

УДК 621.382:615.471

А.Е. ПЕРЕПЕЛИЦЫН, В.С. ХАРЧЕНКО

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ПЛИС ТЕХНОЛОГИЙ В МЕДИЦИНСКОМ ОБОРУДОВАНИИ

Обсуждаются задачи информационных технологий и причины роста интереса к ним в современной медицине. Дается аналитический обзор рынка программируемой логики с учетом требований к медицинскому оборудованию. Приводятся результаты анализа применения технологий ПЛИС в медицине. Проводится анализ проблем и перспектив применения ПЛИС в медицинской технике. Рассматриваются примеры использования ПЛИС ведущих фирм в клинических системах и системах визуализации. Анализируются примеры и перспективы реализации на ПЛИС такой медицинской задачи, как томографические вычисления.

Ключевые слова: ПЛИС, медицинское оборудование, томография.

Введение

В последнее десятилетие активно развиваются технологии ПЛИС, завоевывая рынки и находя себе применение в разных отраслях, в том числе и в медицине. Они зарекомендовали себя как одни из немногих полупроводниковых технологий, спрос на которые практически не зависит от успешности продаж фирм производителей конечного продукта. Даже в период экономической нестабильности с 2008 по 2011 темп роста рынка ПЛИС был очень высоким [1].

С ростом степени интеграции микросхем качественно меняется предел сложности систем, которые могут быть реализованы на их основе. Технологии ПЛИС приходят на смену микропроцессорам, применяемым в критических системах.

Рост требований к элементной базе, возможность реализации всего набора функций устройства в одном корпусе, обширный потенциал для распараллеливания сложных вычислений и цифровой обработки сигналов, а также высокая надежность и гибкость проектов делают программируемую логику идеальной платформой для реализации задач современной медицинской техники.

Целью исследования является анализ состояния, проблем и перспектив применения ПЛИС в медицинских системах.

1. Причины роста интереса к информационным технологиям в медицине

Все более широкое использование портативных устройств для записи, хранения и передачи данных пациента на центральный сервер говорит о том, что

персональные медицинские сведения в настоящее время выходят за пределы больницы или приемной врача. Компьютеризация медицинских записей помогает уменьшить административные расходы, но при разработке подобных систем требуется уделять повышенное внимание защите личных данных пациента. Такие системы нуждаются в защищенных каналах связи и других мерах, гарантирующих, что персональные данные не могут быть легко скопированы.

В США одной из сфер применения ИТ в медицине является задача построения инфраструктуры здравоохранения, включающей в себя цифровые технологии для госпитализации, электронные медицинские карты (EMR) и электронные медицинские записи (EHR), а также информационные сети нового поколения. Она регламентируется несколькими законами.

Закон о применении медицинских информационных технологий в экономической деятельности и клинической практике (HITECH) ставит в жесткие рамки медицинский персонал и поставщиков услуг в вопросе надежной обработки электронных медицинских записей пациентов, их внедрения и эффективного использования. Кроме того, этот закон ужесточает меры безопасности и обеспечения конфиденциальности, предусмотренные законом об отчетности и безопасности медицинского страхования (HIPAA), который регламентирует строгие требования к учреждениям, располагающим конфиденциальными медицинскими записями [2].

Тенденция к миниатюризации сопровождается повышением требований к обеспечению конфиденциальности пациента. Надежность также является важным требованием, как с точки зрения долговеч-

ности изделия, так и для гарантии того, что устройство работает в соответствии со спецификацией. Это крайне важно для быстро растущего рынка устройств, используемых при оказании экстренной помощи. Например, автоматизированный наружный дефибриллятор должен быть безопасным в использовании. В то же время медработники и другой персонал нуждаются в гарантии того, что устройство работает нормально, т.е. оно точно выдаст требуемый разряд и не сделает этого в неподходящий момент [3].

2. Анализ проблем и перспектив применения ПЛИС в медицинской технике

Причина популярности программируемой логики. Программируемая логика все чаще используется в разных приложениях вместо микропроцессоров, микроконтроллеров и DSP-процессоров, поставщики которых с каждым годом все сильнее испытывают серьезное давление на рынок своей продукции со стороны ПЛИС. Высокий темп роста рынка ПЛИС, технологические достижения 2011 года и выпуск кристаллов ведущими производителями Altera и Xilinx по 28-нанометровой технологии открывают новые возможности для построения сложных встроенных систем в качестве однокристалльных SoPC решений. К числу достижений стоит отнести не только то обстоятельство, что DSP стали стандартными блоками ПЛИС, но и возможность выбора программных и аппаратных RISC-ядер. Ядра ARM получили столь широкое распространение, что фирма Xilinx выпустила специализированную линейку продуктов Zynq-7 для передовых решений на базе технологий ARM.

Вслед за лидерами рынка программируемой логики компании Microsemi и Lattice так же укрепили свои позиции по итогам 2011 года за счет уникальных стратегических решений. Lattice Semiconductor приобрела фирму SiliconBlue Technology, специализирующуюся на производстве ПЛИС с малым энергопотреблением для портативных потребительских устройств – смартфонов, планшетных компьютеров, цифровых камер, навигационных приборов и других устройств с батарейным питанием, и приступила к выпуску нового семейства ECP4. Microsemi приобрела компанию Zarlink – крупнейшего производителя микросхем для телекоммуникации и оптоэлектроники, а годом раньше – компанию Actel (лидера по разработке кристаллов для космических и оборонных систем), с её сериями ПЛИС SmartFusion и IGLOO, представляющими большой интерес для построения портативной медицинской электроники.

Тенденции применения портативных устройств. Использование портативных устройств и телемедицины позволяет перенести медицинское обслуживание в домашние условия и оказать большую поддержку для профилактической медицины. Однако подобные устройства должны обеспечивать возможность работы от собственных батарей в течение длительного времени для сохранения высокого уровня автономности. Поэтому одним из ключевых проектных требований для портативных медицинских устройств является низкое энергопотребление, обусловленное не только соображениями автономности, а еще и необходимостью продолжительного срока службы самого аккумулятора в приложениях с подобным типом питания. К другим важным требованиям относится сокращение сроков от начала разработки до выхода изделия на рынок, низкая цена, малые габариты, а также интеграция и надежность [4].

Ярким примером важности всех вышеописанных качеств для передовой медицины являются успешные клинические испытания на добровольцах имплантируемого прибора, который вводит в организм пациента нужные препараты по заранее составленному графику или по радиосигналу извне. Такая технология, помимо беспрецедентно точного приема препарата, как по времени, так и по дозировке, также позволяет пациенту длительное время не посещать доктора [5]. Использование в подобной критической системе двухстороннего радиоканала для обмена данными с внешним миром в очередной раз акцентирует внимание на необходимости обеспечения информационной безопасности при реализации подобных проектов, даже если используются частоты стандарта Medical Implant Communication Service (MICS), предусматривающего радиосвязь на расстоянии до нескольких метров.

Предлагаемые решения на ПЛИС. Производители оборудования и специалисты-системотехники стремятся предложить решения, соответствующие диапазону стандартных цен и потребностей, поэтому они часто используют аппаратные и программные модули сторонних разработчиков (IP-ядра) для сведения к минимуму расходов на проектирование на ПЛИС.

Компания Microsemi предлагает ПЛИС со смешанным типом сигналов SmartFusion, объединяющую структуру программируемой логики, архитектуру ARM Cortex-M3, существенный объем флэш и SRAM памяти, а также другие компоненты. Её архитектура позволяет хранить данные и выполнять код внутри одного твердотельного устройства. Достичь лучших показателей экономии электроэнергии поможет использование устройств IGLOO,

которые могут перейти в дежурный режим за 1 микросекунду и потреблять в нем не более 5 микроватт при сохранении содержания системной памяти и энергозависимых регистров данных. Основанные на технологии флэш-памяти, эти ПЛИС предлагают настоящую систему на кристалле, представляя более гибкие решения, чем традиционные микроконтроллеры с фиксированной функциональностью. Эти качества особенно важны при построении имплантантов, носимой и портативной техники.

Все ПЛИС третьего поколения фирмы Microsemi, включающие семейства ProASIC3, IGLOO, Fusion и SmartFusion, используют флэш-память для постоянного хранения настроек ключей шифрования на кристалле, которые определяют, могут ли микросхемы быть перепрограммированы после изготовления, что делает вмешательство без верного ключа практически невозможным. Энерго-независимые ПЛИС на основе технологий Antifuse и Flash начинают работать сразу при включении питания. Они лишены необходимости в дополнительной схеме для хранения конфигурации, неотъемлемой для ПЛИС на основе SRAM и в полном смысле являются однокристалльными устройствами.

ПЛИС на основе SRAM, составляющие основную массу продукции компаний Altera и Xilinx, требуют постоянного электропитания для поддержания их запрограммированного состояния. Вдобавок к загрузочной ПЗУ они могут потребовать дополнительный внешний компонент для управления конфигурацией системы, потому что ПЛИС не может взять на себя эти функции, пока не прочтет собственную конфигурацию.

Проблемы надежности. С усложнением технологического процесса производства интегральных схем возрастает их чувствительность к единичным сбоям (SEUs) из-за высокоэнергетических частиц, порожденных космическими лучами или фоновой радиацией. Дополнительными источниками этих частиц являются корпус самой микросхемы и кремниевая подложка из-за неизбежных включений в виде радиоактивных элементов и изотопов. Поскольку оба эти источника находятся непосредственно в самом устройстве, никакое внешнее экранирование не может защитить от заряженных частиц. Когда эти частицы пронизывают кремниевые подложки интегральных схем, они оставляют след ионизации, которая может привести к образованию заряда, способного изменить состояние логического элемента памяти на КМОП структурах, такой как SRAM. Это изменение состояния называется одиночным сбоем

(SEU) [6].

Так как подобные нарушения носят временный характер и исчезают при следующей записи или сбросе SRAM памяти, оправдано применение внутрикристалльного резервирования для парирования отказов рядовых ячеек в рамках каждого цикла работы прибора, т.е. от момента загрузки конфигурации до выключения.

Чувствительность схем памяти к SEU увеличивается с каждым новым поколением устройств из-за снижения напряжения питания и уменьшения пороговой емкости логического элемента. То, что раньше вызывало тревогу лишь в области космических приложений, теперь актуально даже на уровне земли и является проблемой для любого проекта с высокими требованиями надежности, например такого, как медицинское оборудование. Опыт космической индустрии постепенно распространяется и в другие отрасли, такие как сетевые технологии, авионика, автостроение и медицина.

Медицинские устройства не только чувствительны к природному фону, но и должны работать в излучающем окружении современных медицинских учреждений. С учетом этого разработчики медицинского оборудования должны теперь рассматривать SEU восприимчивость при выборе технологии, которая станет основой для их продукции.

Возможности применения различных технологий. В целом, вся медицинская электроника может быть подразделена по принципу применения и возможности перемещения на стационарную, портативную, носимую и имплантируемую.

Для двух последних типов устройств требования к энергопотреблению и надежности особенно жесткие, что обусловлено необходимостью длительной работы от компактного автономного источника питания и, в большинстве случаев, потенциальной угрозой для жизни пациента при отказе устройства.

Надежность и безопасность являются неотъемлемыми требованиями для медицинского оборудования, относящегося к критическим системам.

Проведенный анализ показывает, что ключевые отличия в характеристиках ПЛИС от различных производителей кроются в структуре логических ячеек, способе их соединения и, прежде всего, используемой технологии реализации. Зная особенности проекта и его окружения, можно сделать вывод о приемлемости выбранной технологии реализации.

Результаты анализа отличий технологий реализации ПЛИС по критериям, актуальным для их применения в медицине, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сопоставление трех технологий программируемой логики

Критерии сопоставления технологий ПЛИС	Antifuse	Flash	SRAM
Поддержка возможности перепрограммирования	Нет	Да	Да
Возможность программирования в системе	Нет	Да	Да
Технология является энергозависимой	Нет	Нет	Да
Существует необходимость во внешней памяти	Нет	Нет	Да
Начало функционирования сразу после включения	Да	Да	Нет
Относительные энергозатраты программирования	Высокие	Высокие	Низкие
Относительное энергопотребление	Низкое	Среднее	Высокое
Устойчивость к обратной инженерии	Высокая	Средняя	Низкая
Устойчивость к однократным сбоям	Да	Да	Нет
Устойчивость к радиации	Да	Нет	Нет

3. Примеры использования ПЛИС в различных медицинских приложениях

Продукция компания Xilinx уже много лет используется в системах визуализации, в том числе в ультразвуковой технике, гастроэнтерологических эндоскопах, томографических и иных системах реального времени. Обработка данных в таких исследованиях требует интенсивного решения задач ЦОС и большого числа каналов, что под силу семействам Virtex-6 и Spartan-6, а также ПЛИС Xilinx 7 серии.

В области ультразвуковых систем фирма ориентируется на применение указанной элементной базы в портативных устройствах с числом каналов от 32 до 196 и исполнениях от почти карманного или планшетного до формата ноутбука [7].

Сферой интересов компании Microsemi в медицине являются специфические ПЛИС решения, применяемые для построения дефибрилляторов, инсулиновых помп, систем обычного ультразвукового и 4D исследования, стоматологической рентгенографии, портативных кардиомониторов и других клинических систем и систем визуализации.

Серии микросхем IGLOO и SmartFusion включают ряд специализированных кристаллов, содержащих функциональные блоки, наиболее общие для большинства портативных, домашних и потребительских медицинских устройств. В их числе стоит отметить биодатчики, усилители и аналого-цифровые преобразователи, системы контроля мощности и управления электропитанием, дежурный микроконтроллер для управления и вычислений при пониженном питании, беспроводные и проводные интерфейсы, интерфейс пользователя для индикации и поддержка человеко-машинного интерфейса, в который входят клавиатуры, колёсики прокрутки, кнопки и переключатели.

Сочетание требований для дефибрилляторов, таких как безопасность, интеграция, низкое энергопотребление и быстрый старт системы, хорошо под-

ходит для набора энергонезависимых ПЛИС этой фирмы. Кристаллы SmartFusion и IGLOO могут предложить датчик доступа, управление пользовательским интерфейсом и исполнительным механизмом, что необходимо для реализации базовых функций дефибриллятора. Поддержка безопасности, свойственная устройствам Microsemi, обеспечивает необходимые функции для гарантии того, что данные, переданные посредством беспроводных протоколов, подобных IEEE 802.11 Wi-Fi, не могут быть перехвачены и расшифрованы, и что пользователи или хакеры не могут пагубно влиять на устройство.

Область применения ПЛИС компании Altera включает системы мониторинга пациентов, искусственной вентиляции и жизнеобеспечения, вспомогательную технику для анестезии, автоматические наружные и имплантируемые дефибрилляторы, системы кардиостимуляции, ультразвуковое оборудование, томографические системы и разнообразное больничное оснащение.

Предлагаемые кристаллы ПЛИС в рамках серий Cyclone, Arria и Stratix подходят для широкого спектра задач систем визуализации. Процесс разработки может быть ускорен за счет использования большого числа готовых библиотечных модулей, применения процессорных ядер, а также вспомогательных инструментов, таких как DSP Builder, который позволяет формировать проект с использованием высокоуровневого представления в Simulink [8].

На основании анализа особенностей технологий реализации ПЛИС можно заключить, что продукция компаний Xilinx и Altera, построенная с использованием SRAM, менее подходит для применения в имплантатах или вспомогательном оборудовании для лучевой терапии, нежели иммунные к сбоям продукты Microsemi, что вызвано существенной интенсивностью SEU в подобных областях при современной степени интеграции. В системах визуализации, не относящихся к критическим системам, напротив требуется большая степень интегра-

ции для реализации сложных алгоритмов восстановления изображения. Сбои в такой технике могут диагностироваться встроенными средствами и устраняться перезапуском оборудования.

4. Перспективы применения ПЛИС в томографических системах

Существует множество работ, посвященных исследованиям преимуществ применения программируемой логики для решения специализированных задач в медицине, в том числе в томографии, которая является популярным методом медицинской визуализации.

Различные технологии томографии, такие как компьютерная (СТ), позитрон-эмиссионная (РЕТ), магнитно-резонансная (MRI), оптическая когерентная (ОСТ) и электроимпедансная томография (ЕИТ), используются как разноплановые виды диагностики. Все виды томографии объединяет потребность в ресурсоемких вычислениях, необходимых для визуализации в реальном времени.

Одним из путей ускорения обработки томографической информации является распараллеливание. Некоторые исследователи заявляют о достижении 82-кратного прироста в скорости обработки на базе ПЛИС по сравнению с аналогичными вычислениями с использованием настольного компьютера [9].

Оптическая когерентная томография используется для визуализации поперечных сечений биологических тканей и материалов. Поскольку она обеспечивает сверхвысокое разрешение изображения в микрометровом масштабе наряду с высокой скоростью визуализации, ОСТ хорошо подходит для глазной томографии. Из-за сложности алгоритма получение томографических изображений в реальном времени требует высокопроизводительной вычислительной платформы. Исследования в этой области показали прирост скорости обработки в 15,5 раз при организации вычислений на основе ПЛИС по сравнению с реализацией алгоритма средствами видеокарты персонального компьютера [10].

Электроимпедансная томография является методом визуализации пространственного распределения проводимости внутри объекта, в частности, органов человека. Реконструкция внутреннего распределения производится с использованием измерений напряжений на поверхности объекта при пропускании через него токов в различных комбинациях [11].

Реконструкция проводимости осуществляется итеративно путем приближения рассчитываемого в прямой задаче потенциала по подбираемой проводимости к потенциалу, снимаемому экспериментально. Эта проблема является нелинейной плохо-

обусловленной обратной задачей, её решение осуществляется посредством решения наборов прямых задач. Ресурсоемкость такого подбора превосходит требования других систем визуализации, поэтому применение ПЛИС в электроимпедансной томографии оправдано в наибольшей степени.

Выводы

Надежность, функциональная и информационная безопасность являются неотъемлемыми требованиями для медицинского оборудования, относящегося к критическим системам.

Технологии программируемой логики все чаще находят применение в медицинском оборудовании, способствуя миниатюризации и гибкости проектов, что в конечном итоге снижает стоимость медицинского обеспечения.

Анализ показывает, что ключевые отличия в характеристиках ПЛИС кроются в структуре логических ячеек, способе их соединения и используемой технологии реализации. Зная особенности проекта и среды его использования, можно сделать вывод о приемлемости выбранной технологии.

На основании анализа особенностей технологий реализации ПЛИС можно заключить, что микросхемы на базе SRAM хуже подходят для применения в имплантатах или вспомогательном оборудовании для лучевой терапии, чем продукты на основе энергонезависимой памяти, что вызвано существенной интенсивностью SEU в подобных областях при современной степени интеграции.

Микросхемы ПЛИС ведущих производителей широко используются в клинических системах и системах визуализации. Существуют специфические решения от разных фирм-производителей, отвечающие специфике конкретного класса устройств. Например, энергонезависимые ПЛИС фирмы Microsemi применимы для широкого спектра медицинской продукции.

Наибольшие перспективы применения ПЛИС демонстрирует в тех областях, где реализовать функциональность средствами одних только микроконтроллеров на сегодняшний день просто невозможно, например, при обработке томографических данных.

Перечисленные виды томографии показали потребность в высокопроизводительных системах обработки информации для визуализации в реальном времени. Кристаллы ПЛИС позволяют реализовать сотни параллельных умножителей с накоплением, что делает возможным распараллеливание и выполнение в одном корпусе ресурсоемких томографических вычислений.

Литература

1. Loring, Wirbel. *The Year to Come in FPGAs* [Electronic resource] – Access mode: <http://www.fpgagurus.edn.com>. – 17.02.2012.
2. *Health Information Technology: The Imperative of Risk and Compliance Management in the HITECH Age* [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.emc.com>. – 17.02.2012.
3. *Intelligent Mixed Signal FPGAs in Portable Medical Devices* [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.actel.com>. – 17.02.2012.
4. *Size, Reliability and Security: The Essential Ingredients for Medical Devices* [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.actel.com>. – 17.02.2012.
5. *Successful human tests for first wirelessly controlled drug delivery chip* [Electronic resource]. – Access mode: <http://medicalxpress.com>. – 17.02.2012.
6. *Single-Event Upsets (SEUs) and Medical Devices* [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.actel.com>. – 17.02.2012.
7. *Xilinx FPGAs in Portable Ultrasound Systems* [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.xilinx.com>. – 17.02.2012.
8. *Medical Imaging Implementation Using FPGAs* [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.altera.com>. – 17.02.2012.
9. *Speeding up medical imaging process using FPGA* [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.eetasia.com>. – 17.02.2012.
10. Li, J. *Scalable, High Performance Fourier Domain Optical Coherence Tomography: Why FPGAs and Not GPGPUs*. [Text] / J. Li, M. Sarunic, L. Shannon // *In Proceedings of Field-Programmable Custom Computing Machines (FCCM)*. – 2011. – P. 49–56.
11. Шульга, Д.И. *Определение локальной неоднородности внутри объекта при помощи электроимпедансной томографии* [Текст] / Д.И. Шульга // *Всеукраїнська НТК "Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2010": Тези доповідей*. – Х.: Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського "ХАІ", 2010. – Т. 2. – С. 163.

Поступила в редакцію 17.02.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.И. Хаханов, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина

АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ ПЛІС ТЕХНОЛОГІЙ У МЕДИЧНОМУ ОБЛАДНАННІ

А.Є. Перепелицин, В.С. Харченко

Обговорюються завдання інформаційних технологій та причини зростання інтересу до них у сучасній медицині. Надається аналітичний огляд ринку програмовної логіки з урахуванням вимог до медичного обладнання. Аналізуються особливості застосування різних технологій ПЛІС у медицині. Проводиться аналіз проблем і перспектив застосування ПЛІС в медичній техніці. Розглядаються приклади використання ПЛІС провідних фірм у клінічних системах та системах візуалізації. Аналізуються приклади і перспективи реалізації томографічних обчислень на ПЛІС.

Ключові слова: ПЛІС, медичне обладнання, томографія.

THE ANALYSIS OF THE USE OF FPGA TECHNOLOGIES IN MEDICAL EQUIPMENT

A.E. Perepelitsyn, V.S. Kharchenko

The problems of information technology and the reasons for the growth of interest to them in modern medicine are discussed. It is proposed an analytical overview of the market of programmable logic for medical applications. The results of analysis of the use various FPGA technologies in medicine are offered. The results of analysis of the problems and prospects of FPGAs in medical technology are offered. The examples of use the FPGAs in clinical systems and visualization systems are presented. The examples and perspectives of the implementation of tomographic computations on FPGA are presented.

Key words: FPGA, medical devices, tomography.

Перепелицын Артём Евгеньевич – аспирант кафедры компьютерных систем и сетей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: perepelitsyn@inbox.ru.

Харченко Вячеслав Сергеевич – д-р техн. наук, профессор, зав. каф. компьютерных систем и сетей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: v.kharchenko@khai.edu.