

# ПРИМЕНЕНИЕ ПЛИС В ЗАЩИЩЕННЫХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ И КОНТРОЛЯ ФИЗИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

*В. Е. Куликов, В. В. Поляков, В. И. Стигунов*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Для подтверждения и получения новых характеристик исследуемых объектов, наряду с математическим моделированием процессов, присущих работе изделия, проходит экспериментальное макетирование команд управления и контроля сигналов о работе зарядно-аппаратурных комплексов. Развитие отечественной элементной базы радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) и увеличение количества контролируемых параметров объекта потребовало разработки новых устройств, обеспечивающих высокую надежность всей системы, а также защиту внутреннего программного обеспечения от несанкционированного доступа.

В рамках развития системы автоматизации и контроля можно выделить три временных этапа, связанных с развитием отечественной радиоэлектронной аппаратуры:

1 этап. Зарождение систем связи и контроля физических объектов, первые опыты (40–60-е гг. XX в.);

2 этап. Переход на полупроводниковую аппаратуру, повышение класса точности (70-е гг. XX в.);

3 этап. Использование высокоскоростных программируемых систем контроля (80-е гг. – наст. вр.).

Основой устройства, контролирующего параметры системы, ранее являлась релейно-контакторная логика (РКЛ). Устройства, основанные на данной концепции, отличаются простотой разработки и монтажа, но требуют точных расчетов электромагнитных параметров системы для предотвращения возникновения сбоев. Также, такие системы имеют защиту информации от преднамеренного воздействия. Фотография устройства, собранного на РКЛ, представлена на рис. 1.

Система связи и контроля решает следующие задачи:

- обеспечение выдачи команд управления при одной возможной неисправности;
- обеспечение защиты от преждевременной выдачи команд управления на аппаратуру контроля;
- обеспечение работы в полуавтоматическом режиме.

Релейно-контакторные схемы управления имеют ряд преимуществ, таких как гальванически изолированные цепи управления от цепей питания (т. н. «сухой контакт») и управление большими токами (до 3А). Электромагнитные реле устойчивы к броску тока при запуске мощных потребителей, в отличие от электроники, а особенно при внезапном отклю-

чении электропитания. Недостатками релейно-контакторной логики являются массогабаритные показатели, контактная коммутация, ограничивающая ее срок службы, искрение, высокое энергопотребление. Эти параметры оказывают большое влияние на исследуемый объект, и с развитием технологий, возникла необходимость модернизировать систему автоматики. Параллельно с развитием исследуемого объекта, происходило увеличение параметров контроля и требования к их точности, что неизменно вело за собой усложнение самой системы.

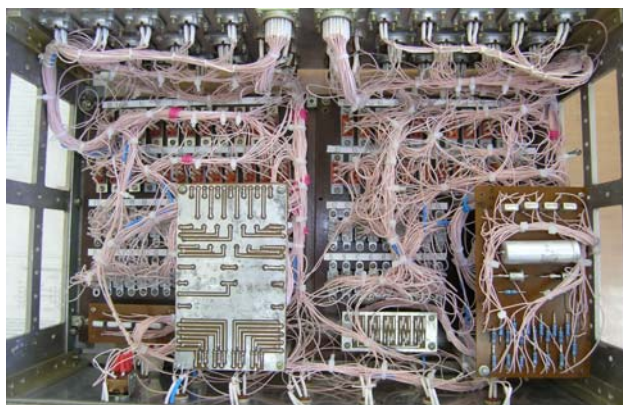


Рис. 1. Устройство, выполненное на релейно-контакторной логике

С середины 70-х годов XX века появляются устройства, собранные на интегральных логических элементах, или, как еще принято называть, интегральные микросхемы (ИМС). Это, в свою очередь, резко сократило энергопотребление, массогабаритные показатели и привело к увеличению функционала и быстродействия системы. Устройства, основанные на ИМС, позволили расширить спектр исследований во всех областях науки и техники. Фотография платы ЭВМ, выполненной на интегральных схемах, представлена на рис. 2. Интегральные микросхемы получили достаточно широкое применение в лабораторном макетировании системы исследования объекта, соответствовали требованиям по защите информации от утечки и преднамеренного воздействия, но практически не были применены на испытательных площадках, так как не отвечали требованиям испытаний по электрическим параметрам и тепловому режиму работы. Кроме того, интегральная микросхема имеет высокую зависимость формы сигналов

выдачи от питающей сети и наводимых электромагнитных помех от различной аппаратуры, если устройство не экранировано. Стоимость системы, собранной на интегральных микросхемах была в 3–5 раз ниже стоимости системы, собранной на релейно-контакторной логике, но вышеописанные проблемы стали причиной отказа от использования данных схем в целом.

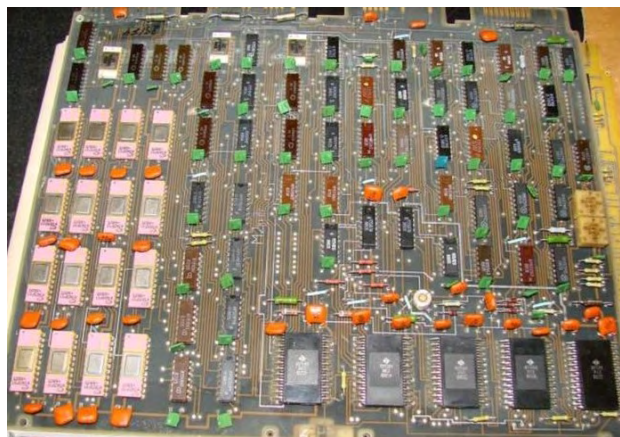


Рис. 2. Плата ЭВМ, выполненная на интегральных микросхемах

На третьем этапе развития электроники произошли изменения, вызвавшие большую модернизацию объекта исследования. Данный этап рассматривается как естественное развитие аппаратуры второго. Научно-техническая революция 60–80-х годов XX века привела к появлению новых типов оборудования: микроконтроллеры, микропроцессоры, программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС), базовые матричные кристаллы (БМК).

Из-за того, что различные системы автоматизации настроены на получение разных параметров, существует большое количество микроконтроллеров, в которых в разной степени коллаборации связаны размеры и стоимость с одной стороны, и гибкость и производительность с другой. Этим объясняется существование широкой номенклатуры микроконтроллеров, отличающихся архитектурой процессорного модуля, размером и типом встроенной памяти, набором периферийных устройств, типом корпуса и т. д. В отличие от микропроцессоров, используемых в компьютерах, в микроконтроллерах часто используется гарвардская архитектура памяти, то есть раздельное хранение данных и команд в ОЗУ и ПЗУ. Фотография микроконтроллера с обвязкой представлена на рис. 3.

Широкие возможности микроконтроллеров позволяют использовать различные устройства под разные задачи. Как правило, их стоимость невысока и они доступны практически каждому разработчику какого-либо оборудования. Невысокая стоимость и широкие возможности позволяют применять устройства, основанные на микроконтроллерах в самых разных областях науки и техники, начиная от сель-

ского хозяйства до авто- и авиастроения. Кроме того, микроконтроллер кроме физической защиты информации имеет возможность криптографической защиты информации для противодействия непреднамеренного воздействия и для противодействия доступа разведки. Отрицательными сторонами использования микроконтроллеров являются сложный подбор оборудования под определённую задачу из-за чрезвычайно широкой номенклатуры со специфичными способами программирования и высокие требования к разработчику программного обеспечения. Низкая надежность из-за наводимых электромагнитных помех приводит к частым сбоям в работе микроконтроллера, а низкое программное быстродействие системы не позволяет использовать данное устройство в высокоточных системах связи и контроля.



Рис. 3. Микроконтроллер с обвязкой

Для выполнения сложных задач, современные системы выдачи и контроля сигналов требуют высокой надежности, точности, а также быстродействия отклика всех узлов. В качестве современного оптимального варианта может использоваться ПЛИС.

ПЛИС – специальные электронные компоненты, используемые для создания цифровых интегральных схем. Логика таких объектов, в отличие от микросхем, не определяется при изготовлении, а определяется посредством проектирования или программирования в специализированном программном обеспечении. Для программирования ПЛИС используются программатор и отладочная среда, позволяющая создать желаемую структуру устройства, основанного на различных языках программирования, таких как AHDL, VHDL, Verilog. По сравнению с другими микроэлектронными технологиями, в том числе и другими классами интегральных схем (ИС), технология ПЛИС обеспечивает рекордно-короткий проектно-технологический цикл (несколько часов/дней), минимальные затраты на проектирование, максимальную гибкость при модификации аппаратуры. При этом весь проектно-технологический цикл выполняется разработчиком РЭА на одном рабочем месте.

В рамках научно-исследовательской деятельности были рассмотрены программируемые логические

интегральные схемы основных зарубежных производителей – Xilinx и Altera. Разработки этих компаний занимают большую часть рынка ПЛИС (более 60 %), поэтому в первых прототипах перспективных устройств связи и контроля были использованы ИС этих фирм. Согласно государственной программе № 320 «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности», Правительством РФ было рекомендовано приступить к плавной замене импортных товаров на элементы, производимые на территории Российской Федерации и Республики Беларусь и прошедшие государственную оборонную комиссию. Результатом этой программы стал запуск тестового производства ИМС нового типа на двух заводах в Российской Федерации. Основным предприятием, выпускающим ПЛИС для оборонной промышленности в Российской Федерации, является АО «Воронежский завод полупроводниковых приборов – сборка», реализующий 8 типов ПЛИС, различающихся между собой количеством логических элементов, количеством пользовательских выводов, технологией программирования и специфичностью. Устройства с маркировкой 1Т, 6Т и 7Т включены в перечень ЭКБ, разрешенной для применения при разработке военной и специальной техники.

#### Сравнение ПЛИС отечественного и зарубежного производства

| Наименование                                  | Intel Altera Cyclone V ST | Xilinx Spartan 7 | 5576XC4T  |
|---|---------------------------|------------------|-----------|
| Объем ОЗУ, кбит                               | 5140                      | 4320             | 98        |
| Типовая логическая емкость, вент.             | 166036                    | 102400           | 200000    |
| Количество эквивалентных логических элементов | 41509                     | 16000            | 9984      |
| Количество пользовательских выводов           | 183(256)                  | 400(512)         | 171 (256) |
| Защита от копирования                         | +                         | +                | +         |
| Технология изготовления                       | 28нм                      | 28нм             | 28нм      |

В таблице представлены основные параметры сравнимых по параметрам семейств ПЛИС, производимых на территории РФ и устройств, выпускаемых на заводах Xilinx Intel (Altera) на июль 2019 года. Все устройства выполнены по технологии 28 нм, но отечественное устройство показывает общую конкурентоспособность зарубежным устройствам, исключая типовую логическую ёмкость. В частности, это объясняется тем, что устройства, выпускаемые ВЗПП-С, являются функциональным аналогом изделий устаревшей серии EPF10K, производимые фирмой Altera в начале XXI века.

Изделия серии 5576XC, имеют больший функционал, чем устройства на цифровых микропроцес-

сорах параллельной обработки сигналов. Такие микропроцессоры дороги в обслуживании и не имеют возможности «горячего резервирования» при нештатной ситуации. Кроме того, увеличение контролируемых параметров повлечет за собой увеличение количества микропроцессоров с уменьшением общей надежности устройства. Применение ПЛИС целесообразно при разработке оригинальной аппаратуры, требующей нестандартных схемотехнических решений, а также при проектировании малогабаритных устройств. ПЛИС обычно заменяют на плате от 8–10 до 50–70 корпусов стандартной логики. При этом значительно уменьшаются размеры оборудования, а вследствие сокращения количества ИС снижается потребление схемы и повышается ее надежность. При специальных воздействующих внешних факторах (СВВФ), микропроцессор подвержен несанкционированному изменению состояния ячейки, от чего защищена ПЛИС. Устройства имеют такую уникальную технологическую особенность, как перемычка или бит секретности. Если после программирования ПЛИС ее внутреннюю конфигурацию можно считать и полученный шаблон использовать для тиражирования схемы, то после разрыва бита секретности содержимое ПЛИС становится недоступным для чтения. Благодаря этому, ПЛИС могут применяться в качестве электронного ключа для защиты аппаратных и программных средств от несанкционированного доступа и копирования. Изделия, основанные как на технологии однократного программирования, так и на технологии Flash, имеют защиту от СВВФ и позволяют обеспечить бесперебойную работу устройства в различных климатических условиях.



Рис. 4. Макет узла устройства, собранного на ПЛИС

Однократно программируемая ПЛИС серии 5576XC – программируемая логическая матрица (ПЛМ) 5576XC7T, обеспечивает физическую защиту информации, загруженной в устройство от преднамеренного воздействия и действий разведки. Такое устройство имеет ряд преимуществ перед устройствами на РКЛ, ИС и микроконтроллерах, а именно:

- не требуется дополнительное ПЗУ, устройство готово к работе сразу после подачи питания;



- аппаратное быстроедействие системы, не более 20 нс;

- малые массогабаритные показатели с большим количеством логических элементов (до 2000);

- низкое энергопотребление ( $U_{пит}^я = 1,8 В$ ,  $U_{пит}^п = 3,3 В$ );

- низкая цена перед устройствами, основанными на РКЛ;

- широкий температурный диапазон работы и стойкость к воздействию специальных факторов.

ПЛИС широко используется для реализации различных цифровых устройств, нуждающихся в высокой скорости и точности:

- цифровая аудио- видеоаппаратура (изготовление цифровых фильтров, схем обработки сигналов и изображений);

- системы телекоммуникации (ПЛИС применяются в аппаратуре уплотнения телефонных каналов, изг. контроллеров шин, адресных дешифраторов и др.);

- моделирование квантовых вычислений (процессоры быстрого преобразования Фурье);

- криптографические устройства. Применение 1–2 ПЛИС средней степени интеграции является достаточным для надежной защиты информации;

- проектирование специализированных больших интегральных схем (СБИС).

ПЛИС широко применяется в стендовом оборудовании, на этапах разработки и производства опытных партий новых изделий, а также для эмуляции схем, подлежащих последующей реализации на другой элементной базе, в частности, БМК.

Процесс отладки ПЛИС и ПЛМ прост для инженера-разработчика систем связи и контроля и не требует пересмотра всей печатной платы с изменением загруженного программного обеспечения, как этого требует микроконтроллер или микросхема. Внутренний набор логических ячеек позволяет быстро переконфигурировать порты ввода-вывода под измененную программу (если устройство позволяет это сделать) без изменения обвязки, что крайне важно на удаленных испытательных площадках. При программировании устройства, согласно стандарту IEEE 1149.1 проходит структурное тестирование печатной платы, называемое периферийным сканированием. Результат омпериферийного сканирования является информация о наличии в электроцепях типичных неисправностей, возникающих при производстве печатных плат: коротких замыканий, непро-

паяк, ошибок при включении (залипаний) на нижний или верхний регистры, обрывов дорожек.

Благодаря большому количеству портов ввода-вывода, доступно увеличение контролируемых параметров, что позволит с высокой точностью управлять объектами и исключить возможность нештатной ситуации. Альтернативой ПЛМ являются более дорогие БМК и СБИС. Фотография макета, собранного на ПЛИС, представлена на рис. 4.

Программируемые логические интегральные схемы, а так же ПЛМ имеют недостатки, аналогичные простым ИС: неустойчивостью к броску тока, а также высокой зависимостью выходного сигнала в неэкранированных устройствах. Кроме того, высокая цена изделия с категорией качества «ВП» определяет отказ от ПЛИС в пользу микроконтроллеров в разработках малых устройств. Отсутствие единого стандарта интерфейса программирования ПЛИС разных компаний-производителей искусственно увеличивает количество разных программ для разработки с одинаковыми функциями, что влечет за собой дополнительные затраты.

В настоящее время в отделении 14 идет разработка конструкторской документации на устройства, реализованные на ПЛИС и ПЛМ для замены устаревшего оборудования на изделия, построенные на современной отечественной элементной базе. По разрабатываемой конструкторской документации был собран макет устройства, основанный на изделии ВЗПП-С 5576ХС1Т. На макете были подтверждены требуемые параметры, выявлены преимущества физического исполнения изделия на ПЛИС перед изделиями, основанными на других типах радиоэлектронной аппаратуры. Расчеты электрических параметров проводились в специализированном программном обеспечении, поставляемые АО КТЦ «Электроника». Результаты расчетов показали, что макет, основанный на ПЛИС, обладает качественно высоким быстродействием по сравнению с предыдущими поколениями устройства контроля и выдачи сигналов.

Технологическое и программное отставание отечественной РЭА вносит определенные сложности в процесс разработки новых устройств. Обратная связь между разработчиками систем, основанных на ПЛИС, позволит увеличить степень интеграции производства с пользователями, что положительно скажется как на технической, так и экономической составляющей проектов.

В дальнейшем, предполагается увеличение количества устройств, используемых в РФЯЦ-ВНИИЭФ, основанных на ПЛИС и ПЛМ отечественного производства.