ПРИМЕНЕНИЕ FPGA В ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

ВИКТОР ЕЖОВ, научный редактор ИД «Электроника»

Ежедневно в мире производится более 20 млн. электродвигателей или более 7 млрд. в год. По оценкам экспертов, электродвигатели потребляют более 50% всей производимой энергии в США, поэтому задача создания высокоэффективной системы управления электроприводом является очень важной. В статье обсуждаются особенности построения эффективных систем управления электродвигателями с использованием FPGA, возможности применения FPGA в промышленных сетях и вопросы выбора оптимальной системы управления электроприводом.

ВВЕДЕНИЕ

В промышленности широко используются системы управления движением на базе микроконтроллеров (МК) и цифровых сигнальных процессоров (DSP), которые обеспечивают построение гибкой и высокопроизводительной системы. Следующим шагом в развитии электропривода станет, по всей видимости, применение FPGA в системах управления.

Пользователи оборудования осознают увеличение стоимости энергии и влияние технологических процессов на окружающую среду, поэтому постоянно растут требования к устройствам, использующим электродвигатели, вводятся новые стандарты, например, Energy Star и др. Одним из путей решения проблемы является применение интеллектуальных систем управления нагрузкой и скоростью электродвигателя, что позволит увеличить КПД электроприводов малой мощности на 14—30%.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ

Структурная схема системы управления электроприводом (СУЭ) показана на рисунке 1. В СУЭ для определения положения ротора и его скорости часто используются датчики на эффекте Холла или внешние оптические кодеры положения, сельсины или датчики магнитной индукции. Каждый из этих датчиков использует различные схемы включения и, следовательно, требует построения особых интерфейсов для приема и преобразования сигналов в формат, необходимый для цифровых систем управления. В случае применения детекторов противо-ЭДС, сельсинов, резистивных датчиков положения и некоторых других датчиков требуется АЦП. Кроме того, во многих приложениях требуется согласование и кондиционирование сигналов (например, фильтрация).

Скорость, вращающий момент и направление вращения электродвигателя управляются модулированным напряжением на обмотках электродвигателя. В ШИМ-системе управления направление вращения и скорость определяются последовательностью импульсов напряжения, приложенного к обмоткам электродвигателя. Интерфейс пользователя системы управления электродвигателя позволяет формировать команды инициализации, конфигурирования и контроля логики управления. Он может быть достаточно простым (например, схема регулировки скорости вращения) или довольно сложным (контроль напряжения, тока и температуры).

Существует много различных типов электродвигателей переменного тока, для каждого из которых имеются специальные методы управления, датчики, силовые каскады и алгоритмы работы. Поэтому разработка универсального конфигурируемого и высокоинтегрированного контроллера, который поддерживает широкий набор технологий управления электродвигателя, является весьма актуальной задачей. Такое решение сможет снизить затраты, улучшить характеристики и повысить энергоэффективность.

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Потери энергии в электроприводе можно минимизировать с помощью интеллектуальной СУЭ. Важным фактором, влияющим на эффективность электроприводов переменного тока, является несогласованная нагрузка. Электродвигатели данного типа достигают максимальной эффективности при работе на полную номинальную нагрузку, однако такой режим работы встречается редко. Весьма часто разработчики выбирают более мощные электродвигатели, чем требуется для данного приложения. И даже если мощность электродвигателя выбрана так, чтобы он работал с номинальной нагрузкой, на практике он часто может работать с меньшей, т.е. менее эффективной нагрузкой. Например, эскалатор, мощность электродвигателя которого выбирается из расчета максимального количества пассажиров, большую часть времени перемещает сравнительно небольшое их количество, что снижает эффективность и вызывает потери энергии. С помощью СУЭ можно осуществлять интеллектуальный и непрерывный контроль нагрузки и согласовывать ее с подводимой мощностью. По суще-

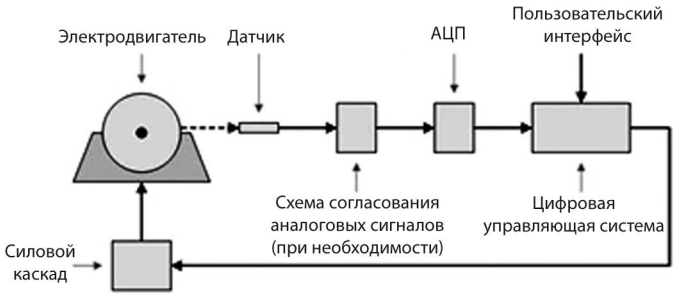

Рис. 1. **Основные элементы системы управления электродвигателем**

ству, система управления подстраивает параметры электродвигателя так, чтобы он всегда работал при номинальной нагрузке.

МИКРОКОНТРОЛЛЕРЫ, DSP ИЛИ FPGA?

Существует несколько возможных решений построения системы цифрового управления электродвигателем. Одним из вариантов является использование специализированного цифрового сигнального процессора (DSP), однако он может быть довольно дорогим и, кроме того, обычно требует дополнительных аналоговых компонентов и подсистем управления.

Другой возможностью является использование микроконтроллеров, которые содержат, по крайней мере, некоторые из требуемых аналоговых блоков, например АЦП. Преимуществом МК является их сравнительно невысокая стоимость (1—2 долл. для промышленных приложений), однако их тактовая частота составляет 10…50 МГц, что ограничивает скорость ШИМ. Кроме того, каждый МК имеет встроенные аналоговые блоки и обеспечивает ширину полосы для управления лишь одним электродвигателем. Следовательно, в робототехнических приложениях, содержащих несколько электродвигателей, может понадобиться несколько МК, часть из которых управляет интерфейсом пользователя и коммуникациями, что увеличивает стоимость системы.

По сравнению с МК, FPGA смешанного сигнала стоимостью 5 долл. содержит достаточное количество аналоговых блоков и подсистем цифровой обработки для одновременного управления несколькими электродвигателями (см. рис. 2). Кроме того, тактовая частота этих компонентов составляет 250…300 МГц, а цифровая часть FPGA может быть использована для обработки данных с массовым параллелизмом при реализации алгоритмов управления. К тому же, в случае применения FPGA смешанного сигнала часть цифровых ресурсов микросхемы можно использовать для реализации микропроцессорного ядра, например оптимизированного ARM Cortex-M1. Кроме управления пользовательским интерфейсом и коммуникациями, это ядро можно использовать для контроля и точной регулировки аналоговых компонентов «на лету». Использование FPGA смешанного сигнала с программным процессором позволяет строить схему управления электродвигателя без датчиков тока, что снижает стоимость системы.

В дополнение к мониторингу напряжения на шине, токов и скорости электродвигателя процессор Cortex-M1 в FPGA смешанного сигнала способен также выполнять диагностику и управлять интерфейсом пользователя. Способность осуществлять диагностику и оперативно реагировать на возникающие проблемы значительно уменьшает вероятность аварии и повышает долговечность электродвигателя, что снижает затраты при эксплуатации оборудования.

ПРИМЕНЕНИЕ FPGA В ПРОМЫШЛЕННЫХ СЕТЯХ

Эффективность СУЭ в промышленности во многом зависит от быстродействия и гибкости промышленных сетей. Одним из типов таких сетей является промышленный Ethernet — Industrial Ethernet (IE) — быстро развивающаяся технология, которая внедряется все более широко. Существует много стандартов IE (более 20), каждый из которых предлагает различные решения проблем, связанных с промышленными сетями.

Создание новых систем, использующих IE, выполняется довольно просто и быстро за счет применения недорогих стандартных разъемов, поддержки длинных линий связи (до 100 м) и возможности «горячего» подключения. Однако производители электроприводов сталкиваются с проблемой выбора протокола IE. Для заказчика важно иметь возможность осуществлять поддержку нескольких стандартов IE с минимальными издержками.

Очевидным решением этой проблемы является разработка заказных плат расширения (для каждого стандарта IE) или использование в контроллере многопротокольной заказной интегральной схемы (ASIC). Однако из-за большого числа стандартов (которые к тому же постоянно развиваются) и из-за того, что ASIC быстро устаревает (т.к. появляются версии с поддержкой новых или измененных стандартов), производители вынуждены финансировать разработку новых продуктов, которые способны поддерживать изменения. Такое решение является затратным, особенно при длительном сроке службы промышленного оборудования.

По сравнению с таким подходом, использование платы, содержащей недорогую микросхему FPGA и трансиверы Ethernet PHY, позволяет осуществлять поддержку (с помощью соответствующих аппаратных и программных IP-блоков) любого стандарта IE. К тому же, поскольку FPGA является программируемым устройством, его можно легко переконфигурировать для поддержки любого нового протокола, что может быть сделано в любое время, даже если устройство уже установлено в производственном оборудовании. Это позволяет системным разработчикам без труда программно поддерживать новые протоколы IE (или новые версии текущих протоколов) и использовать существующее оборудование предприятия. Поддержка оборудования, находящегося в эксплуатации, осуществляется очень просто — устанавливается подходящая конфигурация FPGA, которая поддерживает данную версию протокола IE, и устройство готово к подключению к системе. Реализация протокола IE на основе недорогой FPGA может быть менее затратной и обеспечивать меньшую потребляемую мощность, чем на основе многопротокольной ASIC. Таким образом, FPGA можно с успехом использовать в системе коммуникации на промышленном предприятии, но каким образом можно использовать эти устройства для снижения стоимости систем электропривода?

ИНТЕГРАЦИЯ СНИЖАЕТ СТОИМОСТЬ

Вычислительные ресурсы сейчас сравнительно недороги, в то время как другие функции и компоненты системы вносят весомый вклад в ее общую стоимость. Например, стоимость запатенто-

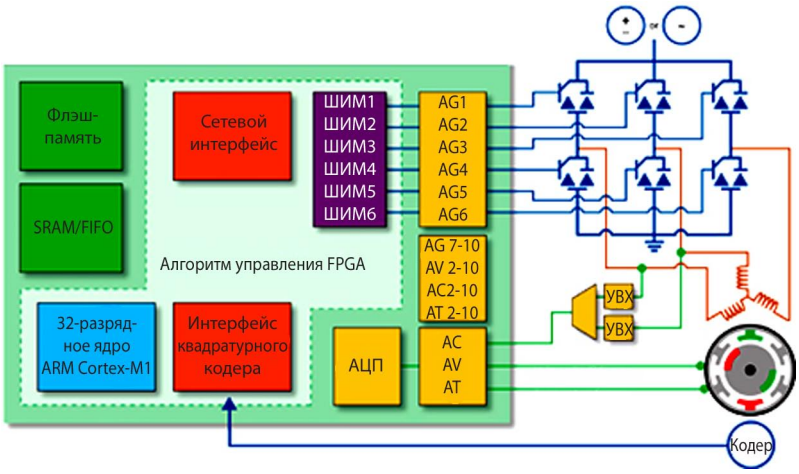

Рис. 2. **FPGA смешанного сигнала содержит аналоговые блоки и системы цифровой обработки для одновременного управления десятью и более электродвигателями**

ванной ASIC для промышленной сети, а также разъемов и кабелей может намного превышать стоимость центрального процессора или DSP. Это — одна из причин, по которой протокол IE становится все более популярным.

Использование FPGA позволяет интегрировать все необходимые узлы цифровой логики и интерфейсы в системе электропривода. Интерфейсы ШИМ, I^2C и SPI могут быть легко реализованы в FPGA, так же как цифровые кодеры электродвигателей и интерфейсы АЦП. Более сложные интерфейсы, подобные PCI, PCI Express и Serial Rapid IO также доступны как готовые IP-блоки.

FPGA можно использовать для поддержки других протоколов, например CAN, Profibus и т.д. Если в процессе проектирования системы разработчику потребуется добавить еще один интерфейс ввода/вывода или дополнительный блок обработки, то это можно сделать с помощью FPGA. Кроме того, в FPGA возможна реализация программных процессоров, например 32-разрядного ядра Nios II. Это значит, что с помощью FPGA можно выполнять такие функции как пакетная обработка протокола IE, обработка данных от датчиков, генерирование данных для LCD-дисплея и даже обслуживание данных через интернет. Разработчикам промышленных систем это позволяет интегрировать важные блоки в отдельной микросхеме FPGA и снизить габариты и стоимость печатных плат (см. рис. 3). Дополнительным преимуществом является то, что интеграция обеспечивает снижение энергопотребления системы и исключает применение вентиляторов.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ ДАТЧИКОВ

Многие промышленные системы используют аналоговые сигналы между датчиками/кодерами и контроллерами. В условиях промышленного производства на сигнальные линии наводятся помехи, особенно если контроллер расположен на большом расстоянии от устройства, которым он управляет. Одним из путей борьбы с помехами является передача сигнала в цифровом формате, что означает преобразование или даже формирование цифровых данных на удаленном объекте.

Интерфейсы кодеров EnDAT и BiSS и сигма-дельта АЦП — примеры устройств, на выходе которых формируется цифровой сигнал. Это не только исключает помехи при передаче данных, но и обеспечивает другие преимущества, например, передачу данных о температуре электродвигателя по той же линии, что и данных о позиционировании кодера, а также более низкий шум квантования в сигма-дельта АЦП.

В традиционных системах, использующих DSP или МК, такие цифровые датчики требуют применения сельсина для преобразования данных обратно в аналоговую форму для считывания их встроенным в чип АЦП. В отличие от этого, FPGA способны принимать сигнал в цифровой форме без использования внешнего сельсина и аналогового интерфейса, что снижает стоимость системы. Гибкость FPGA позволяет разработчику добавлять столько интерфейсов различного типа, сколько требуется в проекте, и благодаря этому становится возможной разработка специализированной системы на одном кристалле.

ВОЗМОЖНОСТЬ ПОСТРОЕНИЯ ОТКРЫТОЙ СИСТЕМЫ

Гибкость и низкое энергопотребление, которое достигается сочетанием протокола IE и использованием FPGA, также обеспечивают возможность построения открытой системы электропривода. Тенденция создания интеллектуальной системы электропривода стала следствием удешевления вычислительных ресурсов, но вместе с тем это означает и существенное усложнение самого электропривода: требуется детальное моделирование работы электродвигателей и использование собственного программного обеспечения. В результате для пользователя оказываются недоступными отдельные технологии — в некоторых электроприводах используются до одной тысячи параметров, и их адаптация к требованиям приложения становится весьма затруднительной. К тому же, фирменные модели не позволяют применять электродвигатели других производителей, что затрудняет проектирование недорогих систем, адаптированных к требованиям заказчика.

Системы управления движением можно разделить на два типа: централизованные и распределенные. Централизованная система состоит из многих электродвигателей и датчиков, подсоединенных к отдельному контроллеру, что обеспечивает невысокую стоимость и возможность удобного управления всей системой. С появлением недорогих промышленных персональных компьютеров (IPC) популярность этого типа приложений увеличивается, однако она ограничивается вычислительной мощностью и интерфейсами ввода/вывода одного контроллера (или IPC).

В распределенной системе каждый электродвигатель имеет специальный процессор для локального управления движением. Этот подход более дорог и требует излишних затрат вычислительных ресурсов, однако при этом появляется возможность построения крупных систем, поскольку нет существенных ограничений по взаимодействию между контроллером и объектом управления. Зачастую наиболее простой путь реализации такой системы — использование промышленного компьютера в сочетании с синхронизированной системой управления, например, по протоколу IEEE1588. Это еще более повышает стоимость системы и увеличивает неэффективные затраты вычислительных ресурсов. Оптимальным вариантом является сочетание низкой стоимости и высокого уровня управления централизованной системы с возможностью масштабирования и высоким быстродействием электроприводов в децентрализованной системе. На сегодня это может быть достигнуто при использовании высокопроизводительных протоколов IE реального времени (например, EtherCAT, SERCOS III, PROFINET IRT и т.д.). С помощью этих протоколов возможно высокоскоростное соединение с малым временем ожидания между контроллером привода и отдельным промышленным PC. Это помогает решить проблему ограниченного количества портов ввода/вывода и позволяет разработчику обеспечить управление многими электроприводами и датчиками с помощью одного процессора.

Такие специфические операции как контроль тока и скорости вращения электродвигателя могут выполняться локально непосредственно на электроприводе. Аппаратно это может быть легко реализовано с помощью FPGA, причем время выполнения даже самых сложных алгоритмов может не превышать 100 нс. Это снижает нагрузку на промышленные компьютеры (IPC), программируемые логические контроллеры (PLC) и сеть IE по передаче и обработке низкоуровневых дан-

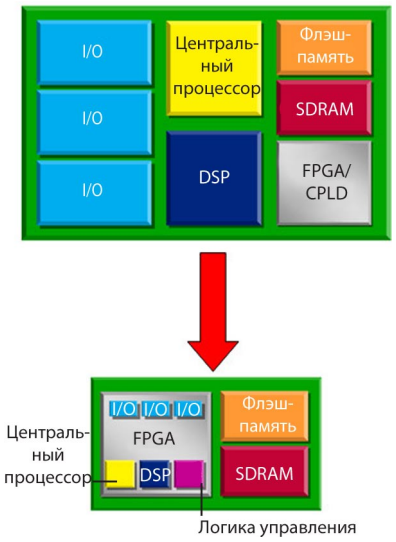

Рис. 3. **Снижение стоимости за счет интеграции компонентов системы в FPGA**

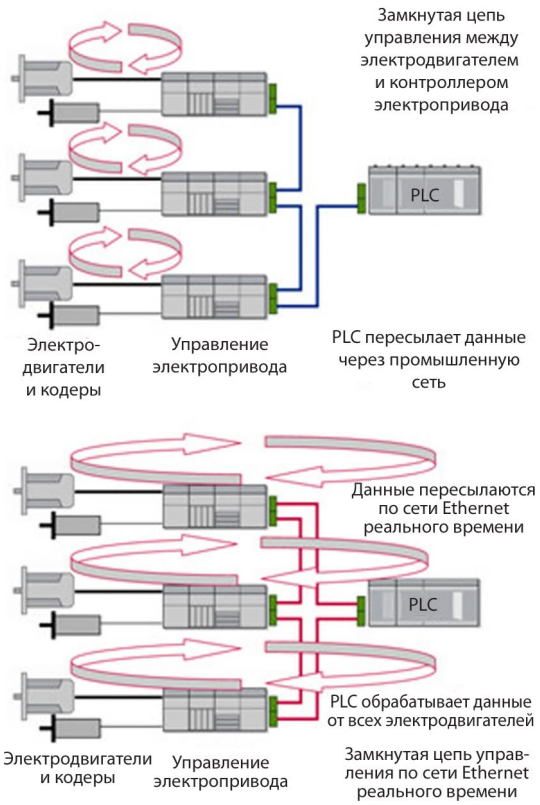

Рис. 4. **Сравнение традиционной распределенной системы управления электроприводом** (вверху) **с централизованной системой на базе IPC/PLC и Ethernet реального времени** (внизу)

ных, а также высвобождает системные ресурсы для решения задач высокого уровня, например контроля скорости и положения (см. рис. 4). Таким образом, комбинация быстрого протокола IE и FPGA позволяет IPC поддерживать высокопроизводительную систему с обратной связью для управления несколькими электродвигателями. Конечному пользователю это обеспечивает доступ к алгоритмам управления, реализуемым на IPC, и, следовательно, создает открытую систему с возможностью полного контроля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Планы развития систем управления движением должны предусматривать не только достижение лучшей производительности, но и снижение ее стоимости и времени ввода в действие. Ввиду ограниченных возможностей реализации и неспособности быстро адаптироваться к новым технологиям традиционные решения на базе МК и DSP вынуждены конкурировать с новыми решениями, появляющимися на рынке.

Использование FPGA позволяет быстро реагировать на изменения технологий и улучшать характеристики как на уровне электропривода, так и системы в целом. Последние поколения FPGA отвечают требованиям по снижению затрат на реализацию системы управления и уменьшению потребляемой мощности. Из-за простоты и гибкости систем на базе FPGA многие производители уже используют эти приборы в оборудовании сетей промышленного Ethernet, а в перспективе производители оборудования будут еще шире использовать возможности FPGA, чтобы обеспечить новые функции систем управления электроприводов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *DSPs, MCUs, or mixed-signal FPGAs for motor control? Make the choice, Mike Thompson// www.automotivedesignline.com*

2. *Moving motion control technology to FPGAs, Stefano J. Zammattio//www.pldesignline.com*