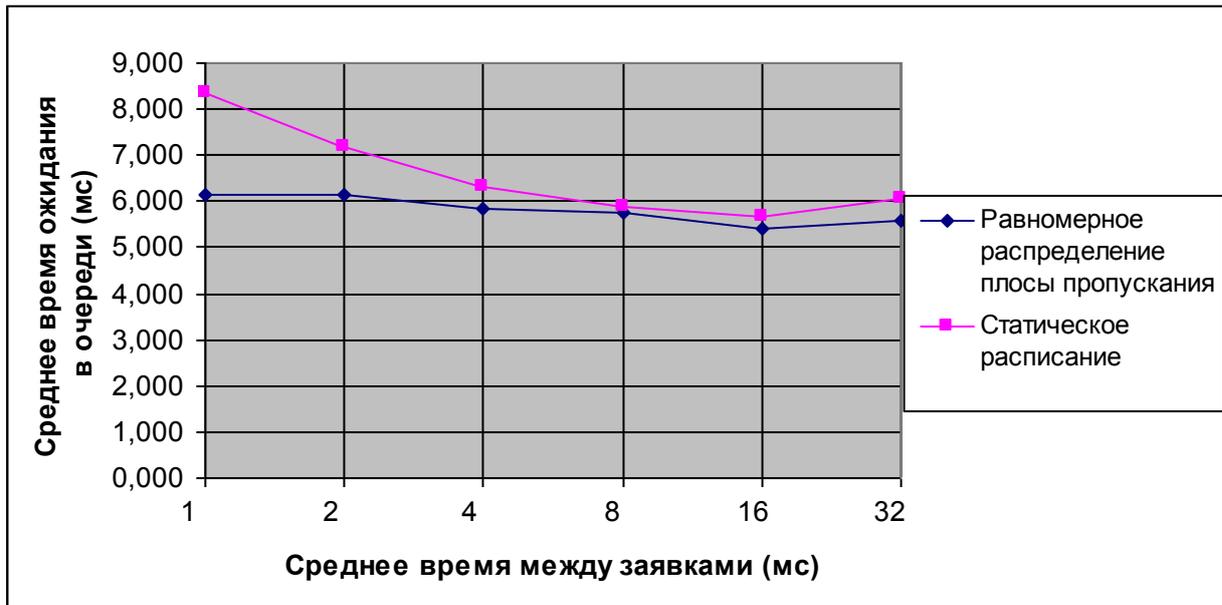


Рис. 7. Зависимость среднего времени ожидания в очереди от среднего времени между заявками на передачу для различных способов планирования обмена

Сравнение приведенных зависимостей показывает, что среднее время ожидания в очереди при использовании способа обмена, реализованного в расширении протокола уровня передачи данных для канала *МАНЧЕСТЕР*, может быть снижено на 30 % (при загрузке канала 0,652) по сравнению с временем ожидания в очереди для статического расписания.

В качестве критерия эффективности использования сжатия данных Q предложено использовать отношение времени, необходимого для передачи несжатых данных, к времени сжатия и передачи данных.

$$Q = N \cdot V / (N_{сж} \cdot V + T_{сж}),$$

где $N_{сж}$ – объем данных после сжатия (байт), V – скорость передачи данных (байт/с), $T_{сж}$ – время затрачиваемое на сжатие данных, N – объем исходных (несжатых) данных.

Испытания транспортного протокола *UDPA* с включением опции сжатия передаваемых данных, проведенные на реальных системах, показали, что средний коэффициент сжатия данных $K_{сж}$ составляет около двух, а время сжатия $T_{сж}$ 64 байт равно 50 мкс, что более чем в десять раз меньше, чем время передачи несжатых данных такого же объема по каналу *МАНЧЕСТЕР*, составляющее около 700 мкс. Таким образом, увеличение пропускной способности сети Q , достигнутое в результате использования сжатия, составляет:

$$Q = 700 / (350 + 50) = 1.75.$$

Таким образом, пропускная способность сети при использовании сжатия может быть увеличена приблизительно в два раза без аппаратной модернизации, благодаря чему улучшаются динамические характеристики СУ и увеличивается максимальное число обрабатываемых сигналов.

В пятой главе работы описана структура ПО, разработанного для реализации унифицированного стека сетевых протоколов, и показана область внедрения разработанных протоколов обмена и ПО, в котором они реализованы.

Областью применения разработанного ПО являются программные комплексы систем управления реального времени, к которым относится большинство корабельных систем управления техническими средствами. Поэтому для минимизации программных издержек архитектура унифицированного сетевого ПО предполагает разделение на менеджер межприборной сети, реализующий функции программного интерфейса для прикладного уровня и функции транспортного уровня, и на драйверы каналов обмена, в

которых реализован интерфейс к сетевым модулям и дополнительный канальный уровень.

Областью внедрения унифицированного стека сетевых протоколов являются корабельные системы управления техническими средствами, обладающие распределенной сетевой структурой. К таким системам, как правило, относятся системы управления общекорабельными техническими средствами (СУ ОКС), системы управления главной энергетической установкой (СУ ГЭУ), электроэнергетические системы (СУ ЭЭС), системы управления маневрированием (СУМ). Внедрение унифицированного ПО в КСУ ТС «Фрегат-11356» позволило отказаться от выделенных приборов, реализующих только функции контроллера канала. Совмещение в центральных пультах и периферийных приборах функций контроллера канала с работой по прямому назначению позволило получить экономический эффект в размере себестоимости четырех приборов.

Унифицированный протокол обмена для сетей стандарта *МАНЧЕСТЕР* был внедрен в следующих СУ ТС: СУ ОКС «Зайсан-20380», СУ ЭЭС «Баксан-20380», СУ ГЭУ «Радуга-20380», ЦКСУ «Этна-20380», СУ ГЭУ «Радуга-21630», СУ ЭЭС «Баксан-21630», СУ ГЭУ «Буря-15А», СУ ГЭУ «Шторм-56Э» для кораблей проекта 956Э.

Не менее широкое внедрение унифицированный протокол получил в СУ ТС: КАС «Литий» (СУ ОКС «Лена»), СУ ОКС «Палладий», СУМ «Коррунд-И», СУ ОКС «Молибден-И», КСУ ТС «Булат-Б» (СУЗ «Алиот-Б»), СУМ «Селенит-Б», СУ ЭЭС «Луга-Б», СУ ОКС «Радий-Б», ЦКСУ «Ирис-Б»), КСУ ТС «Булат-Я».

Следует отметить, что во всех перечисленных СУ ТС (за исключением СУ ГЭУ «Буря-15А», СУ ГЭУ для кораблей проекта 956Э) используется одинаковое унифицированное ПО, реализующее унифицированный стек протоколов в среде ОС РВ *QNX-4*. Для СУ ГЭУ Буря-15А и СУ ГЭУ «Шторм-56Э» кораблей проекта 956Э используется модифицированная версия унифицированного ПО для ОС РВ *QNX-6*.

Дополнительный экономический эффект от использования унифицированного сетевого ПО заключается в сокращении времени отладки функциональных программ СУ за счет использования разработанных утилит удаленной отладки, обеспечивающих передачу и запуск программ непосредственно по сети *МАНЧЕСТЕР*. Разработка и использование этих утилит без прекращения работы системы по прямому назначению стало возможным, благодаря высоким скоростным характеристикам унифицированного стека сетевых протоколов и реализующего его сетевого ПО.

Дополнительный резерв пропускной способности для любого из каналов поддерживаемого сетевым ПО унифицированного стека сетевых протоколов обеспечивается, благодаря возможности использования встроенного алгоритма сжатия передаваемых данных путем включения соответствующей опции в конфигурационном файле сетевого ПО. Включение этой опции позволило в два раза повысить пропускную способность на прикладном уровне для управляющих сетей СУ ГЭУ «Радуга-21630» и СУ ЭЭС «Баксан-21630».

В заключении сформулированы основные результаты работы:

- 1) предложен способ передачи функций контроллера для канала *МАНЧЕСТЕР* и других сетей с выделенным узлом обслуживания доступа к каналу;
- 2) предложена дисциплина обслуживания доступа к каналу *МАНЧЕСТЕР*, обеспечивающая равномерное распределение времени использования канала между абонентами и снижение времени ожидания передачи;
- 3) с использованием пакета программ *GPSS World* проведено моделирование предложенного способа разделения канала, подтвердившее снижение времени ожидания передачи по сравнению со статическим расписанием обмена;
- 4) предложена структура унифицированного стека сетевых протоколов для систем управления реальным временем, обеспечивающая независимость прикладного уровня от используемых каналов обмена и проведен анализ существующих стеков, в ходе которого подтверждена оптимальность предложенного решения;

- 5) разработано ПО, реализующее функции унифицированного стека сетевых протоколов для корабельных систем управления реального времени и обеспечивающее единый программный интерфейс прикладного уровня независимо от используемых протоколов канального и транспортного уровня;
- 6) разработаны приложения прикладного уровня, использующие ПО унифицированного стека сетевых протоколов и обеспечивающие удаленный запуск программ и передачу файлов, что позволяет проводить отладку и изменение программ на любых узлах сетей стандартов *МАНЧЕСТЕР*, *RS-485*, *CAN*, используемых для передачи управляющей информации корабельных систем управления.

На перечисленные выше способы передачи функций контроллера обслуживания и доступа к каналу получен патент РФ № 2209521, Н 04 L12/00, Н 04 L12/28 от 29.04.2002.

Публикации по теме диссертации

1. *Евланников Д. Л., Королев Е. В., Третьяков В. А.* Опыт разработки и внедрения общесистемного ПО КСУТС // Системы управления и обработки информации. 2000. Вып.2, с. 140 – 145.
2. *Блинов С. В., Королев Е. В.* Повышение эффективности использования магистрали ГОСТ 26765.52-87 (MIL-STD-1553B) в системе «ОНЕГА-11356» // Системы управления и обработки информации. Юбилейный Выпуск. 2002, с. 89 – 96.
3. *Королев Е. В.* Способ обмена для сети с выделенным узлом обслуживания доступа к каналу. Действующий патент РФ № 2209521, Н 04 L12/00, Н 04 L12/28. Приоритет от 29.04.2002. Изобретения, полезные модели. Официальный бюллетень Российского агентства по патентам и товарным знакам. 2003. № 21.
4. *Королев Е. В.* Удаленная отладка программного обеспечения с использованием канала ГОСТ 26765.52-87 (MIL-STD-1553B) // Системы управления и обработки информации. 2003. Вып 5, с. 129 – 131.
5. *Королев Е. В.* Цифровое сжатие данных в каналах межприборного обмена // Системы управления и обработки информации. 2004. Вып 8, с. 104 – 107.
6. *Королев Е. В.* Материалы IV молодежной научно-технической конференции «Взгляд в будущее-2006». СПб.: ФГУП «ЦКБ МТ «Рубин». 2006, с. 38 – 41.
7. *Королев Е. В.* Повышение эффективности использования магистралей ГОСТ26765.52-87 (MIL-STD-1553B), RS-485, CAN в корабельных системах управления. // Морской вестник. 2006. № 4, с. 164 – 172.
8. *Королёв Е. В.* Информационные технологии сопровождения программного обеспечения систем управления техническими средствами. Седьмая Общероссийская конференция по морским интеллектуальным технологиям. Материалы конференции «Моринтех-2008». СПб.: НИЦ «Моринтех». 2008, с. 211 – 212.
9. «Менеджер межприборной сети». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011 611493.

Личный вклад. В работах, выполненных в соавторстве, личный вклад автора в равных долях с соавторами.