Электронная компонентная база космического назначения

М. И. Краснов, к. т. н., *krasnov_mi@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

В. Б. Стешенко, к. т. н., доцент, *steshenko_vb@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Электронная компонентная база, применяемая в бортовой аппаратуре КА, должна в полной мере обеспечивать целевые технические характеристики радиоэлектронной аппаратуры в части функциональных и электрических характеристик, а также стойкость к внешним воздействующим факторам и показателям надежности. Авторами статьи проводится анализ текущей ситуации с обеспеченностью электронной компонентной базы и рассматриваются перспективы развития и создания необходимых изделий электроники. В настоящее время результаты работы подтверждаются активным применением в космической технике созданных компонентов космического назначения.

Ключевые слова: космическая техника, бортовая радиоэлектронная аппаратура, электронная компонентная база, электрорадиоизделия, ЭКБ, ЭРИ

Electrical, Electronic and Electromechanical Parts for Space Applications

M. I. Krasnov, *Cand. Sci. (Engineering)*, *krasnov_mi@spacecorp.ru*

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

V. B. Steshenko, *Cand. Sci. (Engineering)*, *associate professor*, *steshenko_vb@spacecorp.ru*

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

Abstract. The electrical, electronic and electromechanical parts (EEE parts) used in spacecraft onboard equipment must fully provide the target technical characteristics of radio-electronic equipment in terms of functional and electrical characteristics, as well as resistance to external factors and reliability indicators. The authors of the article analyze the current situation with the EEE parts and consider the prospects for the development and creation of the necessary electronics products. Currently, the results of the work are confirmed by the active use of the created space components in space technology.

Keywords: space technology, onboard radio-electronic equipment, electrical, electronic and electromechanical parts (EEE parts), electronic components (EC)

Развитие космической техники ставит перед разработчиками радиоэлектронной бортовой аппаратуры (БА) жесткие требования: улучшение габаритно-массовых характеристик, увеличение функциональных возможностей аппаратуры и повышение сроков ее активного существования. В настоящее время задачи по созданию бортовых систем с новыми техническими характеристиками для космических аппаратов (КА) связи, дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и навигации имеют высокую актуальность.

Электронная компонентная база (ЭКБ), применяемая в бортовой аппаратуре КА, должна в полной мере обеспечивать целевые технические характеристики БА в части функциональных и электрических характеристик, а также обеспечивать стойкость к широкому спектру внешних воздействующих факторов. Например, полосы частот связи, выделенные для космического применения в S- и L-диапазонах, полностью заняты, практически заполнены диапазоны Ka, K, Ku (покрывающие частотный спектр до 40 ГГц), поэтому в настоящее время востребована высокочастотная ЭКБ на частотные диапазоны Q (30–50 ГГц), V (50–75 ГГц), W (60–100 ГГц).

Проблемный вопрос обеспечения комплектования БА КА заключается в огромных ресурсах (материальных, временных, кадровых), которые нужны для создания и поддержания серийного производства широкой номенклатуры типоминиалов ЭКБ для реализации разнообразных функциональных задач, при крайне малой количественной потребности космической промышленности.

Как следствие, предприятия микроэлектроники зачастую не заинтересованы в создании и поставке компонентов для космической промышленности. Требования к сроку активного существования (САС) КА при полном отсутствии возможностей ремонта приводят к сверхвысоким требованиям по надежности (срок службы 15 лет при низкой интенсивности отказов) и стойкости к дестабилизирующим факторам космического пространства (КП) — все это определяет специфику ЭКБ для аппаратуры космического назначения (табл. 1).

А приведенные требования надежности и стойкости к внешним воздействующим факторам находятся в обратной зависимости с необходимыми

Таблица 1. Специфика ЭКБ для аппаратуры космического назначения

Стойкость к воздействию дестабилизирующих факторов космического пространства	
Накопленная доза	От 80 до 300 кРад
Воздействие ТЗЧ (пороговое значение линейных потерь энергии (ЛПЭ))	Порядка 60 МэВ·см ² /мг
повышенная температура	До 125 °С
Пониженная температура	До –60 °С
Солнечное излучение	Ультрафиолетовое излучение
Вакуум	Отсутствие конвективного теплообмена
Невесомость	Состояние невесомости влияет на функционирование отдельных компонентов
Требования к надежности	
Срок службы с учетом неремонтопригодности аппаратуры в процессе летной эксплуатации	Не менее 150 000 часов при низкой интенсивности отказов
Требования к сохраняемости с учетом длительных циклов создания техники, а также необходимости длительного хранения до начала летной эксплуатации	В течение 25 лет

электрическими и функциональными характеристиками (например, быстродействие для цифровых микросхем).

Ключевая цель приведенной работы заключается в формулировании задач, решение которых позволит обеспечить достижение требуемых технических характеристик ЭКБ космического назначения при условии сокращения необходимых ресурсов на их создание путем снижения типоминиалов за счет унификации технических решений и обеспечения импортонезависимости.

Следует отметить, что ЭКБ космического назначения развивается во всем мире путем, отличным от развития электроники общепромышленной,

ориентированной на массовый выпуск продукции с коротким жизненным циклом (ЖЦ) и быстрой сменой типов [1]. Доступная к закупке ЭКБ быстро (3–5 лет) снимается с производства без согласования с мелкими потребителями за счет смены продуктовых линеек.

Ключевой задачей при создании ЭКБ для применения в аппаратуре космической техники является обеспечение приемлемой стоимости малосерийного производства при безусловном обеспечении требований широкой номенклатуры, длительного ЖЦ, надежности, стойкости к дестабилизирующим факторам и отказоустойчивости.

В то же время развитие микроэлектроники идет «семимильными шагами». Не секрет, что полупроводниковая промышленность занимает в мировой экономике уникальное положение: она развивается по детально разработанному плану, который не только не препятствует конкурентоспособности участников, но даже и способствует ей. Этот план известен как International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS) [2], который представляет собой план-прогноз, ежегодно обновляемый и публикуемый международной организацией Semiconductor Industry Association (SIA). В основе ITRS лежат несколько простых принципов:

- востребованы новые технологии создания СВЧ-компонентов на частоты до 300 ГГц и более,
- востребованы новые технологии создания оптоэлектронных компонентов,
- гетерогенная интеграция электроники необходима для растущего рынка мобильных устройств и интернета вещей,

в т.ч. знаменитый закон Мура об удвоении числа элементов СБИС каждые 1,5–2 года. Закон Мура не отражает никаких фундаментальных законов природы, а лишь описывает ситуацию, складывающуюся на рынке в результате конкуренции между производителями, а также вследствие взаимного стимулирования радиоэлектронной и полупроводниковой отраслей. Также роль играет и психологический фактор: разработчики и производители придерживаются прогнозных сроков закона Мура и ITRS, так как знают, что конкуренты действуют

аналогичным образом. Более того, стремление обогнать конкурентов часто приводит к тому, что разработчики и производители выводят на рынок новое изделие раньше, чем это предусмотрено ITRS. В результате в наши дни закон Мура, строго говоря, должен формулироваться иначе, поскольку из экспоненциального он превратился в суперэкспоненциальный.

Главное значение же ITRS в том, что этот план не только является прогнозом динамики параметров, но и содержит в себе точные указания относительно того, какими конструкторскими и технологическими средствами новые параметры могут быть достигнуты, когда и какие технические средства должны быть разработаны и освоены производством. В последних опубликованных планах следует выделить два тренда, значимых для космической электроники:

- основным рынком сбыта мировой электроники становятся мобильные устройства, а как следствие — переход к миниатюрным многокристальным сборкам по объемной технологии, не стойким по факту к большинству дестабилизирующих факторов космического пространства;
- переход на фотонные технологии передачи данных и сигналов, что крайне перспективно для космического приборостроения ввиду высоких скоростей и высокой помехоустойчивости при малых массогабаритных показателях [3].

Таким образом, ITRS является руководством к действию для разработчиков не только приборов и компонентов, но и техпроцессов и технологического оборудования. Идентичные тренды отмечены NASA [4] и ведущими мировыми производителями [5].

Но, рассуждая о проектных нормах и степени интеграции СБИС, зачастую забывают, что потребителю не важна информация о том, на какой базе была сделана аппаратура. Его интересует функциональный потенциал. Потребители предъявляют к разработчикам аппаратуры для космических аппаратов все более жесткие требования: необходимо увеличение функциональных возможностей аппаратуры при одновременном уменьшении габаритно-массовых характеристик и повышении ее САС.

Снижение себестоимости конечной продукции и повышение качества надежности и функциональности изделия — вот основные задачи, решаемые мировыми лидерами в области космического приборостроения.

Например, мировой лидер по созданию ПЛИС и встраиваемых систем фирма Xilinx реализует свои серийные изделия, созданные по технологии 16 нм [6], тогда как Aeroflex (нынешний бренд Cobham) создает новейшие микроконтроллеры космического назначения с применением кристаллов на основе технологии 180 нм [7]. Как шутят в нашей отрасли, «делайте ЭКБ хоть из дерева, только характеристики обеспечьте». Требования по обеспечению нового функционала при высокой стойкости к внешним воздействующим факторам (ВВФ) космического пространства постоянно стимулируют исследователей и производителей разрабатывать и внедрять все новые и новые технологии создания высоконадежной ЭКБ на основе общепромышленных кристаллов, например [8].

В своем развитии электронная промышленность прошла через несколько этапов. В 40–80-е годы прошлого столетия активно использовался монтаж в отверстия в основном при ручной пайке и монтаже. Изделия отличались достаточно большим весом и габаритами.

Начиная с 1980-х годов печатные узлы стали разрабатываться с применением компонентов поверхностного монтажа и при их сборке начали широко применяться полуавтоматические и автоматические методы монтажа. Вес и габариты изделий уменьшились в 6–7 раз.

Около десяти лет назад появилась новая технология — встраиваемые компоненты внутри печатных плат. Формируется печатный узел со сложной трехмерной структурой, в которой компоненты как дискретные, так и пленочные расположены внутри самих печатных плат [9].

Такие тенденции получили название «Больше, чем Мур», т.к., помимо простого уменьшения размеров элементов (которые уже сами по себе ушли в область нанометрового диапазона), они имеют существенные преимущества в части миниатюризации и быстродействия, достигающиеся за счет гетерогенной интеграции, что позволяет совместить в одном корпусе элементы, изготовленные

с применением различных микро- и нанотехнологических маршрутов. Данная технология является крайне перспективной для создания бортовой аппаратуры современных космических аппаратов и позволяет удовлетворять возрастающие требования к функциональным, массогабаритным и энергетическим характеристикам [10].

Как уже отмечалось, выпуск высоконадежных компонентов в небольшом количестве нерентабелен для предприятий электронной промышленности, нацеленных на массовое производство, однако представляет весьма доходный и динамично развивающийся бизнес для специализированных нишевых компаний. В США и ряде европейских стран работает много предприятий такого рода. Это могут быть как самостоятельные фирмы, например Aeroflex (нынешний бренд Cobham), так и подразделения крупных фирм, создающих сложные комплексы (в качестве примера — Boeing).

Министерство обороны США с 2001 года реализует программу ускоренного развития радиационно-стойкой элементной базы в рамках Программы производства вооружений — Defense Production Act, Title III [11]. В структуре Министерства обороны США Программа контролируется Агентством по уменьшению военной угрозы, подчиняющимся заместителю министра обороны США по закупкам, технологии и логистике. Непосредственная поставка радиационно-стойкой элементной базы для нужд Министерства обороны США, а также других ведомств контролируется Центром снабжения вооруженных сил (DSCC) в Колумбусе. Центром DSCC в Колумбусе ведется реестр сертифицированных изготовителей элементной базы для нужд Министерства обороны США: QML (Qualified Manufacturers List) [12].

Помимо сертифицированных фирм, производством радиационно-стойкой элементной базы занимаются несертифицированные фирмы других ведомств (например, Сандийские лаборатории Министерства энергетики США) или частные фирмы (в качестве примера — Peregrine Semiconductor). Взаимодействие с другими ведомствами и промышленностью США в области радиационно-стойкой элементной базы координируются Центром микроэлектроники США — Defense MicroElectronics Activity (DMEA) в Сакраменто, штат Калифорния.

Сегодня основным институтом развития космической электроники США становится Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) [13]. Вовлечение высоких компетенций из малых эффективных фирм приводит к динамичному развитию отрасли и появлению ряда новых продуктов.

Министерство энергетики США производит специализированную радиационно стойкую ЭКБ в Центре микроэлектроники Сандийских национальных лабораторий, а также проводит исследования по данной проблеме в Ядерном центре Лос-Аламоса. Министерство энергетики США имеет собственные требования к радиационно-стойкой элементной базе, но большей частью они унифицированы с требованиями стандартов Министерства обороны США. Национальное космическое агентство США NASA проводит работы по радиационно-стойкой микроэлектронике в своих исследовательских центрах, например Лаборатории реактивного движения JPL Стэнфордского университета.

В 1998 г. совместно с фирмой Intel эта лаборатория организовала трансфер технологии радиационно-стойких процессоров Pentium в Сандийские лаборатории, до настоящего времени это остаются единственные процессоры, квалифицированные в системе стандартов NASA для космического применения.

Компания BAE Systems закончила модернизацию своего производства пластин при спонсорской поддержке Министерства обороны США для обеспечения внутреннего гарантированного ресурса для радиационно стойкой микроэлектроники для стратегических военных и космических приложений следующего поколения. Производство пластин в настоящее время находится в полном объеме по технологическим нормам 250 нм и 150 нм. Компания BAE Systems продолжает играть свою важную роль в качестве внутреннего торгового поставщика радиационно-стойкой техники, производя продукты следующего поколения и предлагая услуги по производству пластин на своих вновь обновленных технологических мощностях.

Компания Aeroflex использует международную производственную кооперацию, в т. ч. как использует изготовление заказных кристаллов, так и осуществляет корпусирование предварительно отте-

стированных кристаллов в металлокерамические корпуса.

Аналогичным путем идут в Европе и Японии. В частности, Японское агентство аэрокосмических исследований (JAXA) совместно с рядом фирм-производителей электроники создало специализированное производство изделий радиационно-стойкой ЭКБ. Институт космических исследований и астронавтики (ISAS) владеет технологическим базисом для гибкой разработки и производства логических интегральных микросхем с очень высокой радиационной стойкостью и приемлемой ценой. Это было достигнуто путем интеграции технологии проектирования радиационно-стойких схем ISAS в современные КНИ технологии от Mitsubishi Heavy Industries Ltd., производителя электронной продукции с высокой надежностью [14].

Европейское космическое агентство имеет опыт построения кооперации при создании специализированной ЭКБ совместно с компанией Atmel [15].

Таким образом, мировой опыт свидетельствует, что создание необходимых технологий ЭКБ для космического приборостроения осуществляется с помощью механизмов государственно-частного партнерства, осуществляемого через заинтересованные государственные институты отраслевого назначения. Ярким примером является DARPA, которая проводит исследования по снижению стоимости комплектования за счет применения общепромышленной ЭКБ коммерческого назначения [16].

Идентичным образом организована работа в Российской Федерации, где головной организацией Госкорпорации «Роскосмос» по выбору и применению ЭКБ определено АО «Российские космические системы», а также на этой базе развернут отраслевой дизайн-центр и «Сборочный дом» [17]. Имеющиеся производственные мощности позволяют создавать функционально-законченные узлы бортовой аппаратуры в виде «Систем-на-кристалле» или «Систем-в-корпусе», а также специализированные компоненты штучного назначения. Ключевой принцип заключается в применении в БА бескорпусных изделий ЭКБ (узлы и блоки создаются как «Система-в-корпусе»), а отдельные узлы и блоки реализуются в виде микроэлектронных

Рис. 1. Распределение задач при создании современной бортовой аппаратуры КА

изделий, созданных в специализированном дизайн-центре как «Система-на-кристалле». Распределение задач между отраслями промышленности и подразделениями предприятий представлено на рис. 1.

Создание БА КА осуществляется в отраслевых дизайн-центрах радиоэлектронной аппаратуры, которые создают бортовую аппаратуру на основе ЭКБ из Перечня ЭКБ-К и функционально законченные узлы по технологии «Система-в-корпусе», а также в отраслевом дизайн-центре специализированной микроэлектроники осуществляется создание узко-специализированных компонентов для бортовой аппаратуры на основе библиотек микроэлектронной промышленности.

Важным преимуществом отраслевой разработки специализированной ЭКБ является возможность рационального использования современных подходов к созданию стойких компонентов к дестабилизирующим факторам космического пространства за счет технологических методов повышения стойкости, конструктивных и схемотехнических, а также обеспечения стойкости за счет моделирования влияния факторов космического пространства на этапе

проектирования компонентов, так как при междоотраслевой постановке задачи требуется натурное подтверждение стойкости ко всем внешним воздействующим факторам по стандартизованным значениям.

К схемотехническим методам повышения радиационной стойкости, в т. ч. к тяжелым заряженным частицам (ТЗЧ), относятся применение библиотек элементов с мажоритированием на уровне вентилях, кодеров, декодеров Хэмминга, т. н. «усиленных» библиотек элементов, отбор библиотечных компонентов и ряд других приемов. Основным достоинством такого подхода является возможность его реализации на существующих и перспективных фабриках, обладающих стандартной (предназначенной для массовой продукции) технологией. Такой подход получил международное название *Rad hard by design*. Таким образом компания Aeroflex (Cobham) обеспечивает гарантированную стойкость в 100 кРад и более по объемному кремнию [18], используя обычные технологические линейки ведущих производителей. При этом можно использовать как уже существующие мощности

зарубежных фабрик, так и отечественные мощности ПАО «Микрон» и АО «Ангстрем», где внедрен и применяется указанный подход.

К конструктивным способам повышения стойкости следует отнести использование специальных корпусов, методов локальной защиты и т. п., обеспечивающих высокую стойкость к дозовым эффектам и климатическим воздействиям. Получить высокую функциональность за приемлемую цену и с необходимыми массогабаритными характеристиками на сегодняшний день зачастую можно только с применением технологии интеграции чипов, изготовленных по различным методикам в одном корпусе, т. е. с применением подхода «Система-в-корпусе».

Использование перечисленных выше подходов к обеспечению стойкости к факторам космического пространства уже внедрено и применяется в дизайн-центрах и дает результат, сопоставимый с применением специальных технологий, но при существенно (в 5–7 раз) меньшей стоимости, определяемой стоимостью производства и разработки [16].

АО «Российские космические системы» определено Госкорпорацией «Роскосмос» головной научно-исследовательской организацией ракетно-космической промышленности по ЭКБ (ГНИО РКП по ЭКБ), в задачи которого входит оценка правильности и выбора применения ЭКБ на соответствие требованиям технического задания на создание бортовой аппаратуры в части стойкости к внешним воздействующим факторам и показателям надежности. В задачи ГНИО РКП по ЭКБ также входит обеспечение максимального применения отечественной ЭКБ в БА КА.

В целях исключения случаев применения ЭКБ несоответствующей космическому назначению по минимально необходимым требованиям надежности и стойкости к ВВФ, а также изготовленных с агрессивными материалами (например, фтор), АО «Российские космические системы» разработало и актуализирует Отраслевой перечень электронной компонентной базы отечественного производства, разрешенной к применению при создании ракетно-космической техники (Положение о Перечне ЭКБ-К утверждено приказом генерального директора Госкорпорации «Роскосмос» от 10.02.2017 г. № 29). В последнюю редакцию Перечня ЭКБ-К, представленного на рис. 2, в целях создания оптимальных условий для максимально широкого применения электронной компонентной базы отечественного производства при создании аппаратуры изделий космической техники внесены следующие дополнения:

- включены перспективные разработки (опытно-конструкторские работы) по созданию отечественной ЭКБ;
- предусмотрены плановые (типовые) сроки поставки изделий ЭКБ.

Учитывая этапы создания радиоэлектронной техники, замена номенклатуры ЭКБ для главного конструктора БА на основании рекомендаций ГНИО РКП по ЭКБ возможна без потерь только на этапе эскизного проекта, когда изменения вносятся только «на бумаге». Замена номенклатуры ЭКБ возможна и на других этапах, что может быть вызвано

Условное обозначение изделия	Обозначение документа на поставку	Наличие изделия ЭКБ в перечне ЭКБ 01-22	Радиационная стойкость ⁽¹⁾	Организация-изготовитель	Сведения о выпуске изделий ЭКБ	Сертификация СМК организации	Плановый срок поставки (справочно)	Примечание
5400ТР024	АЕНВ.431260.122ТУ	ОЗ	РС	ПАО «Микрон» г. Москва	ВП	ВП	до 90 дней	
5400ТР025	АЕНВ.431260.122ТУ	ОЗ	РС	ПАО «Микрон» г. Москва	ВП	ВП	до 90 дней	
Необходимость плановых сроков поставки подтверждена участниками секции по применению и развитию ЭКБ Совета главных конструкторов по космическому приборостроению 15.06.2017 г. Данная информация будет способствовать долгосрочному планированию работ, предупреждать конфликты между поставщиками и потребителями ЭКБ ОП.								

Рис. 2. Структура Перечня ЭКБ-К

отрицательными результатами наземной экспериментальной отработки, но она требует коррекции конструкторской и технологической документации, а также повторного проведения комплекса наземной экспериментальной отработки и дополнительного согласования с головным исполнителем и головным институтом государственного заказчика с оформлением необходимых документов (карточка разрешения на отклонение от конструкторской документации и т. д.).

Практика работы показала, что даже экспресс-эскизного проекта работает только «по хвостам», т. к. практическая реализация выбора ЭКБ осуществлялась разработчиком РЭА на ранних этапах проектирования без участия методического влияния ГНИО РКП по ЭКБ. Сложившаяся ранее практика работы, согласно Ограничительным перечням ЭКБ ОП, и учтенным экземплярам технических условий на ЭКБ ОП, безусловно технически оправдана, однако автоматизация проектирования потребовала кардинального пересмотра для обеспечения разработчика технической информацией.

В настоящее время разработчик пользуется удобными онлайн-справочниками [19] и сервисами иностранных производителей ЭКБ для выбора необходимого комплектующего по ключевым техническим характеристикам, а размещение условного графического обозначения на схеме электрической принципиальной и посадочного места на чертеже печатной платы осуществляется «перетаскиванием» курсором мыши символа библиотеки из одного окна САПР в другое. Таким образом разработчик сэкономил время на знакомство с ограничительными перечнями и техническими условиями (которые дополнительно необходимо закупать в бумажном виде у фирмы-производителя), а также на необходимость создания конструкторских библиотек для САПР на каждое изделие ЭКБ ОП и успешно применял ЭКБ иностранного производства.

Указанное выше позволяет сделать вывод, что эффективное решение задачи по обеспечению преимущественного выбора отечественной ЭКБ разработчиками РЭА возможно при условии создания комфортных инструментов выбора ЭКБ в САПР. Управление номенклатурой ЭКБ в бортовой аппаратуре космического назначения со стороны ГНИО РКП по ЭКБ должно осуществляться через ограни-

чительные справочники ЭКБ ОП в САПР и состав доступных библиотек.

Отдельное внимание следует уделить термину «библиотека ЭКБ», т. к. идентичные формулировки используют разработчики микроэлектронных изделий применительно к разработке «Система-на-кристалле» на конкретной фабрике и разработчики РЭА применительно к описаниям изделий ЭКБ. В данном случае мы рассматриваем конструкторские библиотеки в определениях разработчика РЭА и они состоят из условного графического обозначения (УГО) для размещения на схеме электрической принципиальной, посадочного места (ПМ) для чертежа печатной или керамической плат, а также 3D-модели для использования в конструкторских чертежах (пример библиотеки ЭКБ в САПР представлен на рис. 3).

Отдельную группу представляют библиотеки ЭКБ для моделирования РЭА (SPICE, IBIS и т. д.) [20], однако они необходимы только для параметрического и функционального моделирования. SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) — симулятор электронных схем общего назначения с открытым исходным кодом.

Сегодня SPICE-модель позволяет:

- АС анализ (анализ по переменному току);
- DC анализ (анализ по постоянному току) для слабых сигналов;
- анализ DC transfer curve;
- анализ шумов;
- анализ передаточной функции (входное и выходное усиление малых сигналов и вычисление импеданса);
- анализ переходных процессов.

IBIS (Input/Output Buffer Information Specification) — спецификация, описывающая входные и выходные буферы интегральных схем. Спецификация традиционной модели IBIS представлена в виде «черного ящика» — таблиц зависимости силы тока от напряжения и напряжения от времени, а также некоторых дополнительных параметров. Это отличает ее от SPICE-моделей, функционирование которых стандартизировано на уровне транзисторов. Эта модель используется преимущественно для проверки целостности сигналов.

Рис. 3. Библиотеки ЭКБ ОП в САПР для разработки РЭА

Функциональное и электрическое моделирование фактически позволяет обеспечить лабораторную отработку технических решений в сжатые сроки без длительного создания аппаратных макетов. Создание библиотек ЭКБ ОП для моделирования сегодня затруднено высокими допустимыми разбросами технических характеристик, что заметно снижает ценность результатов моделирования РЭА.

Следует отметить, что вносимые разработчиком схмотехнические и конструкторские ошибки («человеческий фактор») могут быть парированы применением электрически активных конструкторских библиотек. Схмотехнические ошибки на порядок снижают создание «электрически активных» УГО, которые не позволяют, например, оставить неподключенными входы цифровой микросхемы или допустить замыкание выходов.

В рамках реализуемых в АО «Российские космические системы» мероприятий не только создаются библиотеки на ЭКБ ОП для САПР, но и предусматривается создание правил для САПР на базе технологических возможностей отечественных производств. Необходимость обеспечить разработчика РЭА технологическими правилами в САПР обусловлена тем, что зачастую разработанные с применением автотрассировщика или заложенных по умолчанию правил печатная или керамическая платы не могут быть изготовлены и смон-

тированы на доступных производствах. Указанные в САПР собственные технологические нормы на ширину проводников, зазоры и т.д. для печатных и керамических плат позволили обеспечить гарантированную реализуемость разработок на собственных производствах.

В рамках текущих работ АО «Российские космические системы» на экспертизу и научно-техническое сопровождение эскизных проектов на бортовую радиоэлектронную аппаратуру КА выработан подход по разработке планов обеспечения импортонезависимости, которые значительно выходят за пределы сроков реализации текущей опытно-конструкторской работы, однако позволяют разработчику и заказчику планировать и прогнозировать дальнейшие доработки и модификации бортовой аппаратуры. Например, по бортовой аппаратуре формирователя сигналов они позволили перейти на отечественный процессор при обеспечении поставки серийного изделия.

Внедрение в САПР для разработки РЭА библиотек на отечественную ЭКБ уже показало свою эффективность за счет резкого роста применимости отечественных комплектующих и снижения схмотехнических и конструкторских ошибок при разработке бортовой аппаратуры.

ГНИО РКП по ЭКБ работает над формированием минимальной функционально полной номенклатуры ЭКБ, необходимой для создания радио-

электронной аппаратуры космического назначения, разработкой технических требований для постановки работ по созданию и освоению производства отечественных комплектующих [21], унификацией схмотехнических решений в БА, разработкой комплекса методов обеспечения импортонезависимости.

Основная научно-техническая идея проводимой работы заключается в обеспечении импортонезависимости за счет формирования комплекса нормативно-технической документации и разработки базовых схмотехнических и конструктивных решений бортовой аппаратуры космических аппаратов, обеспечивающих значительное сокращению необходимой номенклатуры электронной компонентной базы и возможность ее создания на производственных мощностях отечественных предприятий.

Разработан комплекс мероприятий, гарантирующих создание и внедрение методов обеспечения импортонезависимости космической радиоэлектронной аппаратуры:

- организационных,
- научно-технических,
- нормативных,
- конструкторских.

Разработано положение о ГНИО РКП по ЭКБ, где сформулированы основные функции, основанные на проводимых работах и исследованиях проблем с выбором и применением комплектующих:

- подготовке предложений по стратегии развития, разработки, производства и применения современной отечественной ЭКБ в изделиях (системах, комплексах) РКТ;
- взаимодействии с организациями РКП и радиоэлектронной промышленности по вопросам обеспечения РКП высоконадежной ЭКБ;
- мониторинге процессов выбора, закупки, применения, испытаний и сертификации ЭКБ для РКТ;
- оценке правильности применения ЭКБ при разработке, модернизации и изготовлении изделий (систем, комплексов) РКТ;
- координации работ по выбору, комплектованию, хранению, применению, испытаниям и сертификации ЭКБ;

- разработке нормативно-технических и директивных документов, регламентирующих порядок выбора, закупки, применения, испытаний и сертификации ЭКБ для РКТ;
- повышении качества РКТ за счет применения высоконадежной ЭКБ;
- контроле за ходом работ по комплектованию ЭКБ изделий (систем, комплексов) РКТ и реализации мероприятий по обеспечению технологической независимости Российской Федерации при разработке, модернизации и изготовлении РКТ;
- организации повышения квалификации и информированности работников РКП по вопросам выбора и применения ЭКБ.

В целях координации научно-технической деятельности в 2013 г. разработаны и утверждены положения о взаимодействии между головными научно-исследовательскими институтами ракетно-космической и радиоэлектронной отрасли (АО «Российские космические системы» и ФГУП «МНИИРИП»), а также разработано и утверждено Положение о взаимодействии Министерства промышленности и торговли Российской Федерации и Федерального космического агентства (ныне — Государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос») при планировании развития, разработке, производстве и применении ЭКБ в ракетно-космической технике.

ГНИО РКП по ЭКБ принимает непосредственное участие в проведении комплексного научно-технического сопровождения ОКР по созданию изделий РКТ в части правильности выбора и применения ЭКБ с выработкой предложений по переходу на существующие и запланированные к созданию отечественные изделия ЭКБ в рамках государственного контракта на оказание услуг головными научно-исследовательскими организациями по научно-техническому и технологическому сопровождению на этапах проектирования, наземной экспериментальной отработки, летных испытаний, подготовки серийного производства и эксплуатации космической техники. Результатом данных экспертиз материалов эскизных проектов является заметное увеличение применения отечественной

ЭКБ на основании рекомендаций по выбору и применению, наличию отечественных аналогов.

По результатам проводимой работы по научно-техническому сопровождению разработки космической техники очевидны интегральные результаты по увеличению применяемости отечественной ЭКБ, отражающиеся на целевом показателе импортонезависимости Федеральной космической программы 2015–2025 гг., представленные в табл. 2.

Таблица 2. Уровень импортонезависимости по годам

Текущее состояние с обеспечением импортонезависимости в части ЭКБ	
Применение ЭКБ ОП в РКТ, %	Годы
25	2014
36	2015
44	2016
53	2017
70	2018

ГНИО РКП по ЭКБ разработаны и внедрены типовые требования к выбору и применению ЭКБ в БА космической техники, которые приводятся с 2014 г. в технических заданиях Госкорпорации «Роскосмос» и обеспечивают внедрение выбранных методов и подходов обеспечения импортонезависимости.

Одно из требований заключается в преимущественном применении комплектующих из перечня ЭКБ-К. Отраслевой перечень ЭКБ-К за счет унификации и исключения номенклатуры, не допустимой к применению в космической технике (низкая надежность, содержание агрессивных соединений, отсутствие стойкости к внешним воздействующим факторам и т.д.), значительно сокращает номенклатуру межотраслевого Перечня 01-22, а также является одним из основных нормативно-технических документов, внедренных при участии творческого коллектива. С 2018 г. в Перечень ЭКБ-К введена графа «Плановый срок поставки» в целях эффективного планирования при создании космической техники.

В рамках проведенной унификации подходов к созданию БА космических аппаратов, схемо-

технически узлов и блоков достигнуто сокращение востребованной номенклатуры ЭКБ на порядок (с 3000 типов до 227 типов). Например, были унифицированы интерфейсы, стандарты напряжений питания и вычислители, что позволило на порядок сократить востребованную номенклатуру интерфейсных микросхем, вторичных источников питания, процессоров за счет унификации технических решений на каждом уровне согласно рис. 4. Сокращение номенклатуры ЭКБ происходит за счет выбора единых технических решений для функционально законченных узлов и блоков.

До последнего времени существовал «зверинец» бортовой аппаратуры с различными интерфейсами, напряжениями и стандартами питания, что не позволяло унифицировать ЭКБ и сократить сроки создания отечественных компонентов. Например, стандартизация интерфейсов с 15 до 3 (RS422/RS485, МКО, SpaceWire) и напряжений питания с 6 до 2 (27 В и 100 В с общим «минусом») позволили сформировать унифицированную заявку на создание всей номенклатуры отечественной ЭКБ для данных узлов, доступную к реализации электронной промышленностью за 3 года.

Коллективом ГНИО РКП по ЭКБ ежегодно обобщаются и унифицируются предложения ракетно-космической промышленности по созданию ЭКБ, что, в свою очередь, на порядок снижает количество необходимых к постановке ОКР по созданию отечественной ЭКБ. Это уже позволило сократить количество необходимых к разработке типов изделий ЭКБ с заявленных организациями РКП 3000 типов до 227 типов унифицированных изделий номенклатуры ЭКБ, а в обеспечение унифицированной заявки Минпромторгом России в 2016 г. развернуты работы по 49 позициям, в 2017 г. — по 37, в 2018 г. — по 13.

Унификация заявок промышленности на создание ЭКБ проводится следующими ключевыми методами:

- стандартизации интерфейсов, протоколов и других технических характеристик;
- статистической обработки потребностей;
- унификации технических требований на перспективное изделие согласно требованиям нескольких потребителей;

Рис. 4. Этапы и уровни унификации

- прогнозирования потребностей в данном типе ЭКБ с использованием планов по развитию космической техники и математического аппарата.

Проведенная ГНИО РКП по ЭКБ работа позволила не только сократить необходимые к разработке типы изделий ЭКБ, заявляемые организациями РКП, но и увеличить применимость отечественных комплектующих в бортовой аппаратуре космических аппаратов с 25 % до 75 %.

АО «Российские космические системы» не только обобщаются и унифицируются предложения предприятий Госкорпорации «Роскосмос» по созданию отечественной ЭКБ, но и разрабатываются технические требования (ТТ) на перспективную унифицированную номенклатуру ЭКБ, осуществляется комиссия приемка ОКР и результатов технического проектирования. Участие в приемке технического проекта позволяет не только учесть отдельные замечания потребителей, но и внести серьезные изменения в функциональные, электриче-

ские и конструкционные характеристики изделий (результаты участия в согласовании технических проектов представлены на рис. 5).

Создаваемая в настоящее время номенклатура ЭКБ в интересах космической промышленности полностью соответствует требованиям по функционалу, конструктиву, электрическим параметрам, стойкости к внешним воздействующим факторам, а также показателям надежности (150 000 часов службы и 25 лет сохраняемости с низкой интенсивностью отказов). Нерешенной до настоящего времени задачей остается подтверждение показателей надежности ранее созданной ЭКБ на соответствие современным техническим заданиям на создание бортовой аппаратуры.

Ведущаяся в АО «Российские космические системы» разработка перспективной бортовой аппаратуры показывает возможность создания узлов и блоков на отечественной ЭКБ, а длительные САС аппаратуры, созданной ранее с учетом принятых мер по автономным испытаниям ЭКБ, а также

- Необходимый конструктив
- Снижение массогабаритных показателей
- Обеспечение надлежащего теплоотвода
- Повышение технологичности применения
- Соблюдение требований к ЭКБ космического назначения
- Уточнение состава и параметров интерфейсов
- Уточнение состава и значений электрических параметров

Результаты совместных работ по согласованию технических требований и результатов технического проектирования уже показывают большую эффективность, так как в несколько раз вырос интерес к участию данных работ со стороны предприятий. Организации-разработчики радиоэлектронной аппаратуры космической техники заведомо получают изделие ЭКБ, применимое в собственных разработках, а предприятие микроэлектронной промышленности получает гарантированный рынок сбыта собственной продукции.

Работы проводятся на основании Положения о взаимодействии Министерства промышленности и торговли Российской Федерации и Федерального космического агентства (ныне — Государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос») при планировании развития, разработке, производстве и применении электронной компонентной базы в ракетно-космической технике.

Рис. 5. Результаты участия в согласовании технических проектов

конструктивной и схмотехнической защиты в радиоэлектронной аппаратуре, подтверждают правильность выбранного системного подхода к выбору и применению ЭКБ в космической технике.

Список литературы

1. Стешенко В.Б. Космическая микроэлектроника в России: Состояние и перспективы развития. Доклад в рамках Международной конференции «Микроэлектроника-2015» // Интегральные схемы и микроэлектронные модули — проектирование, производство и применение: Сборник тезисов. 2015. С. 55.
2. International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS). Semiconductor Industry Association. 2015.
3. Романов А.А. Развитие фотоники в России и мире. Публичный аналитический доклад // М., Битуби, 2016.
4. NASA Technology Roadmaps TA 10: Nanotechnology, National Aeronautics and Space Administration. 2015.
5. TI Space Products. Innovating your space solution with leading-edge Rad Hard (RHA) and QMLV products. Texas Instruments. 2019.
6. <https://www.xilinx.com/products/silicon-devices/fpga.html/> (Дата обращения 25.07.2019).
7. <https://www.cobhamaes.com/pagesproduct/prods-hirel-arm.cfm> (Дата обращения 05.08.2019).
8. <http://www.3d-plus.com/innovations.php/> (Дата обращения 17.07.2019).
9. Popelar S. Organic class Y “system-in-package” technology development. Ph.D. Cobham Semiconductor Solutions Colorado Springs. 06.19.2018.
10. Hybrids and Packaging Technologies. Multi-Chip and Hybrid Modules. European space components Information Exchange system. ESCC. ESA. 2010.
11. [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f14/2_seaford_roundtable.pdf/](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f14/2_seaford_roundtable.pdf) (Дата обращения 10.08.2019).
12. Qualified manufacturers list of products qualified under performance specification MIL-PRF-038535. Integrated circuits (microcircuits). Manufacturing general requirements for. QML-38535-17. 11-Jul-2003. supersending. QML-38535-16. 16.10.2002.
13. Weigand R. ESA Microprocessor Development Status and Roadmap. European Space Agency. Microelectronics Section. DASIA. 2011.
14. Establishment of World's First Foundation for Developing High-Performance Logic ICs with High Radiation Tolerance through Integration of State-of-the-Art Consumer Silicon-on-Insulator Technology and Space

- Radiation Hardening Technology. Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). 22.11.2010.
15. *Weigand R.* ESA Microprocessor Development. Status and Roadmap. DASIA. 18.05.2011.
16. *Keller J.* There's never been a better time to be in the space electronics market. Military space electronics experts are looking to relax radiation-hardening and ruggedization standards for the new breed of low-Earth-orbit satellites. Military and Aerospace Electronics. 18.06.2019.
17. *Данилин Н.С., Булаев И.Ю., Белов Д.А., Морозов И.А.* Внедрение новых микроэлектронных технологий в бортовую космическую аппаратуру — системы в корпусе // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2015. № 1. С. 69–76.
18. <https://www.cobhamaes.com/pagesproduct/prods-hirel-rhd.cfm/> (Дата обращения 04.08.2019).
19. <http://www.ti.com/data-converters/dac-circuit/high-speed/products.html/> (Дата обращения 30.07.2019).
20. SPICE Simulation Fundamentals Updated May 16, 2019 <https://www.ni.com/ru-ru/innovations/white-papers/06/spice-simulation-fundamentals.html> / (Дата обращения 17.07.2019).
21. *Стещенко В.Б, Краснов М.И.* Требования к высоконадежной ЭКБ космического назначения. Сб. докладов II научно-технической конференции «Испытания ЭКБ. Возможности и проблемы», Мытищи, 2018 г.