

Применение систем на кристалле на базе ПЛИС в информационных системах управления производственным оборудованием

А. Петров, д. т. н.¹, Д. Потехин, д. т. н.¹, И. Тарасов, д. т. н.¹

УДК: [004.31+004.75]:681.518 | ВАК: 05.13.05

В статье рассматриваются свойства программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) и возможности их применения в информационных системах управления производственным оборудованием. Предлагается архитектура системы, в которой ПЛИС выступают как элемент, осуществляющий сбор данных и их предварительную обработку, а также локальное управление исполнительными устройствами, реализуя таким образом подход туманных вычислений.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие компонентной базы вычислительных систем привело к появлению в 1960-х годах информационных систем управления предприятием – корпоративных информационных систем (КИС). Повсеместное распространение информационных технологий, аппаратных платформ и компьютерных сетей способствует постоянному развитию и расширению внедрения подобных систем. Можно упомянуть следующие разновидности КИС, представляющие существенный интерес и поддержанные программными разработками [1]: системы взаимодействия с покупателем (Customer Relationship Management – CRM), планирование ресурсов предприятия (Enterprise Resource Planning – ERP), управление цепочками снабжения (Supply Chain Management – SCM) и др.

Особенностью перечисленных систем является то, что их аппаратная часть строится на широко распространенных персональных компьютерах, серверах и сетевом оборудовании. Таким образом, проектирование КИС подобного типа заключается в выборе и компоновке аппаратных ресурсов из существующих компонентов с фокусированием процесса проектирования на программном обеспечении.

В то же время большой интерес для автоматизации производственных процессов представляют также системы с получением информации с датчиков физических величин, контрольно-измерительного оборудования, систем учета (например, на основе RFID или QR-кодов), что позволяет расширить перечень источников информации для КИС и получить качественно отличающиеся методы управления предприятием.

Разновидностью КИС, использующей данные контрольно-измерительного оборудования, является MES (Manufacturing Execution System) – система управления производством в реальном времени. Учитывая актуальность задачи развития в России товарного производства и повышения эффективности производственных комплексов, представляется оправданным повышенное внимание к автоматизированным системам управления технологическими процессами.

В отличие от CRM или ERP-систем, системы типа MES должны осуществлять сбор информации, связанной с производством, от:

- систем автоматизации производственного процесса;
- датчиков;
- оборудования;
- персонала;
- программных систем.

Данные задачи обозначаются также понятием «сбор данных» (в англоязычной литературе – Data Collection или Data Acquisition).

К уровням иерархии современных АСУ относят [2, 3]:

1. *Уровень датчиков и исполнительных устройств.* На данном уровне используются физические интерфейсы CAN, 1-Wire, I²C, SPI, варианты UART и др.
2. *Уровень технологического оборудования (уровень контроллера).* Кроме UART с физическим интерфейсом RS-485, применяются также Modbus, Profibus и другие интерфейсы и сетевые архитектуры подобного уровня.
3. *Вышестоящие уровни (диспетчерский, уровень управления цехом, уровень высшего руководства).* На данных уровнях обычно для коммуникации используются протоколы на основе Ethernet.

¹ РТУ МИРЭА.

Можно отметить, что если, начиная с диспетчерского уровня, можно использовать Ethernet, то есть ориентироваться на широко распространенное компьютерное и сетевое оборудование, то уровень технологического оборудования подразумевает применение промышленных компьютеров или программируемых логических контроллеров (ПЛК), а уровень датчиков подразумевает применение физических интерфейсов, отсутствующих в большинстве компьютеров. Таким образом, внедрение MES требует применения низкоуровневых устройств, обеспечивающих интерфейсы с датчиками и исполнительными устройствами технологического оборудования.

ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ ПЛИС

Известным в настоящее время подходом к разработке новых цифровых устройств является применение ПЛИС. Упрощенная структура ПЛИС с архитектурой FPGA (Field-Programmable Gate Array – программируемая пользователем вентильная матрица) показана на рис. 1. На этом рисунке видно, что в основе FPGA лежит матрица программируемых логических ячеек – конфигурируемых логических блоков. В процессе эволюции архитектуры FPGA, впервые предложенной компанией Xilinx [4] в 1985 году, в состав этих микросхем последовательно добавлялись следующие аппаратные блоки:

1. двухпортовая синхронная статическая память (BRAM);
2. компоненты умножителей и умножение с накоплением (DSP48);
3. высокоскоростные последовательные приемопередатчики;
4. контроллеры Ethernet, PCI Express, Interlaken;
5. процессорные ядра PowerPC и ARM Cortex-A.

Кроме прототипирования СБИС, областями применения ПЛИС стали также оригинальные системы вычислений, измерения и управления, а также коммуникационные устройства. Основным аргументом в пользу применения данной элементной базы является высокая стоимость подготовки производства СБИС, поэтому программируемая элементная база оказывается привлекательной для областей применения, в которых желательно использование специализированных вычислительных узлов.

Исходя из аппаратных средств ПЛИС и оптимальных способов их использования можно выделить следующие основные задачи в системах управления производством в реальном времени, которые можно решить на базе ПЛИС, расширяя возможности существующих систем на базе персональных и промышленных компьютеров:

- интеграция подсистем сбора данных и управления, что обеспечивается большим количеством программируемых выводов ПЛИС, позволяющих объединять контроллеры разнородных цифровых интерфейсов

в микросхеме с большой степенью интеграции компонентов;

- обеспечение интерфейса с локальными и глобальными сетями предприятия за счет использования высокоскоростных последовательных приемопередатчиков (Multi-Gigabit Transceiver – MGT), встроенных аппаратных интерфейсов PCI Express, а в некоторых ПЛИС – также Interlaken, 100G Ethernet;
- реализация туманных вычислений при использовании параллельных вычислительных структур на базе аппаратных компонентов «умножение с накоплением», а также специализированных программных процессоров, предназначенных для эффективного выполнения узкого подкласса задач [5].

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ТУМАННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ НА БАЗЕ ПЛИС

При проектировании проблемно-ориентированных систем необходимо исходить из специализации вычислительных узлов, реализуемых на базе программируемых ячеек ПЛИС. В табл. 1 приведены сравнительные характеристики ПЛИС Xilinx, предназначенных для разработки систем начального уровня. В статье не рассматриваются семейства ПЛИС верхнего ценового диапазона, поскольку стоимость такого решения может оказаться слишком высока для его широкого

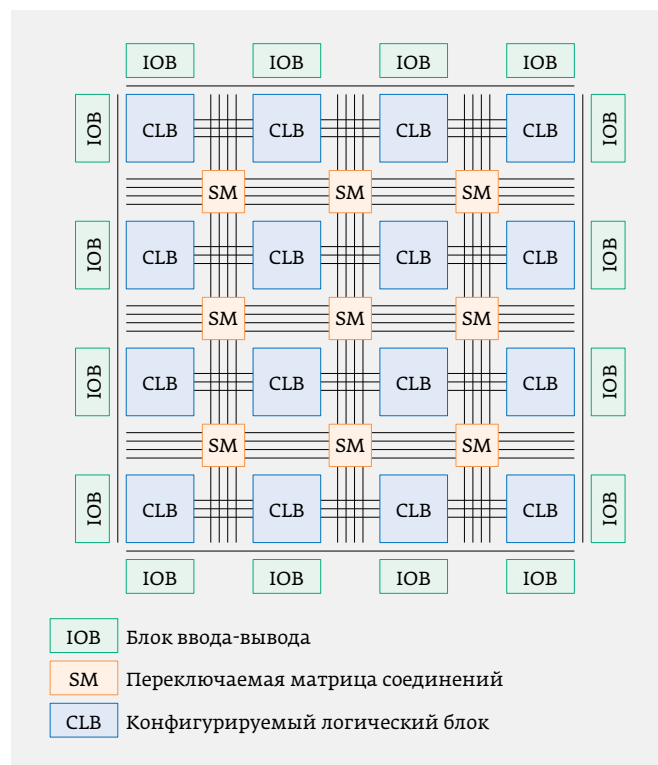


Рис. 1. Упрощенная структура ПЛИС с архитектурой FPGA

Таблица 1. Сравнительные характеристики семейств ПЛИС, предназначенных для разработки систем начального уровня

Семейство ПЛИС	Spartan-6	Spartan-7	Artix-7	Zynq-7000S, Zynq-7000
Количество логических ячеек, тыс.	4–150	6–102	12–215	23–85
Блочная память, кбит	216–4 824	180–4 320	720–13 140	1 800–5 040
Количество секций DSP	8–180	10–160	40–740	66–220
Количество приемопередатчиков, макс.	8	–	16	4
Максимальная скорость приемопередатчиков, Гбит/с	3,2	–	6,6	6,25
Максимальная поддерживаемая скорость DDR3, Мбит/с	800	800	1 066	1 066
АЦП	–	2×12 бит, 1 Мвыб./с, со встроенными датчиками напряжения питания и температуры, до 17 внешних аналоговых входов		
Количество программируемых внешних выводов, макс.	576	400	500	328

применения в информационных системах даже с учетом работы в составе дорогостоящего технологического оборудования.

При реализации компонентов вычислительной системы можно ориентироваться на следующие особенности.

Разработка интерфейсных модулей

Данный вид компонентов существенно расширяет функциональные возможности информационной системы за счет получения доступа к датчикам физических величин с цифровым интерфейсом. Основным ресурсом ПЛИС, который в данном случае необходимо учитывать в первую очередь, являются программируемые внешние выводы, поскольку прочие компоненты ПЛИС используются в небольшом количестве относительно имеющегося их числа.

В табл. 2 приведено требуемое количество выводов для реализации несложных цифровых интерфейсов,

получивших распространение в задачах подключения датчиков и исполнительных устройств. Можно видеть, что ПЛИС обладают значительными возможностями для интеграции большого количества компонентов в одном корпусе, обеспечивая эффективную организацию внешних интерфейсов.

В табл. 2 при расчете суммарного количества подключаемых устройств учтены особенности интерфейсов I²C и SPI. В первом используется адресная организация устройств на двухпроводной шине, при которой на каждом физическом канале могут располагаться до 128 устройств, адресуемых с помощью стандартного протокола. Такой способ, впрочем, требует обеспечения достаточной помехоустойчивости физического канала. Для интерфейса SPI три из четырех физических линий могут быть обобщены для всех устройств, активация которых осуществляется при помощи индивидуальных сигналов выбора ChipSelect.

Таблица 2. Возможности ПЛИС при подключении внешних цифровых интерфейсов датчиков и исполнительных устройств

Тип контроллера	Требуемое количество выводов	Количество интерфейсных модулей, реализуемых в ПЛИС с 400 выводами	Количество модулей при частичном обобщении сигналов
UART	2	200	200
I ² C	2	200	200 каналов по 128 устройств
SPI	4	100	397
ШИМ, 1-Wire	1	400	400

Таблица 3. Пиковая производительность ПЛИС в задачах цифровой обработки сигналов

Семейство ПЛИС	Spartan-6	Spartan-7	Artix-7	Zynq-7000S, Zynq-7000
Количество секций DSP	8–180	10–160	40–740	66–220
Максимальная тактовая частота секций DSP, МГц	325	450	450	450
Пиковая производительность в задачах ЦОС, млрд операций «умножение с накоплением» в секунду	58	72	333	100

Устройства предварительной цифровой обработки сигналов

Компоненты цифровой обработки сигналов (ЦОС), размещаемые на кристалле ПЛИС, в целом соответствуют концепции туманных вычислений, и целью их применения является выполнение основного объема вычислений непосредственно в составе датчика или распределенной сети устройств. Такое решение снижает нагрузку как на центральное вычислительное устройство информационной системы, так и на коммуникационные системы, значительно уменьшая объем передаваемых данных.

Пиковая производительность ПЛИС в задачах цифровой обработки сигналов определяется как произведение количества секций DSP на их тактовую частоту. Снижение

тактовой частоты в реальных проектах, как правило, определяется невозможностью трассировки всей схемы на максимально достижимой для компонентов ПЛИС частоте, поэтому на практике тактовая частота может оказаться в 2–3 раза ниже максимальной. Тем не менее для отдельных узлов, в число которых включаются и секции DSP, реальная частота может быть близка к пиковой. В табл. 3 приведена пиковая производительность ПЛИС в задачах цифровой обработки сигналов.

Как можно видеть в табл. 3, пиковая производительность ПЛИС нижнего-среднего ценового диапазона достигает сотен миллиардов операций «умножение с накоплением» в секунду, что существенно превышает производительность в аналогичных задачах сигнальных процессоров

и процессоров общего назначения. Таким образом, такие задачи, как цифровая фильтрация на базе КИХ- и БИХ-фильтров, спектральный анализ на базе БПФ и вейвлет-функций, корреляционный анализ и подобные задачи, могут быть эффективно реализованы на базе ПЛИС в рамках подхода «система на кристалле», в том числе непосредственно в месте размещения источников данных и аналого-цифровых преобразователей. Таким образом, исходный поток данных может быть преобразован с целью существенного снижения передаваемого из ПЛИС трафика по сравнению с потоком поступающих данных. Это соответствует концепции туманных вычислений с передачей основного объема вычислений в распределенные системы обработки данных.

АРХИТЕКТУРА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЛИС

Предлагаются следующие основные положения для обоснования архитектуры вычислительной системы управления производственными процессами в составе MES:

- обеспечение автономности работы и сочетания поддержки систем реального времени (включая «жесткие» режимы) и интерфейсов к вышестоящим информационным системам управления предприятием;
- обеспечение высокой производительности в выбранном подклассе задач;
- обеспечение интерфейсов для систем сбора данных.

Исходя из этих положений для систем на базе ПЛИС перспективной является архитектура на базе гетерогенной системы на кристалле, включающая:

- процессорные ядра приложений в виде RISC-процессоров общего назначения, в качестве которых могут выступать аппаратные ядра ARM Cortex-A в семействах ПЛИС Xilinx Zynq-7000 и Zynq MPSoC или программные процессоры MicroBlaze;
- проблемно-ориентированные процессорные ядра поддержки отдельных процессов управления, при необходимости работающие в режиме исключительной поддержки одного или нескольких периферийных устройств для обеспечения реакции в режиме реального времени;
- проблемно-ориентированные вычислительные модули ускорения вычислений, преимущественно цифровой обработки сигналов, на базе компонентов DSP48 (умножение с накоплением).

Структурная схема цифровой части информационно-измерительной системы с применением ПЛИС показана на рис. 2.

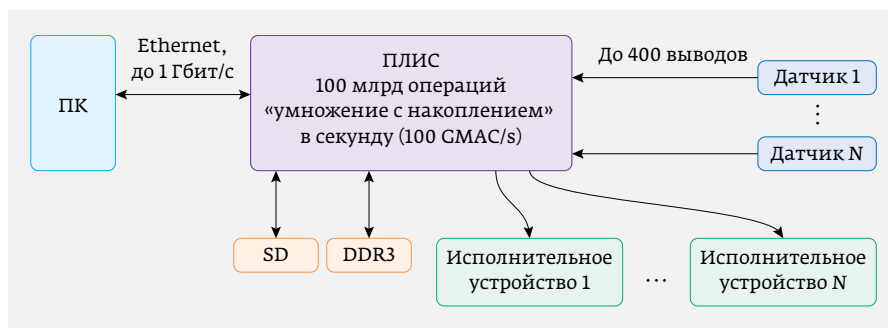


Рис. 2. Структурная схема цифровой части информационно-измерительной системы с применением ПЛИС

Из рис. 2 видно, что с учетом выполнения основного объема вычислений, касающихся обработки данных с датчиков и управления исполнительными устройствами, трафик по локальной сети Ethernet может быть существенно сокращен и приведен к технически реализуемому для интерфейса Ethernet уровню. При этом размещение в ПЛИС компонентов цифровой обработки сигналов позволяет реализовать в ПЛИС начального уровня до 100 млрд операций «умножение с накоплением» в секунду, что соответствует архитектуре и подходу туманных вычислений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Высокая производительность ПЛИС в задачах цифровой обработки сигналов и возможность реализации на базе программируемых ресурсов ПЛИС гетерогенной процессорной системы для управления цифровыми подсистемами делает возможным использование ПЛИС в качестве элементов информационной системы управления производственным оборудованием. С учетом высокой суммарной производительности компонентов ПЛИС такое решение отвечает концепции туманных вычислений, существенно снижая нагрузку на центральные вычислительные узлы и коммуникационную сеть информационной системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Емельянова Н.З., Партыка Т.Л., Попов И.И. Проектирование информационных систем: учеб. пособие. – М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2018. 432 с.
2. Lian F.-L., Yook J.K., Tilbury D.M., Moynе J. Network architecture and communication modules for guaranteeing acceptable control and communication performance for networked multi-agent systems // IEEE Transactions on Industrial Informatics. Feb. 2006. V. 2. № 1. PP. 12–24.
3. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. – М.: Горячая линия – Телеком, 2013. 606 с., ил.
4. www.xilinx.com
5. Тарасов И. Проектирование процессорных ядер. Цели, задачи, инструменты // Компоненты и технологии. 2018. № 2 (199). С. 44–54.