

# Методика проектирования оптимальных систем управления электродвигателями на ПЛИС

Владимир Вычужанин (г. Одесса, Украина)

**В статье описывается методика комплексного проектирования оптимальных систем управления электродвигателями, использующих ПЛИС с ЦПОС переменной точности и специализированные программы.**

В мировой практике регулируемый электропривод (привод с переменной скоростью вращения электродвигателей) признан одним из наиболее эффективных энерго- и ресурсосберегающих технологий. Многолетним опытом подтверждена высокая эффективность применения регулируемого электропривода для управления параметрами и оптимизации работы различных технологических систем с механизмами, работающими на переменных режимах.

В общей структуре потребления электроэнергии в народном хозяйстве России на долю электродвигателей приходится около 40% электроэнергии. Традиционно в большинстве технологических систем различного назначения установлены электродвигатели в расчёте на максимальную производительность оборудования, в то время как продолжительность пиковой нагрузки составляет 10...15% от общего времени работы оборудования. Электродвигатели, работающие с постоянной скоростью вращения, потребляют в 1,5 раза больше электроэнергии, чем это требуется для обеспечения технологического процесса. Применение регулируемого электропривода позволяет оптимизировать

работу электродвигателей, исключив непроизводительное потребление электроэнергии.

Для реализации систем управления в регулируемых электроприводах используются микроконтроллеры (MCU Motor Control) со встроенными периферийными устройствами. Возросшая сложность алгоритмов цифрового управления электроприводами потребовала перехода к высокопроизводительным архитектурам и специализированным цифровым процессорам обработки сигналов (DSP Motor Control). Ведущие фирмы по производству ЦПОС – Texas Instruments, Motorola и Analog Devices – выпустили приборы, обладающие большим объёмом встроенной флэш-памяти программ, памяти данных и набором интегрированных периферийных устройств (таймеров/счётчиков, параллельных и последовательных портов ввода/вывода, многоканальных процессоров событий, многоканальных АЦП и ЦАП, генераторов частоты, ШИМ-сигналов и периодических сигналов, квадратурных декодеров, контроллеров различных интерфейсов и т.п.) и возможностью программирования и отладки на языке высокого уровня C/C++.

Общими недостатками микроконтроллеров и ЦПОС, используемых для регулирования электропривода, являются ограниченные возможности масштабирования и производительности: как правило, МК и ЦПОС имеют фиксированную память, узкий диапазон аналоговых сигналов, фиксированный канал ШИМ, а также ограниченную поддержку многокоординатных систем. Недостаток ресурсов проявляется при реализации сложных алгоритмов обработки информации с высокими требованиями к производительности, при контроле нагрузки, коррекции положения, скорости и других параметров электроприводов.

Хотя при управлении электродвигателями ЦПОС, как правило, имеют достаточную производительность для вычислений, они не могут полностью обеспечить работу системы управления, одновременно выполняющей проблемно-ориентированные операции в реальном масштабе времени (т.е. реализовать интерфейс памяти, контроль сигнала интерфейса фильтрации, поддержку протокола стандарта Industrial Ethernet и т.п.). Кроме того, разработка алгоритмов управления электроприводами и их перевод (с учётом системных требований к аппаратной оптимизации) в программное обеспечение является трудоёмким процессом.

Использование ПЛИС для повышения эффективности функционирования электроприводов в системах управления позволяет относительно легко масштабировать производительность регулируемых электроприводов. В настоящее время в разработках систем управления электроприводами также применяются ЦПОС, встроенные в ПЛИС и обладающие гибкостью, успешно используемой при их интеграции и оптимизации. В разработках систем управления на ПЛИС с ЦПОС также используется дополнительная логика, пользовательские инструкции и обеспечивается поддержка протокола Industrial Ethernet. Типичная схема системы управления электроприводом с ЦПОС, встроенным в ПЛИС, приведена на рисунке 1.

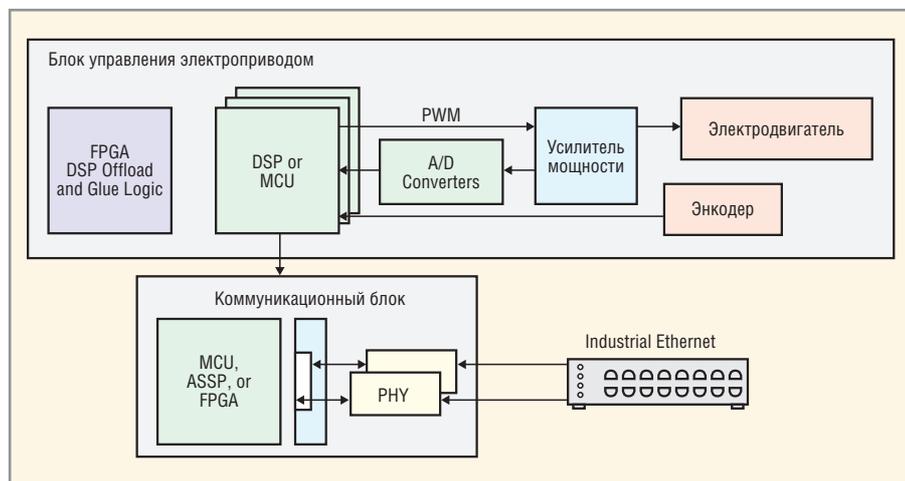
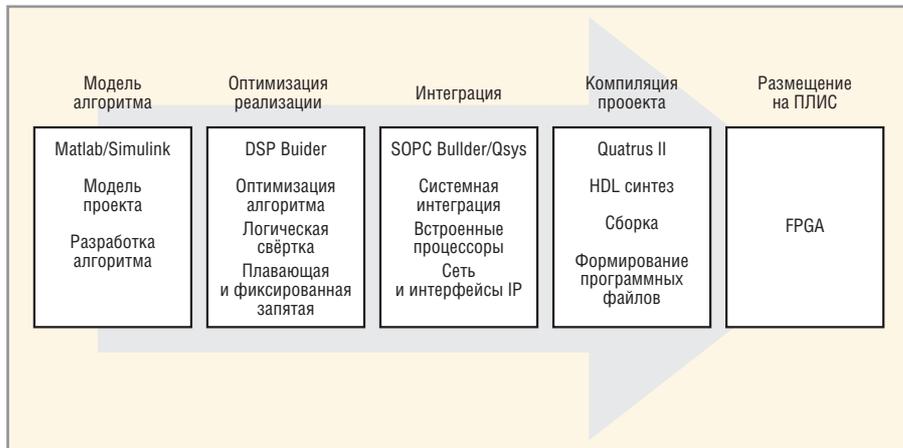


Рис. 1. Типичная схема системы управления электроприводом с ЦПОС, встроенным в ПЛИС

В настоящее время существует большое многообразие программируемых устройств и специализированных программ, применяемых в регулируемом электроприводе. Фирма Altera предлагает комплекс мероприятий по оптимизации структуры систем управления электродвигателями, содержащих ПЛИС, условно сводимых к схеме, представленной на рисунке 2.

Оптимизация структур систем управления электродвигателями на ПЛИС предполагает наличие следующих технических возможностей:

- гибкость конструкции с многократным использованием IP-блоков и DSP-блоков переменной точности. Выполнение операций с фиксированной или плавающей точкой в блоках векторного управления (объектно-ориентированного управления, Field Oriented Control, FOC);
- наличие набора инструментов для моделирования Simulink, DSP Builder Altera и универсального инструмента интеграции системы в пакеты программ Qsys или SOPC Builder, оптимизирующих работу электродвигателей с помощью систем управления, содержащих ПЛИС;
- конструктивная интеграция встроенного ЦПОС, энкодера, интерфейсов и алгоритмов ЦОС для управления вращением и каналом связи Industrial Ethernet в одном устройстве;
- масштабирование с использованием функции параллелизма, позволяющее повысить производительность и эффективность различных типов регулируемых электродвигателей.



**Рис. 2. Последовательность мероприятий по оптимизации структуры систем управления электродвигателями на основе ПЛИС**

Использование ПЛИС со встроенными ЦПОС позволяет разработчикам реализовать параллельное управление несколькими подсистемами в регулируемых электроприводах, обеспечить контроль необходимого числа различных интерфейсов, датчиков и энкодеров.

Разработчики, используя ЦПОС переменной точности с плавающей точкой в блоках для векторного управления (FOC), могут обеспечить выполнение сложных математических алгоритмов. На рисунке 3 приведены элементы FOC, интегрированные в ПЛИС для создания единой системы управления электроприводом.

Представленная на рисунке 3 структура поддерживает интеграцию следующих IP-блоков:

- IGBT-управление электродвигателями переменного тока. Использование методов пространственно-векторной модуляции (SVM) в ПЛИС для

ШИМ напряжения на затворе IGBT-транзисторов и создания синусоидального напряжения, необходимого для управления электроприводом;

- интерфейс внешнего АЦП для измерения тока обратной связи с электродвигателя;
- сетевой интерфейс, позволяющий осуществлять загрузку в ПЛИС промышленных протоколов стандартов Ethernet в режиме реального времени, что требуется для таких приложений, как Ethernet/IP, PROFINET IO/IRT и EtherCAT;
- датчик обратной связи (энкодер) для передачи позиционных данных ротора электродвигателя.

При реализации регулируемого электропривода непременным условием нормальной работы системы управления является точное измерение скорости, ускорения и положения ротора электродвигателя. В схеме управления

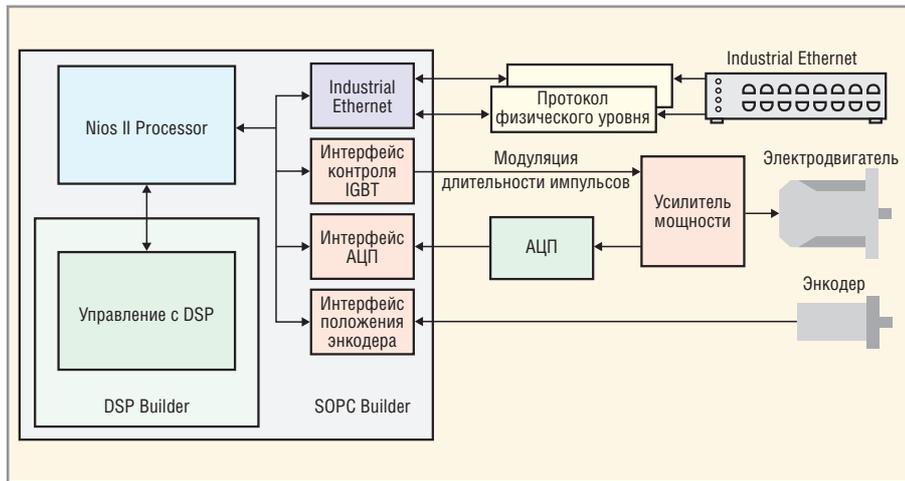


Рис. 3. Блок-схема контроллера электропривода на основе ПЛИС

в качестве сигнала обратной связи могут использоваться потребляемый электродвигателем ток или противо-ЭДС обмотки. Однако для высокоточного управления скоростью или положением ротора рекомендуется использовать энкодеры, механически связанные с ротором.

Схемы электроприводов варьируются в зависимости от типа используемого электродвигателя и области его применения. Например, часто используемые синхронные электродвигатели переменного тока математически описываются интенсивными полями объектно-ориентированного управле-

ния (FOC), входящими в алгоритм автоматического регулирования. Применение соответствующих алгоритмов обеспечивает качественный контроль и поддержание скорости и крутящего момента вала электродвигателя при переменной нагрузке, контроль точных значений управляющих напряжений и частоты вращения электродвигателя. Объектно-ориентированное управление также обеспечивает контроль тока трёхфазного электродвигателя в режиме реального времени для создания плавно вращающегося магнитного потока при соответствии частоте вращения электродвигателя частоте синусоидальных колебаний напряжения питания. Использование FOC позволяет уменьшить пульсации крутящего момента и электромагнитные помехи и обеспечить точное позиционирование в системах управления промышленными серводвигателями. Однако блок-схема FOC (см. рис. 4) является относительно сложной, и алго-

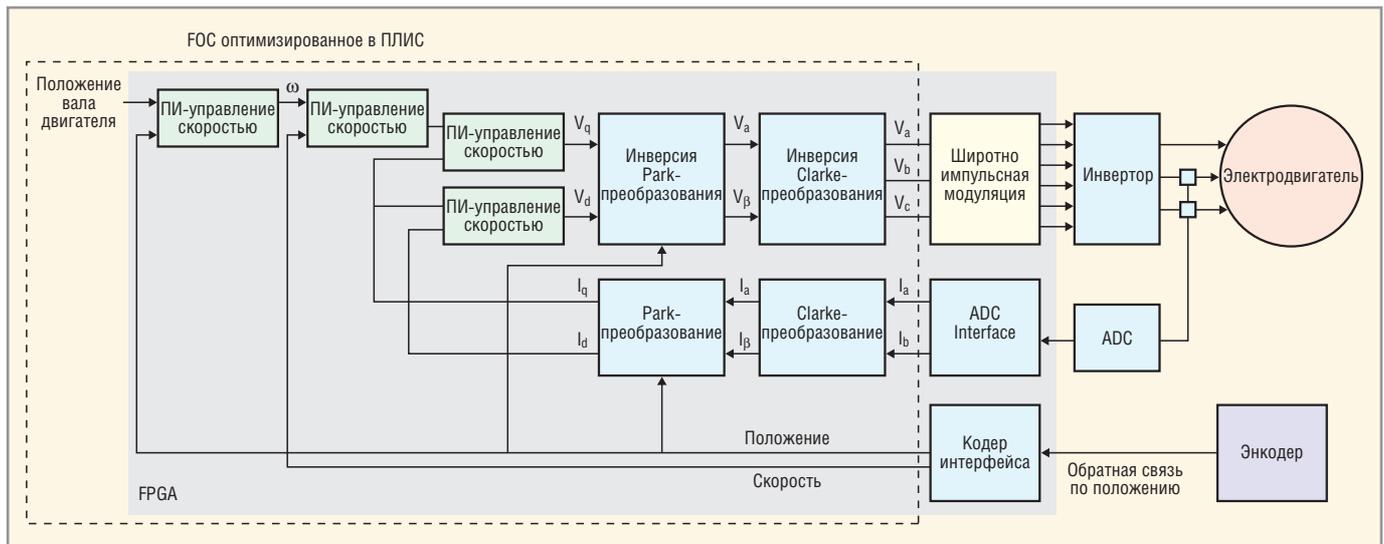


Рис. 4. Блок-схема объектно-ориентированного управления (FOC) электродвигателем

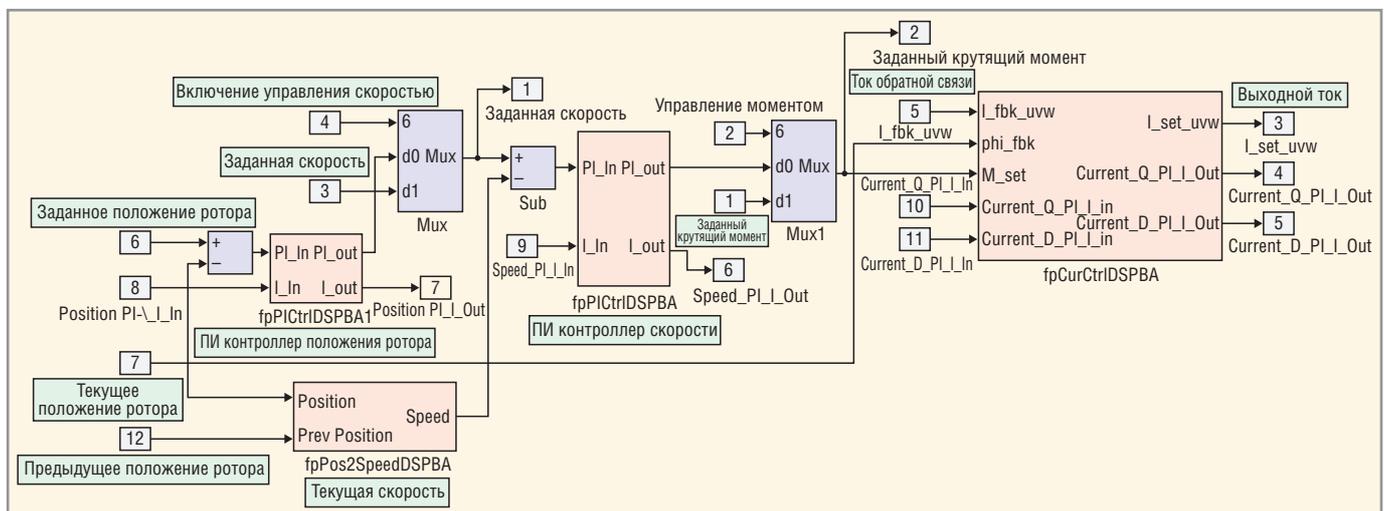


Рис. 5. Блок-схема контроллера для управления положением и скоростью вала для синхронного электродвигателя с постоянными магнитами

ритм её работы на высоких скоростях требует существенных вычислительных мощностей.

Алгоритм FOC включает в себя последовательность действий:

- преобразование данных о трёхфазном токе обратной связи и положении ротора с использованием преобразований Кларка/Парка;
- использование результатов преобразований для пропорционально интегральных (ПИ) регуляторов системы управления в целях обеспечения нулевого уровня постоянного тока и заданного момента на валу электродвигателя;
- обратное преобразование напряжений на выходах ПИ-регуляторов в трёхфазный ток с использованием обратных преобразований Кларка/Парка.

Следует отметить, что использование FOC в управляемом электроприводе позволяет применять электродвигатели меньших габаритов, стоимости и энергопотребления. ПЛИС со встроенным ЦПОС переменной точности обеспечивает гибкие возможности при выборе уровня точности, а также поддерживает одинарную и двойную точность вычислений с плавающей запятой.

Традиционное проектирование систем управления электроприводами на основе технологии DSP Motor Control включает этап создания их моделей и разработку по результатам моделирования алгоритма управления с последующим написанием кода для ЦПОС. Такая последовательность проектирования имеет определённые недостатки:

- как правило, алгоритм моделирования для реализации на ЦПОС вначале использует плавающую точку, но затем функционирует с фиксированной точкой;
- для модели требуется повторная проверка кода.

Поэтому увеличение производительности при реализации алгоритма управления требует дополнительных действий:

- ручной оптимизации кода;
- обновления кода для более производительного ЦПОС;
- использования более одного ЦПОС для распараллеливания алгоритма.

Среда проектирования DSP Builder Altera позволяет преодолеть указанные недостатки. Эта среда представляет собой расширенное блочное множество,

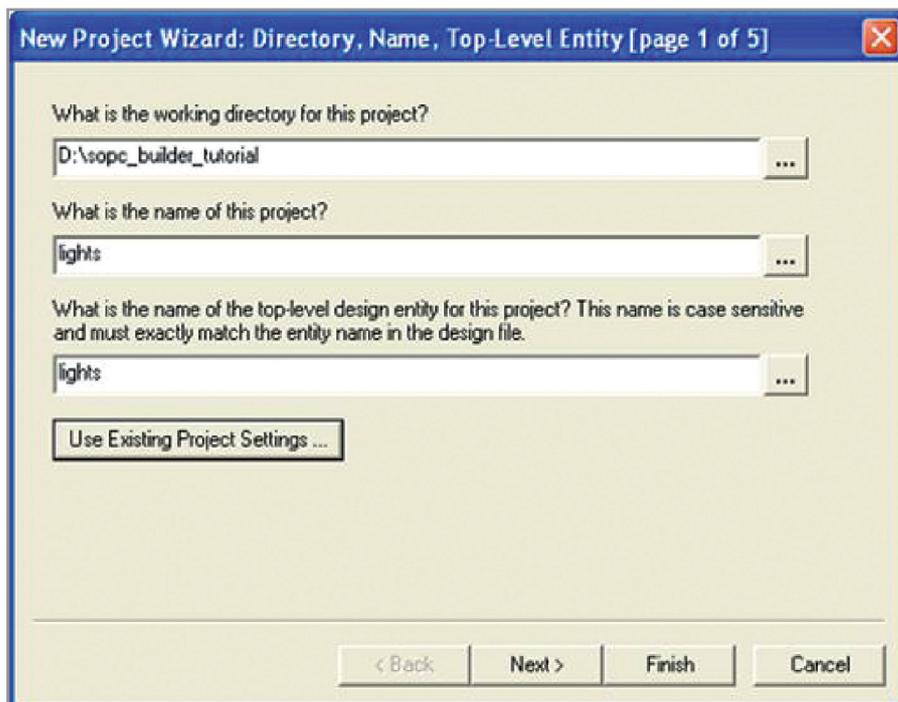


Рис. 6. Окно формы создания нового проекта

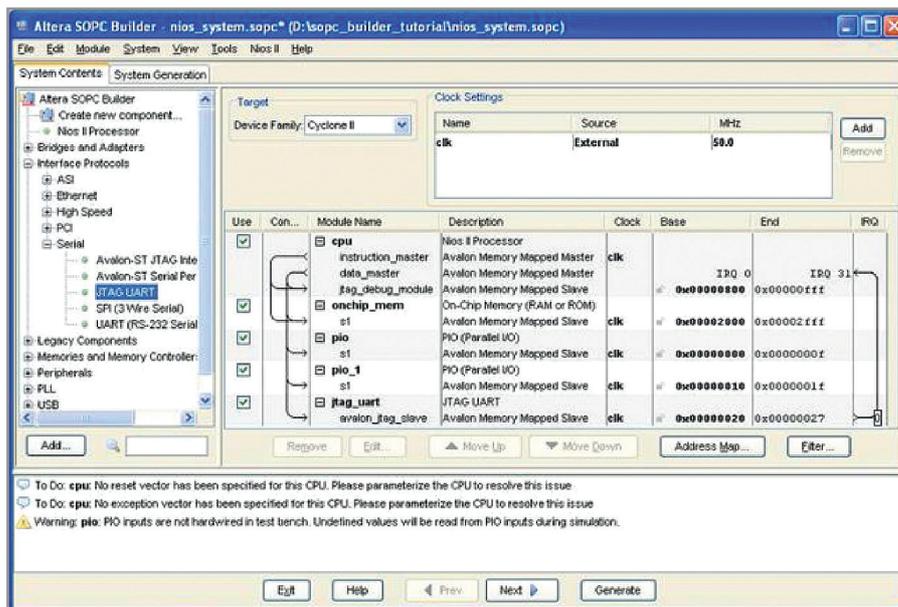


Рис. 7. Окно итоговой спецификации законченной системы

изначально поддерживающее алгоритм моделирования с фиксированной точкой или одинарной/двойной точности с плавающей точкой. Среда осуществляет поддержку программных продуктов Matlab и Simulink. Объединив функции MATLAB и блоки Simulink с мегафункциями и блоками DSP Builder, можно аппаратно реализовать систему цифровой обработки сигналов. Среда разработки DSP Builder позволяет конвертировать системы, разработанные с помощью MATLAB и Simulink, в файлы, которые затем могут использоваться САПР Quartus II для аппаратной реализации на ПЛИС.

Интегрированные блоки DSP Builder позволяют разрабатывать модели алгоритма FOC непосредственно в среде Matlab и Simulink путём реализации блок-схемы на элементарных блоках (ADD, SUB, MULTIPLY, CONSTANT, COSINE и SINE). На рисунке 5 показана блок-схема контроллера для управления положением и скоростью вала для синхронного электродвигателя с постоянными магнитами. В зависимости от используемых ресурсов ПЛИС и процессора, проектировщики могут реализовать элементы схемы в программном или аппаратном виде.

При проектировании специализированных сопроцессоров в ПЛИС сре-

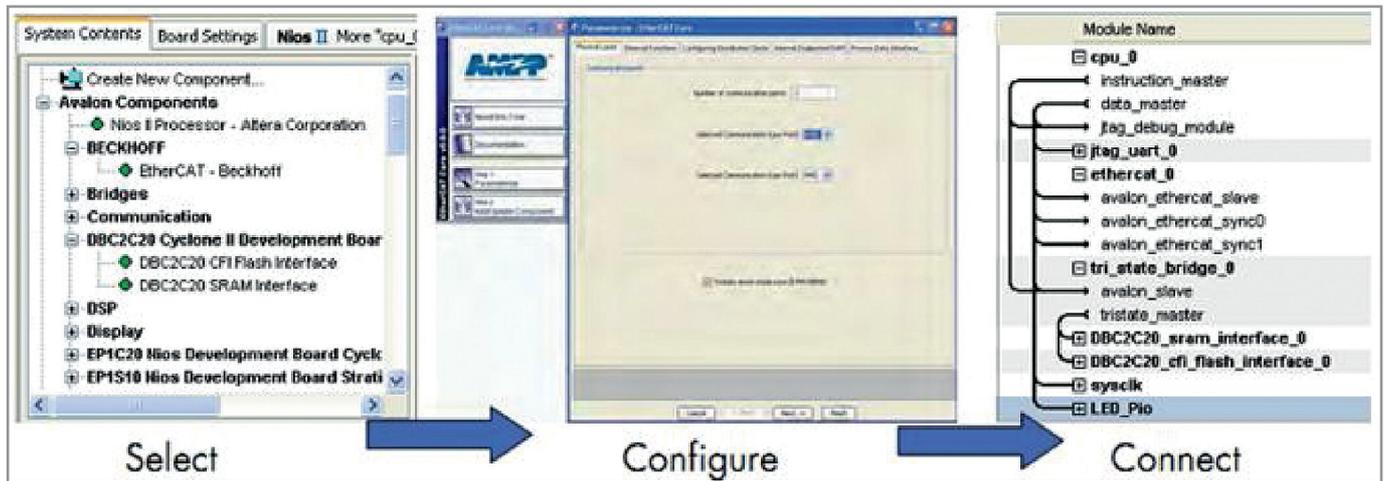


Рис. 8. Использование аппаратных IP-блоков в SOPC Builder для создания системы, совместимой с Industrial Ethernet

да DSP Builder может быть подключена к приложению системы на программируемом кристалле System on a Programmable Chip (SOPC) Builder компании Altera. Например, программно встроенный процессор Nios II поддерживается DSP Builder благодаря связи с приложением SOPC Builder, входящим в программный пакет САПР Quartus II. Программное обеспечение SOPC Builder предназначено для автоматического проектирования различных программно-аппаратных средств компьютерной техники и представляет собой набор HDL-модулей: контроллеров памяти, интерфейсов, периферийного оборудования и др. Инструменты системной интеграции SOPC Builder, также как Qsys, позволяют разработчикам создавать функционально закон-

ченные СнК при помощи автоматизации интеграции аппаратных компонентов.

Разработчик проекта системы, без кодирования HDL с помощью графического интерфейса пользователя (GUI), использует SOPC Builder для ускорения и автоматизации конфигурирования, интеграции и модернизации систем на базе IP-блоков. SOPC Builder создаёт файл конфигурации, загружаемый в ПЛИС. При необходимости внесения изменений в проект разработчик открывает SOPC Builder и изменяет проект через GUI. Создание нового проекта для системы управления в каталоге SOPC Builder Quartus II начинается с заполнения формы, приведённой на рисунке 6. Окно итоговой спецификации законченной системы

представлено на рисунке 7. На рисунке 8 приведён пример использования аппаратных IP-блоков в SOPC Builder для создания системы, совместимой с Industrial Ethernet.

Используя Matlab, разработчики могут настроить проект по данным измерения ключевых параметров системы в рабочем диапазоне изменения переменных:

- методом свёртывания, позволяющего установить необходимые время задержки, пропускную способность и ресурсы для реализации наиболее важной части схемы;
- применением алгоритма Simulate для настройки физической модели электродвигателя и задания параметров при моделировании регуляторов системы;
- использованием чисел с фиксированной точкой на различных этапах выполнения алгоритма управления для установки заданной точности системы управления.

При комплексном проектировании оптимальных систем управления электродвигателями на основе ПЛИС применяется метод свёртывания элементов оборудования системы, тесно связанного с мультиплексированием

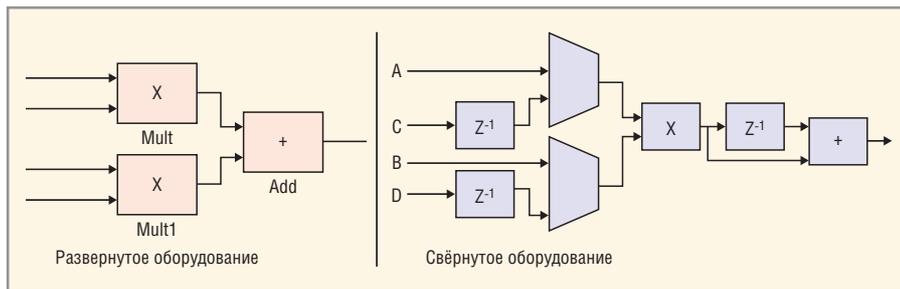


Рис. 9. Примеры развернутого и свёрнутого оборудования однотипного устройства

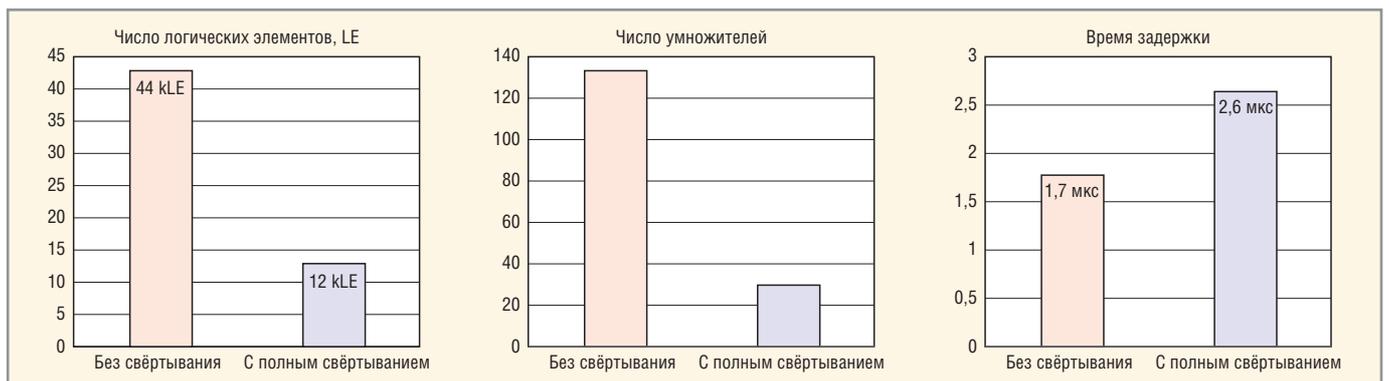


Рис. 10. Системные ресурсы и время задержки

**Таблица 1. Результаты использования системы управления без свёртывания и с полным свёртыванием элементов схемы**

Спецификация	Без свёртывания	С полным свёртыванием
Блоки сложения (вычитания)	22	1
Блоки умножения	22	1
Блоки <i>sin</i>	4	1
Максимальная пропускная способность, Мегавыборок/с	100	1

**Таблица 2. Результаты использования в системе управления представления чисел с плавающей и фиксированной точкой**

Спецификация	Фиксированная точка, 16-бит	Фиксированная точка, 32-бит	Плавающая точка
Число логических элементов	2000	4000	12 000
Число 18-битных умножителей	4	5	28
Время задержки, мкс	1,21	1,36	2,65

и временным разделением каналов. Указанный метод обеспечивает экономию системных ресурсов путём использования единого тракта для обработки нескольких каналов передачи данных. При использовании метода свёртывания не предъявляются особые требования к мультиплексной передаче сигнала и буферизации данных, в отличие от разработок, получаемых в результате ручного свёртывания. Рисунок 9 показывает, как свёртывание позволяет уменьшить число сочетаний блоков устройства, не используемых в процессе его функционирования.

Для экспериментальной оценки результатов применения методики комплексного проектирования оптимальных систем управления электродвигателями на базе ПЛИС с использованием развёрнутого и свёрнутого оборудования можно воспользоваться базовой оценкой с помощью алгоритма моделирования FOC компании Altera. Алгоритм включает преобразование Кларка/Парка, выполнение функций блоков ПИ-регулирующего, суммирования (вычитания), умножения, операторов SIN и COS. Экспериментальный стенд содержит модель электродвигателя, DSP Builder для FOC-контроллера скорости, внешнюю обратную связь с ПИ-регулятором, а также необходимую логику и элементы.

Результаты, полученные при моделировании в среде Simulink системы управления электродвигателем на основе ПЛИС семейства Cyclone IV при одинарной точности с плавающей точкой и фиксированной точке, для развёрнутой и свёрнутой конфигураций, приведены в таблице 1 и на рисунке 10. Результаты использования DSP Builder при выполнении операций с фиксированной или плавающей точкой при свёртыва-

нии блоков для реализации системы управления представлены в таблице 2. Приведённые данные показывают существенное снижение числа блоков сложения и умножения при использовании свёртывания, а значит, уменьшение плотности блоков в реализуемом устройстве системы управления электроприводом в ПЛИС Cyclone IV. Двукратное увеличение времени задержки допустимо при реализации системы управления электроприводом.

Полученные экспериментальные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- использование модели FOC с плавающей точкой влияет на число используемых логических элементов. Время задержки увеличивается незначительно (до 5 мкс), что допустимо для подобных операций;
- метод свёртывания обеспечивает оптимизацию аппаратных ресурсов. Таким образом, предлагаемая методика, основанная на использовании инструментов Simulink и Matlab для моделирования, DSP Builder для оптимизации алгоритма управления электродвигателем, SOPC Builder для системной интеграции и программного обеспечения Quartus II для синтеза проектирования и монтажа проекта обеспечивает возможность комплексного проектирования оптимальных систем управления электродвигателем на основе ПЛИС.

Применение описанной методики при построении электропривода позволяет исключить непроизводительное потребление электроэнергии, а в системах кондиционирования воздуха, теплоснабжения и водоснабжения дополнительно обеспечить экономию тепла (до 10%) и снижение водопотребления (до 20%).

