

УДК 004.057.4

## ОРГАНИЗАЦИЯ СЕТИ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ УСТАВОК ИСТОЧНИКАМ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ОБМОТОК УПРАВЛЕНИЯ ТОКАМАКА КТМ

*А.А. Дериглазов, С.В. Федин, В.М. Павлов, Ю.Н. Голобоков, А.М. Ли*

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия*

Управление технологическими процессами в экспериментальных энергетических установках предполагает наличие надёжной и быстрой связи между подсистемами распределённой АСУ ТП для обработки управляющих воздействий со стороны контроллера и оператора. В данной статье авторы продемонстрировали возможность организации сети реального времени с жёстко зафиксированным циклом управления с помощью свободно распространяемого фреймворка Xenomai для операционной системы Linux. Результаты применены на Казахском материаловедческом токамаке КТМ.

**Ключевые слова:** токамак, источники питания, последовательный интерфейс, протокол передачи, реальное время, драйвер реального времени.

## REAL-TIME NETWORK ORGANIZATION FOR TRANSFERRING SETPOINTS TO PULSE POWER SUPPLY SOURCES OF TOKAMAK KTM CONTROL WINDINGS

*A.A. Deriglazov, S.V. Fedin, V.M. Pavlov, Yu.N. Golobokov, A.M. Lee*

*Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia*

Experimental energy installations the work of which is based on high-speed processes challenges the developers of its control systems to arrange a fast and reliable communication between subsystems to process the control actions from the controllers. To face this challenge, the real-time networks, built using serial interfaces, should be considered. In this paper the authors consider the possibility of building such network capable of small information messages transmitting with a hard-fixed transmission speed. The result was applied to the thermonuclear facility of Kazakhstan Tokamak for Material Testing (KTM) for communication of Plasma Control System (PCS) and Digital Control System (DCS) of tokamak windings power sources.

**Key words:** tokamak, power sources, serial interface, transfer protocol, real-time, real-time driver.

DOI: 10.21517/0202-3822-2020-43-4-39-44

### ВВЕДЕНИЕ

Казахстанский материаловедческий токамак (КТМ) — яркий пример физической установки, в которой системам управления требуется обрабатывать управляющие воздействия с высокой точностью и за минимальный период времени [1]. Для стабильной работы установки необходимо решить задачу организации сетевого взаимодействия между системой управления плазмой (СУП) и системой цифрового управления (СЦУ) универсальными тиристорными преобразователями (УТП), которые предназначены для питания обмоток электромагнитной системы установки.

СЦУ УТП токамака работает в режиме жёсткого реального времени с циклом управления, равным 1600 мкс. СЦУ должна получать уставки в виде углов управления открытием тиристорных УТП со стороны СУП [2].

### ФИЗИЧЕСКАЯ СРЕДА КАНАЛА СВЯЗИ

Рассматриваемые подсистемы СЦУ и СУП располагаются внутри реакторного зала КТМ, но находятся в разных помещениях. Это создаёт требование к длине линии связи не менее 100 м. Кроме того, так как линия связи проходит через реакторный зал, необходимо предусмотреть защиту от наведённых электромагнитных помех со стороны электромагнитной системы (ЭМС) токамака.

Учитывая перечисленные требования к физическому каналу связи, было принято решение использовать экранированную витую пару (FTP-кабель) с металлическими корпусами разъёмов.

Для проверки эффективности экранирования было проведено осциллографическое исследование процесса передачи пакетов в условиях проведения тестового пуска установки. В результате исследова-

ния наведённых помех зарегистрировано не было. Таким образом было заключено, что стандартного экранирования FTP-кабеля вполне достаточно.

### ИНТЕРФЕЙС КАНАЛА СВЯЗИ

Экранированная витая пара в качестве среды передачи может использоваться различными интерфейсами. Однако для создания максимально унифицированной сети, абонентом которой может быть фактически любая ЭВМ, входящая в состав аппаратного обеспечения токамака КТМ, было принято решение использовать встроенные во фронтальную панель одноплатных ЭВМ последовательные интерфейсы. В качестве альтернативного варианта рассматривался Ethernet с RTnet framework [3], но для его использования необходимо подключать к плате-носителю СЦУ дополнительную сетевую PCI-карту, так как входящие в состав ЭВМ Ethernet-порты уже используются для связи СЦУ с системами автоматизации верхнего уровня и для сетевого взаимодействия между управляющей и диагностической ЭВМ [4]. К сожалению, в некоторых СЦУ это не представляется возможным из-за отсутствия свободных PCI-слотов.

### СЕТЕВОЙ ПРОТОКОЛ

В качестве протокола сети разработан пользовательский протокол, кадр которого состоит из 14 байт полезных данных, в которых содержится информация о значении угла управления открытием тиристорных УТП, а также о комплекте преобразователей, для которых предназначаются данные уставки. Кроме полезной информации, каждое сообщение содержит четыре служебных байта:

- идентификатор начала сообщения (старт байт);
- номер пакета;
- контрольная сумма CRC8;
- резервный байт (для возможной модификации протокола).

Формат кадра протокола представлен в таблице.

Структура информационного сообщения СУП для СЦУ

Старт	№ пакета										Селектор комплектов УТП	Резерв	Контрольная сумма
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
1 байт	10 байт (уставки для СЦУ УТП)										4 байта	1 байт	1 байт
Общая длина пакета 18 байт													

Скорость работы последовательного интерфейса должна обеспечивать передачу как минимум одного сообщения за цикл управления. Стоит уточнить, что приём уставок осуществляется вне цикла управления на аппаратном уровне, результат складывается в буфер, чтение которого в потоке реального времени длится около 100 мкс. Таким образом, процесс считывания пакета практически не влияет на цикл управления, но увеличивает суммарное запаздывание системы, что необходимо учитывать при синтезе регуляторов СУП. Каждое задействованное в САУ устройство, последовательно включённое в контур управления, может внести дополнительное запаздывание величиной от нуля микросекунд до длительности цикла, с которым оно работает. С целью сделать это запаздывание максимально детерминированным принято решение об использовании единого цикла управления, равного 1600 мкс для всех объектов, входящих в контур, с дальнейшей синхронизацией устройств. Таким образом, каждое сообщение (18 байт) должно быть передано и принято в течение временного интервала, равного 1600 мкс.

Учитывая то, что каждый байт пакета передаётся последовательным портом с помощью 10 бит [5] (8 бит данных, 1 старт бит и 1 стоп бит), рассчитаем минимальную необходимую скорость по формуле

$$S = \frac{10N_{\text{bytes}}}{T_{\text{cycle}}} = 112\,500 \text{ бод.} \quad (1)$$

Ближайшее из списка стандартных скоростей значение с небольшим запасом составляет 115 200 бод.

Из-за сравнительно большого расстояния между подсистемами (в среднем 100 м) использование интерфейса RS-232 на расчётных скоростях не представляется возможным, поскольку в таком режиме длина линии не должна превышать 15 м [6]. Однако, если использовать в качестве транспортного интерфейса стандарт RS-485, дальность передачи можно увеличить до 1200 м [7]. Учитывая сказанное, было принято решение использовать интерфейс RS-232 как основной, а RS-485 — как стандарт передачи данных на расстоянии с применением соответствующих преобразований.

### ВНЕДРЕНИЕ РАЗРАБОТАННОГО РЕШЕНИЯ

Итоговая схема передачи управляющих воздействий УТП показана на рис. 1.



Рис. 1. Схема передачи управляющих воздействий

Для того чтобы проверить работоспособность данного технического решения, был использован лабораторный стенд (рис. 2), в состав которого входят одноплатные ЭВМ PCI-6872F (ЦСУ) и MVME5500 (СУП). Обмен информацией осуществляется через встроенные последовательные интерфейсы.

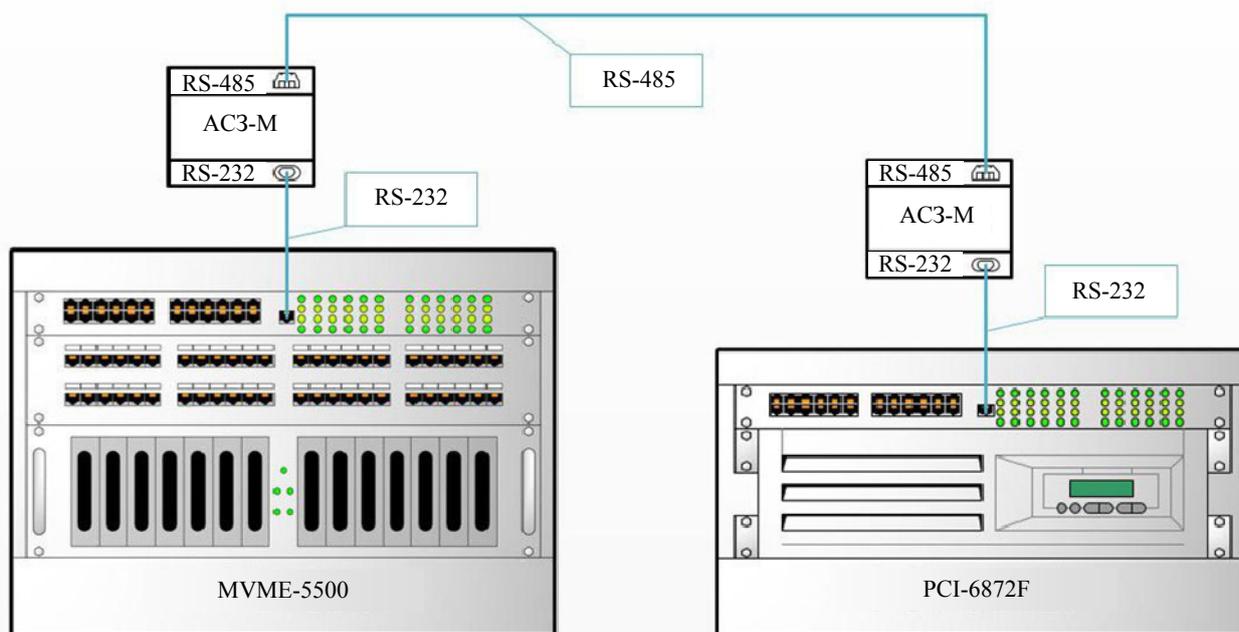


Рис. 2. Схематическое изображение использованного лабораторного стенда

В состав СЦУ реальной установки входят шесть ЭВМ PCI-6872F, отвечающих за управление источниками питания PF1, 2, PF3, 6, PF4, 5, TF, CS, HFC соответственно [2]. В каждой ЭВМ имеется один RS-232-порт, выведенный на фронтальную панель. Таким образом лабораторный стенд имитирует работу связки СУ—СЦУ\_PF1, 2.

В ПО СЦУ предусмотрен алгоритм реагирования на ошибки при передаче информационных пакетов. Если один из пакетов пропущен или повреждён, применяются уставки, актуальные для предыдущего цикла управления. Если количество пропущенных пакетов больше аварийного числа, выполняется остановка эксперимента с инвертированием тока из обмоток электромагнитной системы.

В качестве тестового программного обеспечения лабораторного стенда используется написанное авторами ПО для операционной системы Linux, установленной на обе ЭВМ. Используя полученный аппаратно-программный комплекс, было проведено несколько экспериментов.

Для проверки надёжности системы связи общее время теста должно превышать максимально возможное время реального эксперимента, которое составляет 5 с. При работе тестового ПО передающая сторона посылает 10 000 сообщений длиной 18 байт, содержащих информацию об уставках для всех девяти источников питания с интервалом между сообщениями, равным циклу управления 1600 мкс. С учётом сказанного общее время теста составляет 16 с, что превышает время эксперимента более чем в 3 раза.

Принимающая сторона считывает сообщения из буфера приёма по прерыванию до тех пор, пока не будет превышен таймаут 3200 мкс. После каждого принятого сообщения ставится временная метка. По превышению таймаута программа проверяет количество принятых пакетов, их достоверность и очерёдность, а также выводит в файл значения временных интервалов между принятыми пакетами. В идеальном случае они должны составлять 1600 мкс. Построив график по итоговым данным, были получены результаты, представленные на рис. 3.

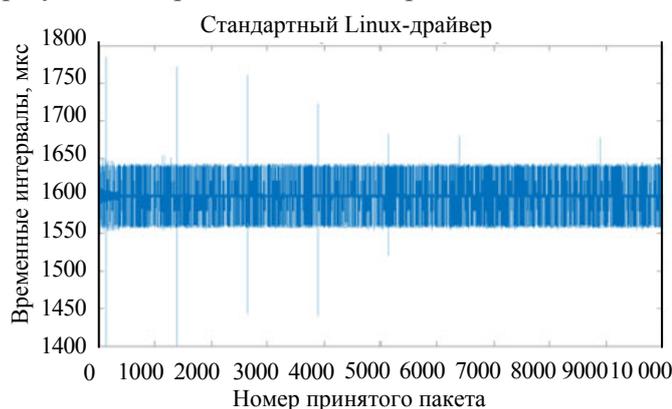


Рис. 3. Графическое отображение результатов контрольного эксперимента

Как видно на рисунке, на протяжении эксперимента наблюдаются весьма значительные отклонения (около  $\pm 40$  мкс) от заданной величины цикла (1600 мкс), кроме того, время от времени происходят случайные выбросы, величина и количество которых могут меняться от эксперимента к эксперименту и достигать значений более 200 мкс, что может привести к пропуску информационного пакета. Причиной данного эффекта, скорее всего, является наличие случайных системных задержек, связанных с работой операционной системы [8]. Если во время проведения эксперимента произойдёт потеря одного пакета, это вряд ли станет причиной аварийной ситуации, но ухудшит управляемость установки. С учётом присутствия ненулевой вероятности пропуска пакетов и возможности увеличения в процессе эксперимента вычислительной нагрузки на ЭВМ эти пропуски могут следовать друг за другом, что, в свою очередь, приведёт к неконтролируемому выпадению целой группы пакетов, что уже является аварийной ситуацией. Таким образом, возникает необходимость в доработке системы связи для исключения вероятности данного исхода и уменьшения амплитуды отклонения временных интервалов от требуемых 1600 мкс.

Возможным решением данной задачи является замена стандартного драйвера последовательного порта на драйвер реального времени. Это влечёт за собой изменения в конфигурации ядра Linux, под управлением которого работают ЭВМ СУП и СЦУ. В качестве операционной системы реального времени было принято решение использовать Xenomai-модификацию ядра Linux [9]. В составе данной модификации присутствует драйвер последовательного порта xeno\_16550A [10]. К сожалению, данный драйвер не имеет поддержки ЭВМ MVME5500, используемой в СУП, но имеет поддержку ЭВМ MVME5100, которая во многом схожа с целевой. После внесения изменений в исходный код драйвера удалось добиться его стабильной работы на ЭВМ MVME5500. Кроме того, изменениям подверглось и тестовое ПО. Средствами API Xenomai в программу добавлен поток реального времени, в котором выполняются операции по приёму и передаче пакетов.

Далее эксперимент был повторён с учётом внесённых изменений в операционную систему, драйверы и ПО. Полученные результаты показаны на рис. 4.

Помимо того, что удалось полностью избавиться от случайных выбросов, значительно уменьшилась амплитуда отклонений от среднего значения. Отклонение величиной около 3 мкс можно считать отличным результатом, позволяющим снизить вероятность потери информационного пакета по причине несоблюдения временных интервалов до минимума. Визуальное сравнение результатов экспериментов до и после модификаций показано на рис. 5.

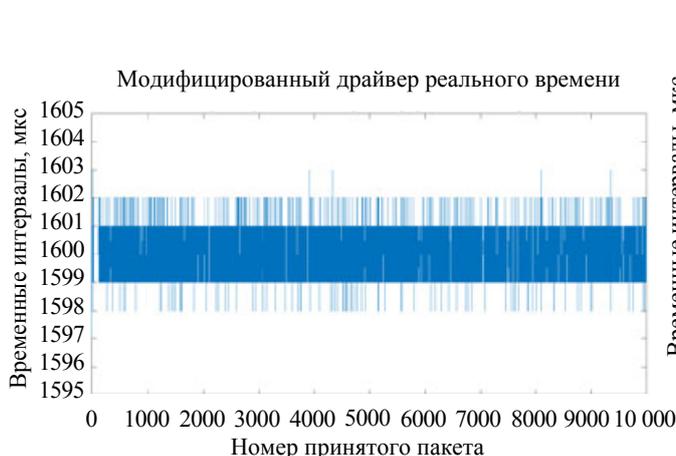


Рис. 4. Графическое отображение результатов эксперимента после модификации операционной системы ЭВМ СУП и СЦУ

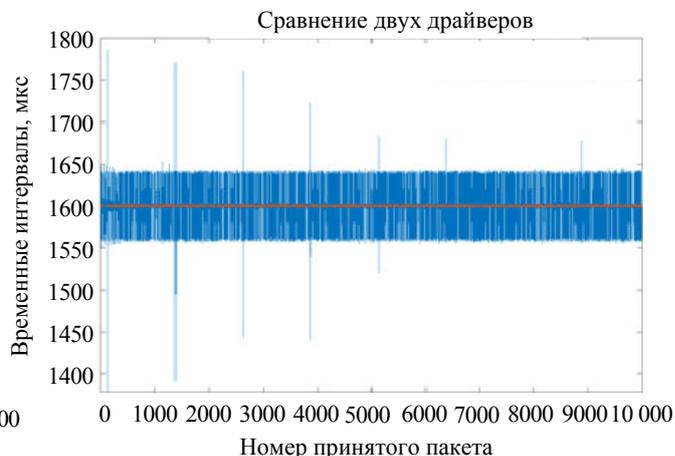


Рис. 5. Сравнение результатов, полученных в ходе экспериментов: — стандартный драйвер, — драйвер реального времени

## ВЫВОДЫ

Модификация драйвера последовательного порта в составе программного обеспечения высокоскоростных систем управления, в частности, токамака КТМ, реализующая сеть реального времени с жёстко фиксированным циклом передачи, способствует более эффективной передаче информационных пакетов между подсистемами и минимизации аварийных ситуаций. Описанный в данной статье метод позволяет обеспечить цикл управления САУ длительностью 1600 мкс. Проведённая в рамках данного исследования работа включает в себя разработку и программную реализацию пользовательского протокола, модификацию драйвера последовательного порта, а также перевод ПО контроллеров СЦУ и СУП в многопоточный режим реального времени. Эти действия позволили сформировать систему связи, способную выполнять функцию гарантированной и своевременной доставки уставок со стороны СУП без внесения существенных изменений в аппаратное обеспечение рассматриваемых подсистем токамака. В совокупности со свободной лицензией применённого программного обеспечения описанное решение является компромиссным для применения на экспериментальных установках с фиксированным циклом управления.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, соглашение № 075-11-2019-013 от 11 октября 2019 г. Идентификатор проекта RFMEFI58519X0007.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Korotkov V.A. et al.** Kazakhstan tokamak for material testing conceptual design and basic parameters. — Fusion Eng. Des., 2001, vol. 56—57, p. 831—835.
2. **Baystrukov K.I. et al.** Control and data acquisition system of tokamak KTM. — AIP Conf. Proc., 2008, vol. 996, № 1, p. 297—306.
3. **Kiszka J., Wagner B.** RTnet — a flexible hard real-time networking framework. — 2005 IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, 2005, vol. 1, p. 449—456.
4. **Mezentsev A. et al.** Advisor information control system for tokamak. — Technological Equipment, 2017, vol. 12, № 23, p. 13113—13121.
5. **Fernald K.W.** Serial Data Interface: pat. US6968472B2 USA. 2005.
6. **Komarinski M.F.** Lengths of Serial Cables [Электронный ресурс]. URL: <https://www.tldp.org/HOWTO/Remote-Serial-Console-HOWTO/serial-distance.html>.

7. **RS485** Quick Guide. Analog Devices [Электронный ресурс]. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/product-selector-card/RS485fe.pdf>.
8. **Сорокин С.** Системы реального времени. — Современные технологии автоматизации, 1997, № 2, с. 22—29.
9. **Barbalace A. et al.** Performance Comparison of VxWorks, Linux, RTAI, and Xenomai in a Hard Real-Time Application. — IEEE Trans. Nucl. Sci., 2008, vol. 55, № 1, p. 435—439.
10. **Kiszka J.** The Real-Time Driver Model and First Applications [Электронный ресурс]. URL: <https://www.xenomai.org/documentation/xenomai-2.2/pdf/RTDM-and-Applications.pdf>.



Алексей Алексеевич Дериглазов, инженер-проектировщик, Отделения ядерно-топливного цикла; Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050 Томск, пр-т Ленина 30, Россия  
aad3@tpu.ru



Сергей Владимирович Федин, аспирант, инженер-проектировщик Отделения ядерно-топливного цикла; Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050 Томск, пр-т Ленина 30, Россия  
fedins.pochta@gmail.com



Вадим Михайлович Павлов, к. техн. н., доцент Отделения ядерно-топливного цикла; Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050 Томск, пр-т Ленина 30, Россия  
pavlov@tpu.ru.



Юрий Николаевич Голобоков, ведущий инженер Центра информационных технологий; Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050 Томск, пр-т Ленина 30, Россия  
golobokov@tpu.ru



Алексей Михайлович Ли, программист Отделения ядерно-топливного цикла; Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050 Томск, пр-т Ленина 30, Россия  
lee@tpu.ru.

Статья поступила в редакцию 21 июля 2020 г.

После доработки 28 августа 2020 г.

Принята к публикации 24 сентября 2020 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2020, т. 43, вып. 4, с. 39—44.