

# Технология EtherCAT

## как инструмент реализации передовой архитектуры управления

# BECKHOFF

Данная статья была представлена в Трудах 21-й ежегодной конференции IEEE/SEMI по передовым технологиям производства полупроводников (ASMC 2010), состоявшейся 11–13 июля 2010 г. в Сан-Франциско, Калифорния. Материал адаптирован и переведен под редакцией А.Д. Маштакова, Бекхофф Автоматизация.

Бекхофф Автоматизация, г. Москва

Ограниченные производительность и полоса пропускания таких традиционных промышленных шин, как DeviceNet, Profibus, CC-Link, CANopen и Modbus, определяют архитектуру системы управления для быстрых ТП и высокоточных систем ЧПУ. Таким образом, быстродействующие контуры регулирования (позиционированием и скоростью сервоприводов, или даже температурой) замкнуты внутри интеллектуальных периферийных устройств. А система связи (традиционная промышленная шина) используется для задания параметров регуляторов и передачи команд, которые затем локально выполняются этими устройствами.

EtherCAT позволяет преодолеть эти ограничения. Уникальный функциональный принцип аппаратной обработки пакета Ethernet «на лету», без промежуточной буферизации, дает возможность почти на 100% использовать полосу пропускания 100 Мбит/с. Данный подход позволяет получить время цик-

ла шины в диапазоне микросекунд, а не миллисекунд — характерного для традиционных промышленных шин. В сочетании с превосходной вычислительной мощностью современных управляющих систем на базе ПК это позволяет строить замкнутые контуры управления быстрыми процессами распределенным образом, на промышленной шине. Для этих задач раньше приходилось замыкать контуры управления локально в периферийных устройствах.

### Общее описание технологии EtherCAT

EtherCAT — это промышленная шина на базе Ethernet, впервые представленная для использования в производстве полупроводниковых приборов в 2004 г. [5]. Она стандартизована такими ассоциациями, как SEMI [1], IEC [2,3] и ISO [4]. Функциональный принцип протокола устройств EtherCAT существенно отличает эту технологию от других, базирующихся на Ethernet-решениях.

В технологии EtherCAT не используется такой режим, в котором пакет Ethernet сначала принимается, затем интерпретируется и ответный пакет от устройства ввода/вывода, содержащий данные технологического процесса. Вместо этого пакет Ethernet обрабатывается «на лету», без какой-либо буферизации (рис. 1). Специальная микросхема каждого ведомого EtherCAT-устройства, оснащенная двухпортовой памятью DPRAM считывает адресованные ему данные во время передачи кадра следующему устройству. Входные данные также «на лету» вставляются во время прохождения кадра. Кадры при этом практически не задерживаются, аппаратная задержка измеряется наносекундами. Кадр, отправленный ведущим устройством, передается каждому следующему устройству, пока не достигнет конца сегмента (или ветви). Последнее устройство определяет, что к его выходному порту не подключено никаких устройств, и отправ-

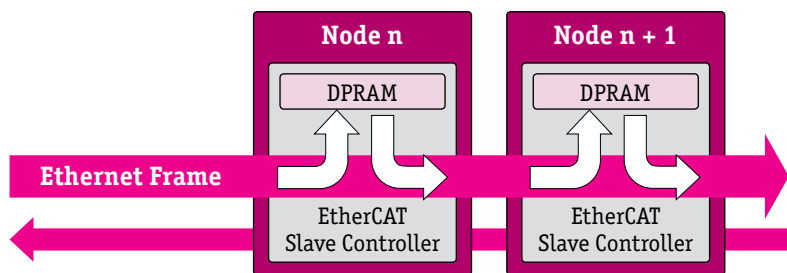


Рис. 1. Обработка кадра «на лету»

ляет кадр назад ведущему устройству по второй витой паре. При определенных условиях возможна даже такая ситуация, при которой задержка распространения пакета через ряд ведомых устройств окажется меньше длительности самого пакета. Иными словами, ведущее устройство начнет получать ответ от устройств распределенного ввода/вывода раньше, чем успеет отправить «хвост» пакета, как это ни парадоксально звучит.

#### Использование полосы пропускания и производительность

В сети EtherCAT один-единственный Ethernet-кадр включает входные и выходные данные многих устройств. Реальное использование полосы пропускания достигает 90% и более. Возможности дуплексной связи 100BaseTX используются в полной мере, обеспечивая скорость передачи данных более 100 Мбит/с (свыше 90% от полнодуплексного Ethernet 2 x 100 Мбит/с). Система EtherCAT не только значительно быстрее всех традиционных промышленных шин, но и самая быстрая среди промышленных решений, базирующихся на Ethernet. Типичное время цикла EtherCAT составляет 50–250 мкс, в то время как в традиционных промышленных шинах на каждое обновление требуется 5–15 мс, т.е. традиционные промышленные шины работают медленнее от 20 до 300 раз!

#### Синхронизация

Для синхронизации работы объединенных в сеть узлов в EtherCAT применяется точное согласование распределенных часов EtherCAT — внутренних часов микросхем EtherCAT-контроллеров. В отличие от полностью синхронной связи, где при возникновении

ошибки сразу же страдает качество синхронизации, распределенные согласованные часы имеют высокую степень устойчивости к возможным задержкам из-за ошибок и кратковременных сбоев связи, за счет локального хранения точного времени внутри каждого из распределенных устройств ввода/вывода.

В сети EtherCAT механизм синхронизации времени реализован полностью аппаратно. Каждые часы могут легко и точно измерить задержку относительно других часов, так как для связи используется логическая и полнодуплексная физическая кольцевая структура Ethernet, т.е. каждый пакет EtherCAT проходит дважды через каждое ведомое устройство (прямой и обратный путь по разным витым парам). На основе этого значения задержки производится подстройка распределенных часов, что позволяет достичь очень точной временной базы с разбросом существенно меньше 1 мкс в масштабах всей сети. Это идеальная точность для приложений синхронизированного управления движением и интеграции измерительных задач внутри одной сети.

#### Финансовые соображения

Ведущие EtherCAT-устройства обычно реализуются программно с использованием стандартного оборудования Ethernet и не требуют выделенного коммуникационного сопроцессора. Ведомые устройства содержат встроенные контроллеры на основе БИС, обеспечивающие обработку пакета, и все ключевые временные параметры, поэтому мощные микроконтроллеры на стороне ведомых устройств не нужны. Инфраструктура EtherCAT не нуждается в коммутаторах и других активных компонентах — в ней ис-

пользуются стандартные кабели и разъемы. Трудозатраты на настройку и инженерно-конструкторские работы также уменьшаются, поскольку отпадает нужда в настройке сети. И наконец, функции диагностики позволяют точно локализовать ошибки и снизить затраты времени на поиск и устранение неисправностей.

#### Ассоциация EtherCAT Technology Group

Помимо низкой стоимости самого оборудования, есть еще один ключевой фактор, делающий возможным снижение стоимости компонентов: повсеместное принятие этой технологии, широкий выбор продуктов и, как следствие, конкуренция среди поставщиков. Технология EtherCAT поддерживается ассоциацией EtherCAT Technology Group, членами которой являются свыше 1300 компаний из 50 стран — производителей оборудования и ПО для автоматизации. Это крупнейшая в мире быстрорастущая организация по вопросам «промышленной сети Ethernet» (количество членов ассоциации EtherCAT Technology Group по состоянию на 31 мая 2010 г. — 1357 членов). Кроме того, EtherCAT входит в употребление быстрее всех других технологий промышленной сети Ethernet. Руководство по продуктам, опубликованное на [www.ethercat.org](http://www.ethercat.org), уже содержит свыше 200 записей более чем о 500 продуктах, и гораздо большее количество продуктов готово к выводу на рынок.

#### Варианты топологии

Сети EtherCAT не имеют практических ограничений на топологию — они могут иметь линейную, звездообразную, древовидную, резервированную кольцевую топологию или даже представлять собой комбинацию всего вышеперечисленного и позволяют использовать до 65 535 узлов на сегмент. Если расстояния между двумя узлами спецификации 100BaseTX, равного 100 м, недостаточно, то его можно увеличить до 2 км за счет волоконно-оптических кабелей. Поддержка «горячего подключения» позволяет подключать и отключать узлы или даже целые технологические камеры во время работы.

### IP-технологии на уровне устройств

Протокол устройств EtherCAT может транспортировать по одной и той же физической сети и другие сервисы и протоколы, основанные на Ethernet. Они туннелируются через протокол EtherCAT, поэтому показатели реального времени не ухудшаются. Таким образом, в среде EtherCAT можно использовать все IP-технологии: HTTP, SECS/GEM, EDA, HSMS-SS, передачу по FTP и т.д.

### Протокол противоаварийных защит (ПАЗ) по EtherCAT

Для реализации гарантированного противоаварийного обмена данными по EtherCAT членами ассоциации EtherCAT Technology Group был разработан функциональный протокол ПАЗ по EtherCAT (FSoE). EtherCAT используется как одноканальная система связи для передачи защищенной и незащищенной информации. Среда передачи считается «черным каналом» и не учитывается в соображениях безопасности. Кадр обеспечения безопасности, содержащий защищенные данные технологического процесса и необходимые резервные копии данных, включен в данные технологического процесса EtherCAT. Этот «контейнер» защищенным образом анализируется в устройствах на уровне приложений. Связь остается одноканальной. Это соответствует Модели А, приведенной в приложении к предварительному стандарту IEC 61784-3.

Оценку протокола Safety-over-EtherCAT проводила Немецкая служба технического контроля и надзора (TÜV). Он сертифицирован как протокол передачи данных технологических процессов между FSoE-устройствами вплоть до уровня SIL 4 согласно IEC 61508. Реализация FSoE-протокола в устройстве должна отвечать критериям безопасности. Необходимо также принять во внимание сопутствующие требования, определяемые конкретным продуктом. В настоящее время на рынке присутствуют конечные устройства, сертифицированные TÜV по уровню безопасности SIL 3 согласно IEC 61508

### Протокол автоматизации EtherCAT

Новейшая добавка к технологии EtherCAT – протокол ав-

томатизации EtherCAT (EAP). Протокол EAP объединяет EtherCAT-протоколы с классическими Ethernet-топологиями для интеграции ведущих устройств шины EtherCAT, инструментов конфигурирования сетей и беспроводных компонентов. В то время как протокол устройств EtherCAT – с обработкой «на лету» – работает абсолютно детерминированно (обычно в микросекундном диапазоне), время цикла EAP лежит в диапазоне миллисекунд, в зависимости от топологии сети, но позволяет организовывать многоуровневую сеть EtherCAT с использованием стандартных маршрутизаторов и прочего стандартного сетевого оборудования и ПО.

### Классическая архитектура управления

Раньше быстродействующие контуры управления приходилось замыкать локально внутри рассредоточенных устройств или через специализированные фирменные шины управления движением. Производительность как промышленных шин общего назначения, так и центрального модуля управления не позволяла реализовывать другие решения.

Этот классический подход имеет ряд недостатков:

1\_Проблема «черного ящика». Встроенный в периферийное устройство алгоритм управления задан производителем устройства и недоступен для системного интегратора. Это означает, что системный интегратор или поставщик системы управления не может выделиться среди конкурентов за счет, скажем, применения передовых методов управления. Время разработки заказных приложений с интенсивным использованием IP стало увеличиваться из-за итеративного характера взаимодействия между производителем и заказчиком в ходе проектирования.

2\_Сложная коммуникация. Алгоритмы управления, локализованные внутри периферийных устройств, требуют задания большого числа параметров, и управление конфигурацией устройств в больших сетях затруднено и часто привязано к конкретному производителю. Например, задание

параметров плазменного табло становится длительным процессом, требующим привлечения материально-технической базы заказчика. Каждое «интеллектуальное» периферийное устройство поставляется вместе со специализированным инструментом конфигурирования (например, с инструментом настройки и задания параметров привода), который нужно установить, обслуживать и правильно использовать.

3\_Зависимость от поставщика. Из-за сложных интерфейсов и обилия параметров переход от одного поставщика к другому – дело непростое и дорогостоящее. Результатом всего этого является высокая стоимость периферийных устройств.

4\_Проблема взаимозависимости контуров управления. Контуры управления, встроенные в изолированные периферийные устройства, имеют ограниченные средства для синхронизации и координации технологических процессов (например, управление концентрацией примесей, вводимых в кремниевую пластину, или плотностью плазмы). В общем и целом при использовании классической промышленной шины управление технологическими процессами на основе моделей является неэффективным.

### Передовая архитектура управления

Объединение производительности EtherCAT с вычислительной мощностью и пропускной способностью современных средств управления на базе ПК позволяет реализовать новый подход к архитектуре управления. Эта шина позволяет передавать не только параметры и команды для рассредоточенных контроллеров или данные относительно медленных контуров управления, но и данные быстродействующих контуров управления.

Перенос алгоритмов управления на уровень центрального управляющего ПК позволяет «вскрыть черные ящики», характерные для прошлых подходов: теперь новые передовые алгоритмы можно разработать, испытать и в конце концов реализовать в инструментах без особых сложностей и без привлечения поставщика подсистемы –

а значит, не делясь результатами с конкурентами.

Вдобавок существенно упрощается интерфейс шины: вместо сложного и специфического для каждого производителя списка конфигурационных параметров происходит лишь обмен простыми, лишёнными избыточности командами / фактическими значениями наряду со стандартизованными командами и словами состояния. Сервоприводы, контроллеры температуры и т.д. становятся менее избыточными и более дешёвыми, что, в свою очередь, сводит к минимуму зависимость от поставщика.

1\_Пример: управление сервоприводом

При использовании EtherCAT параметры и поведение сервопривода стандартизованы ассоциацией IEC в [7]. Рабочая группа по профилям приводов, входящая в ассоциацию EtherCAT Technology Group, разработала указания по внедрению для сервоприводов, которые используют передовую архитектуру управления. Во всех трех режимах работы сервоприводов, описанных в этих указаниях («циклический синхронный момент», «циклическая синхронная скорость» и «циклическая синхронная позиция») контур управления замыкается через EtherCAT. Планирование перемещения и координирование движения выполняются внутри ЦП контроллера сети, реализованного, например, на базе ПК (рис. 2). Приводы, поддерживающие эти режимы, имеют очень маленький набор локальных параметров и очень

просты в конфигурировании и обслуживании.

В приводах с классическими способами управления или при использовании низкопроизводительных промышленных шин формирование траектории и планирование пути осуществляются в самом приводе, и для координации воздействия по разным осям зачастую требуются специальные каналы связи между приводами, скорость обмена по которым не превосходит нормальную частоту сканирования. Эти приводы сами по себе гораздо сложнее и, как следствие, дороже в разработке по сравнению с типовым приводом EtherCAT, который может быть менее «интеллектуальным», но более быстрым.

Сверхбыстрая детерминированная сеть, поддерживающая устройства ввода/вывода, оси движения и устройства управления технологическими процессами, в сочетании с вычислительной мощностью многоядерных процессоров открывает неограниченные возможности для организации передового управления технологическими процессами при весьма скромной стоимости по сравнению с другими имеющимися промышленными решениями для управления технологическими процессами. Настоящая статья не нацелена на то, чтобы подробно исследовать различные виды алгоритмов управления, которые становятся осуществимыми благодаря новой архитектуре управления. Однако было бы разумно рассмотреть некоторые алгоритмы, которые сегодня,

как правило, трудно реализуемы из-за изоляции локальных контуров управления внутри выделенных устройств.

2\_Управление с опережающей связью контур-контур

Рассмотрим типовую ситуацию регулирования скорости напыления тонких пленок в сфере производства полупроводниковых компонентов. Пусть для некоторого периферийного интеллектуального устройства задается уставка. Это устройство, выполняя свою функцию, будет изменять физическую среду в области протекания процесса, например расход газа (изменение потока газа будет изменять давление), в то время как другое устройство, ответственное за поддержание постоянства среды протекания процесса, начнет «отрабатывать на возврат» к своей уставке, приводя среду протекания процесса в состояние, соответствующее существовавшему до этого или желаемому равновесию (автоматический контроллер давления или дроссельная заслонка для поддержания давления). В этом примере один контур управления изменяет среду процесса, после чего другой контур реагирует на это изменение. Независимо от того, насколько точно настроен второй контур управления, вышеописанная ситуация приведет к локальному возмущению условий протекания процесса. Этот эффект, пренебрежимо малый в крупных технологических узлах прошлого, становится более заметным сегодня, в процессах на-

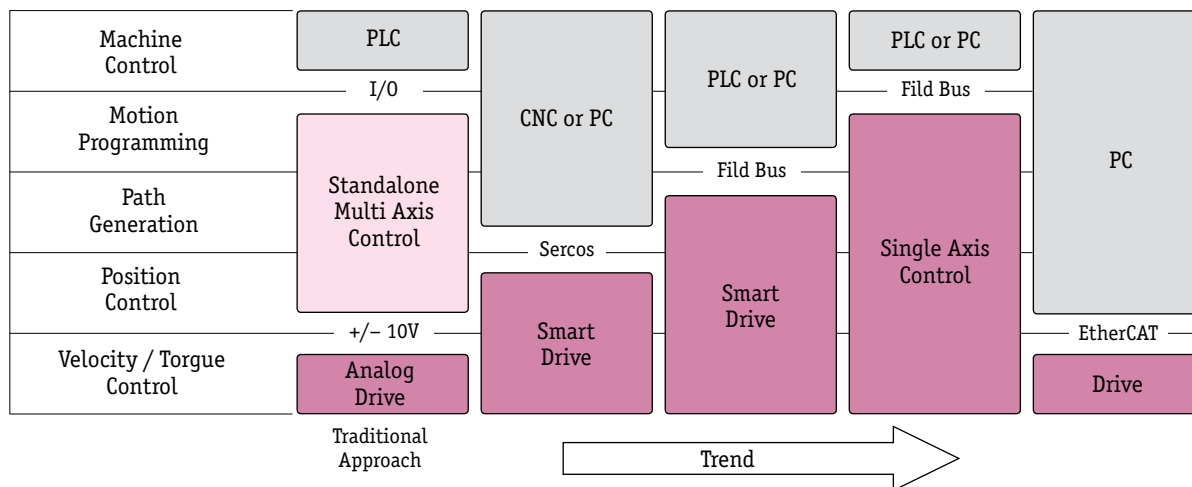


Рис. 2. Тенденция в архитектуре управления приводом

пыления тонких пленок, когда толщина слоя становится сравнимой с размерами атомов. Архитектура управления на основе EtherCAT позволяет естественным образом решить эту проблему благодаря передаче мгновенных значений параметров процесса с датчиков, значений уставок и т.д. от одного контура управления к другому через канал опережающей связи. Следует отметить, что при этом нет нужды реализовывать оба контура управления на центральном управляющем компьютере. Этот же прием (с некоторыми ограничениями) может быть реализован на устройствах с локальными контурами управления благодаря малому времени цикла обмена данными и детерминизму EtherCAT.

### 3\_ Управление на основе моделей / многосвязное управление

Можно привести массу примеров проблем, возникающих при управлении технологическими процессами производства полупроводников, когда прямое измерение критически важного для протекания процесса параметра оказывается невозможным или экономически не оправданным — например, прямое измерение плотности плазмы. В таких случаях управление процессом опирается на описание характеристик «окна процесса», которое задается и поддерживается во время обработки кремниевой пластины за счет объединения других контуров непрямого управления. Ограниченность такого подхода к управлению вызвана тем фактом, что разные контуры управления и их отклонение от оптимума оказывают различные воздействия на критические параметры процессов, называемые также критической размерностью. Иными словами, многомерное «окно процесса» имеет сложную форму и может быть более толерантным к отклонениям в одном измерении и менее толерантным — в другом.

Традиционная архитектура управления предполагает использование независимых контуров управления давлением, температурой, потоком газа, мощностью ВЧ-излучения и т.д. В такой архитектуре практически невозможно реализовать управление на основе модели,

поскольку для этого требуется слишком много перекрестных связей между контурами управления.

Централизованная архитектура с мощным многоядерным ЦП в сочетании с быстрой промышленной сетью совершенно меняет дело, делая реальностью то, что было недостижимо ранее. Центральный контроллер обладает огромной вычислительной мощностью, позволяющей реализовывать сложные и требующие большого объема вычислений алгоритмы. В то же время сеть EtherCAT обеспечивает магистраль с детерминированными характеристиками для передачи данных с датчиков и управления исполнительными механизмами. Способность управлять удаленными устройствами с высокой скоростью данных особенно важна в производстве полупроводниковых систем, где отдельные критически важные устройства (например, генераторы ВЧ-сигнала и источники питания систем нанесения PVD-покрытия) удалены от собственно инструментов управления процессом, а зачастую и вовсе находятся на другом этаже здания фабрики.

Показательный пример управления на основе модели — многозонное управление температурой с поддержанием равномерной температуры пьедестала кремниевой пластины для литографических инструментов. Неравномерность температуры не должна превышать 0,05–0,1 °C по всей площади кремниевой пластины при значении температуры в диапазоне 150–200 °C. Как правило, для этого используются подогревающие пьедесталы с 4–6 круговыми зонами нагрева. Проблема состоит в существовании перекрестных температурных помех между нагревающими резисторами. Кроме того, установка на пьедестал новых, более холодных кремниевых пластин порождает тепловые переходные процессы. Традиционные методы управления температурой не обеспечивают необходимой стабильности результатов. Решение проблемы — в использовании управления на основе модели, в которой управляющие сигналы для тиристорных управления зонами выдаются с учетом как генерации тепла, так и передачи тепла между зо-

нами и между зонами и кремниевой пластиной. Сегодня единственный способ реализовать управление на основе модели для быстропеременных процессов состоит в разработке выделенных локальных контроллеров с приличным микропроцессором и выделенными устройствами ввода/вывода. Сделать выделенные контроллеры камер вполне возможно, но принимая во внимание, что количество камер процессов на систему отслеживания измеряется десятками, а это становится весьма и весьма дорого. И это пример еще далеко не самой сложной ситуации.

Более сложные алгоритмы на основе моделей потребовали бы выделенного контроллера на базе ПК для каждого модуля технологического процесса, тем самым увеличивая стоимость этого решения еще сильнее. Это происходит не из-за ограниченной вычислительной мощности современных контроллеров на базе ПК, а из-за локальных ограничений скорости ввода/вывода, либо из-за большого количества портов ввода/вывода, либо избытка кабелей, от которого не удается избавиться, либо того и другого вместе. Предлагаемая новая архитектура на базе EtherCAT с центральным контроллером на базе ПК позволяет преодолеть эти ограничения. Она, например, позволяет сосредоточить управление несколькими многозонными контурами управления температурой на базе модели в одном управляющем ПК, что позволяет обойтись меньшим количеством кабелей.

### Синхронизация управления процессом / подавление артефактов измерения

Во многих случаях необходимо обеспечить точную синхронизацию (в начале или на протяжении всей траектории) между несколькими различными контурами управления или между контуром управления и системным событием. Бывает и так, что в силу особенностей механического построения системы или характера измерений датчик обратной связи контура управления на какое-то время попадает под воздействие другой, не имеющей к нему отношения части системы.

Пример 1. Модуляция мощности лампы в зависимости от углового

положения вращающегося пьедестала кремниевой пластины. Здесь необходимо синхронизировать контроллер управления мощностью лампы с энкодером, считывающим угловое положение пьедестала.

**Пример 2.** Термопаранагреватель кремниевой пластины, с которой считывается значение температуры, может на некоторое время попасть под воздействие сканирующего лазера, порождающего дополнительные локальные нагревающие волны в задачах реального времени.

И это только два весьма простых примера. Есть множество других задач синхронизации, пытаясь решить которые инженеры-технологи вынуждены балансировать между ценами на материалы и доступными готовыми решениями для управления технологическими процессами. Использование сети EtherCAT, по сути, устраняет такие проблемы благодаря своей скорости и детерминизму. Центральный контроллер на базе ПК мгновенно получает полностью обновленную информацию о состоянии системы на каждом цикле сканирования: угловые положения, фактические значения потоков, давления, мощности ВЧ-излучения и т.д. Приложив очень небольшие усилия, можно обеспечить даже одновременную выборку данных. Различные задачи управления могут использовать любые данные о статусе системы любым необходимым способом, и это не требует дополнительных усилий по проектированию оборудования.

#### Сбор данных

Сбор данных, соответствующих нормальному состоянию системы и процессов и событий, — обычное дело в управлении любым технологическим процессом. Частота обновления данных по промышленной

шине обычно лежит в лучшем случае в диапазоне 10–100 Гц. Однако для некоторых приложений, а также для поиска неисправностей желательны или даже необходимы гораздо более высокие частоты сбора данных. Производители микроконтроллерных систем часто подсоединяют инструменты сбора данных напрямую к служебному порту микроконтроллера для диагностики и тонкой настройки. Нередки случаи использования очень дорогостоящих подключаемых устройств сбора данных с встроенной памятью для детектирования и сохранения трендов и т.д. В этом состоит еще одно преимущество сети EtherCAT — она позволяет собирать данные с частотой до 20 кГц, не мешая работе других, более медленных устройств, находящихся в той же сети. Больше того, ни более быстрые, ни более медленные устройства не нужно разрабатывать специально с точки зрения совместимости с EtherCAT. По сути дела, внутренние схемы быстрых устройств должны быть достаточно быстры, чтобы успевать порождать новые данные с такими скоростями.

#### Заключение

До сих пор требования к управлению технологическими процессами старались удовлетворять путем использования более мощных и более сложных децентрализованных устройств управления. Это привело к росту зависимости от поставщиков таких интеллектуальных подсистем.

Объединение EtherCAT и контроллеров на базе ПК позволит изменить эту тенденцию: подсистемы и их интерфейсы теперь будут упрощены, и инженеры-технологи снова обретут контроль над ними.

EtherCAT позволяет реализовать передовые архитектуры управления, которые «вскрывают

черные ящики», существовавшие в прошлом, и расширяют возможности управления технологическими процессами. В то же время EtherCAT поддерживает и классические подходы. Дело за производителями инструментов — подхватить инициативу и извлечь пользу из новых возможностей — если архитектура управления будет определяться только поставщиками подсистем, то EtherCAT будет просто более быстрой, менее сложной и более гибкой промышленной шиной.

#### Литература

- 1\_SEMI E54.20, Standard for Sensor/Actuator Network Communications for EtherCAT.
- 2\_IEC 61158-2/3/4/5/6-12, Industrial communication networks — Fieldbus specifications — Type 12 elements (EtherCAT).
- 3\_IEC 61784-2 (Ed.1.0), Industrial communication networks — Profiles -Part 2: Additional fieldbus profiles for real-time networks based on ISO/IEC 8802-3.
- 4\_ISO 17545-4 Industrial automation systems and integration — Open systems application integration framework, EtherCAT profiles.
- 5\_M. Rostan, «High Speed Industrial Ethernet for Semiconductor Equipment», SEMI Technical Symposium: Innovations in Semiconductor Manufacturing, San Francisco, CA, July 2004.
- 6\_EtherCAT Technology Group, <http://www.ethercat.org>.
- 7\_IEC 61800-7-301/304 (Ed.1.0), Adjustable speed electrical power drive systems — Part 7—301: Generic interface and use of profiles for power drive systems — Mapping of profile type 1 to network technologies — Part 7—304: Generic interface and use of profiles for power drive systems — Mapping of profile type 4 to network technologies.
- 8\_J. O. Krah, C. Klarenbach, «IPC based closed loop control of decentralized servo drives with eXtreme Fast Control (EtherCAT)», SPS/IPC/Drives, Nuremberg, Germany, Nov 2007, 473–481.
- 9\_M. Chaffee, «CIP Motion Implementation Considerations», 2009 CIP Networks Conference, Howey-in-the-Hills, FL, Feb 2009.

А. Маштаков,  
ООО «Бекхофф Автоматизация», г. Москва,  
тел.: (495) 981-6454,  
e-mail: a.mashtakov@beckhoff.com