

ПРОМЫШЛЕННЫЙ



ETHERNET ФАКТЫ

СРАВНЕНИЕ СИСТЕМ

5 ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

PROFINET,
POWERLINK,
EtherNet/IP,
EtherCAT,
SERCOS III

Как работают эти системы

Организации
пользователей

Взгляд за кулисы

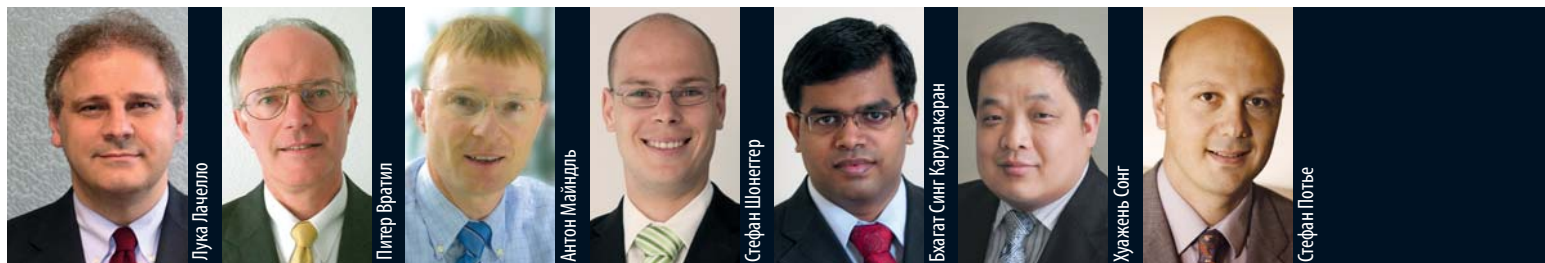
Инвестиционная
привлекательность и
производительность

Все, что Вам нужно знать!

Протоколы
безопасности

Изучаем основы!





Введение

Сложный мир промышленного Ethernet может привести новичка в некоторое замешательство. Специалисты, занятые изучением этого вопроса, тоже озадачены широкой и «непрозрачной» линейкой систем от конкурирующих производителей. В технической документации большинства производителей практически не найти полных и понятных сведений обо всех технических характеристиках и специальных функциях в плане их соответствия определенным стандартам. Если же Вы попытаетесь отыскать материалы, в которых четко сравниваются основные системы и дается их объективная оценка, то будете обескуражены еще больше.

Нас часто просят предоставить общий обзор основных систем и интересуются - «в чем же разница». Поэтому мы решили целиком посвятить один выпуск именно этой проблеме. Создавая его, мы пытались сохранить максимальную объективность, насколько это возможно для участника данного рынка. Наш обзор фокусируется на технических, экономических и стратегических критериях, которые важно учитывать при оценке долговременных инвестиций в оборудование промышленного Ethernet. Приведенные ниже аргументы обсуждались и подтверждались в ходе многочисленных дискуссий с разработчиками и лицами, принимающими решения в данной области. Везде, где возможно, мы попытались проверить их заявления.

Но несмотря на все усилия, мы не смогли предоставить точную и достоверную информацию по некоторым аспектам, что вынуждает нас обратиться за помощью к читателям. Если у Вас есть поправки и предложения, то отправьте их нам по электронной почте или просто позвоните. Мы рассчитываем на то, что Вы сможете дополнить этот обзор, и приветствуем любые дискуссии, которые помогут с максимальной тщательностью и объективностью оценить различные стандарты промышленного Ethernet. В первое издание вошла информация, полученная от сообщества промышленного Ethernet.

Запрещается изменять настоящий документ без предварительного согласия издателя.

Мы приветствуем передачу настоящего документа целиком. Текущую версию документа можно скачать с сайта www.ethernet-powerlink.org.

Контакты: офис EPSG,
телефон: +49 30 850885-29
info@ethernet-powerlink.org

Лука Лачелло, менеджер по разработке ПО, COMAU Robotics, Италия
Питер Вратил, исполнительный директор, Innotec, Германия
Антон Майндль, президент EPSG, Германия
Стефан Шонеггер, руководитель подразделения B&R, Австрия
Бхагат Синг Карунакаран, генеральный директор, Kalycito - Индия
Хуажень Сонг, менеджер по маркетингу, POWERLINK Association, Китай
Стефан Потье, менеджер по технологическому маркетингу, EPSG, Франция



Обзор системы: 5 основных претендентов

ВВЕДЕНИЕ 4

- Выбор систем для обзора

КАК РАБОТАЮТ ЭТИ СИСТЕМЫ 6

- Подходы к реализации Ethernet реального времени
- Коммуникационный стандарт PROFINET
- Коммуникационный стандарт POWERLINK
- Коммуникационный стандарт EtherNet/IP
- Коммуникационный стандарт EtherCAT
- Коммуникационный стандарт SERCOS III

ОРГАНИЗАЦИИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ 12

- Организации пользователей – Статус, права и лицензирование

ИНВЕСТИЦИОННАЯ ПРИВЛЕКАТЕЛЬНОСТЬ 16

- Совместимость с существующими профилями приложений
- Восприимчивость к электромагнитным помехам / Надежность передачи – Точки электрических подключений
- Кабельные соединения гибкой топологии – Высокая надежность – Возможность горячего подключения
- Готовность к переходу на Gigabit Ethernet
- Поддержка международных стандартов – Производительность – Продукты на рынке

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ 18

- Теоретически достижимая длительность цикла – Коммуникационная архитектура систем
- Непосредственный перекрестный трафик – Передача больших объемов данных
- Нагрузка на сеть с устройствами безопасности
- Реальная длительность цикла – Джиттер – Сравнение производительности

РЕАЛИЗАЦИЯ 22

- Реализация ведущего устройства
- Стоимость сетевых компонентов
- Реализация ведомого устройства
- Стоимость подключения узлов
- Эксплуатационные расходы

ФУНКЦИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ 25

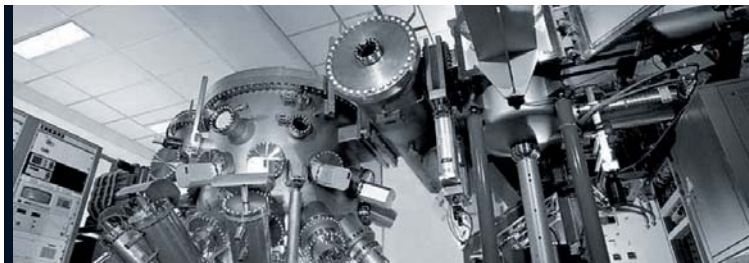
- Сетевая интеграция вместо жестких проводных соединений

ПРИНЦИП ЧЕРНОГО КАНАЛА 27

- Полевые сети системы безопасности
- Передача данных системы безопасности по шинам или сетевым линиям

КАК РАБОТАЕТ СИСТЕМА БЕЗОПАСНОСТИ 28

- CIP Safety – PROFIsafe – openSAFETY – FSoE
- Сертификация – Технология – Реализация устройств
- Интеграция – Производительность – CRC



Выбор систем для обзора

В этом выпуске издания «Промышленный Ethernet. Факты» сравниваются системы PROFINET (RT, IRT), POWERLINK, EtherNet/IP, EtherCAT и SERCOS III, т. е. пять из почти 30 систем промышленного Ethernet, применяемых в мире в настоящее время.¹ Почему именно они? При выборе учитывались технические аспекты, соответствие стандартам и рыночные соображения. Принимались во внимание такие факторы, как например, поддерживает ли организация дальнейшее развитие протокола, занесен ли протокол в стандарт IEC и отвечает ли система жестким требованиям реального времени.

Реальное время

Предусмотренный стандартом Ethernet IEEE 802.3 механизм разрешения коллизий данных порождает нерегулярные задержки при их передаче. Чтобы достичь быстродействия реального времени, протоколы промышленного Ethernet применяют специальные профилактические меры, позволяющие избежать таких коллизий. Для жесткого реального времени периоды передачи сигнала должны точно вписываться в заданные интервалы, в противном случае возможна передача ошибочного сигнала. Для мягкого реального времени допускаются некоторые ограниченные отклонения допустимого интервала. И если для приложений мягкого реального времени, например, для мониторинга температуры, вполне достаточно длительность цикла порядка нескольких сотен миллисекунд, то для цифровых систем управления или систем управления перемещениями часто необходимы циклы длительностью менее одной миллисекунды.

¹ Более обширный перечень систем можно найти по адресу www.pdv.reutlingen-university.de/rte/.

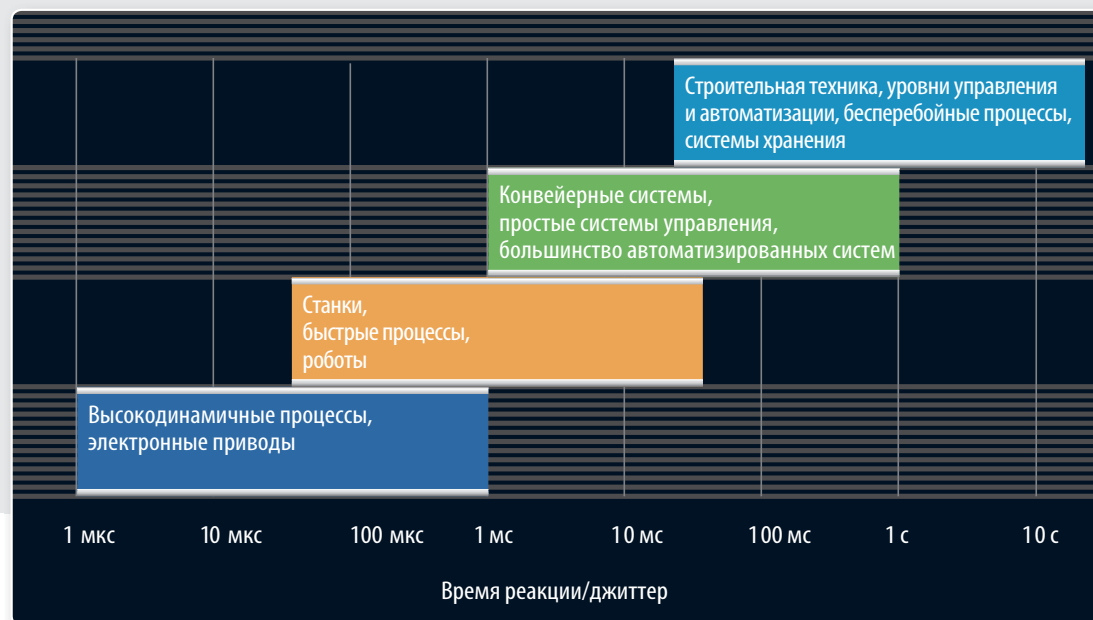
Его автор — профессор, д.т.н. Юрген Швагер, начальник лаборатории обработки данных Ройтлингенского Университета.



Обзор системы: 5 основных претендентов

Доли рынка

Другим ключевым аспектом отбора для сравнения была доля рынка: различные исследования, выполненные агентствами IMS и ARC, показывают, что примерно три четверти всех приложений промышленного Ethernet в мире используют протоколы EtherNet/IP, PROFINET или Modbus TCP. За ними идут POWERLINK и EtherCAT, которое особенно хорошо удовлетворяет требованиям жесткого реального времени. В настоящем обзоре мы не рассматривали отдельно Modbus TCP, поскольку поддерживающая его организация пользователей ODVA заявила, что этот протокол интегрирован в EtherNet/IP. Однако система SERCOS III была включена в это сравнение, несмотря на незначительную долю на рынке, поскольку она играет значительную роль в быстродействующих решениях по управлению перемещениями.



Классы и сферы применения приложений реального времени (классификация IAONA)



Как работают эти системы

Подходы к реализации Ethernet реального времени

Существует три подхода к реализации Ethernet-решений реального времени:

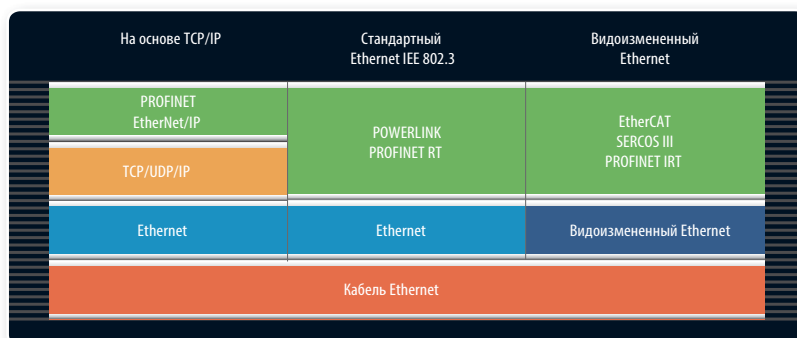
1. Подход на основе TCP/IP: протоколы, основанные на уровнях TCP/IP с механизмами реального времени внедряются в верхний уровень. Возможности таких решений обычно ограничены.
2. Стандартный Ethernet: протоколы реализуются на верхнем уровне стандарта Ethernet. Эти решения используют преимущества эволюции Ethernet и позволяют обойтись без дополнительных вложений.
3. Видоизмененный Ethernet: стандартный уровень Ethernet, механизм Ethernet и инфраструктура подвергаются изменениям. Эти решения ставят производительность выше соответствия стандартам.

Критические различия сравниваемых в этой публикации систем промышленного Ethernet лежат в способах организации передачи данных и в способах достижения производительности реального времени. EtherCAT и SERCOS III используют для взаимодействия метод суммарного фрейма:

в каждом цикле данные для всех узлов кольцевой сети отправляются в виде одной телеграммы, которая передается от одного узла к другому; одновременно собираются ответы узлов. Другие системы отправляют узлам индивидуальные телеграммы, а каждый узел отвечает на свою телеграмму.

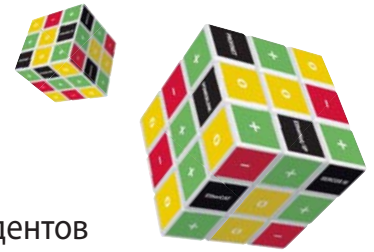
Для доступа к сети и синхронизации данных системы используют три механизма:

- Централизованное управление синхронизацией сети. В системах POWERLINK ведущее устройство разрешает отдельным узлам передачу данных. В сетях EtherCAT и SERCOS III передача телеграмм суммарного фрейма выполняется после получения такта синхронизации от ведущего устройства.
- PROFINET IRT использует для управления взаимодействием синхронизированные коммутаторы.
- EtherNet/IP использует протокол CIP Sync для распространения по сети информации о синхронизации в соответствии со стандартом IEEE 1588.



*Методы реализации
Ethernet реального
времени*

Обзор системы: 5 основных претендентов



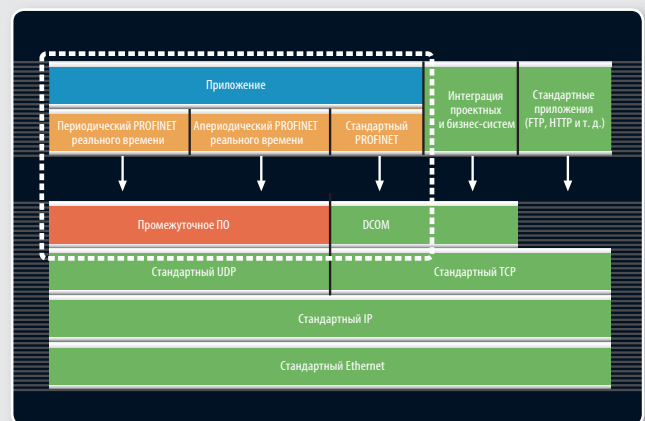
Коммуникационный стандарт PROFINET

PROFINET (Process Field Network – Полевая сеть для управления процессами) подразделяется на два класса производительности, отвечающих разным требованиям синхронизации: PROFINET RT для мягкого реального времени или при полном отсутствии требований реального времени, и PROFINET IRT для жесткого реального времени. Эта технология разработана корпорацией Siemens и компаниями-членами организации пользователей PROFIBUS (PNO). Созданная вслед за PROFIBUS DP система PROFINET I/O на основе Ethernet определяет обмен данными между контроллерами ввода/вывода, а также параметризацию, диагностику и структуру сети.

Как это работает

Для поддержки разных классов производительности PROFINET использует принцип «производитель/потребитель» с разными протоколами и службами. Полезная высокоприоритетная информация передается непосредственно по протоколу Ethernet во фреймах Ethernet с приоритетностью VLAN, а диагностические и конфигурационные данные передаются по протоколу UDP/IP. Это позволяет системе достичь длительности цикла около 10 мс для приложений ввода/вывода.

PROFINET IRT предлагает циклы с периодом синхронизации менее 1 мс, как того требуют приложения для управления перемещениями. Это реализуется с помощью режима мультиплексирования по времени на основе специально управляемых аппаратно-синхронизируемых коммутаторов. В будущем с помощью так называемой Динамической Упаковки Фрейма (Dynamic Frame Packing – DFP) пользователи получат новый вариант PROFINET с оптимизированной длительностью цикла за счет применения принципа суммарного фрейма к определенному набору сетевых устройств.

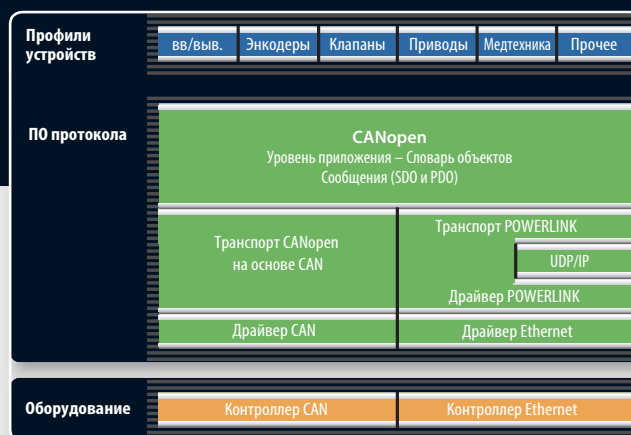


Коммуникационный стандарт POWERLINK

Изначально разработанный компанией B&R, стандарт POWERLINK был представлен в 2001 г. С 2003 г. дальнейшим развитием этой технологии занималась Группа стандартизации Ethernet POWERLINK (EPG) – независимая организация пользователей с демократическим уставом. POWERLINK представляет собой не охраняемую патентами, независимую от изготовителей и исключительно программную коммуникационную систему, которая поддерживает жесткое реальное время. Кроме того, в 2008 г. была предложена бесплатная версия с открытым исходным кодом. POWERLINK интегрирует все механизмы CANopen и полностью соответствует стандарту IEEE 802.3, т.е. этот протокол поддерживает все стандартные возможности Ethernet, включая перекрестный трафик и горячее подключение, и позволяет строить сети любой топологии.

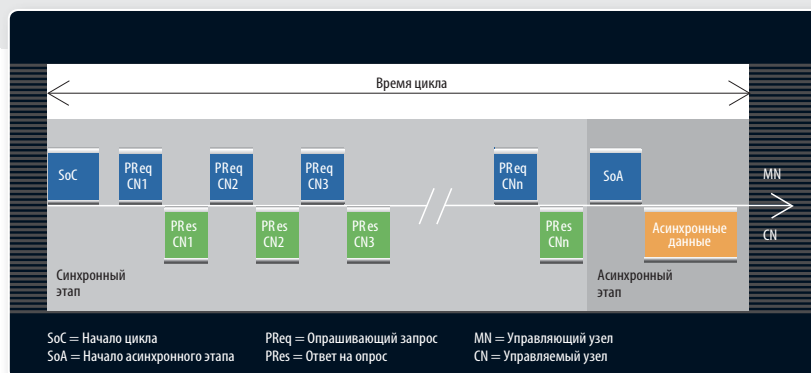
Как это работает

Для обеспечения синхронной передачи данных POWERLINK использует тайм-слоты и процедуры опроса. Координацию осуществляет так называемый Управляющий Узел (Managing Node – MN): ПЛК или промышленный ПК. Этот управляющий узел запускает синхронизацию цикла, с помощью которой синхронизируются все устройства, и управляет передачей данных. Все другие устройства выступают в роли Управляемых Узлов (Controlled Nodes – CN). В течение одного цикла MN поочередно отправляет так называемые «Опрашивающие запросы» на все узлы CN в фиксированной последовательности. Каждый CN немедленно отвечает на такой запрос «Ответом на опрос», который могут «слышать» все остальные узлы.



Много общего: OSI-модель CANopen и POWERLINK

Цикл POWERLINK состоит из трех периодов. Во время «Стартового периода» MN отправляет на все CN фрейм «Начало цикла» (SoC) для синхронизации устройств. Джиттер составляет до 20 нс. Циклический синхронный обмен данным выполняется во втором периоде («Циклический период»). Оптимизация скорости передачи на этом этапе достигается за счет мультиплексирования. Третий период обозначает начало асинхронного этапа, который позволяет передавать большие и не критичные по времени пакеты данных. Такая информация, как данные пользователя или фреймы TCP/IP, распределяются по асинхронным этапам в нескольких циклах. POWERLINK различает домены реального и относительного времени. Поскольку при передаче данных в течение асинхронного периода поддерживаются стандартные IP фреймы, то маршрутизаторы надежно и прозрачно отделяют эти данные от доменов реального времени. POWERLINK отлично подходит для всех приложений автоматизации, включая ввод/вывод, управление перемещениями, роботами, связь между ПЛК и визуализацию.





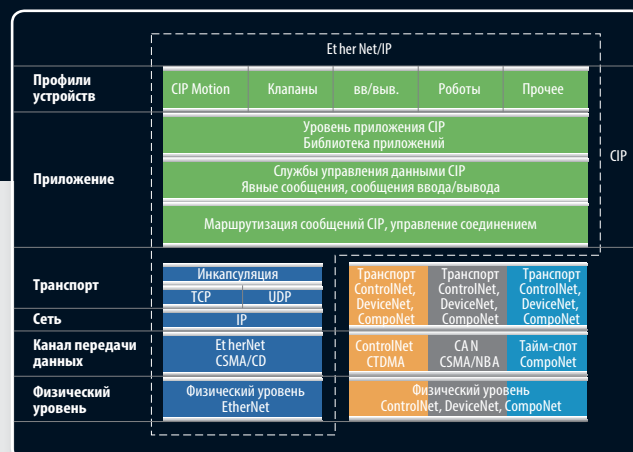
Обзор системы: 5 основных претендентов

Коммуникационный стандарт EtherNet/IP

Первоначально выпущенный в 2000 г., EtherNet/IP представляет собой открытый промышленный стандарт, разработанный компанией Allen-Bradley (Rockwell Automation) и Открытой ассоциацией изготовителей DeviceNet (ODVA). В сущности, «Протокол промышленного Ethernet», является переносом протокола прикладных программ CIP, который уже использовался в ControlNet и DeviceNet (Общий промышленный протокол), на протокол передачи данных Ethernet. Особенно хорошо EtherNet/IP зарекомендовал себя на американском рынке. Он часто применяется с системами управления Rockwell.

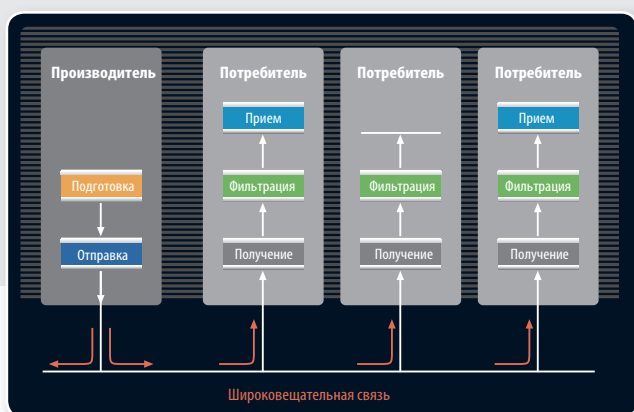
Как это работает

EtherNet/IP работает на стандартном оборудовании Ethernet и использует для передачи данных протоколы TCP/IP и UDP/IP. Благодаря функциональности «производитель/потребитель», поддерживаемой протоколом CIP, EtherNet/IP имеет в своем распоряжении несколько коммуникационных механизмов, например, циклический опрос, синхронизацию по времени или событию, групповую передачу (мультикаст) или простое соединение точка-точка. Протокол прикладных программ CIP различает «невяные» сообщения ввода/вывода и «явные» телеграммы запросов/ответов для передачи сведений о конфигурации и получения данных. И если явные сообщения встроены во фреймы TCP, то данные приложений реального



Модель уровней EtherNet/IP

времени передаются через UDP в связи с более компактным форматом и меньшим объемом служебной информации. Образуя центр звездообразной топологии, коммутаторы предотвращают коллизии данных, поступающих от разных устройств, подключенных через соединения типа точка-точка. Обычно EtherNet/IP реализует мягкое реальное время благодаря циклам длительностью около 10 мс. Чтобы обеспечить необходимую длительность цикла и достаточно малый джиттер для управления сервоприводами, используются технологии CIP Sync и CIP Motion, а также точная синхронизация узлов с помощью распределенных тактовых генераторов в соответствии с требованиями стандарта IEEE 1588.



Коммуникационный стандарт EtherCAT

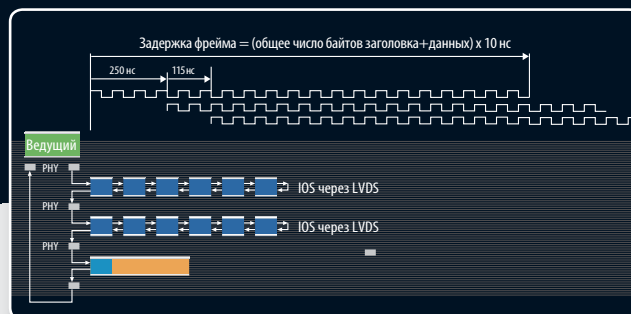
EtherCAT («Ethernet для автоматизации управления») разработан компанией Beckhoff Automation. Все его пользователи автоматически становятся членами Технологической группы EtherCAT (ETG).

Как это работает

EtherCAT опирается на метод суммарного фрейма: ведущее устройство EtherCAT передает фрейм Ethernet, содержащий данные для всех узлов сети. Этот фрейм проходит поочередно через все узлы. Пройдя последний узел магистральной, фрейм возвращается обратно. Узлы обрабатывают содержащуюся во фрейме информацию по мере его прохождения в одном направлении. Каждый узел на лету считывает адресованную ему информацию и вставляет во фрейм ответные данные. Для поддержания скорости 100 Мбит/с необходимо специальное оборудование на специализированных ИС, ASIC или ПЛИС, способное быстро обрабатывать проходящие данные. В сущности, топология сети EtherCAT всегда образует логическое кольцо. Даже ответвления магистральной, которые можно подключать к специально разработанным для этой цели узлам, на самом деле добавляют двунаправленные соединения, по которым суммарный фрейм проходит вперед и назад по ответвляющейся линии.

Структура фрейма EtherCAT

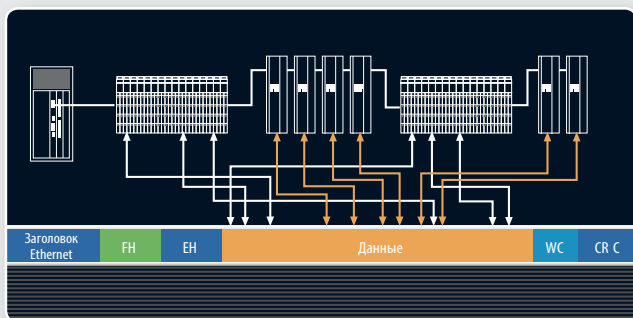
Все телеграммы EtherCAT с инструкциями для отдельных узлов расположены в области фрейма, предназначенной для полезных данных. Каждый фрейм EtherCAT содержит один заголовок и несколько команд EtherCAT. Каждая команда состоит из собственного заголовка, данных инструкций для ведомого устройства и счетчика. Каждому ведомому устройству доступно до 64 Кбайт адресного пространства. Адресация



сопровождается автоприращением, т.е. каждое ведомое устройство увеличивает значение 16-разрядного адресного поля. Кроме того, ведомые устройства могут адресоваться через распределенные адреса станций, которые присваиваются ведущим устройством на начальном этапе.

Синхронизация процесса EtherCAT

При каждом соединении с ведомым устройством передается тактовая частота реального времени, которая синхронизируется ведущим устройством с помощью методов, подобных описанным в стандарте IEEE 1588. Существуют ведомые устройства как с механизмами реального времени, так и без них, поскольку такие механизмы очень требовательны к оборудованию. Тактовая частота реального времени позволяет с высокой точностью синхронизировать управляющие сигналы. В физическом смысле протокол EtherCAT работает не только поверх Ethernet, но и поверх LVDS (низковольтная дифференциальная передача сигналов). Этот стандарт используется компанией Beckhoff в качестве внутренней шины терминалов. Обычно в роли ведущего устройства EtherCAT используется стандартный ПК с интерфейсом Ethernet. В отличие от других протоколов, таких как POWERLINK или PROFINET, EtherCAT распространяется на уровни с 1 по 3 семиуровневой OSI-модели. Поэтому для достижения функциональности приложений, сравнимой с другими системами, приходится использовать дополнительный уровень протокола (CoE, EoE).



Принцип работы EtherCAT



Обзор системы: 5 основных претендентов

Коммуникационный стандарт SERCOS III

Бесплатный коммуникационный стандарт реального времени для цифровых интерфейсов приводов SERCOS III определяет не только аппаратную архитектуру физических соединений, но и структуру протокола и обширный диапазон профилей. SERCOS III, представляющий собой третье поколение интерфейсов Sercos, впервые появившихся на рынке в 1985 г., использует в качестве протокола для передачи данных стандартный Ethernet в соответствии с IEEE 802.3. Он преимущественно используется в системах автоматизации для управления перемещениями. Развитие этой технологии и совместимость со стандартами поддерживается официально зарегистрированной ассоциацией Sercos International e.V.

Как это работает

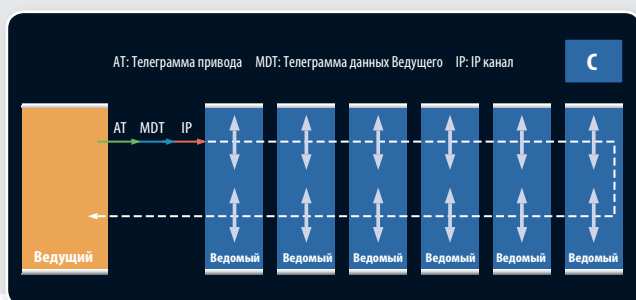
Хотя для ведомых устройств обязательно требуется специальное оборудование, в качестве ведущего устройства вполне могут применяться программные решения. Организация пользователей Sercos предлагает ядро SERCOS III IP для поддержки разработки оборудования SERCOS III на основе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). SERCOS III использует метод суммарного фрейма. Сетевые узлы должны соединяться шлейфом или кольцом. Данные обрабатываются во время прохождения через устройство, причем для разных типов взаимодействия используются разные типы телеграмм. Благодаря применению полнодуплексного Ethernet-соединения шлейф узлов фактически образует одно кольцо; а правильно построенная кольцевая технология образует двойное кольцо, обеспечивая резервирование при передаче данных.

Непосредственный перекрестный трафик реализуется двумя коммуникационными портами в каждом узле: и в последовательной, и в кольцевой сети телеграммы реального времени проходят через каждый узел на пути вперед и назад, т.е. они обрабатываются дважды за один цикл. Следовательно, устройства могут обмениваться информацией друг с другом в пределах одного цикла, не требуя пропускания своих данных через ведущее устройство.



Специальный контроллер для связи ведущий-ведомый в технологии SERCOS называется SERCON.

Кроме канала реального времени, который использует временные слоты с зарезервированными полосами для передачи данных без коллизий, SERCOS III предлагает опционный канал относительного времени. Узлы синхронизируются на аппаратном уровне по инициативе первой телеграммы реального времени в начале коммуникационного цикла. С этой целью в первую телеграмму встраивается Главная телеграмма синхронизации (MST). Обеспечивая высокую точность за счет поддержания смещения синхронизации не более 100 нс, аппаратная процедура компенсирует задержки времени исполнения и флуктуации, возникающие в Ethernet-оборудовании. Различные сегменты сети могут использовать разную тактовую частоту циклов и все же достигать полностью синхронной работы.



Организации пользователей

Еще одним ключевым аспектом нашей оценки системы является независимость пользователей. Нерешенные проблемы, касающиеся прав на товарную марку или патенты, могут ограничивать собственные разработки пользователей. Эти важнейшие факторы должны учитываться при выборе системы. Чтобы избежать юридических ловушек в будущем, следует внимательно рассмотреть создателей решений и организации пользователей, которые их поддерживают.

Критерии	PROFINET RT IRT	POWERLINK	EtherNet/IP	EtherCAT	SERCOS III
Организация	PNO	EPG	ODVA	ETG	SERCOS International
www.	profinet.com	ethercat-powerlink.org	odva.org	ethercat.org	sercos.org

PROFINET – PI

PROFIBUS & PROFINET International (PI) – это международная зонтичная организация, объединяющая 25 региональных Ассоциаций PROFIBUS и PROFINET, включая организацию пользователей PNO (PROFIBUS Nutzerorganisation e. V). У этой организации есть офис, который управляет совместными проектами и распространяет информацию участникам и другим заинтересованным лицам. Офису подчинен сертификационный центр для продуктов PROFIBUS и PROFINET. Принятый 24 апреля 1996 г. устав организации определяет ее обязанности и сферу ответственности. Членами организации могут стать любые компании, ассоциации и учреждения, поддерживающие интересы PI – производители устройств, пользователи, поставщики системных решений или операторы сетей PROFIBUS или PROFINET.
www.profinet.com

POWERLINK – EPSG

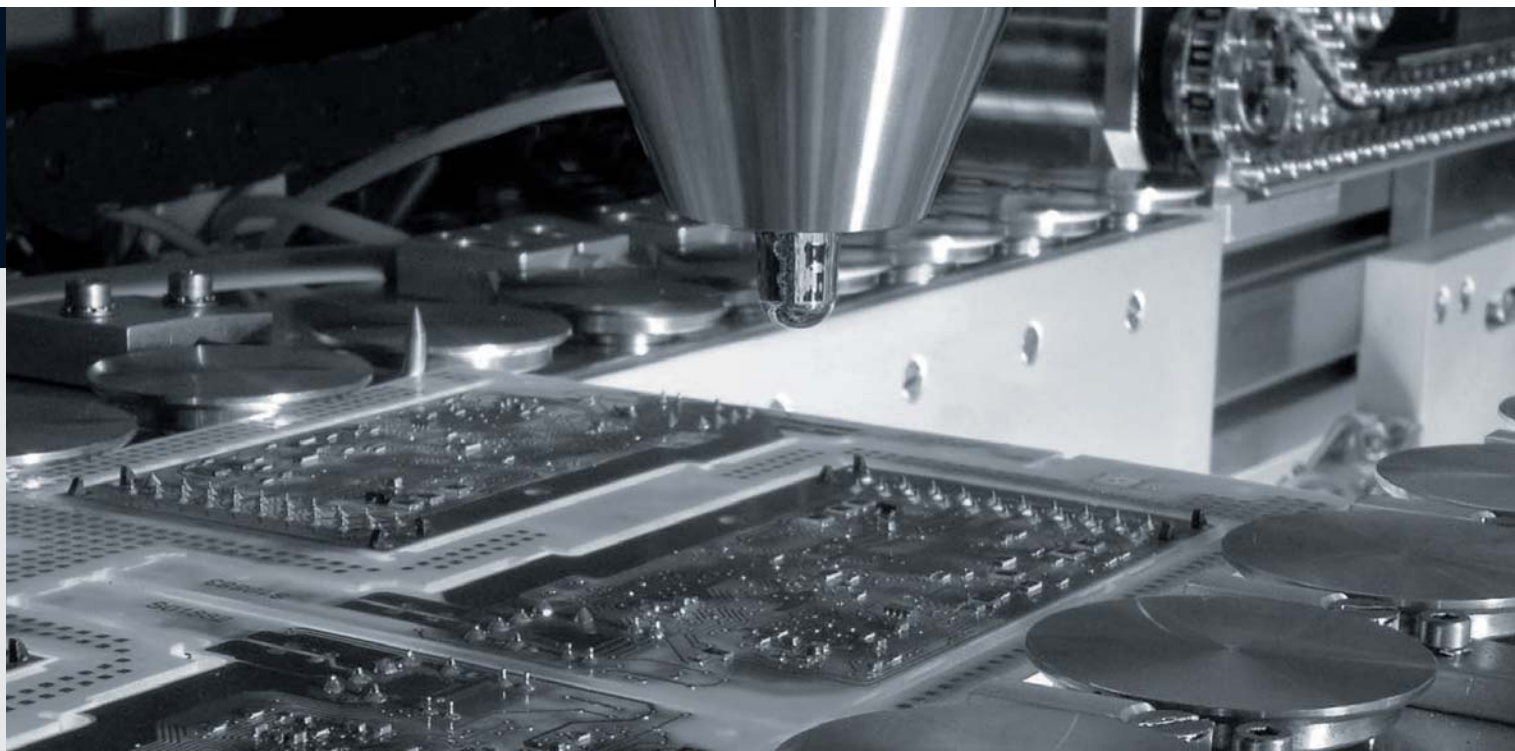
Группа стандартизации Ethernet POWERLINK (EPG) была основана в 2003 г. в качестве независимой организации компаний-производителей приводов и систем автоматизации. Целью группы является стандартизация и дальнейшая разработка протокола POWERLINK, представленного компанией B&R в 2001 г. EPSG взаимодействует с комитетами по стандартизации, такими как «CAN в автоматизации» (CiA) или МЭК (IEC). EPSG является зарегистрированной ассоциацией, созданной в соответствии с гражданским законодательством Швейцарии.
www.ethercat-powerlink.org

EtherNet/IP – ODVA

ODVA представляет собой объединение всех пользователей DeviceNet и EtherNet/IP. Организация занимается постоянной разработкой и дальнейшим распространением этих полевых шин, которые преимущественно используются в США и Азии, хотя встречаются и в Европе. Одним из ключевых направлений деятельности организации является разработка и продвижение CIP и других основанных на нем протоколов. Пользователи могут не только применять эту технологию, но и вносить вклад в непрерывные разработки, присоединившись к Группам специальных интересов (SIG). Кроме того, ODVA принимает активное участие в деятельности других комитетов по стандартизации и промышленных консорциумов. Устав организации сравнительно сложен.
www.odva.org



Обзор системы: 5 основных претендентов



EtherCAT – ETG

Технологическая группа EtherCAT представляет собой форум, совместно учрежденный пользователями, производителями комплектного оборудования, изготовителями станков и другими поставщиками систем автоматизации. Цель группы заключается в поддержке и пропаганде преимуществ EtherCAT как открытой технологии. Головному офису организации в Нюрнберге подчинена сертификационная лаборатория. Все договорные соглашения на использование технологии EtherCAT должны заключаться непосредственно с компанией Beckhoff Automation. Технологическая группа EtherCAT представляет собой «nicht eingetragener Verein», т. е. незарегистрированное общество в соответствии с гражданским кодексом Германии.
www.ethercat.org

SERCOS III – sercos International e. V.

sercos International e.V. (SI) представляет собой ассоциацию, зарегистрированную в Германии. Ее офис находится во Франкфурте-на-Майне. Членами являются изготовители и пользователи систем управления, приводов и других компонентов автоматизации, производители станков, а также НИИ и другие организации. Ассоциация имеет дочерние организации в Северной Америке и Азии. С головным офисом сотрудничает сертификационная лаборатория Штутгартского университета.
www.sercos.org



Статус, права и лицензирование

Каков юридический статус различных организаций пользователей? Кто является собственником технологии? Какие юридические ограничения, в зависимости от условий лицензирования, связывают разработчиков, использующих конкретную технологию? Ответы на эти вопросы даются ниже.

Критерии	PROFINET RT IRT	POWERLINK	EtherNet/IP	EtherCAT	SERCOS III
Тип организации	ассоциация +	ассоциация +	ассоциация +	незарегистриро- ванный клуб o	ассоциация +
Ответственность	PNO +	EPSP +	ODVA +	участники o	SERCOS +

Технологическая группа EtherCAT: незарегистрированный клуб не является правовым субъектом, а представляет собой гибрид между ассоциацией и частным партнерством, юридическая ответственность которого остается неясной.

Критерии	PROFINET RT IRT	POWERLINK	EtherNet/IP	EtherCAT	SERCOS III
Владельцы прав	члены +	члены +	члены +	Beckhoff o	члены +
Владельцы бренда	PNO +	EPSP +	ODVA +	Beckhoff o	SERCOS +

В большинстве случаев права на технологию остаются у организации, несущей за нее ответственность. Следовательно, члены организации, являясь совладельцами технологии, могут ее использовать. Если права на технологию принадлежат другому лицу или организации, то перспективы ее будущего законного применения остаются неясными.



Обзор системы: 5 основных претендентов

Критерии	PROFINET RT IRT	POWERLINK	EtherNet/IP	EtherCAT	SERCOS III
Оплата участия	членские взносы ○	членские взносы ○	членские взносы ○	без членских взносов +	членские взносы ○

Членство в ETG бесплатно. В других организациях членство платное. Ежегодный взнос обычно зависит от размера компании-участницы. Кроме того, организации пользователей POWERLINK и SERCOS позволяют разрабатывать и выводить на рынок продукты не только своим участникам.

Критерии	PROFINET RT IRT	POWERLINK	EtherNet/IP	EtherCAT	SERCOS III
Спецификации ведущего и ведомого устройств	PNO +	EPG +	ODVA +	Beckhoff ○	SERCOS ○

Хотя для SERCOS III и EtherCAT и описаны коммуникационные механизмы, но внутренние принципы работы ведомых устройств остаются неопределенными. Пользователи должны использовать специализированные ИС и ПЛИС. Проприетарный код ПЛИС от Beckhoff доступен в виде объектного кода, исходный код не разглашается.

Критерии	PROFINET RT IRT	POWERLINK	EtherNet/IP	EtherCAT	SERCOS III
Бесплатный исходный код ведущего устройства	-	+	-	○	+
Бесплатный исходный код ведомого устройства	-	+	+	-	○

PROFINET: Организация пользователей PROFIBUS (PNO) предлагает своим членам исходный код и документацию для реализации PROFINET (исполняемое ПО PROFINET). Пункт 1.5 лицензионного соглашения на это ПО дает членам PNO право на использование пяти патентов.

POWERLINK: Код ведущего и ведомого устройств POWERLINK доступен бесплатно по лицензии на открытый исходный код BSD. Пакет программ доступен на сайте SourceForge.net.

EtherNet/IP: Пакеты программ можно приобрести у различных провайдеров услуг. Университетом разработан вариант с открытым исходным кодом.

EtherCAT: Для реализации ведомых устройств обязательно применение специализированных ИС или ПЛИС. Код на языке VHDL или проприетарный код для ПЛИС нужно покупать у компании Beckhoff; исходный код недоступен. ETG предлагает образцы кода для ведущих устройств. Поскольку патентодержатель не согласен на лицензирование открытого исходного кода, то исходный код не квалифицируется, как открытый.*

SERCOS III: ПО ведущего устройства предлагается бесплатно по лицензии LGPL. Для ведомых устройств нужно приобретать специализированные ИС или код для ПЛИС.

* Источник: Лаборатория разработки средств автоматизации с открытым исходным кодом (www.osadl.org)

Инвестиционная привлекательность

Мы уже упоминали открытость, как один из факторов, влияющих на долговременную окупаемость инвестиций. Кроме того, большую роль в принятии безопасных долговременных решений по инвестициям играет целый ряд технических и стратегических соображений.

Совместимость с существующими профилями приложений

Критерии	PROFINET RT IRT	POWERLINK	EtherNet/IP	EtherCAT	SERCOS III
	PROFIBUS	CANopen	DeviceNet	CANopen	SERCOS II
Обратная совместимость	+	+	+	+	+

Восприимчивость к электромагнитным помехам / Надежность передачи

Протоколы суммарного фрейма более восприимчивы к помехам, чем протоколы с одним фреймом. При повреждении фрейма в протоколах с суммарным фреймом всегда теряется весь цикл.

Критерии	PROFINET RT IRT	POWERLINK	EtherNet/IP	EtherCAT	SERCOS III
Электромагнитная восприимчивость	+	+	+	○	○

Поскольку SERCOS III использует две телеграммы, то по сравнению с EtherCAT его производительность выше на 50 %.

Точки электрических подключений

Одной из особенностей EtherCAT является возможность направить все коммуникации через внутреннюю терминальную шину ввода/вывода. Однако высокая производительность, упоминаемая обычно в связи с этой функцией, омрачается риском снижения безопасности из-за повышенной восприимчивости к помехам (в местах подключений шины).

Критерии	PROFINET RT IRT	POWERLINK	EtherNet/IP	EtherCAT	SERCOS III
Точки электрических подключений	+	+	+	○	+



Кабельные соединения гибкой топологии

Сети EtherCAT и SERCOS III всегда образуют логическое кольцо. Это кольцо может физически замыкаться на ведущем устройстве, а в случае шлейфового соединения – внутри последнего узла физической линии. EtherCAT позволяет ответвлять магистраль через специальные соединения, но весь фрейм проходит по таким ответвлениям вперед и назад, то есть в целом сеть по-прежнему образует логическое кольцо.

Критерии	PROFINET RT IRT	POWERLINK	EtherNet/IP	EtherCAT	SERCOS III
Топология «Дерево»	+	+	+	○	○
Топология «Звезда»	+	+	+	○	○
Топология «Кольцо»	+	+	+	+	+
Топология «Шлейф»	+	+	+	+	+

Высокая надежность

Только спецификации POWERLINK предусматривают резервирование ведущего устройства и кабеля, которое реализовано в реальных проектах. Для PROFINET и EtherNet/IP возможна реализация приложений на специальных коммутаторах.

Критерии	PROFINET RT IRT	POWERLINK	EtherNet/IP	EtherCAT	SERCOS III
Кольцевое резервирование	○	+	○	+	+
Резервирование ведущего устройства и кабеля	○	+	○	○	—



Обзор системы: 5 основных претендентов

Возможность горячего подключения

POWERLINK, EtherNet/IP и PROFINET предоставляют пользователям возможность горячей замены. На SERCOS III и EtherCAT распространяются некоторые ограничения, связанные с обязательным использованием кольцевой топологии. В топологии физического кольца SERCOS III допускает отказ одного сетевого узла. В этом случае два его соседних узла замыкают свои линии передачи и приема. После этого к оставшимся узлам можно обращаться с любой стороны от ведущего устройства. EtherCAT предлагает некоторые возможности горячего подключения: если к портам ведомого контроллера EtherCAT ничего не подключено, то они автоматически отключаются. Однако распределенный сигнал тактовой частоты EtherCAT требует повторной синхронизации, что может повлиять на некоторые приложения.

Критерии	PROFINET RT IRT	POWERLINK	EtherNet/IP	EtherCAT	SERCOS III
Горячая замена	+	+	+	○	○

В технологиях, основанных на логическом кольце (EtherCAT и SERCOS III), ограничения сетевой топологии накладываются и на возможность горячего подключения. Горячее подключение модулей возможно только к одному концу шлейфа (SERCOS III), а распределенный сигнал тактовой частоты требует повторной синхронизации, что может наложить ограничения на некоторые приложения.

Готовность к переходу на Gigabit Ethernet

Поскольку EtherNet/IP и POWERLINK полностью реализованы программно, эти протоколы легко могут использоваться в оборудовании Gigabit Ethernet. Системы EtherCAT можно расширить до Gigabit, но для этого требуется повторная разработка специализированных ИС. PROFINET IRT тоже требует некоторой переработки оборудования, что, в частности, касается коммутаторов. Решения на основе ПЛИС также могут быть переработаны для поддержки в Gigabit.

Критерии	PROFINET RT IRT	POWERLINK	EtherNet/IP	EtherCAT	SERCOS III
Готовность к Gigabit	+	+	+	-	○

Члены sercos International утверждает, что их проприетарное ядро в принципе готово к переходу на Gigabit Ethernet.

Поддержка международных стандартов

Международный стандарт IEC 61158 классифицирует протоколы (называемые «Типами») для использования в промышленных системах управления. Стандарт IEC 61784-2 классифицирует семейства коммуникационных профилей (называемые «CPF»). Стандарты GB представляют собой национальные китайские стандарты, подготовленные и выпущенные Комитетом по стандартизации Китая (SAC). Эти стандарты распространяются на все отрасли промышленности Китая. Документы GB/Z представляют национальные технические руководства. Они носят в основном информативный характер и не являются обязательными для исполнения. Для коммуникационных технологий в Китае главным является стандарт GB/T. Он рекомендован для использования во всех отраслях промышленности Китая и отвечает следующему требованию: в нем описывается полностью открытая технология, которая может широко применяться в качестве стандартной во всем мире. Оборудование, выпущенное по этому стандарту должно без проблем использоваться в любой стране и компании.

Критерии	PROFINET RT IRT	POWERLINK	EtherNet/IP	EtherCAT	SERCOS III
IEC 61158	Type 10	Type 13	Type 2	Type 12	Type 19
IEC 61784-2	CPF 3	CPF 13	CPF 2	CPF 12	CPF 16
Национальный китайский стандарт GB	GB/Z 25105-2010	GB/T 27960-2011	GB/Z 26157-2010		

Продукты на рынке

Продукты PROFINET IRT на основе технологии ERTEC (Enhanced Realtime Ethernet Controller – Усовершенствованный Ethernet-контроллер реального времени) широко доступны на рынке. Тем не менее, появление функции DFP и нового поколения специализированных ИС (например, Tiger Chip от компании Phoenix Contact) породило сомнения в будущей совместимости текущих решений IRT.

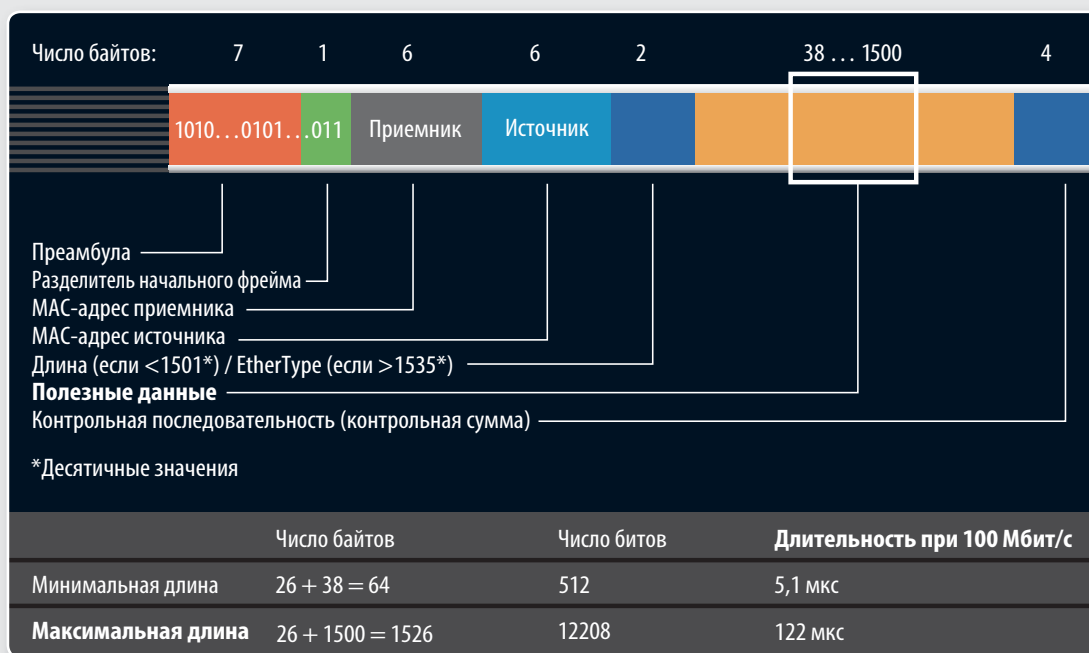
Критерии	PROFINET RT IRT	POWERLINK	EtherNet/IP	EtherCAT	SERCOS III
Продукты на рынке	+	+	+	+	+



Производительность

Теоретически достижимая длительность цикла

Производительность систем послужила поводом для многочисленных дискуссий, основной темой которых стала теоретически достижимая длительность цикла в системах промышленного Ethernet. Самая малая длительность цикла теоретически рассчитывается следующим образом:



Источник: структура фрейма согласно определению IEEE 802.3 (кроме указанной выше длительности 5,1 мкс нужно добавить еще промежуток между фреймами 0,96 мкс).



Обзор системы: 5 основных претендентов

Следовательно, если ведущее устройство отправляет фрейм, адресованный самому себе, который не будет проходить через другие узлы, то этот фрейм появится в ведущем устройстве через 122 мкс (в случае одного Ethernet-фрейма максимальной длины).

Теоретически обрабатывать отдельные части фрейма можно по мере их поступления. Однако байты контрольной суммы (CRC), подтверждающие достоверность полученных данных, приходят последними в конце фрейма. Этот сценарий не учитывает задержки на физическом уровне, вызванные кабелями, портами Ethernet, задержками передачи внутри ведущего устройства и т.д. Кроме того, как только сигнал покидает ведущее устройство, то нужно учитывать время его прохождения по сети (5 нс/м) и время обработки в ведомом устройстве.

Делая выбор между централизованной или децентрализованной архитектурой, следует тщательно учесть перспективные расширения системы и возможные будущие требования. Одно из преимуществ децентрализованной обработки различных контуров управления заключается в том, что она позволяет добавлять узлы без заметного влияния на базовую длительность цикла, т.е. не требует внесения фундаментальных изменений в общую концепцию. Кроме того, дополнительная функциональность, такая как мониторинг состояния или встроенная технология безопасности, будет оказывать меньшее влияние на концепцию управления, чем в централизованных архитектурах, на которые сильно влияет уменьшение объемов данных.

Чтобы выбрать решение, рассчитанное на перспективу, следует везде, где только можно, отдавать предпочтение децентрализованной обработке контуров управления с длительностью цикла менее 500 мкс, особенно в приложениях по управлению приводами.

Коммуникационная архитектура систем

Критерии	PROFINET RT IRT	POWERLINK	EtherNet/IP	EtherCAT	SERCOS III
Поддержка централизованного управления	+	+	+	+	+
Поддержка децентрализованного управления	+	+	+	-	o

Непосредственный перекрестный трафик

Непосредственный перекрестный трафик предоставляет критически важные преимущества, особенно для жесткого реального времени: в контролерах быстрых приводов он позволяет легко и с высокой точностью синхронизировать оси, поскольку все значения положений могут распределяться непосредственно, не проходя через ведущее устройство. Это снижает нагрузку на сеть и гарантирует доступность данных (например, реальных положений осей) для всех задействованных узлов в пределах текущего цикла. А если данные проходят сначала через ведущее устройство, то это не только добавляет задержку на один цикл, но и увеличивает общий трафик в сети.

Критерии	PROFINET RT IRT	POWERLINK	EtherNet/IP	EtherCAT	SERCOS III
Непосредственный встречный трафик	+	+	+	-	+

В POWERLINK и SERCOS III непосредственный встречный трафик доступен даже для модулей, обладающих только функциональностью ведомого устройства, тогда как для EtherNet/IP требуются модули с функциональностью опрашиваемого устройства.

Передача больших объемов данных

В приложениях, требующих передачи больших объемов данных, время прохождения через узлы сильно влияет на общую длительность цикла. Но ее можно сократить, устанавливая приоритетность данных. Системы, поддерживающие механизмы приоритетности, позволяют в каждом цикле считывать данные высокого приоритета, в то время как данные низшего приоритета будут опрашиваться через каждые n циклов.

Критерии	PROFINET RT IRT	POWERLINK	EtherNet/IP	EtherCAT	SERCOS III
Приоритетность	+	+	+	○	+

В POWERLINK, EtherNet/IP и PROFINET переменная длительность цикла жестко прописана в спецификациях протокола. В SERCOS III эта возможность добавлена только недавно. В EtherCAT решения для реализации этого требования могут быть реализованы как часть специального приложения.

Нагрузка на сеть с устройствами безопасности

Сеть Ethernet может использоваться для реализации функций систем безопасности, когда подключенные к ней устройства безопасности (кнопка аварийного останова, приводы с контроллерами безопасности) циклически обмениваются защищенными данными. Используемые в этих процессах меры защиты включают дублирование данных и их упаковку в безопасные «контейнеры», что приводит к росту сетевого трафика. В решениях с суммарным фреймом это приводит к росту числа фреймов, а в решениях с одним фреймом это увеличивает объем данных каждого передаваемого фрейма. В конечном итоге теоретически более высокая производительность метода суммарного фрейма сводится к нулю.



Реальная длительность цикла

В решениях с суммарным фреймом данные должны дважды проходить через каждый контроллер. Если сигнал вынужден проходить через много узлов, то общее время передачи существенно возрастает. Поэтому данные о «сырой» производительности, предоставляемые организациями, поддерживающими такие решения, следует скорректировать с учетом этого эффекта. Другим аспектом, который тоже необходимо учитывать, является то, что производительность зависит от особенностей реализации, например, от класса задач, решаемых реальными системами управления, используемыми в приложении.

Критерии	PROFINET RT IRT	POWERLINK	EtherNet/IP	EtherCAT	SERCOS III
Производительность	○	+	○	+	+

Джиттер

Для достижения высокого качества управления очень важно обеспечить минимальный джиттер (отклонение тактовой частоты) и очень точно определить задержки сигнала. Для этого сетевые узлы должны быть синхронизированы с максимально возможной точностью. Конкурирующие варианты Ethernet используют для достижения этой цели разные механизмы. Если EtherCAT использует принцип распределенной синхронизации, реализуемый специальным алгоритмом в ESC (контроллере ведомых устройств EtherCAT), то в сетях POWERLINK синхронизация достигается с помощью простого синхросигнала (SoC).

Критерии	PROFINET RT IRT	POWERLINK	EtherNet/IP	EtherCAT	SERCOS III
Jitter	○	+	○	+	+

EtherCAT, POWERLINK и SERCOS III позволяют создавать систему практически без джиттера (< 100 нс). В сетях EtherNet/IP джиттер можно значительно уменьшить, используя во всех компонентах специальные расширения IEEE 1588. Джиттер можно уменьшить и в приложениях PROFINET IRT.



Обзор системы: 5 основных претендентов

Сравнение производительности

На практике сравнение производительности различных систем оказывается достаточно сложной задачей из-за различия их характеристик. Системы EtherNet/IP и PROFINET RT сразу исключаются, поскольку они пригодны лишь для мягкого реального времени. В PROFINET IRT имеются проблемы, связанные с обязательным применением коммутаторов, что порождает иную архитектуру приложений, затрудняющую прямое сравнение систем. Приведенные ниже значения получены на основе опубликованных схем расчета.

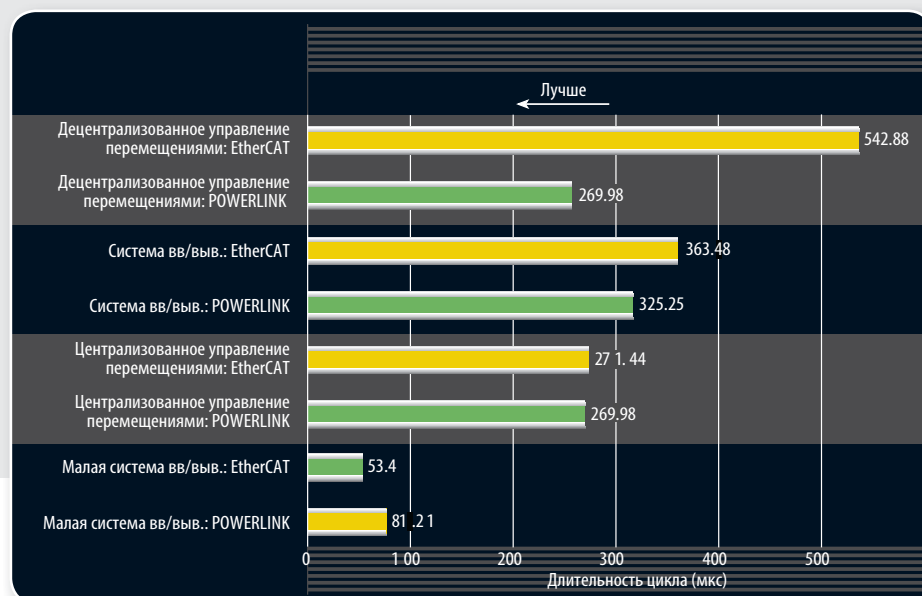
Использовались следующие сценарии тестирования

1. Малая система, состоящая из ведущего устройства и 33 модулей ввода/вывода (64 аналоговых и 136 цифровых каналов).
2. Система ввода/вывода с ведущим устройством и двенадцатью ведомыми устройствами Ethernet с 33 модулями каждое (всего 2000 цифровых и 500 аналоговых каналов).
3. Сеть для управления перемещениями с 24 осями и одной станцией ввода/вывода со 110 цифровыми и 30 аналоговыми портами ввода/вывода.

На практике в большинстве приложений POWERLINK оказывается быстрее, чем EtherCAT. EtherCAT оптимизирован для приложений с очень малым объемом сетевого трафика. В системах с большим трафиком в среде EtherCAT наблюдается непропорционально большой рост длительности цикла. В децентрализованных архитектурах (например, в децентрализованных системах управления перемещениями) EtherCAT сильно страдает из-за отсутствия непосредственного перекрестного трафика (в обоих направлениях), что резко снижает теоретически достижимую производительность. Кроме того, прямая интеграция ввода/вывода EtherCAT приводит к снижению частоты выборки системы ввода/вывода, поскольку время прохождения через систему ввода/вывода непосредственно влияет на длительность цикла. В POWERLINK и SERCOS III такие эффекты отсутствуют.

В качестве исходной точки для расчетов, касающихся EtherCAT, использовались сведения, опубликованные Притцем в 2008 г.¹ Им были заново измерены задержки сигналов при прохождении через специализированные ИС EtherCAT. Измерения проводились на реальных продуктах, используемых в приложениях POWERLINK. Их результаты рассеяли все сомнения и подтвердили заявленные ранее значения.

Для SERCOS III испытания и расчеты не выполнялись. Тем не менее, можно ожидать, что уровень производительности SERCOS III может быть сравним с POWERLINK, что делает его быстрее EtherCAT во многих приложениях.



¹ Г. Притц, конференция EFTA 2008 г. Анализ производительности EtherCAT и PROFINET IRT. Опубликовано на сайте Технологической группы EtherCAT: www.ethercat.org. Последнее обращение: 14 сентября 2011 г.

Реализация



В стоимость реализации входят затраты на разработку, цена лицензии и оборудования. Здесь нужно учитывать также доступность кода (программы или VHDL в случае аппаратной реализации).

Реализация ведущего устройства

Конструкция ведущего устройства	PROFINET RT IRT		POWERLINK	EtherNet/IP	EtherCAT	SERCOS III
Доступ к ведущему устройству	—		+	—	○	+
	Ведущее устройство с открытым исходным кодом отсутствует		openPOWERLINK (открытый исходный код)	Ведущее устройство с открытым исходным кодом отсутствует	защищен патентом ¹	общий API ведущего устройства SERCOS III (открытый исходный код)
Стоимость реализации	○	—	+	○	+	○
	дорогой пакет программ	требует специального оборудования с сопроцессором	работает на стандартном оборудовании	дорогой пакет программ	работает на стандартном оборудовании	обычно с поддержкой сопроцессора

¹ Ведущее устройство с открытым исходным кодом отсутствует. Существует только образец кода, на который не распространяются гарантийные обязательства.

Все протоколы позволяют реализовать ведущее устройство программно на стандартной микросхеме Ethernet.



Обзор системы: 5 основных претендентов

Стоимость сетевых компонентов

Внешние устройства = внешние коммутаторы или концентраторы

Внутренние мультипорты = порты, непосредственно интегрированные в устройства, в основном для последовательных и кольцевых топологий

Стоимость сетевых компонентов	PROFINET RT IRT		POWERLINK	EtherNet/IP	EtherCAT	SERCOS III
Внешние устройства	+	o	+	o	o	o
	стандартный коммутатор	специальный коммутатор, необходима поддержка IRT	стандартные концентраторы и коммутаторы	необходим управляемый коммутатор со сложной функциональностью (отслеживание IGMP, зеркалирование портов и т.п.)	необходимы специальные сетевые компоненты ¹	рассчитан на будущее применение внешних инфраструктурных устройств, но на момент написания статьи не применялся
Внутренние мультипорты	o	o	+	o	+	+
	интегрированный коммутатор	необходима специализированная ИС Siemens	стандартный концентратор	интегрированный коммутатор, очень сложный	необходима специализированная ИС Beckhoff ²	технология на основе ПЛИС

¹ Для организации топологии «звезда» или «дерево» в EtherCAT нужны специальные сетевые компоненты.

² Beckhoff ET1100.



Реализация ведомого устройства

Реализация протокола шины ведомых устройств EtherCAT, SERCOS III и PROFINET IRT требует применения аппаратных решений (специализированных ИС и ПЛИС). В POWERLINK, EtherNet/IP и PROFINET RT могут также применяться программные решения на основе микроконтроллеров. В стоимость программных решений входит стоимость лицензий на пакет программ и возможно, дополнительные затраты на более мощные и, следовательно, более дорогие контроллеры. Для аппаратных решений пользователи могут выбрать коммуникационные интерфейсы на основе ПЛИС или специализированных ИС. В принципе, ПЛИС можно применять и в программных решениях.

ПЛИС (программируемая вентильная матрица) представляет собой интегрированную схему, которую разработчики оборудования могут конфигурировать самостоятельно. Она состоит из программируемых логических компонентов, т.н. логических блоков, и имеет иерархию для переконфигурирования схемы их соединения. Все логические функции специализированных ИС могут реализовываться и с помощью ПЛИС. Функции можно настраивать перед вводом в эксплуатацию. Разовые затраты на разработку ПЛИС меньше, чем затраты на специализированные ИС. ПЛИС очень привлекательны для решений промышленного Ethernet не только благодаря малой стоимости, высокой производи-

тельности и поддержке нескольких протоколов, но и потому, что позволяют использовать предварительно собранные компоненты для интеграции функций уровня 2 семиуровневой модели OSI (концентраторы, коммутаторы). Однако пользователи должны знать, что сложность протокола сказывается на объеме кода и, как следствие, на необходимом числе логических блоков. Функциональность уровня 2 тоже может сильно повлиять на их число. Коммутаторам требуется больше блоков, чем концентраторам, а коммутаторам со сложным управлением требуются дополнительные логические блоки. POWERLINK является наименее сложным Ethernet-решением реального времени. К тому же, поскольку POWERLINK использует только концентраторы, этот протокол требует небольшого числа логических блоков и может реализовываться на малых ПЛИС.

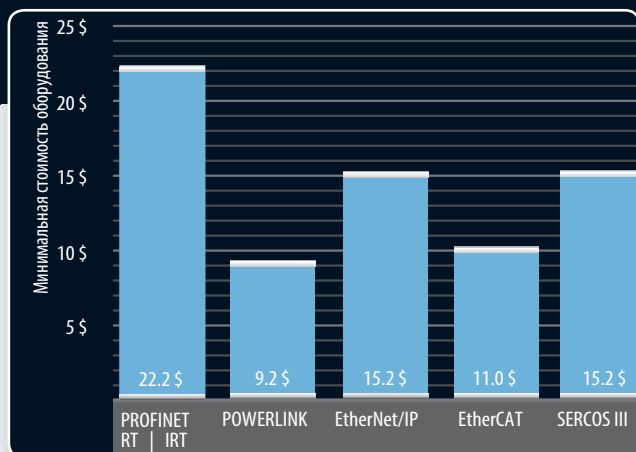
С другой стороны, EtherCAT и SERCOS III более требовательны и, следовательно, нуждаются в большем числе логических блоков.

Стоимость подключения узлов в различных системах Ethernet реального времени

Приведенная ниже стоимость подключения в расчете на один узел относится к расходам на эксплуатацию оборудования. В расчете не учитыва-



Обзор системы: 5 основных претендентов



лась потенциальная стоимость лицензий на пакет программ и т. п.

Цифры, приведенные на этой диаграмме, предоставлены различными производителями. Они показывают цену реализации разных решений промышленного Ethernet. Кроме того, некоторые цифры публиковались производителями в журналах по промышленной автоматизации. Стоимость физического уровня ($2 \times 1,1$ \$) считается одинаковой для всех протоколов. Расходы на соединители не учитывались. Расчет стоимости на один узел выполнялся исходя из годового объема 1000 штук.

Profinet: Расчет выполнялся для решения со специализированными ИС ERTEC200. В будущих реализациях могут использоваться устройства с ИС TPS1 от компании Phoenix Contact. В этом случае стоимость может снизиться до уровня, сравнимого с EtherCAT. Уровень стоимости POWERLINK достигнут не будет.

Powerlink: Расчет выполнялся для решения на основе ПЛИС. Учитывалась стоимость ОЗУ и флэш-памяти.

EtherNet/IP: Данные для EtherNet/IP относятся к типичному решению на основе ПЛИС.

EtherCAT: Расчет выполнялся для самых дешевых специализированных ИС EtherCAT с двумя портами Ethernet (ET1100). Решения EtherCAT на основе ПЛИС стоят значительно больше; разница особенно велика для синхронных решений с синхронизацией реального времени.

Sercos III: Данные Sercos III относятся к типичному решению на основе ПЛИС.

Эксплуатационные расходы

Эксплуатационные расходы состоят в основном из затрат на техническое обслуживание и администрирование сети. Некоторые технологии, такие как EtherNet/IP с синхронизацией CIP и PROFINET IRT, очень сложны, и поэтому стоимость их администрирования может быть очень высокой. Кроме того, любое применение управляемых коммутаторов требует опыта работы с сетью. Во многих случаях для сдачи в эксплуатацию и обслуживания требуется привлечение сетевых инженеров.

В реализации режима реального времени ключевую роль играет технология синхронизации. POWERLINK и SERCOS III обеспечивают синхронизацию через механизм, управляемый ведущим устройством, который обеспечивает высокую точность и мало подвержен ошибкам. PROFINET IRT и EtherNet/IP с синхронизацией CIP используют механизм синхронизации, совместимый с IEEE 1588. Это существенно усложняет администрирование сети, особенно, если устройства нужно изолировать, поскольку они порождают ошибки синхронизации, вызванные программными или аппаратными сбоями.

Такие функции, как горячее подключение – т. е. возможность замены устройств без отключения сети – также позволяют значительно сократить расходы на обслуживание. Заменяемые устройства можно обновлять и настраивать, не влияя на функции системы, выполняемые в реальном времени.

Затраты	PROFINET RT IRT	POWERLINK	EtherNet/IP	EtherCAT	SERCOS III
Стоимость покупки	○	+	○	+	○
Эксплуатационные расходы	○	+	○	+	+

Функции обеспечения безопасности

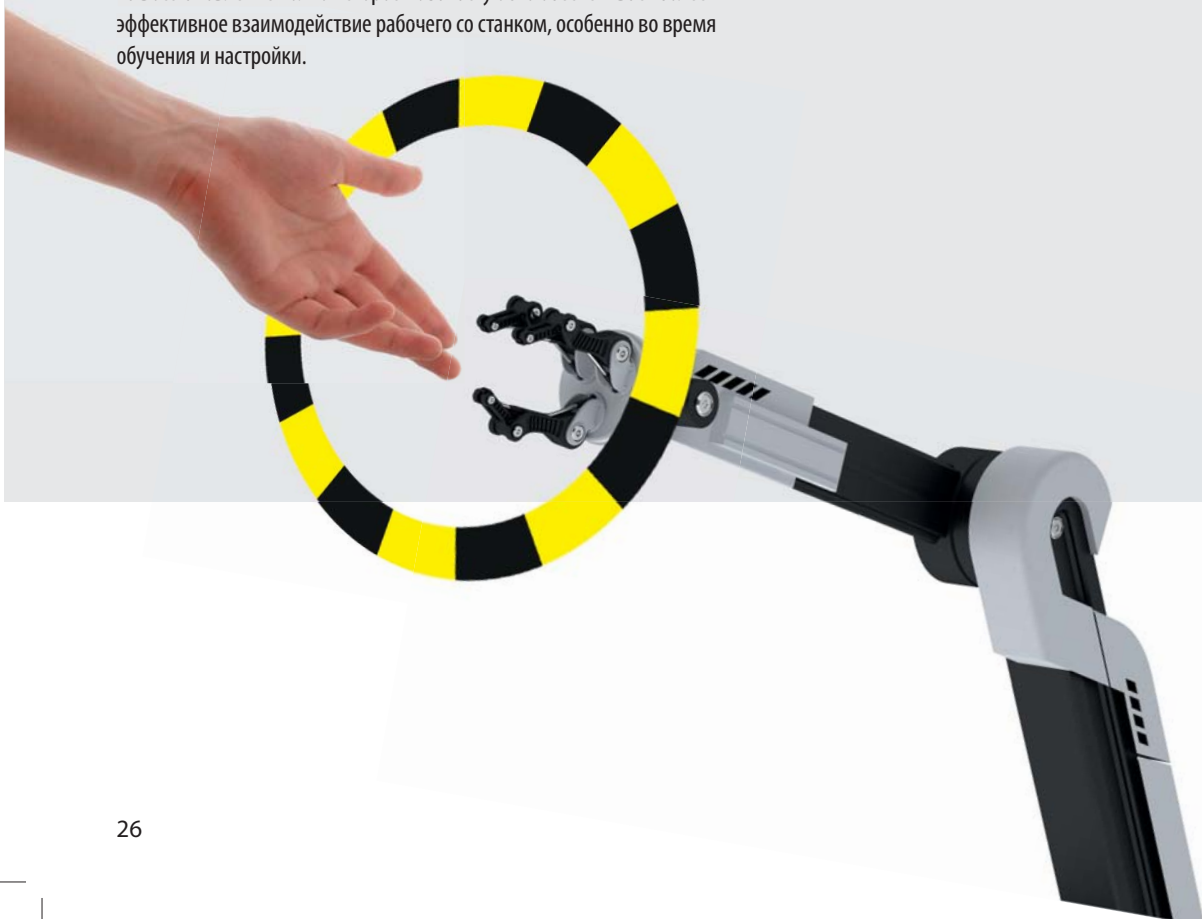
За последнее десятилетие требования к безопасности на производстве стали более жесткими. Выход Директивы Евросоюза о машинах и механизмах 2006/42/ЕС заставил машиностроителей и других производителей уделять еще более пристальное внимание данной проблеме. От них требуется создавать комплексные решения по защите рабочих от травм, а производственного оборудования – от повреждения при одновременном сохранении высокого уровня производительности.

Появление новых стандартов привело к необходимости строгой сертификации нового производственного оборудования и к возрастанию требований к устройствам, обеспечивающим безопасность. Поддерживаемые множеством новых и инновационных продуктов, эти стандарты облегчают внесение изменений в концепции решений по безопасности. Например, теперь проникновение за защитное ограждение машины может не привести к остановке всех ее частей, как это было раньше. Во многих случаях, умная реакция, такая как продолжение работы на пониженной безопасной скорости, обеспечивает необходимый уровень защиты. При этом производительность падает не так сильно за счет сокращения времени на восстановление полной скорости. Зачастую это обеспечивает более эффективное взаимодействие рабочего со станком, особенно во время обучения и настройки.



Сетевая интеграция вместо жестких проводных соединений

Традиционно оборудование систем безопасности жестко подключалось к специальному коммутатору, логика работы которого реализовывалась чисто аппаратно. И хотя этот метод теоретически может охватить достаточно много случаев, все больше изготовителей станков осознают преимущества интегрированной системы безопасности. Она опирается на программируемое оборудование систем безопасности и модули ввода/вывода, которые используют существующую полевую шину для обмена данными, относящимися к обеспечению безопасности.





Обзор системы: 5 основных претендентов

На первый взгляд, старые методы могут показаться менее дорогими. И в связи с меньшей стоимостью аппаратных компонентов, во многих случаях это может быть и так, но только если не рассматривать решения по безопасности в комплексе. Везде, где сложность таких систем выходит за рамки простой кнопки аварийного останова, интегрированные сетевые системы безопасности более предпочтительны. Они сокращают число компонентов и кабелей, а также обеспечивают большую гибкость защитной логики, заменяя жесткое подключение на настраиваемую конфигурацию. Кроме того, существенно упрощается диагностика ошибок. В сочетании с централизованным хранением данных, это обеспечивает более быстрое восстановление. Максимальная готовность оборудования и станков обеспечивается интегрированными сетевыми технологиями безопасности за счет:

- Непосредственного подключения датчиков безопасности к сети
- Прямого считывания информации из компонентов
- Сокращения объема обслуживания за счет автоматической установки параметров компонентов по сети
- Более безопасного переключения режимов за счет установки параметров во время работы
- Сокращения времени реакции благодаря устранению задержек, вызванных реле
- Применения модульной конструкции, поддерживаемой сетевой структурой и ПО безопасности
- Повышения готовности благодаря расширенной диагностике
- Сокращения числа компонентов и проводных соединений
- Большого разнообразия защитных функций (безопасный останов, безопасное ограничение скорости и т.д.)

Как это работает

Приложения безопасности на основе сертифицированного ПО программируются с помощью функциональных блоков, таких как счетчики, таймеры или датчики скорости. Работая на специальных контроллерах безопасности, они заменяют традиционные цепи безопасности с жесткими подключениями. Программная реализация приложений по безопасности сокращает количество компонентов безопасности и стандартных модулей ввода/вывода. Помимо замены специально выделенных кабелей на передачу данных безопасности по существующей сети, это значительно снижает стоимость и сложность систем обеспечения безопасности. Благодаря использованию существующих сетевых соединений, изменение конфигурации станков или их опций не требует прокладки специальных кабельных линий. Кроме того, это повышает гибкость и свободу проектирования приложений по безопасности, а также упрощает модификацию существующих агрегатов и станков в течение их жизненного цикла. К тому же диагностические сигналы можно передавать без дополнительного оборудования. В конечном итоге применение интегрированных систем безопасности ускоряет проектирование и существенно сокращает время выхода на рынок.

Принцип Черного Канала

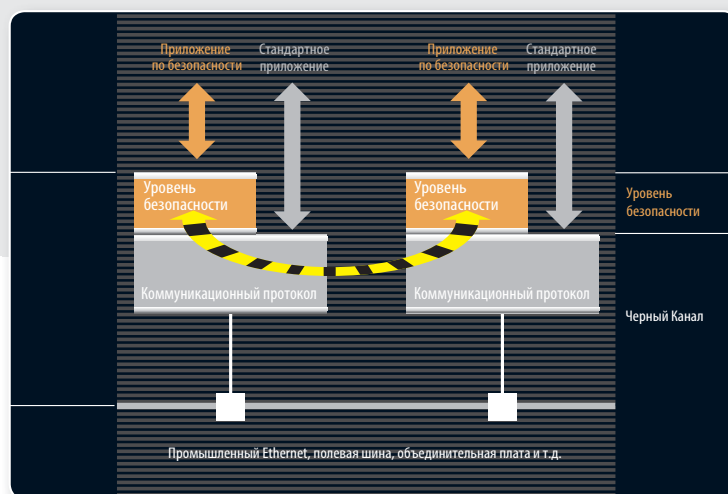
Полевые сети системы безопасности

Ориентированные на применение в системах безопасности полевые шины упрощают замену компонентов станков и оборудования. В большинстве случаев достаточно двух кабелей — одного для питания, другого для связи. Датчики могут подключаться прямо к сети безопасности. Им не нужны отдельные кабели для передачи диагностических сигналов. Это позволяет сократить необходимое число аппаратных компонентов.

Принцип Черного Канала позволяет передавать относящиеся к системе безопасности данные, а также диагностическую информацию по существующим сетевым соединениям. Это ускоряет реакцию системы. Датчики тоже получают свои настройки по сети. Это позволяет загружать в них оптимизированные параметры при изменении режима работы и устраняет необходимость настройки параметров на самом устройстве в случае замены компонента после отказа. Все это повышает производительность и сокращает простои.

Передача данных системы безопасности по шинам или сетевым линиям

Принцип черного канала позволяет передавать данные системы безопасности и обычные данные по одной и той же сети или шине. Независимо от механизма передачи обычных данных, используемого в этой линии, компоненты системы безопасности могут передавать данные с помощью изолированного защищенного протокола, образуя туннель под сетевым каналом. Полевые шины безопасности представляют собой чисто программные протоколы без собственных физических характеристик. Их скорость и длительность цикла зависят от используемого протокола передачи данных. Все возможные ошибки передачи известны и перечислены в соответствующих стандартах — IEC 61784-3 и IEC 61508. Механизм их предотвращения должен реализовываться в виде критической части протоколов передачи данных систем безопасности. Необходимое качество обнаружения ошибок передачи зависит от уровня защиты, которого нужно достичь.



Механизм Черного Канала



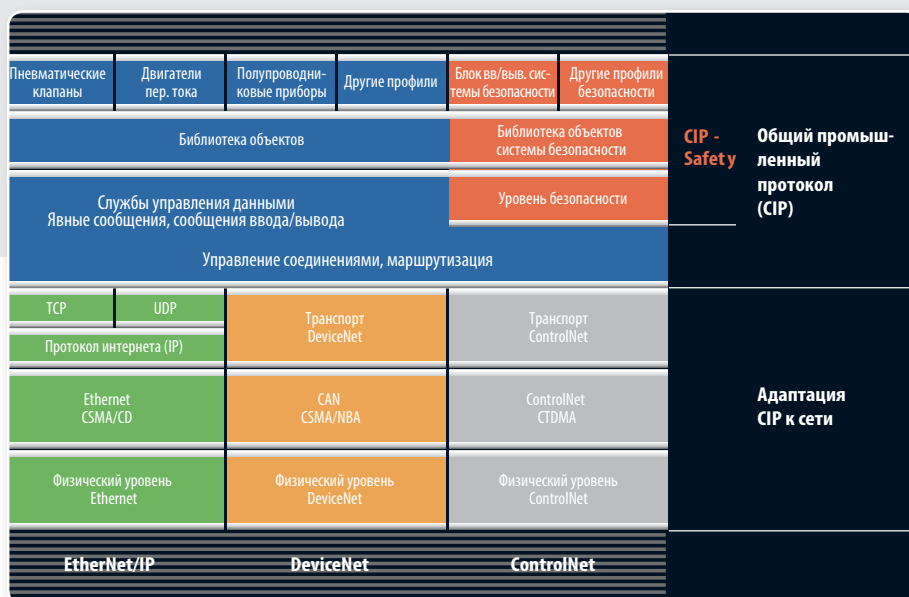
Обзор системы: 5 основных претендентов

Как работает система безопасности

CIP Safety

Протокол CIP Safety предназначен для передачи данных системы безопасности через EtherNet/IP или DeviceNet. Опираясь на уже существующие службы CIP (Common Industrial Protocol – Общий промышленный протокол), CIP Safety использует для обмена данными между узлами безопасности механизм «производитель/потребитель». Здесь потребитель выступает в роли «источника», а производитель – в роли «приемника». Надежная синхронизация времени между производителями и потребителями опирается на хронологический мониторинг. Обеспечивается синхронность всех узлов сети, причем время создания сообщений безопасности можно определить по временной метке. Эти методы гарантируют актуальность обрабатываемых данных. Для передачи данных безопасности используются «Объекты подтверждения системы безопасности». Они организуют и гарантируют целостность сообщений в сети CIP Safety. Кроме того, эти объекты образуют мост между передачей информации по безопасности и используемой полевой шиной или сетью. Для передачи данных протокол использует однократную передачу или многоадресные соединения. Их применение зависит от емкости канала, используемого для поддержки этих соединений.

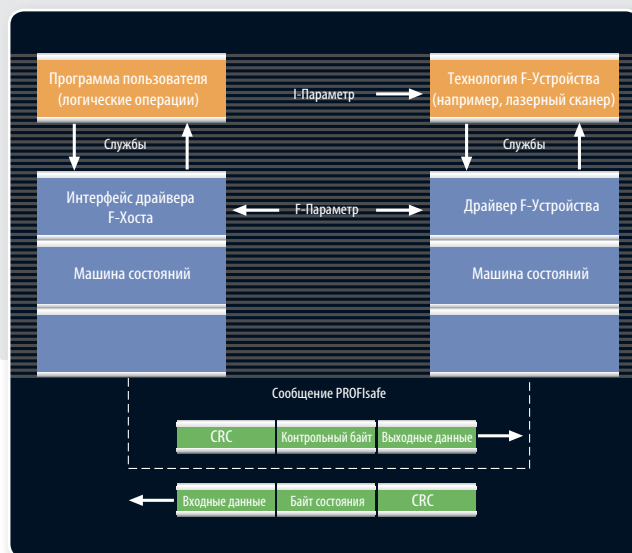
Для расчета контрольной суммы (CRC) протокол CIP Safety использует различные форматы, от 8 до 32 разрядов. Выбор формата зависит от размерности данных – 1 байт, 2 байта или от 3 до 256 байтов, а также от диапазона данных, которые должна охватить рассчитываемая контрольная сумма. Для уникальной идентификации узлов безопасности используется Уникальный идентификатор узла (Unique Node Identifier – UNID). Он представляет собой комбинацию сетевого идентификатора с адресом узла, которая эквивалентна MAC-адресу. Идентификатор узла можно установить вручную (DIP-переключателями) или программно. На этапе запуска источник проверяет, есть ли в сети сконфигурированные UNID. Другие параметры, такие как таймауты, интервалы пингования или максимальное число узлов, настраиваются с помощью Инструмента настройки безопасности (Safety Configuration Tool – SNCT).



PROFIsafe

PROFIsafe использует для передачи телеграмм системы безопасности механизм «Ведущий-Ведомый». Ведущее устройство, называемое обычно «F-Хост», циклически обменивается данными системы безопасности со всеми сконфигурированными ведомыми устройствами, которые называют «F-Устройствами». Каждое F-Устройство имеет F-Драйвер, координирующий обмен сообщениями, которые называются «PDU безопасности» (PDU – блок данных протокола) между F-Хостом и F-Устройством. Метод расчета контрольной суммы PDU зависит от размера передаваемого сообщения, при этом сообщения делятся на «короткие PDU» длиной до 12 байтов и «длинные PDU» длиной до 123 байтов. Для коротких PDU используется CRC 24, а для длинных – CRC 32. В качестве средства, позволяющего приемнику сообщений определить, в правильном ли порядке пришли телеграммы, PROFIsafe использует последовательную нумерацию телеграмм системы безопасности. Кроме того, мониторинг времени допуска (F-Сторожевой таймер), который сбрасывается при каждом получении телеграммы, всегда гарантирует чтение актуальной телеграммы. Так называемые «F-Параметры» (параметры PROFIsafe) предоставляют уникальный идентификатор для связи между F-Хостом и F-Устройством.

Хотя адреса (уникальные кодовые имена) передаются F-Устройствам автоматически, адреса приемников нужно задавать непосредственно на устройстве с помощью DIP-переключателей. F-Устройства получают свою конфигурацию за счет передачи F-Параметра через GSD (General Station Description – Универсальное Описание Станции) и I-Параметра (параметра отдельного F-Устройства). Эти параметры управляются сервером iPar, из которого их можно передавать в устройство PROFIsafe через стандартные интерфейсы. Обычно сервер iPar встроен в «CPD-Инструмент» (Collaborative Product Design – Совместная разработка продуктов). Для разработчиков продуктов это означает, что для полной настройки F-Устройства нужно создать файл GSD и для каждого продукта предусмотреть интерфейс для связи с CPD-Инструментом.





Обзор системы: 5 основных претендентов



openSAFETY

Протокол openSAFETY разработан для передачи данных системы безопасности по любой полевой шине или сети. Его можно использовать на всех полевых шинах, в том числе на основе Ethernet.

Для передачи данных системы безопасности используется модель «производитель/потребитель». Преимущество этой модели заключается в том, что все потребители в сети могут получать и обрабатывать сообщения, отправляемые производителем. Каждый узел openSAFETY имеет уникальный номер UDID (Unique Device Identification – Уникальный идентификатор устройства). Он представляет собой комбинацию MAC-адреса с номером изготовителя устройства. В процессе начальной загрузки Менеджер сети безопасности (Safety Network Management – SNMT) проверяет тип устройства и его UDID, автоматически обнаруживая замененные устройства. При обнаружении такого устройства, в Узлы безопасности (Safety Node – SN) автоматически передаются необходимые параметры. При необходимости SNMT можно интегрировать в Менеджер конфигурации безопасности (Safety Configuration Manager – SCM). Если провести аналогию с другими коммуникационными протоколами, то SCM можно представить, как ведущее устройство openSAFETY, использующее службы для управления сетью.

Словарь объектов openSAFETY (openSAFETY Object Dictionary – SOD) управляет всеми параметрами, которые затем передаются в узлы безопасности с помощью Объектов данных службы безопасности (Safety Service Data Objects – SSDO). По завершению этапа настройки узла и начальной загрузки начинается циклический обмен данными между производителем и потребителем. Для передачи данных процессов, критических для обеспечения безопасности, используются Объекты данных процесса безопасности (Safety Process Data Objects – SPDO). Фрейм openSAFETY состоит из двух субфреймов. Он может передавать максимум 254 байта данных системы безопасности и использует CRC 8 для полезных данных объемом от 1 до 8 байтов и CRC 16 для полезных данных объемом от 9 до 254 байтов.

openSAFETY позволяет создавать очень большие сети. К каждому домену openSAFETY (openSAFETY Domain – SD) можно подключить до 1023 узлов безопасности. Поскольку они адресуются по SCM, то дополнительные аппаратные коммутаторы не нужны. Максимальная конфигурация сети openSAFETY состоит из 1023 доменов openSAFETY с общим числом узлов безопасности более миллиона. Обмен данными между отдельными доменами осуществляется через Шлюз домена openSAFETY (openSAFETY Domain Gateway – SDG).





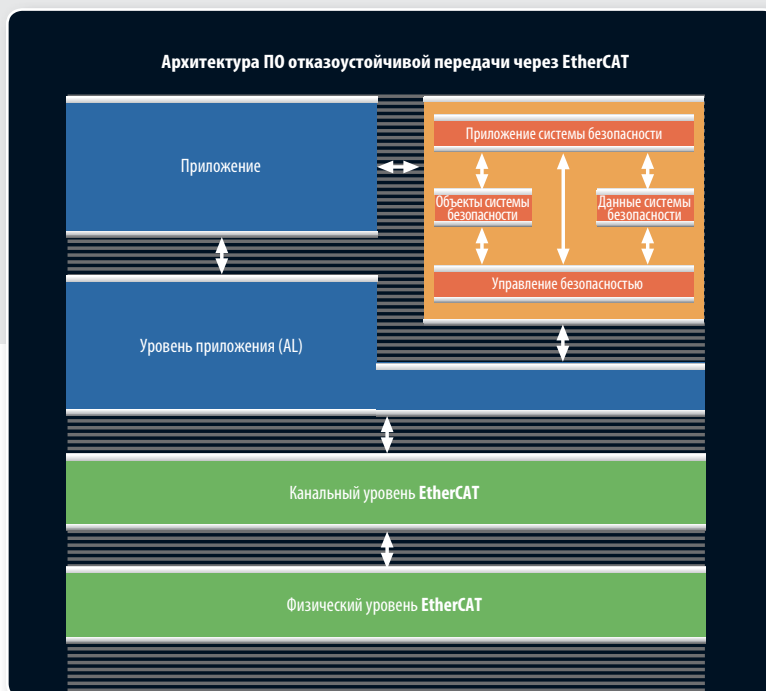
FSoE

Схема отказоустойчивой передачи поверх EtherCAT (Fail Safe over EtherCAT – FSoE) предназначена для передачи данных системы безопасности поверх EtherCAT с помощью ведущих и ведомых устройств FSoE. В каждом цикле FSoE ведущее устройство передает блок данных протокола (Protocol Data Unit – PDU) безопасности ведомому устройству, одновременно запуская сторожевой таймер. Ведомое устройство проверяет и обрабатывает принимаемые данные перед их возвратом ведущему устройству. В этом случае ведомое устройство тоже запускает сторожевой таймер. Ведущее устройство получает и обрабатывает данные так, как это было описано для ведомого, и останавливает сторожевой таймер. И только по завершению цикла ведущее устройство генерирует новый PDU безопасности. В связи с применением такого механизма связь всегда зависит от оборудования и топологии.

Адресные отношения между ведущим и ведомым устройством называются «FSoE-соединением». Оно характеризуется уникальным идентификатором соединения. 16-разрядный идентификатор соединения передается ведущим устройством индивидуально на ведомые устройства. Пользователи должны следить за тем, чтобы у каждого ведомого устройства был уникальный идентификатор. Для корректной иденти-

фикации в процессе начального запуска ведущее и ведомое устройства генерируют для каждого сообщения «Порядковые номера» в диапазоне от 0 до 65535. Это гарантирует обработку актуальных сообщений. Для обращения к отдельным устройствам им нужно присвоить уникальные номера узлов, которые устанавливаются аппаратно DIP-переключателями. Каждое ведущее устройство FSoE имеет «Обработчик ведущего устройства FSoE», который взаимодействует с ведомым устройством через «Обработчик ведомого устройства FSoE». При необходимости можно организовать взаимодействие между разными ведущими устройствами в сети с помощью дополнительного «Обработчика ведомого устройства FSoE», который можно реализовать в ведущем устройстве. Для защиты передаваемых PDU, для каждых двух байтов данных системы безопасности используется CRC 16. Другими словами, для передачи 10 байтов CRC 16 используется пять раз.

Как таковая, настройка параметров не применяется. Процесс параметризации должен быть частью пользовательской программы. И хотя спецификации FSoE не описывают требуемые параметры детально, пользователи должны следить за тем, чтобы ведомые устройства FSoE индивидуально получали корректные параметры.





Обзор системы: 5 основных претендентов

Сравнение интегрированных систем безопасности

Сертификация

Критерии	CIP Safety	PROFIsafe	openSAFETY	FSoE
На основе черного канала	+	+	+	+
IEC 61784-3	+	+	+	+
Орган сертификации	TÜV Rheinland IFA	TÜV Süd IFA	TÜV Süd TÜV Rheinland	TÜV Süd

В сущности, все интегрированные технологии безопасности в равной степени отвечают требованиям безопасности. Все они опираются на принцип «Черного канала», описанный в стандарте IEC 61784-3 и сертифицированный до уровня безопасности SIL 3. Однако за чистыми аспектами безопасности скрываются критерии, которые определяют, будет ли данная технология принята изготовителями оборудования или конечными пользователями. Главным из них является простота интеграции технологии в приложения, используемые для решения текущих задач.

Критерии	CIP Safety	PROFIsafe	openSAFETY	FSoE
Сертификация SIL3 (IEC 61508)	+	+	+	+
Готовность к SIL4	o	o	+	o

Технология openSAFETY сертифицирована до уровня безопасности SIL3. И хотя она еще не оценена полностью, основные принципы этой технологии, включая вероятность отказа по требованию (probability of failure on demand – PFD), уже готовы для реализации на уровне SIL4.

Технология

Критерии	CIP Safety	PROFIsafe	openSAFETY	FSoE
Поддержка дублирования полезных данных	+	–	+	–
Поддержка многоадресной передачи сообщений	+	–	+	–
Конфигурирование устройств системы безопасности	+	o	+	o
Безопасное управление перемещениями	o	+	+	+

В процессе проектирования устройств безопасности огромную роль играет выбор технологии. В зависимости от сложности фреймов безопасности, для их создания могут потребоваться дополнительные усилия, что нежелательно. Поддержка многоадресной передачи сообщений помогает сократить время реакции. Это, в свою очередь, может повлиять на общую схему оборудования или станка, например, уменьшить размеры оборудования или занимаемую им площадь. После выполнения техобслуживания или замены ведомые устройства системы безопасности должны автоматически настраиваться ведущим устройством. Следует задать уникальные интерфейсы для их настройки, благодаря которым ведомые могли бы настраиваться разными ведущими устройствами. Для PROFIsafe разработан iPar-сервер, отвечающий этому требованию. Степень его совместимости с имеющимся на рынке оборудованием пока не ясна, поскольку в прошлом использовались конфигурационные данные, которые предоставлялись изготовителем ведущего устройства, а не полученные внутри системы. В апреле 2012 г. организация пользователей sercos International (SI) объявила о создании Профиля безопасного перемещения для CIP Safety на SERCOS III. Однако к моменту опубликования настоящей брошюры Профиль безопасного перемещения на основе CIP Safety был еще недоступен.

FSoE предлагает безопасный канал параметризации для передачи надежно инкапсулированных данных в приложение безопасности, но схема адресации параметров приложения по безопасности отсутствует.



Реализация устройств

Критерии	CIP Safety	PROFIsafe	openSAFETY	FSoE
Юридические ограничения	+	—	+	—
Защита инвестиций	○	○	+	○
Время продвижения на рынок	+	+	+	○
Реализация	—	○	+	+
Текущая доля рынка	○	+	○	—
Наличие сертифицированного пакета ПО	+	+	+	—

Для изготовителей устройств самое важное значение имеет независимость и стоимость реализации. При сравнении реализаций устройств учитывались все затраты на лицензирование, пакет программ, проверку на совместимость и сертификацию. Учитывалась также сложность каждой технологии и ее влияние на необходимые ресурсы и стоимость реализации.

ProfSAFE и FSoE используют только протоколы своих собственных организаций. Это может заставить задействовать несколько протоколов безопасности, если применяются разные системы автоматизации и полевые шины. CIP Safety требует реализации специального Уровня Абстракции CIP в Черном Канале, увеличивая тем самым трудоемкость разработки. Согласно нашим исследованиям, ведомое устройство FSoE находится на этапе разработки, и в настоящее время на рынке отсутствует сертифицированный пакет программ для ведущего устройства FSoE. Это создает потенциальные риски при реализации технологии безопасности на уровне устройства.

Критерии	CIP Safety	PROFIsafe	openSAFETY	FSoE
Поддерживаемые протоколы промышленного Ethernet	EtherNet/IP SERCOSIII	PROFINET	PROFINET EtherCAT EtherNet/IP Modbus POWERLINK PROFINET SERCOSIII	EtherCAT
Наличие реализации с открытым исходным кодом	—	—	+	—

В настоящее время пакет openSAFETY является единственным ПО с открытым исходным кодом для систем безопасности. С технической и юридической точек зрения, openSAFETY полностью независим от используемых аппаратных технологий.

Интеграция

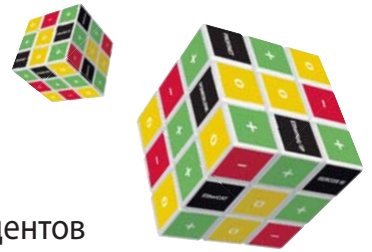
Критерии	CIP Safety	PROFIsafe	openSAFETY	FSoE
Совместимость пакета	○	○	+	—
Производительность	○	○	+	○
Адресация	+	—	+	—
Время реакции	○	○	+	○

Для обеспечения совместимости продуктов разных изготовителей важную роль играет совместимость всех имеющихся на рынке пакетов. Стратегия открытого исходного кода openSAFETY гарантирует совместимость пакетов.

В сети системы безопасности все узлы должны иметь уникальные идентификаторы. Во избежание ошибок при установке параметров адресация должна быть автоматической. Однако протоколы PROFIsafe и FSoE требуют ручной установки адреса каждого из устройств системы безопасности с помощью DIP-переключателей. Это усложняет установку устройств в стойках. Ошибки оператора могут привести к неправильной настройке параметров. Кроме того, аппаратные переключатели затрудняют реализацию модульного построения станков, поскольку ручная адресация не обладает достаточной гибкостью и не допускает автоматической настройки компонентов.

Следуя принципу «производитель/потребитель», openSAFETY поддерживает непосредственный встречный трафик, что позволяет получить исключительно быструю реакцию. Маршрутизация всех сообщений системы безопасности через ведущее устройство, как в PROFIsafe и FSoE, удлиняет цикл, приводя к потере ценного времени защитной реакции.

Протокол CIP Safety для поддержки перекрестного трафика требует функции инициатора соединения; в результате перекрестный трафик между ведомыми устройствами (приемниками) становится невозможным.



Обзор системы: 5 основных претендентов

Производительность

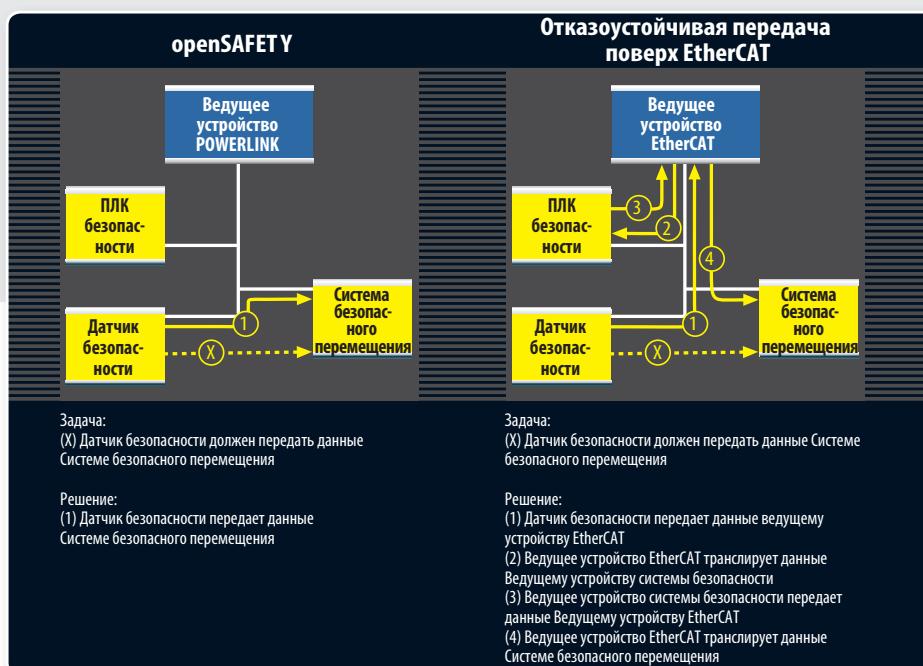
Поскольку протоколы безопасности являются протоколами прикладных программ, производительность сети безопасности зависит от лежащего под ним протокола передачи данных. Выбор базового протокола определяет не только доступную полосу канала и длительность цикла, но и функциональные возможности, такие как горячее подключение или перекрестный трафик.

Перекрестный трафик играет огромную роль в производительности систем, ориентированных на обеспечение безопасности. В сетях, поддерживающих перекрестный трафик, узлы безопасности могут передавать сигналы непосредственно друг другу, не пропуская их через ведущее устройство. Это обеспечивает оптимизированное время реакции в опасных ситуациях. В сетях, не поддерживающих перекрестный трафик, узлы безопасности передают сигналы ведущему узлу полевой шины, который передает их ведущему устройству сети для подтверждения. Затем сигнал возвращается в ведущий узел полевой шины, который перенаправляет его узлу-получателю. По сравнению с прямой передачей данных через перекрестный трафик, этот процесс увеличивает задержку в четыре раза, замедляя реакцию. Поскольку дистанция аварийной

остановки квадратично зависит от времени отклика, а отрицательное ускорение учетверяет время прохождения сигнала, то это приводит к увеличению дистанции аварийной остановки в 16 раз.

Критерии	CIP Safety	PROFIsafe	openSAFETY	FSoE
Диапазон CRC	8-32 разряда	24-32 разряда	8-16 разрядов	16 разрядов
Необходимые расчеты CRC для данных объемом 20 байтов	2	1	2	10
Количество разных CRC	5	2	2	1

Требуемое количество разных контрольных сумм повышает сложность реализации и увеличивает стоимость разработки. Кроме того, расчет нескольких CRC может привести к существенному замедлению реакции на нарушения условий безопасности.



Пример сокращения времени передачи за счет перекрестного трафика. Перекрестный трафик позволяет узлам безопасности непосредственно взаимодействовать друг с другом (слева), тогда как в системах, не поддерживающих встречный трафик, путь прохождения сигнала увеличивается в четыре раза (справа).

Выходные данные

«Промышленный ETHERNET. Факты» — это информационный документ,
публикуемый EPSG – ETHERNET POWERLINK STANDARDIZATION GROUP,
POWERLINK Office, Schaperstr. 18, 10719 Berlin.
<http://www.ethernet-powerlink.org/>.

Концепция, верстка, маркетинг проекта и координация:
FR&P Werbeagentur GmbH,
Schaperstraße 18, 10719 Berlin,
Телефон: +49(0)30-85 08 85-0, Факс: -86

Управление публикацией:
А.-Кристиан Броддак
Координационно-редакторский отдел/издательская группа:
Хейде Реннеманн-Ихленбург

© Сведения об авторских правах
Название и верстка издания «Промышленный ETHERNET. Факты» защищены
законодательством об авторском праве. Полное или частичное пере-
издание допускается только с предварительного разрешения редакции.