

УДК 004.3

Новая архитектура подчиненных устройств Ethernet POWERLINK на базе программируемых логических интегральных схем

Романов А.М.

МИРЭА - Российский технологический университет,

проспект Вернадского, 78, Москва, 119454, Россия

e-mail: romanov@mirea.ru

Аннотация

В работе решается проблема реализации подчиненных устройств Ethernet POWERLINK на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) с минимальным использованием логических ячеек и блоков памяти. Для этого предлагается новая модульная архитектура, ресурсоемкость которой может гибко настраиваться в зависимости от требуемого функционала. На базе предложенной архитектуры было создано первое в России устройство Ethernet POWERLINK, прошедшее сертификацию Ethernet POWERLINK Standardization Group на соответствие стандарту. По результатам экспериментальных исследований было продемонстрировано, что новая архитектура требует от 3.5 до 9 раз меньше логических ресурсов ПЛИС и до 126 раз меньший объем блочной памяти для реализации устройств Ethernet POWERLINK. Также важным результатом является возможность реализации разработанных решений на базе отечественных микросхем ПЛИС, в том числе в радиационно-стойком исполнении, что позволяет использовать их при создании авиационной и космической техники.

Ключевые слова: полевая шина, программируемые логические интегральные схемы, Ethernet POWERLINK, стандарт 61158, отечественная элементная база.

Введение

Ethernet POWERLINK, наравне с PROFINET IRT, EtherCAT и SERCOS III, является на сегодняшний день одной из наиболее распространённых промышленных полевых шин реального времени на базе Ethernet [1, 2], применяемых в робототехнике, мехатронике и автоматизированных системах управления технологическим процессом (АСУ ТП). Она имеет высокую пропускную способность, обеспечивает точную синхронизацию устройств между собой, возможность информационного обмена с циклами до 200 мкс и джиттером менее 1 мкс. Благодаря открытому стандарту IEEE 61158 и лицензии BSD, под которой распространяется все программное обеспечение, необходимое для создания новых узлов Ethernet POWERLINK, использование данной шины не может быть ограничено со стороны зарубежных правообладателей, что делает её крайне перспективной с точки зрения импортозамещения.

Рассмотрим пример системы управления роботизированной конвейерной линией (рис. 1), информационный обмен в которой реализован при помощи шины Ethernet POWERLINK, с точки зрения реализации отдельных ее элементов.

За реализацию общего закона управления отвечает программируемый логический контроллер (ПЛК) или промышленный компьютер. Он же с точки зрения полевой шины Ethernet POWERLINK является ведущим устройством. Как правило,

устройства данного типа имеют высокую вычислительную мощность и оснащаются полнофункциональными операционными системами реального времени, такими как VxWorks, QNX или Linux с патчем ядра RT PREEMPT. Для построения на их базе ведущего устройства Ethernet POWERLINK существуют готовые программные решения [3-7], построенные на основе открытого стека протоколов openPOWERLINK.

Остальные элементы рассматриваемой системы управления (рис. 1) служат для реализации сформированного закона управления и с точки зрения полевой шины Ethernet POWERLINK являются подчиненными устройствами. Их условно можно разделить на две группы: «сложные» и «простые» устройства (рис. 2).

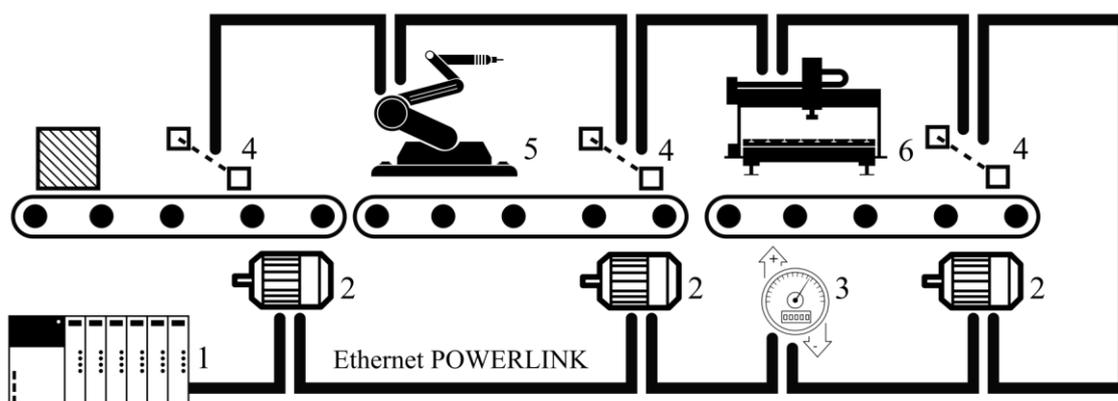


Рис. 1. Пример системы управления роботизированной конвейерной линией с информационным обменом по шине Ethernet POWERLINK. Ведущее устройство: 1 — ПЛК или промышленный компьютер. Подчиненные устройства: 2 — асинхронные приводы, 3 — датчик расхода электроэнергии, 4 — световой барьер, 5 — робот, 6 — упаковочная машина с системой диагностики, подключаемой по полевой шине

Четкая граница разделения между данными группами отсутствует, при этом для каждой из них можно выделить ряд общих особенностей, характерных для входящих в нее устройств.

К «сложным» устройствам относятся роботы, специализированные машины и станки с ЧПУ, подключаемые по полевой шине, многофункциональные сервоприводы, промышленные системы технического зрения и т. д. Основными отличительными признаками данной группы являются: широкий функционал, сложные алгоритмы управления, большой объем данных передаваемых между подчиненным и ведущим устройствами. Как правило, такие устройства имеют высокую вычислительную мощность, а в некоторых случаях они оснащаются полнофункциональными операционными системами. Для реализации функционала Ethernet POWERLINK на их основе, как и в случае с ведущими устройствами, подходят решения на базе openPOWERLINK. При этом стоимость элементов полевой шины несоизмеримо мала по сравнению с себестоимостью «сложного» устройства.

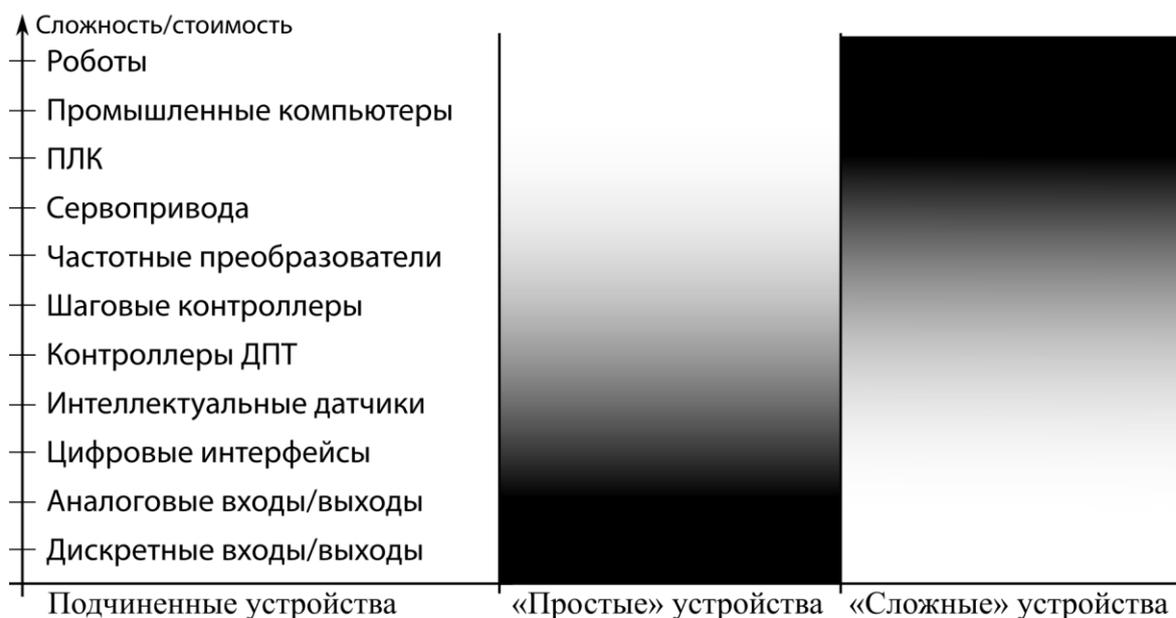


Рис. 2. Условное распределение подчиненных устройств Ethernet POWERLINK на две группы: «сложный» и «простые» устройства. Цветом показана степень соответствия устройств каждой группе (черный цвет показывает максимальное соответствие)

К «простым» устройствам относятся системы дискретного и аналогового ввода/вывода, интеллектуальные датчики, частотные преобразователи и т. д. Отличительными чертами данной группы являются: монофункциональность (например измерение одной физической величины или управление одним исполнительным устройством), простые алгоритмы управления и обработки сигналов, малый объем данных передаваемых между подчиненным и ведущим устройствами. Такие устройства, как правило, реализуются на базе сигнальных процессоров, микроконтроллеров и программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) без использования операционных систем. Себестоимость является ключевой характеристикой устройств данной группы, на которую существенно влияет каждый дополнительный элемент, в том числе компоненты, необходимые для организации связи по полевой шине. При этом количество устанавливаемых «простых» устройств, как правило существенно превосходит количество

«сложных», что делает снижение себестоимости реализации Ethernet POWERLINK актуальным именно за счёт «простых» подчиненных устройств, поскольку это позволит наиболее существенно снизить себестоимость внедрения данной шины в системы управления.

Целью данной работы является разработка новой модульной архитектуры аппаратно-программного обеспечения ПЛИС, предназначенной для реализации «простых» подчиненных устройств Ethernet POWERLINK.

1. Способы реализации подчиненных устройств Ethernet POWERLINK

На сегодняшний день существует три наиболее распространённых способа реализации подчиненных устройств Ethernet POWERLINK. Первым является использование специализированных микросхем, например Hilscher netX. Они позволяют в кратчайшие сроки вывести новое устройство на рынок, добавив в него поддержку не только Ethernet POWERLINK, но и других наиболее распространённых полевых шин, таких как EtherCAT, SERCOS-III или Ethernet/IP. Однако за счёт избыточного функционала данные микросхемы имеют достаточно высокую стоимость, что может быть не существенно при подготовке прототипа или для «сложных» устройств, но становится серьезной проблемой на пути сокращения себестоимости «простого» устройства. Также недостатком использования специализированных микросхем является их плохая взаимозаменяемость, что может привести к существенной переработке как программного, так и аппаратного обеспечения конечных продукта в случае снятия конкретной микросхемы с производства или запрета на ее поставки в Россию.

Более универсальным способом является программная реализация на базе стека протоколов openPOWERLINK, которая может быть выполнена как на базе операционной системы Linux [7], так и на базе микроконтроллера без операционной системы. Стоит отметить, что данный способ не позволяет работать с малыми временами циклов (400 мкс и менее) даже на встраиваемых компьютерах, которые фактически не применяются в «простых» устройствах. Это связано с особенностями информационного обмена в сетях Ethernet POWERLINK (рис. 3) [8]. На каждом цикле, который начинается с SoC пакета (здесь и далее названия пакетов о протоколах передачи, используемых при реализации шины Ethernet POWERLINK даны согласно [8]), ведущее устройство передает каждому подчиненному устройству пакет PollRequest, содержащий уставки для регуляторов и исполнительных устройств, в ответ на который получает от подчиненного устройства пакет PollResponse, содержащий показания датчиков. Синхронную часть цикла завершает пакет SoA, после которого могут передаваться служебные данные, не требующие жесткой привязки ко времени.

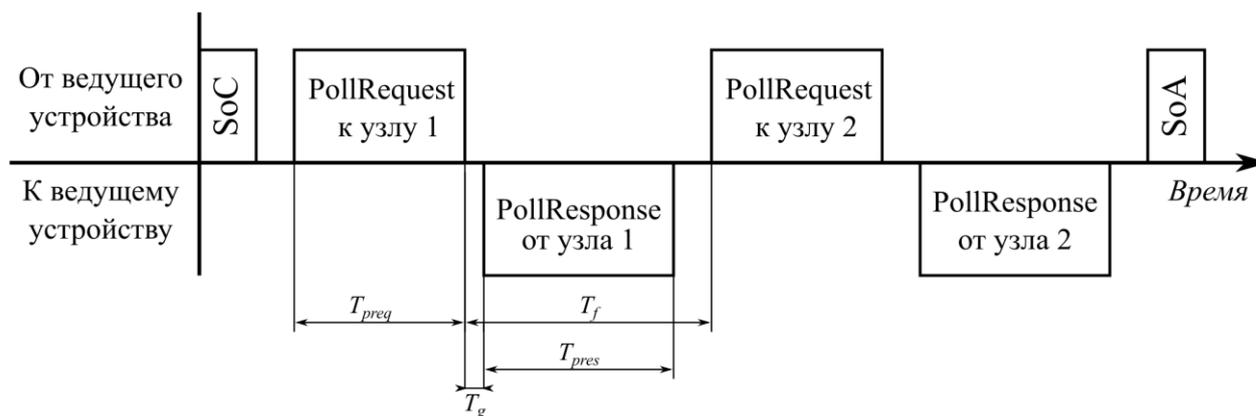


Рис. 3. Порядок информационного обмена в сетях Ethernet POWERLINK

Поскольку время передачи пакетов PollRequest (T_{req}) и PollResponse (T_{pres}) определяется исключительно объемом передаваемых данных между подчиненными и ведущим устройствами, единственным способом уменьшения минимально возможного времени цикла при фиксированном объеме передаваемой информации является сокращение времени T_g между пакетами PollResponse и PollRequest, а также сокращение временного слота T_f на передачу PollResponse, который фактически равен сумме T_g , T_{pres} и T_j , где T_j — максимальный джиттер задержки T_g . При реализации Ethernet POWERLINK на микроконтроллере обработка пакета PollRequest начинается только после того, как он целиком был принят и завершилась проверка контрольной суммы, что не минуемо приводит к увеличению T_g . Интерфейс обмена с микроконтроллером большинства микросхем Ethernet Media Access Control (MAC) включает в себя First-In-First-Out (FIFO) буфер, который не позволяет точно управлять моментом отправки пакета, увеличивая джиттер T_j , а в случае использования операционной системы T_j может оказаться еще больше, увеличиваясь за счет джиттера вносимого драйверами сетевого адаптера. Для

преодоления этих проблем применяется обработка Ethernet пакетов на аппаратном уровне, которая позволяет «на лету» определить предназначенный узлу пакет PollRequest и начать отправку ответного пакета сразу после окончания его приема, снизив T_g до минимально допустимых в сетях Ethernet 960 нс и обеспечив T_j менее 1 мкс. В некоторых микроконтроллерах (например, TI AM335x Sitara) для аппаратной обработки Ethernet пакетов предусмотрено специальное ядро, однако в большинстве случаев разработчики реализуют этот функционал на ПЛИС.

Создание подчиненных устройств Ethernet POWERLINK на базе ПЛИС является наиболее перспективным способом реализации «простых» устройств, поскольку позволяет не только обеспечить работу в циклах менее 400 мкс с джиттером менее 1 мкс, но и реализовать все устройства по принципу системы-на-кристалле на базе одной микросхемы ПЛИС [9-12]. На сегодняшний день на рынке присутствуют ПЛИС в подавляющем большинстве корпусов: от TQFP, позволяющего проводить ремонт в полевых условиях, до миниатюрных BGA корпусов размером 2x2 мм и меньше; изготавливаются микросхемы стойкие к радиации, воздействию сверхнизких и сверхвысоких температур, что позволяет подобрать микросхему под любую задачу. При этом в случае использования ПЛИС практически отсутствуют ограничения на количественный и качественный состав периферии, в то время как периферия микропроцессора строго определена в момент изготовления (например, если на микропроцессоре реализовано 3 интерфейса UART, то реализовать на нем 4 независимых RS-485 не возможно).

Подавляющее большинство описанных реализаций Ethernet POWERLINK при помощи ПЛИС (например, [6, 9, 13-15]), основаны на стеке openPOWERLINK, для которого существуют решения на базе микросхем Xilinx и Altera [7]. Их обобщенная структурная схема представлена на рис. 4.

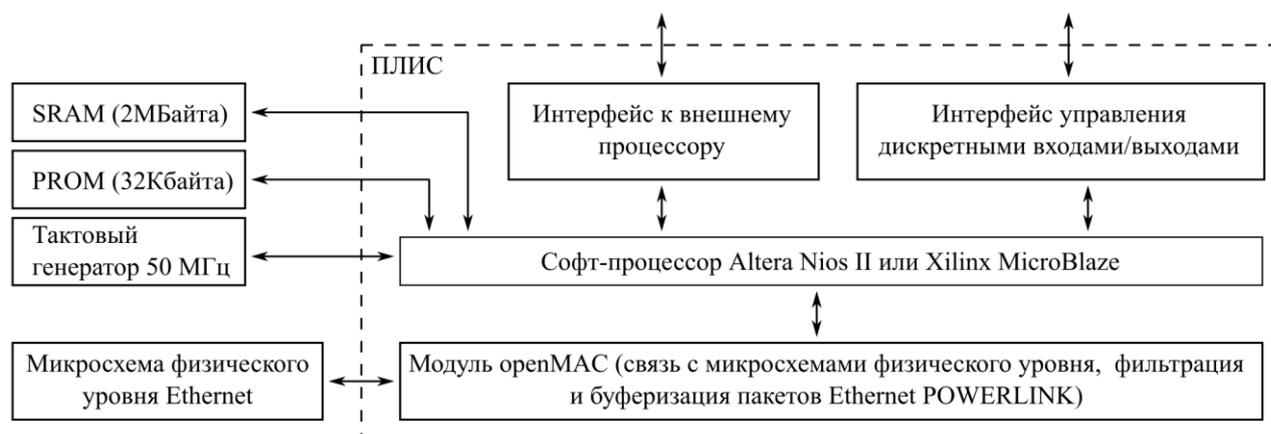


Рис. 4. Структура схема решений Ethernet POWERLINK на базе стека openPOWERLINK

Архитектура данных решений создавалась для обеспечения максимальной совместимости с исходным кодом стека openPOWERLINK, используемого в микропроцессорных системах. Её основными компонентами являются софт-процессор, на котором исполняется программный код openPOWERLINK, и подключенный к нему блок openMAC, который осуществляет приём, фильтрацию, буферизацию и своевременную отправку пакетов по сети Ethernet POWERLINK. К несомненным плюсам данной архитектуры можно отнести поддержку большинства дополнительных возможностей протокола Ethernet POWERLINK, таких, как динамическое переназначение состава пакетов, передаваемых в изохронной фазе цикла, возможность организации асинхронного обмена при помощи Service Data Objects (SDO) пакетов, инициированного подчиненным узлом, простоту работы с

большими объектными словарями, поддержку асинхронного обмена через UDP и так далее.

В тоже время, надо отметить, что этот функционал востребован в первую очередь в «сложных» подчиненных устройствах, а для большинства «простых» устройств его поддержка выражается в первую очередь в увеличении требуемого объема логической ёмкости ПЛИС, что в конечном счете сказывается на себестоимости продукта. И здесь проявляется главный недостаток решений на базе openPOWERLINK - их низкая масштабируемость. Из-за того, что стек реализован по сути программно, отключение или подключение дополнительных функций не позволяет существенно сократить объем используемых ресурсов ПЛИС, так как для запуска программы нельзя использовать 2/3 софт-процессора, даже если сократить эту программу на 30%. Использование программно реализованного стека также приводит к увеличению требований к объему памяти, что в конечном счете выражается в необходимости установки дополнительных внешних микросхем, что не только увеличивает массогабаритные размеры изделия и себестоимость за счет удорожания монтажа, но и потенциально снижает надежность конечного изделия.

2. Анализ требований и выбор путей реализации новой архитектуры

При разработке новой модульной архитектуры аппаратно-программного обеспечения ПЛИС, предназначенной для реализации «простых» подчиненных устройств Ethernet POWERLINK, основными требованиями предъявляемыми к новой архитектуре являются: соответствие стандарту Ethernet POWERLINK [8], возможность работы в циклах до 200 мкс, существенное снижение требований к

ресурсам ПЛИС по сравнению с решениями на базе стека openPOWERLINK. Также исходя из запроса российской промышленности на импортозамещение к разрабатываемому аппаратно-программному обеспечению предъявляется требование совместимости с отечественной элементной базой.

На основе анализа стандарта Ethernet POWERLINK [8], функционала и объемов передаваемых данных для всех основных типов «простых устройств» (рис. 2) были выделены четыре типа информационного обмена, которые необходимо реализовать в разрабатываемой архитектуре: инициализация и управление подчиненным устройством при помощи NMT команд, синхронная передача данных в пакетах PollRequest/PollResponse, асинхронная передача данных по протоколу SDO via Asnd, прямой обмен между подчиненными устройствами (кросс-трафик). Первые два вида информационного обмена являются строго обязательными согласно [8], в то время как два других являются опциональными. Исходя из этого предлагается обработку NMT-команд и синхронную передачу данных реализовать в виде основного модуля аппаратно-программного обеспечения ПЛИС, а оставшиеся способы информационного обмена выполнить в виде дополнительных модулей, которые могут при необходимости добавляться или исключаться разработчиком в зависимости от функционала требуемого в конкретном изделии.

Как отмечалось выше, для обеспечения работы в циклах с периодом 200 мкс и менее необходимо в первую очередь снижать время и джиттер формирования ответного пакета PollResponse на запрос ведущего устройства, полученный в виде пакета PollRequest. Для достижения минимально возможной задержки при отправке

PollResponse предлагается осуществлять обработку всех входящих пакетов «на лету» без использования буферов и софт-процессоров.

Анализ отечественной элементной базы показал крайне ограниченный набор компонент, которые могут быть использованы для реализации современных полевых шин реального времени на базе Ethernet.

На данный момент на рынке присутствует всего одна микросхема физического уровня Fast Ethernet российского производства: Миландр 5600BB3T. Она имеет интерфейс Media Independent Interface (MII) тактируемый частотой 25 МГц, в то время как большинство зарубежных аналогов оснащаются интерфейсом Reduced Media Independent Interface (RMII), который тактируется частотой 50 МГц. В связи с этим предлагается в рамках новой архитектуры выделить сопряжение с микросхемами физического уровня Ethernet в отдельный модуль, который будет выполнен в двух версиях для интерфейсов MII и RMII соответственно.

Также анализ элементной базы показал, что в качестве платформы для создания подчиненных устройств на базе новой архитектуры, аналога зарубежных ПЛИС, могут выступать российские ПЛИС ВЗПП-С серий 5576 и 5578, а также полузаказные СБИС НПК ТЦ серий 5521 и 5529. Существующие решения на базе openPOWERLINK не могут быть реализованы при помощи данных микросхем сразу по нескольким причинам. Для ПЛИС главными проблемами является их недостаточная логическая ёмкость и высокие транспортные задержки, не позволяющие обеспечить работу аппаратно-программного обеспечения подчиненного устройства Ethernet POWERLINK с необходимой частотой в 50 МГц.

При использовании полузаказных СБИС основной сложностью становится замена проприетарных софт-процессоров Nios II и MicroBlaze, на которых основаны решения openPOWERLINK и которые могут быть реализованы только на основе микросхем Altera и Xilinx соответственно.

Для обеспечения совместимости с отечественной элементной базой при создании новой архитектуры были приняты следующие требования и ограничения: разработка аппаратно-программного обеспечения должна вестись на основе чистого языка Verilog стандарта IEEE 1364-2001 без использования любых проприетарных ядер ПЛИС; возможность работы как на частоте тактового генератора 25 МГц при использовании интерфейса МП к микросхеме физического уровня, так и на частоте 50 МГц при использовании интерфейса RМП; малая ресурсоёмкость, позволяющая реализовать подчиненное устройство Ethernet POWERLINK на микросхеме ПЛИС серии 5576 (микросхемы данной серии имеют наименьшую степень интеграции из рассмотренных в данной работе отечественных ПЛИС и СБИС, поэтому реализация на их основе будет косвенно говорить о возможности реализации и на упомянутых выше микросхемах других серий).

3. Новая архитектура для реализации подчиненных устройств на ПЛИС

В основе предложенной архитектуры лежит использование общего канала данных (рис. 5), который формируется при помощи модуля сопряжения с интерфейсами МП/RМП, идущими к микросхеме физического уровня. Во время приема Ethernet пакета он побайтно поступает в общий канал данных. Все модули, участвующие в обработке пакета независимо забирают данные из общего канала и

«на лету» их обрабатывают без применения какой-либо буферизации. Такой подход позволяет не только оптимизировать каждый блок на прием именно тех пакетов, для которых обработки которых он предназначен, но и сделать все модули аппаратно-программного обеспечения ПЛИС максимально независимыми, позволяя их компоновать в любом сочетании в зависимости от требуемого функционала. Обработав пакет, каждый из блоков может сформировать ответный пакет, который тут же поступает в общий канал данных откуда отправляется в сеть через микросхему физического уровня. Отсутствие коллизий в общем канале данных при отправке пакетов от нескольких независимых блоков гарантируется за счет того, что разные модули предложенной архитектуры формируют ответы на различные запросы ведущего устройства.

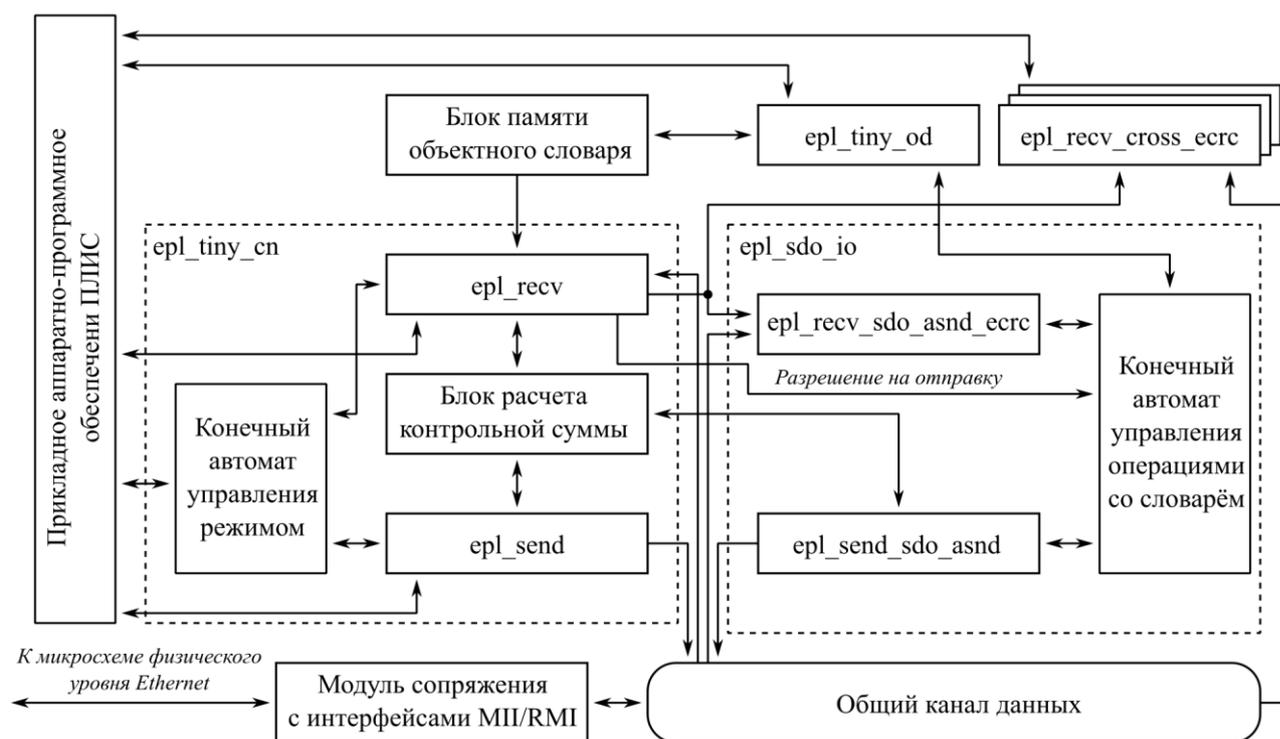


Рис. 5. Структурная схема аппаратно-программного обеспечения ПЛИС подчиненного устройства Ethernet POWERLINK на базе предложенной архитектуры

Минимально возможная конфигурация ведущего устройства включает в себя помимо интерфейса к микросхеме физического уровня только модуль `epl_tiny_cn` и память объектного словаря объемом 259Б. Модуль `epl_tiny_cn` является обязательным для всех конфигураций новой архитектуры, он включает в себя: блок `epl_recv` для обработки входящих пакетов SoC, PollRequest, SoA и ASnd (только содержащих NMT команды ведущего устройства); блок `epl_send`, который формирует ответные пакеты PollResponse, IdentResponse и StatusResponse; конечный автомат, который обеспечивает управления режимами работы и переход узла от неактивного состояния (NMT_CS_NOT_ACTIVE) в режим циклического обмена (NMT_CS_OPERATIONAL) согласно [8]; блок расчета контрольной суммы. Блок памяти объектного словаря используется модулем `epl_tiny_cn` только в режиме чтения при формировании пакетов IdentResponse и StatusResponse. Поэтому для

оптимизации ресурсоемкости записи объектного словаря располагаются в памяти строго в том же порядке, в котором они располагаются в указанных выше пакетах. Это позволяет при формировании ответа ведущему устройству просто вычитывать данные подряд из блока памяти, отказавшись от сложных схем выборки.

Для обеспечения настройки подчинённого устройства в асинхронной фазе цикла Ethernet POWERLINK в рамках предлагаемой архитектуры необходимо добавить на общий канал данных модуль `epl_sdo_io`, который реализует обмен при помощи SDO пакетов. Он включает в себя блоки `epl_rcv_sdo_asnd_esc` и `epl_send_sdo_asnd`, которые служат для обработки входящих и формирования исходящих SDO пакетов соответственно, а также конечный автомат, который обеспечивает чтение и запись значений в поля объектного словаря, реализуя операции `WriteByIndex` и `ReadByIndex` протокола SDO via ASnd [8]. Для обеспечения минимальной ресурсоемкости `epl_sdo_io` использует для проверки и формирования контрольных сумм соответствующий блок в составе `epl_tiny_cn`, для чего в обоих модулях предусмотрен специальный интерфейс. Также `epl_tiny_cn` используется для формирования разрешения модулю `epl_sdo_io` на отправку исходящих SDO пакетов, которое формируется на основе обработки пакетов SoA, полученных от ведущего устройства. Таким образом, обработка и формирование пакетов Ethernet POWERLINK в описанных модулях происходит независимо, в то время как за общее управление режимом информационного обмена и порядком отправки пакетов осуществляется по команде модуля `epl_tiny_cn`.

Технически для реализации полноценного обмена с подчиненным устройством в синхронном и асинхронном режимах Ethernet POWERLINK в рамках прикладной задачи достаточно модулей `epl_tiny_cn` и `epl_sdo_io`, однако для того, чтобы устройство полностью соответствовало стандарту [8] **Ошибка! Источник ссылки не найден.**] и могло пройти сертификацию, необходимо, чтобы в нем был реализован минимальный объектный словарь, объем которого четко определен в [8]. В рамках предлагаемой архитектуры для этих целей используется модуль базового объектного словаря `epl_tiny_od`, который в процессе обработки данных входящего SDO пакета «на лету» преобразует индекс поля объектного словаря в адрес памяти, а в момент формирования исходящего SDO пакета также «на лету» подставляет в него вычитанные из памяти данные. В конфигурациях использующих модуль `epl_tiny_od` объем блока памяти объектного словаря увеличивается с 259 байт до 4 Кбайт. При этом в младших 259 байт записываются те поля, которые используются модулем `epl_tiny_cn` для формирования пакетов `IdentResponse` и `StatusResponse`, байты с 259 по 2047 используются для хранения остальных полей обязательного подмножества объектного словаря, а старшие 2048 байт хранят начальные значения для всех полей и копируются в младшие 2048 байт памяти при поступлении команды на сброс настроек подчиненного устройства.

Модуль обработки кросс-траффика `epl_recv_cross_escr` является аналогом модуля `epl_recv` с той лишь разницей, что он обрабатывает не пакеты `PollRequest` от ведущего устройства, а пакеты `PollResponse` от другого подчиненного устройства. Данный модуль может использоваться как совместно с `epl_tiny_cn`, так и отдельно от

него, позволяя создавать устройства не являющиеся самостоятельными узлами Ethernet POWERLINK, но следящие за функционированием других устройств подключенных к полевой шине. В последнем случае необходимо использование дополнительного блока расчета контрольной суммы. Если устройство должно обрабатывать кросс-трафик от нескольких устройств, то для каждого устройства на общий канал данных должен быть подключен отдельный модуль `epl_rcsv_cross_esc`.

На основе предложенной архитектуры был создан блок дискретного ввода/вывода FPGA Tiny CN DirectIO, который в декабре 2017 г. прошел сертификацию Ethernet POWERLINK Standardization Group, став первым сертифицированным устройством Ethernet POWERLINK, разработанным в России. В ходе сертификации была подтверждена работоспособность всего функционала предложенной архитектуры, включая синхронный обмен в циклах с периодом до 200 мкс включительно, асинхронный обмен по протоколу SDO via ASnd, а также обработку кросс-трафика. По условиям проведения сертификации её результаты распространяются на все подчиненные устройства Ethernet POWERLINK на базе предложенной в данной работе архитектуры.

В таблице 1 представлено сравнение ресурсоемкости аналогичных по функционалу систем подчиненных устройств на базе стека openPOWERLINK и различных конфигураций предложенной архитектуры.

Таблица 1. Сравнение пресурсоемкости решений на базе openPOWERLINK и различных конфигураций предложенной архитектуры на примере микросхемы Altera EP4CE15F17I7

Конфигурация	Логическая ёмкость	Требуемый объем памяти
Система ввода/вывода на базе openPOWERLINK версии 2.5.2	6786 LE	32 КБ встроенной блочной памяти; 32 КБ внешней энергонезависимой памяти; 2 МБ внешней статической памяти
Система ввода/вывода на базе предложенной архитектуры (поддержка только синхронного обмена)	733 LE	259 Б встроенной блочной памяти
Система ввода/вывода на базе предложенной архитектуры (поддержка синхронного обмена и асинхронного обмена)	1387 LE	259 Б встроенной блочной памяти
Система ввода/вывода на базе предложенной архитектуры (поддержка синхронного обмена и асинхронного обмена, а также базового объектного словаря согласно [8])	1870 LE	4 КБ встроенной блочной памяти
Дополнительный модуль приема кросс-траффика от одного узла	111 LE	—

Наиболее полная конфигурация предложенной архитектуры, включающая в себя модули `epl_tiny_cn`, `epl_sdo_io` и `epl_tiny_od`, а также блок памяти объектного словаря объемом 4 КБ требует для реализации на ПЛИС ВЗПП-С 5576XC4Т 2812 LE (28% логической емкости ПЛИС) и 49152 Кбит блочной памяти (50% объема блочной памяти ПЛИС). Максимальная частота по результатам синтеза составила 40.32 МГц, что в 1.6 раза выше необходимых для работы с интерфейсом МП 25 МГц. Таким образом подтверждается возможность реализации предложенной архитектуры на отечественной элементной базе.

Как видно из таблицы 1, даже в максимальной конфигурации устройство на базе предложенной архитектуры требует в 3.5 раза меньше ресурсов ПЛИС по сравнению с решением на базе openPOWERLINK, а наибольший потенциальный выигрыш в логической ресурсоемкости составляет чуть больше 9 раз, а в используемой памяти более 126 раз. В сочетании с ранее предложенными автором ресурсо-эффективными подходами к реализации систем управления и обработки данных с использованием ПЛИС [16-18], предложенная архитектура позволяет создавать законченные модули распределенных систем управления, как системы-на-кристалле на базе бюджетных микросхем, таких как Lattice ICE40 NX и Altera MAX10. Данные ПЛИС оснащены встроенной памятью для хранения конфигураций, что позволяет реализовать законченное устройство, подключаемое по шине Ethernet POWERLINK при помощи всего трех основных компонент на печатной плате: ПЛИС, микросхемы физического уровня Ethernet и тактового генератора.

Заключение

В работе предложена новая модульная архитектура для реализации подчиненных устройств Ethernet POWERLINK. Её основным достоинством является высокая эффективность использования ресурсов ПЛИС. Как результат, в зависимости от конфигурации, ядро информационного обмена, построенное на базе предложенной архитектуры требует от 3.5 до 9 раз меньше логических ячеек ПЛИС и до 126 раз меньший объём блоков памяти по сравнению с ранее известным решением на базе стека протоколов openPOWERLINK.

Благодаря тому, что новая архитектура может быть реализована на чистом языке Verilog без использования проприетарных ядер, привязанных к конкретному производителю микросхем, она совместима с максимально широким набором ПЛИС как зарубежного так и российского производства, являясь единственным известным на данный момент подходом к аппаратной реализации устройств Ethernet POWERLINK на отечественной элементной базе.

На основе предложенной архитектуры было сделано первое российское устройство, получившее сертификат Ethernet POWERLINK Standardization Group, что говорит о полном её соответствии стандарту Ethernet POWERLINK.

Одним из ключевых требований к элементной базе для авиационной и космической техники является стойкость к воздействию радиации. Отечественные микросхемы ПЛИС имеют радиационно-стойкое исполнение, что позволяет при реализации на них устройств управления и информационного обмена не применять дополнительные схемы резервирования на уровне конфигурируемой логики [19]. Предложенная архитектура для реализации узлов Ethernet POWERLINK полностью совместима с российскими микросхемами серий 5576 и 5578, которые уже используются в бортовых системах управления для космических применений [20], что говорит о возможности её применения в авиационной и космической технике.

Библиография

1. Смакова Е. Индустриальный и синхронный протоколы Ethernet // Электронные компоненты. 2009. № 4. С. 1 - 4.

2. Romanov A., Romanov M., Kharchenko A., Kholopov V. Unified architecture of execution level hardware and software for discrete machinery manufacturing control systems // Research and Development (SCOREd), 2016 IEEE Student Conference on, IEEE, 2016. DOI: [10.1109/SCORED.2016.7810088](https://doi.org/10.1109/SCORED.2016.7810088)
3. Baumgartner J., Schoenegger S. POWERLINK and real-time Linux: A perfect match for highest performance in real applications // Twelfth Real-Time Linux Workshop, 2010, available at: <https://manualzilla.com/doc/5985800/powerlink-and-real-time-linux--a-perfect-match-for>
4. Wallner W., Baumgartner J. openPOWERLINK in Linux Userspace: Implementation and Performance Evaluation of the Real-Time Ethernet Protocol Stack in Linux Userspace // Proc. 13th Real-Time Linux Workshop (RTLWS), Prague, Czech Republic, 2011, C. 155 - 164.
5. Andr n F., Strasser T. Distributed open source control with Industrial Ethernet I/O devices // 16th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA'2011), September 5-9, Toulouse, France ETFA2011. IEEE, DOI: [10.1109/ETFA.2011.6059141](https://doi.org/10.1109/ETFA.2011.6059141)
6. Schalk K. et al. Microsecond-precision time stamping in a deterministic distributed sensor network utilizing openPOWERLINK // 2017 IEEE International Conference on Wireless for Space and Extreme Environments (WiSEE 2017), 10-12 October 2017, Montreal, Quebec, Canada, pp. 52 - 56.
7. openPOWERLINK, available at: <http://openpowerlink.sourceforge.net/web/openPOWERLINK.html>

8. IEEE Standard for Industrial Hard Real-Time Communication. IEEE Std 61158-2017 (Adoption of EPSG DS 301).
9. Viveka J.S.V., Navaneethan S. Open source motor control using Xilinx Spartan-6 // International Journal of Advanced Research in Electronics and Communication Engineering (IJARECE), 2015, vol. 4, issue 5, pp. 1277 – 1280.
10. Idkhajine L. et al. Fully integrated FPGA-based controller for synchronous motor drive // IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, vol. 5, no. 10, pp. 4006 - 4017.
11. Liu J. et al. The development of a novel servo motor controller based on EtherCAT and FPGA // 2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC), IEEE, 2016, pp. 3174 - 3179. DOI: [10.1109/CCDC.2016.7531529](https://doi.org/10.1109/CCDC.2016.7531529)
12. Попов Б.Н., Фам Т.Т. Логические автоматы управления электродвигателями на платформе программируемой логики // Труды МАИ. 2005. № 18. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=34193>
13. Knezic M., Dokic B., Ivanovic Z. Performance analysis of the ethernet powerlink pollresponse chaining mechanism // Factory Communication Systems (WFCS), 2015 IEEE World Conference on, IEEE, July 2015, pp. 1 - 4. DOI: [10.1109/WFCS.2015.7160578](https://doi.org/10.1109/WFCS.2015.7160578)
14. Baumgartner J., Schoenegger S. POWERLINK and Real-time Linux: A perfect match for highest performance in real applications // Twelfth Real-Time Linux Workshop, Nairobi, Kenya, 2010, available at: <https://www.osadl.org/fileadmin/dam/rtlws/12/Baumgartner.pdf>

15. Reinhart G. et al. Automatic configuration (plug & produce) of industrial ethernet networks // 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications (INDUSCON), Brazil, 2010.
166. Романов А.М. Анализ и синтез элементов устройств управления мехатронно-модульными системами на базе ПЛИС с использованием сигма-дельта модуляции // Естественные и технические науки. 2013. № 6. С. 348 – 361.
177. Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П., Романов А.М. Универсальная бортовая система управления роботами различных типов базирования и назначения (реализация принципов унификации и импортозамещения) // Вестник МГТУ МИРЭА. 2015. № 3-1 (8). С. 230 – 248.
18. Romanov A., Romanow M. FPGA based implementation of content-addressed memory based on using direct sigma-delta bitstream processing // 2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRusNW), Saint Petersburg, Russia, 2016, pp. 320 - 324.
19. Муллов К.Д. Воздействие космической радиации на цифровые устройства на базе ПЛИС и методы повышения радиационной стойкости данных систем // Труды МАИ. 2016. № 87. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=69720>
18. Матафонов Д.Е. Создание и отработка маршрутизатора в стандарте SpaceWire на отечественной программируемой логической интегральной схеме // Труды МАИ. 2018. № 103. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=100780>