

УДК 004.67+004.9

ИННОВАЦИОННЫЙ КУРС «ПРОГРАММИРУЕМАЯ РАДИОЭЛЕКТРОНИКА» ДЛЯ ИНЖЕНЕРНЫХ ВУЗОВ

*Бартенев В.Г., д.т.н., профессор кафедры теоретической радиотехники и радиофизики Московского государственного технического университета радиотехники, электроники и автоматики (МИРЭА),
e-mail: syntaltechno@mail.ru*

*Битюков В.К., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой теоретической радиотехники и радиофизики МИРЭА,
e-mail: bitukov@mirea.ru*

*Кузеленкова Е.Г., инженер кафедры теоретической радиотехники и радиофизики МИРЭА,
e-mail: Kuzelenkova@mirea.ru*

Ключевые слова: программируемая радиоэлектроника, микроконтроллер, сигнальный процессор, программируемая логическая интегральная схема, программируемые цифровые фильтры, программируемые устройства оценки параметров помех, программируемые обнаружители сигналов.

Введение

Анализ современного состояния отечественной радиоэлектроники показал, что по ряду причин Российской Федерации не удалось в полном объеме осознать произошедший в мире за последние двадцать лет революционный переворот в этой области техники. Во многом это произошло из-за развала СССР, своеобразия российских экономических реформ, в основу которых положена сырьевая составляющая, и неадекватности государственных чиновников, считающих вполне нормальным повсеместное внедрение импортной элементной базы радиоэлектроники (даже в системы и комплексы ОПК).

Отсутствие современной отечественной элементной базы грозит многим отраслям промышленности нашей страны потерей конкурентоспособности, как на внутреннем, так и внешнем рынке. Более того, это сказывается на развитии инновационных технологий, модернизации экономики и, самое главное, угрожает обороноспособности России. Чтобы лучше понять, какого этапа развития достигла современная радиоэлектроника, следует вспомнить, как она возникла и развивалась.

Этапы развития радиоэлектроники в мире

Радиоэлектроника есть продолжение и модернизация в расширенном толковании радиотехники - науки о методах и средствах передачи и приема сообщений на расстояние посредством электромагнитных волн, распространяющихся в свободном пространстве. В рамках радиоэлектроники имеют дело с устройством и функционированием радиотехнических устройств и систем (РТУС) с применением электронных приборов – полупроводниковых, электровакуумных, акустоэлектронных, оптоэлектронных и других [1]. Три человека стоят

Выполнен анализ основных этапов развития радиоэлектроники: от ее возникновения и до настоящего времени. Констатируется, что за последние двадцать лет произошел революционный переворот в этой области техники, связанный с переходом к программируемым радиоэлектронным встраиваемым системам и устройствам с использованием микроконтроллеров, сигнальных процессоров и программируемых логических интегральных схем. Это предопределило необходимость в постановке и преподавании в инженерных высших учебных заведениях инновационного учебного курса «Программируемая радиоэлектроника». Этот курс целесообразно читать бакалаврам, студентам и магистрам, включив его в базовую часть профессионального цикла федеральных государственных образовательных стандартов. На факультете радиотехнических и телекоммуникационных систем МИРЭА был успешно апробирован новый учебный курс «Программируемая радиоэлектроника».

у истоков радиотехники: русский ученый Александр Степанович Попов (1859 - 1906 г.г.), итальянский изобретатель Гульельмо Маркони (1874 - 1937 г.г.) и американец сербского происхождения Никола Тесла (1856 - 1943 г.г.). Важно отметить и предшественников этих великих изобретателей.

В 1873 г. английский ученый Джеймс Клерк Максвелл опубликовал работу «Трактат по электричеству и магнетизму». Как следствие из составленных им уравнений, следовал вывод о возможности распространения электромагнитных волн в свободном пространстве со скоростью света. Но полученному теоретическим путем открытию мало кто поверил. Однако спустя 15 лет немецкий ученый Генрих Рудольф Герц экспериментальным путем доказал справедливость теории Максвелла. От опытов Герца, опубликовавшего результаты своих экспериментальных исследований, отталкивались и Попов, и Маркони, и Тесла.

7 мая 1895 г. А.С. Попов впервые продемонстрировал на заседании физического отделения Русского физико-химического общества свой радиоприемник, принимавший колебания, излучаемые видоизмененным осциллятором Герца. Этот день в нашей стране и отмечается, как День радио. 24 марта 1896 г. на заседании того же общества А.С. Попов помимо радиоприемника демонстрирует и созданный им искровой радиопередатчик, передававший из одного здания в другое азбукой Морзе



первую в мире радиотелеграмму. Текст ее был краток: «ГЕНРИХ ГЕРЦ» [2]. Этой телеграммой А.С. Попов продемонстрировал дань уважения своему предшественнику.

Другой изобретатель радио - Г. Маркони - в 1896 г. получил первый английский патент на систему беспроволочной телеграфии [3]. В июле 1897 г. он основал компанию «The Wireless Telegraph & Signal Company Limited» (в 1900 г. она была переименована в «Marconi's Wireless Telegraph Company Limited»). Маркони в Англии зарекомендовал себя не только великим изобретателем, но крупным предпринимателем, сумевшим быстро и эффективно внедрить в промышленное производство изобретенные им радиотелеграфные аппараты, приносящие созданной им компании большую прибыль. А что же А.С. Попов? В 1898 г. в научных исследованиях профессора А.С. Попова наступил важный этап. Построив и установив приемно-передающие устройства на учебном судне «Европа» и крейсере «Африка», он довёл дальность беспроволочной связи до 5 км. Эти опыты подтверждают его приоритет, как изобретателя радио. Это же подтверждает и официальный отказ Морского ведомства в выдаче патента Г. Маркони на его систему связи в России. В том же 1898 г. в Петербурге выпускается первая партия приемников конструкции А.С. Попова для военно-морского флота. Но самое главное состоит в том, что от телеграфной беспроволочной связи А.С. Попов переходит к радиотелефонной. На построенный им «приемник депеш» с телефонными трубками А.С. Попов получает привилегию (Российский патент) №6066 с приоритетом от 14(26) июля 1899 г. На свое изобретение А.С. Попов получает также патенты в Англии и Франции. Более того, в Париже на Всемирной выставке в 1900 г. приемник А.С. Попова был удостоен золотой медали [2].

Маркони, получив отказ в выдаче патента во Франции, устремляется в Америку. В США он сближается с изобретателем лампы накаливания Томасом Эдисоном. Из тысячи изобретений Эдисона только одно может быть отнесено к беспроволочному телеграфу. 14 мая 1885 г. за десять лет до знаменитой демонстрации первого в мире радиоприемника А.С. Поповым Эдисон подал заявку для получения патента на «передачу без проводов сигналов азбуки Морзе». Однако это была низкочастотная индуктивная связь, действующая на малом расстоянии. В 1903 г. Эдисон, стремясь поддержать предприимчивого Маркони в его стремлении проникнуть со своим изобретением на американский рынок, передал ему этот свой патент. Однако этот благородный поступок Эдисона не помог Маркони заявить о себе в США, как об изобретателе радио. Свой приоритет в изобретении радио в США сумел отстаивать выдающийся изобретатель Никола Тесла. После длительной тяжбы в Верховном суде США уже после смерти Теслы в 1943 г. он был официально признан изобретателем радио. Непризнанный в США Маркони, тем не менее, добивается больших успехов в своей деятельности и в 1901 г. устанавливает радиосвязь через Атлантический океан с Америкой, а в 1918 г. - с Австралией.

История радиоэлектроники, насчитывающая немногим более 100 лет, весьма показательна и является од-

ним из блестящих примеров бурного развития научно-технического прогресса. Эту историю можно разбить на ряд характерных этапов. В каждом из них радиоэлектроника достигала своего известного развития, но в то же время появлялось нечто новое, что и являлось основой следующего этапа.

Первый этап развития начался тогда, когда такого понятия как радиоэлектроника еще и не существовало. Это было время, как уже было сказано, первых изобретений беспроводного телеграфа А.С. Поповым, Г. Маркони, Н. Теслой и др. В этот период зарождалась радиотехника, и в научных исследованиях происходил переход от сильно затухающих колебаний к незатухающим колебаниям. Искровые передатчики и кристаллические детекторы на этом этапе постепенно достигли технического совершенства. В завершении первого периода, который приходился на конец первой Мировой войны, появились дуговые передатчики и машины высокой частоты.

Казалось бы, все возможности радиотехники на этом этапе были исчерпаны и ее развитие должно было остановиться. Однако появляются новые приборы – электронные лампы. Именно радиолампы внесли принципиально новое качество в развитие радиоэлектроники. Поэтому второй этап в развитии радиоэлектроники характеризовался широким использованием электронных ламп, как в качестве детекторов и усилителей в приемниках, так и генераторов в передатчиках. Радиолампы усовершенствовали радиотелефонию. Все это предопределило формирование новых отраслей промышленности - радиовещание, телевидение, радиолокация, автоматика, телемеханика и вычислительная техника.

Первые отечественные радиолампы были созданы в Нижегородской радиолaborатории в трудные первые годы советской власти. В разруху, голод и гражданскую войну коллективу Нижегородской радиолaborатории во главе с М.А. Бонч-Бруевичем удалось создать мощные радиолампы, не имевшие в то время аналогов и за рубежом [4]. За годы первых советских пятилеток намечился бурный скачок в развитии отечественной радиоэлектроники. К началу Великой Отечественной войны советская промышленность уже серийно выпускала средства связи, радиостанции, пеленгационные и радиолокационные системы, ни в чем не уступавшие зарубежным аналогичным образцам [5]. В это время электронные приборы получили массовое распространение, их номенклатура расширилась от усилительных и генераторных радиоламп разных типов и характеристик до электроннолучевых трубок разных размеров и очень чувствительных фотоэлектронных приборов. Опять наступило насыщение в развитии радиоэлектроники. Нужен был новый качественный скачок для ее новой модернизации.

Появление к концу второй Мировой войны полупроводниковых усилительных приборов – транзисторов указало на начало третьего этапа в развитии радиоэлектроники. Полупроводники были известны давно и широко использовались в качестве детекторов и выпрямителей. Исторически первым устройством, в котором полупроводник заменил электронную лампу, был изобретенный в 1922 г. сотруddником Нижегородской радиолaborатории

тории О.В. Лосевым приемник, известный под названием «кристадин» [6]. Однако недостаточное в то время теоретическое и экспериментальное знание свойств полупроводников не позволило этому изобретению оказать заметное влияние на развитие радиоэлектроники. Только изобретение транзистора в США в 1948 г. [7], способного заменить электронную лампу, привело к широкому проникновению полупроводников в радиоэлектронику. Полупроводниковые приборы становятся неперменной и существенной частью радиоэлектронных устройств и систем. Их применение приводит к коренным изменениям в радиоэлектронной аппаратуре как схемотехническим, так и конструктивным. Появляются полупроводниковые источники электрической энергии - это и фотоэлектрические преобразователи, и термоэлектрические генераторы. Широко используются полупроводниковые источники света: светодиоды и полупроводниковые лазеры. Совершенствование полупроводниковой технологии позволило существенно уменьшить габариты разрабатываемых радиоэлектронных систем сначала за счет микромодульных конструкций, а затем и микросборок, используя монтаж с бескорпусными полупроводниковыми элементами.

Четвертый этап в развитии радиоэлектроники наступил одновременно в СССР (НИИ «Пульсар») [8] и США (Texas Instruments) [9], где были созданы первые твердотельные интегральные схемы. Интегральная радиоэлектроника хотя и медленно, но стала набирать обороты. Интегральные микросхемы постепенно вытесняют транзисторы, как в аналоговых, так и цифровых устройствах. Появляются настольные вычислительные машины на цифровых интегральных микросхемах. Новое направление в радиоэлектронике - цифровая обработка сигналов, благодаря цифровым интегральным схемам и первым аналого-цифровым преобразователям в интегральном исполнении, получило практическую реализацию.

За десятилетие своего развития интегральная радиоэлектроника достигает таких высот, что в 1971 г. в компании Intel (США) создается первый в мире программируемый однокристалльный микропроцессор I4004 с 2300 транзисторами на одном кристалле. А еще через 8 лет эта же фирма создает первый программируемый сигнальный процессор I2920 на одном кристалле, который мог подаваемый на его вход аналоговый сигнал преобразовывать в цифровой код, подвергать код цифровой обработке по запрограммированному алгоритму и преобразовывать результат в аналоговую форму, выдавая его на выход. Несколько позже в СССР появляется аналог американского микропроцессора I8080 с серийным названием 580ИК80, а в 80-х годах двадцатого столетия - усовершенствованный аналог сигнального процессора I2920 с серийным названием КМ1813ВЕ1 [10].

Последнее десятилетие прошедшего столетия характеризовалось наступлением пятого этапа развития радиоэлектроники - эры программируемой радиоэлектроники. Полезно отметить характерные особенности этого нового современного этапа развития радиоэлектроники. Программируемая радиоэлектронная система –

это не только цифровая, но и реконфигурируемая система, способная к постоянному усовершенствованию и модернизации только за счет смены программного обеспечения. Концепция программируемой радиоэлектроники отражает главное изменение в современной конструкторской парадигме, для которой соотношение аппаратно-программных средств выбирается с явным преобладанием программных средств, что и обеспечивает возможность быстрого изменения тактико-технических характеристик РТУС в соответствии с изменяющимися требованиями и возможностями. Эта концепция распространяется практически на все разрабатываемые современные радиоэлектронные устройства и системы, начиная с сотовых телефонов и заканчивая радиолокационными станциями.

Разработчиками современных РТУС становятся, главным образом, программисты. Создание программируемых устройств существенно сокращает период разработки новых моделей радиоэлектронных систем. Их аппаратная реализация требовала макетирования, отладки и трудоемкой регулировки изделия в целом. В то же время для одного и того же воздействия сигнальный процессор с одной и той же программой даст на выходе один и тот же отклик. Это существенно снижает затраты на изготовление и проверку программируемого устройства.

Быстрый рост и сменяемость требований, предъявляемых к современным радиоэлектронным устройствам и системам, использование различных сигналов требуют реализации нескольких режимов работы проектируемых устройств. Такая многорежимность РТУС, в свою очередь, требовала набора конкретных аппаратных средств для каждого режима. Это увеличивало объем аппаратуры и стоимость изделия в целом. А программируемая система производит смену режима простой перезагрузкой программного обеспечения. Более того, программируемая система может быть модернизирована уже на этапе испытаний для корректировки непредвиденных проблем или для улучшения тактико-технических характеристик. Другим преимуществом программируемой системы является ее способность к глубокой самодиагностике, как всей системы, так и отдельных устройств, что повышает надежность изделия и требует минимального его обслуживания.

В то время как в России в 90-е годы была практически полностью разрушена электронная промышленность, на западе, а затем в Юго-Восточной Азии и Китае была создана мощная инфраструктура производств комплекующих для программируемой электроники. К началу нового XXI века там уже были разработаны несколько поколений микропроцессоров, сигнальных процессоров и программируемых логических интегральных схем (ПЛИС).

Появление целых семейств высокопроизводительных сигнальных процессоров, созданных фирмами-лидерами в этой области Texas Instruments и Analog Devices, а также супер ПЛИС из Xilinx и Altera, открыло новые горизонты в развитии программируемых радиоэлектронных систем.



Рис. 1. Первый отечественный программируемый сигнальный процессор KM1813BE1 на фоне справочного листа с его описанием

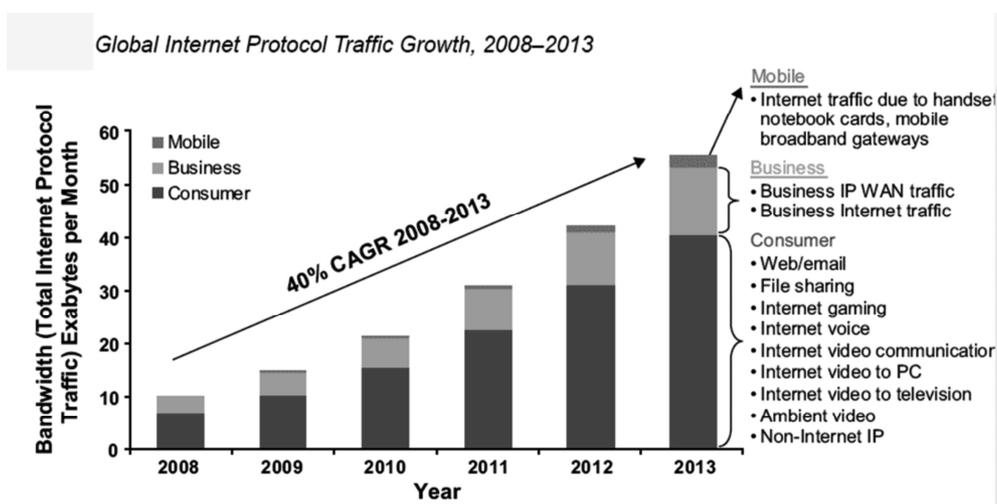


Рис. 2. Рост объема информации по годам в глобальном Интернете

Проекты, реализованные на сигнальных процессорах и ПЛИС, уже применяются в таких областях как адаптивная цифровая фильтрация, адаптивное обнаружение и накопление сигналов, управление фазированными антенными решетками, программируемое формирование различных генерируемых сигналов сложной формы с большой частотно-временной базой и их программируемое сжатие [11]. Сформировалось целое направление в создании программируемых радиоприемных устройств (Software Defined Radio). Эти идеи программируемой обработки потоковых данных на сигнальных процессорах и ПЛИС широко используются в системах цифрового радиовещания и телевидения, сотовой связи и Интернете. О том, какой поток информации (глобальный Интернет трафик в эксабайт в месяц) к 2013 г. будут обрабатывать программируемые радиоэлектронные системы, показан на рис. 2, заимствованном на сайте фирмы Altera [12]. Полезно отметить, что приставка экса (exa) означает 10^{18} .

Инновационный курс «Программируемая радиоэлектроника»

Чтобы в должной мере ответить на этот новый современный технологический вызов в развитии радио-

электроники необходимо иметь высококвалифицированные инженерные кадры. Для этого в инженерных высших учебных заведениях, наряду с традиционными дисциплинами (например, «Промышленная электроника», «Схемотехника аналоговых электронных устройств», «Цифровые устройства и микропроцессоры») стали читать студентам новый учебный курс «Программируемая радиоэлектроника». Основные цели и задачи курса состоят в подготовке обучающихся построению программируемых устройств на сигнальных процессорах и ПЛИС, а также показе на конкретных примерах всех преимуществ программируемой радиоэлектроники.

На факультете радиотехнических и телекоммуникационных систем МИРЭА был поставлен и прочитан студентам третьего и четвертого курсов, обучающимся по специальностям 210302 Радиотехника, 210304 Радиоэлектронные системы и 210201 Проектирование и технология радиоэлектронных средств, инновационный учебный курс «Программируемая радиоэлектроника».

Инновационный курс «Программируемая радиоэлектроника» включал в себя следующие разделы: программируемые цифровые фильтры; программируемые устройства оценки параметров помех; программируемые обнаружители сигналов.

Большое внимание в новом курсе уделено приобретению на лабораторных занятиях студентами практических навыков, умений и профессиональных компетенций по разработке программируемых устройств. Алгоритмы программируемых устройств вначале моделируются в системе МАТЛАБ, а затем программа работы этих устройств после соответствующей компиляции загружается в ПЗУ сигнальных процессоров или конфигурирует ПЛИС. При этом для синтеза цифровых фильтров, в программу курса включено изучение таких специализированных пакетов проектирования как Digital Filter Design Pack (DFDP) и dsPIC Filter Design. Верификация правильной работы программируемых устройств осуществляется сравнением предварительных результатов, полученных на модели в системе МАТЛАБ, с результатами работы программируемого устройства.

В отличие от сигнальных процессоров, для которых основной этап проектирования устройств ЦОС сводится к разработке программы, для ПЛИС начальный этап - это разработка алгоритма, т.е. выбор вычислительных процедур, обеспечивающих реализацию оператора обработки с учетом особенностей FLEX микросхем. При этом можно воспользоваться DSP конструктором (например, DSP TOOL KIT фирмы Altera), с готовыми заготовками АЛУ и умножителя как с фиксированной, так и плавающей запятой или мегафункциями включающими в себя наиболее распространенные алгоритмы ЦОС в том числе БПФ, КИХ и БИХ фильтры и т.д. В частности, этот пакет можно дополнить и своими мегафункциями такими как: адаптивные фильтры, устройства выделения квадратур (X,Y), адаптивное пороговое устройство и т.д. Хотелось бы подчеркнуть, что курс «Программируемая радиоэлектроника» не дублирует уже читаемые курсы по цифровой обработке сигналов, хотя в нем и дается краткий обзор основных принципов ЦОС. В данном курсе ЦОС - это всего лишь инструмент, и поэтому цель курса развить интуитивное понимание принципов ЦОС на программном уровне. Поэтому чрезмерная детализация предмета в части ЦОС не целесообразна. Для этого существуют другие специальные курсы, углубляющие знания в отдельных направлениях ЦОС.

В данном курсе минимизировано и рассмотрено аппаратного обеспечения, хотя во всех примерах обсуждаются схемы включения DSP и ПЛИС на базовых платформах. Основное внимание слушателей сфокусировано в направлении разработки отдельных программируемых устройств на этих базовых платформах с максимальным использованием программного обеспечения. Студентам демонстрируются все достоинства инновационного подхода к построению программируемых встраиваемых радиотехнических и телекоммуникационных устройств и систем. В том числе и такое важное преимущество, как сокращение периода разработки новых моделей программируемых устройств.

К сожалению, сейчас в России производство электронных компонент для программируемой радиоэлектроники не отвечает современным требованиям. Правительство РФ принимает экстренные меры по преодолению отставания в радиоэлектронике. В частности, Правительством РФ для возрождения отечественной элек-

троники в 2006 г. была принята Федеральная целевая программа «Национальная технологическая база» с подпрограммой «Развитие электронной компонентной базы» на 2007-2011 годы. Однако эта программа не выполнена. Если зарубежные фирмы уже предлагают программируемые микросхемы, изготовленные по технологии 28 нм, то наши же организации еще не смогли освоить производство программируемых микросхем даже с технологией 90 нм. Тем не менее, Правительство РФ принимает новую Федеральную целевую программу «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники» до 2015 года [13].

В настоящее время, изучая курс «Программируемая радиоэлектроника», студенты, к сожалению, разрабатывают программы пока для импортных сигнальных процессоров и ПЛИС. Однако введение в системную подготовку инженеров инновационного учебного курса «Программируемая радиоэлектроника» обеспечит готовность дипломированных специалистов к широкому и эффективному использованию отечественных программируемых микросхем при разработке систем различного назначения.

Литература

1. Каганов В.И., Битюков В.К. Основы радиоэлектроники и связи. – М.: Горячая линия-Телеком, 2006. – 542 с.
2. А.С. Попов в характеристиках и воспоминаниях современников. - М.-Л.: АН СССР, 1958.
3. Marconi G. Brit. Patent No. 12039. June 2, 1896.
4. Арнауты Л.И., Карпов Я.К. Прорыв в грядущее. Страницы жизни М.А. Бонч-Бруевича. - М.: Московский рабочий, 1986.
5. Бартенев В.Г. К 70 летию создания первых РЛС дальнего обнаружения. - Современная электроника. 2010, №3.
6. Лосев О.В. Детектор-усилитель; детектор-генератор. - ТИТбп. НРЛ, 1922, №14.
7. Brattain W.H., Bardeen J. Three Electrode Circuit Element Utilizing Semiconductive Materials. - U.S. Patent 2,524,035. Oct.3, 1950. Filed June 17, 1948.
8. Малин Б.В. Создание первой отечественной микросхемы. - НИИ-35 (теперь НИИ «Пулсар»). www.chip-news.ru.
9. Kilby J.S. Miniaturized Electronic Circuits. - U.S. Patent 3,138,743. June 23, 1964. Filed Feb. 6, 1959.
10. Однокристалльная перепрограммируемая микро-ЭВМ с аналоговыми устройствами ввода и вывода KM1813BE1A,Б. Справочный листок ЯТ09360, ИЭВТ, 1980.
11. Bartenev V. Software Radar: New Reality. - Report on the International conference RADAR 2006. China, 2006.
12. Stratix V. FPGAs: Built for Bandwidth. Altera's 28-nm FPGAs deliver the industry's highest bandwidth, highest level of system integration». www.altera.com.
13. Концепция федеральной целевой программы «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники на 2008-2015 годы». Утверждена распоряжением Правительства РФ №972-р от 23 июля 2007. www.minprom.gov.ru.