

Научно-технические проблемы метрологического обеспечения разработки ЭКБ нового поколения

В. Быканов, к. т. н.¹, Б. Подъяпольский², В. Булгаков³

УДК 621.38 | ВАК 05.27.06

ФГУП «МНИИРИП» является головной отраслевой научно-исследовательской испытательной организацией, выполняющей функции исследований в области электронной компонентной базы (ЭКБ), а также научного обеспечения и межведомственной методической координации работ по метрологическому обеспечению при создании и испытаниях изделий ЭКБ. В статье рассмотрены основные проблемы метрологического обеспечения испытаний при производстве электронной компонентной базы, выявлены их причины и предложены рациональные пути решения подобных задач.

Стратегия развития электронной промышленности [1] предусматривает освоение в производстве радиоэлектронной продукции нового поколения таких приоритетных направлений, как:

- совершенствование технологической и производственной базы твердотельной и вакуумной СВЧ-электроники;
- обеспечение разработок и производства радиационно стойкой ЭКБ, включая вакуумную;
- развитие и создание производств микросистемной техники на базе интеллектуальных сенсоров и передовых полупроводниковых технологий;
- реконструкция действующих производств микроэлектроники и создание микроэлектронного производства современного технологического уровня, включая корпусирование ЭКБ;
- развитие базовых технологий и конструкций приборов оптоэлектроники, квантовой и магнитной электроники, пассивных радиоэлектронных компонентов, развитие наноэлектроники;
- создание новых высокотехнологичных материалов для электроники и организация их серийного производства.

Развитие этих направлений ЭКБ и технологий ее создания невозможно без совершенствования метрологического обеспечения разработки, производства и испытаний ЭКБ как важнейшего аспекта управления качеством выпускаемых изделий, их оценки.

Для метрологического обеспечения разработки, производства и испытаний ЭКБ необходим системно увязанный с программными мероприятиями комплекс стандартов и эталонов, законодательных и нормативных документов, а также методов и средств измерений, их поверки и калибровки.

Основные проблемы метрологического обеспечения испытаний при разработке и производстве ЭКБ можно подразделить на две группы:

- вопросы технической базы (массовое использование средств измерений импортного производства, аналоги которых в Российской Федерации не производятся из-за отсутствия отечественной технологической базы и современной ЭКБ);
- несоответствие характеристик средств метрологического обеспечения разработки, производства и испытаний ЭКБ возросшим требованиям к выпускаемой продукции двойного назначения, усугубляемое невозможностью закупки иностранных средств измерений.

Трудности из первой группы наиболее актуальны в таких областях, как измерения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах радиочастотного спектра; информационно-коммуникационные технологии; фотоника и неразрушающий контроль. Особенно критическая ситуация сложилась в области радиотехнических измерений, где доля импортной техники достигает 75%, а по некоторым видам – до 100% при общей потребности до 25 тыс. средств измерений в год. Таким образом, развитие современных высокотехнологических предприятий целиком зависит от поставок импортных средств измерений.

Текущее состояние приборостроительной отрасли не позволяет обеспечить предприятия современными

¹ ФГУП «МНИИРИП», начальник отдела обеспечения единства измерений, старший научный сотрудник.

² ФГУП «МНИИРИП», начальник испытательного центра.

³ ООО «ВИАНТЕК», директор.

радиоизмерительными приборами в полном объеме. Для решения проблемы должны быть предусмотрены меры государственной поддержки, в том числе в рамках программы импортозамещения. С учетом имеющегося на приборостроительных предприятиях научно-технического задела целесообразно направить усилия на разработку уникальных приборов миллиметрового диапазона, поставка которых в Россию ограничена, а также компонентов и узлов для их производства. В качестве альтернативного подхода рационально использовать возможности совместного производства на отечественных предприятиях разработок иностранных компаний – мировых лидеров в данной области.

Для решения задач метрологического обеспечения разработки, испытаний ЭКБ в первую очередь необходимо поддержать в Российской Федерации организацию серийного производства следующих средств измерений [3]:

- осциллографов цифровых двух- и четырехканальных;
- анализаторов цепей векторных в диапазоне частот более 22 ГГц;
- анализаторов цепей скалярных в диапазоне частот более 40 ГГц;
- анализаторов спектра в диапазоне частот более 50 ГГц;
- генераторов сигналов в диапазоне частот более 40 ГГц;
- калибраторов мощности электромагнитных колебаний в диапазоне частот более 78,3 ГГц;
- частотомеров электронно-счетных в диапазоне частот более 40 ГГц.

Развитие отечественных средств контроля в метрологии требует наличия соответствующей эталонной базы, которая обеспечит единство и точность измерений при разработке и испытаниях РЭА и ЭКБ.

Спорные вопросы из второй группы наиболее характерны для измерений в сфере гидроакустики и смежных с ней областей – гидрофизики, физических полей электромагнитной группы, дистанционного зондирования Земли. Стимулом к развитию метрологии гидроакустических измерений служит, в частности, ужесточение законодательства в отношении допустимого уровня шумового загрязнения, которое подлежит международному контролю.

Решение данных проблем осложняется [2]:

- отсутствием координации работ федеральных органов исполнительной власти, метрологических служб различных уровней и профильных организаций по метрологическому обеспечению предприятий;
- неразвитостью системы мониторинга, анализа метрологического обеспечения предприятий

радиоэлектронной и электронной промышленности;

- устареванием нормативно-правовой базы, не успевающей за промышленным прогрессом продукции.

От технических характеристик ЭКБ значительно зависит качество их функционирования в составе узлов, модулей, систем и комплексов, создаваемых на их основе. Измерение данных параметров осуществляется методами инструментального контроля, определенными соответствующей НТД (нормативно-технической документацией), которая включает:

- основополагающие ГОСТы на методы и средства измерений параметров;
- систему ГОСТов на методы испытаний (измерений) для определенных классов (групп) ЭКБ;
- систему ГОСТов на конкретные виды ЭКБ либо виды измеряемых параметров определенных групп ЭКБ;
- ТУ для конкретных типов изделий ЭКБ.

К сожалению, не существует единого подхода к описанию требований к методам и средствам измерений, используемым при испытаниях в процессе производства ЭКБ. Например, в одном случае комплект ГОСТов состоит из 15–20 стандартов для каждого измеряемого параметра, в другом – используется общий ГОСТ, предусматривающий различные методы испытаний. Поэтому приоритетное направление разработки нормативных документов, регламентирующих организацию и порядок метрологического обеспечения испытаний РЭА и ЭКБ, – составление единых требований к оборонной и народно-хозяйственной продукции:

- Требования к метрологическому обеспечению, включаемые в ТТЗ (ТЗ) на разработку РЭА и ЭКБ;
- Требования к метрологическому обеспечению при выполнении этапов ОКР по созданию РЭА и ЭКБ;
- Требования к метрологическому обеспечению, включаемые в ТТЗ (ТЗ) на разработку средств измерительного контроля и испытаний для создания РЭА и ЭКБ;
- Обязательная метрологическая экспертиза создаваемой РЭА и ЭКБ. Организация и порядок проведения;
- Руководство о порядке проведения обязательной метрологической экспертизы технической документации на изделия РЭА и ЭКБ;
- Общие требования к методам испытаний РЭА и ЭКБ;
- Методики оценки метрологического обеспечения отечественной РЭА и ЭКБ при разработке, изготовлении и испытаниях;
- Алгоритмы (методы) аттестации методик непрямых измерений в процессе разработки, испытаний и производства РЭА и ЭКБ;

- Общие требования к аттестации испытательного оборудования для испытаний РЭА и ЭКБ.

В рамках выполненной ФГУП «МНИИРИП» комплексной научной работы «Метрология ЭКБ» для формирования общего перечня технических характеристик ЭКБ, подлежащих инструментальному контролю в процессе разработки, испытаний и эксплуатации, было проанализировано около 400 ГОСТов по основным группам ЭКБ. Цели данной работы – сбор и систематизация информации о требованиях к методам и средствам измерений, диапазонам и точностным характеристикам измеряемых величин. Разработанный перечень технических свойств ЭКБ насчитывает около 800 параметров и характеристик. Полученные данные систематизированы по группам (видам) измерений, в частности: параметры импульсов – 8 видов измерений, постоянное и переменное напряжение – 102, постоянный и переменный ток – 74, сопротивление – 42, емкость – 8, мощность – 23, энергия – 5, частота – 18, характеристики сигналов – 9, временные параметры – 14, относительные величины – 33, линейные величины – 10, угловые величины – 13, прочие величины по другим видам измерений – больше 100.

В результате анализа и группировки данных были составлены кадастр технических характеристик ЭКБ (более 700), подлежащий инструментальному контролю, и номенклатурный перечень с основными техническими характеристиками контрольной измерительной аппаратуры для метрологического обеспечения разработки и производства современной ЭКБ.

Помимо традиционных видов измерений, по мере развития ЭКБ и технологий ее изготовления появляются новые параметры ЭКБ, требующие инструментального контроля, постоянно совершенствующихся методов и средств измерений. Наибольшее количество измерительных задач находится в области создания интегральных схем (в том числе сверхбольших) и сверхскоростных интегральных микросхем, полупроводниковых, электровакуумных приборов, приборов СВЧ, изделий оптоэлектроники и др.

По данным предприятий разработчиков и изготовителей ЭКБ, весь спектр измерительных задач можно разделить на три группы:

- первая – общие измерительные задачи, характерные как для РЭА, ЭКБ, так и для множества других объектов измерений (массы, геометрических размеров, электрических, радиотехнических величин и т. п.);
- вторая – специальные измерительные задачи, характерные в основном для современной электро- и радиотехники, информационных технологий (генерирование сигналов большой амплитуды, измерение параметров цифровых микросхем

и модулей, глубокого вакуума, характеристик спецстойкости, информационной безопасности и т. п.);

- третья – комплексные измерительные задачи (измерение уровня промышленных помех, параметров переходных процессов, динамических характеристик РЭА и ЭКБ, антенные измерения и т. п.).

Общие измерительные задачи для большей части технических объектов, включая РЭА и ЭКБ, могут быть решены современными типовыми средствами измерений. Основными трудностями в этой группе задач являются измерения малых длин (нанометры), генерирование высоких напряжений (до сотен киловольт), измерение сверхмалых линейных размеров и температур в широком динамическом диапазоне с высокой точностью. В настоящее время эти параметры определяются с использованием преимущественно зарубежных приборов. Измерение остальных физических величин возможно с помощью отечественных устройств, которые могут работать в составе автоматизированных измерительных систем (с интерфейсными функциями) и метрологическое обеспечение которых организовано в соответствии с современной нормативно-технической базой.

Для решения наиболее сложных специальных и комплексных измерительных задач (вторая и третья группы) необходимы специфические комплексные измерительные установки или автоматизированные измерительные системы, специальные условия измерений (должны быть созданы камеры, полигоны, центры и т. п.), высококвалифицированный персонал.

Основные средства измерений для решения отдельных специальных измерительных задач входят, как правило, в состав испытательного оборудования, а проблемы их метрологического обеспечения решаются при его аттестации.

К особому классу специальных измерений относится контроль параметров спецстойкости РЭА и ЭКБ, который проводится в специализированных испытательных центрах.

Для измерения динамических параметров и переходных процессов в современной быстродействующей РЭА и ЭКБ применяются только зарубежные многоканальные осциллографы со сверхширокой полосой пропускания, векторные анализаторы цепей и анализаторы сигналов. Современные отечественные аналоги этих приборов отсутствуют, можно лишь надеяться на их разработку в ближайшее время.

Рациональный путь решения подобных задач – создание автоматизированных измерительных систем на базе современных средств измерений и размещение их на базе специализированных предприятий.



Рис. 1. Выпускаемые изделия ЭКБ различных видов (%)

Определенные трудности представляют вопросы метрологического обеспечения нестандартизованных (технологических) устройств с измерительными функциями (калибры, пробки, щупы, индикаторы и т. п.), часто применяемых в технологических процессах отдельных предприятий. В настоящее время нормативные документы по обеспечению единства измерений такого оборудования отсутствуют.

Следует отметить, что в государственной программе развития электронной промышленности [4] целевым индикатором является технический уровень современной ЭКБ, которая оценивается по освоенному в производстве технологическому уровню изделий



Рис. 2. Общее количество параметров и характеристик, подлежащих инструментальному контролю

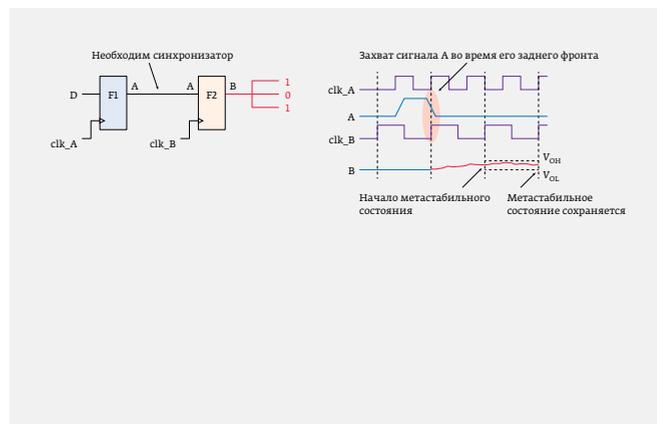


Рис. 3. Количество параметров и характеристик, подлежащих инструментальному контролю в различных видах интегральных микросхем

микроэлектронной техники. К 2025 году планируется достижение уровня технологии 0,045–0,010 мкм, что сократит отставание российской электроники и радиоэлектроники от мировых показателей.

Еще одно заслуживающее внимания направление – создание систем на одном кристалле (однокристалльные законченные изделия), что значительно усложняет и совершенствует аппаратные и программные средства измерений цифровых сигналов (поток).

Если существующие средства тестирования микросхем представляют собой преимущественно многоярусные одноблочные тестеры, то перспективная номенклатура таких средств измерений и тестирования для упомянутых изделий должна предусматривать ряд приборов для фиксирования параметров цифровых

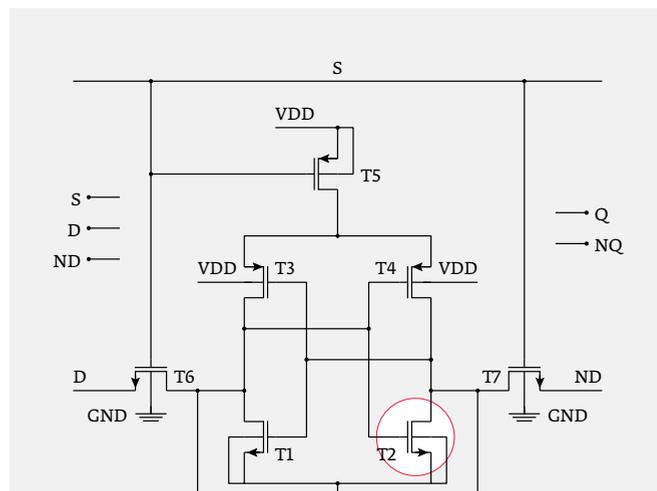


Рис. 4. Количество параметров и характеристик, подлежащих инструментальному контролю в различных видах полупроводниковых приборов

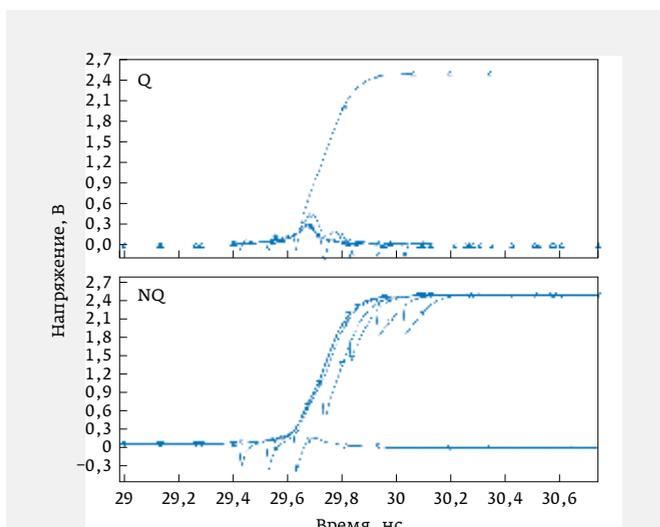


Рис. 5. Количество параметров и характеристик, подлежащих инструментальному контролю в различных видах изделий оптики и оптоэлектроники

сигналов, включая установление объема и скорости передачи информации.

Сравнительный анализ объемов выпускаемых изделий ЭКБ различных видов и соответствующего количества параметров и характеристик, подлежащих инструментальному контролю, представлены соответственно на рис. 1–6.

Потребности в оснащении новейшей измерительной техникой современных промышленных технологий (в том числе нанотехнологий) значительно увеличивают количество объектов, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений. Наряду с этим актуальна разработка соответствующих эталонов, необходимых для метрологического обеспечения средств измерений, а также новых методик поверки и калибровки.

Таблица 1. Состояние метрологического обеспечения в СВЧ-диапазоне разработки и эксплуатации высокотехнологической продукции

| Параметры | Диапазон частот, ГГц | | |
|--------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------|
| | 37–118 | 178 | 220–400 |
| Спектральная плотность мощности шума | Реализовано | Подлежит первоочередной разработке | 2019–2026 гг. |
| Мощность СВЧ | Подлежит первоочередной разработке | 2020–2026 гг. | После 2026 г. |
| Комплексные коэффициенты отражения | 2020–2025 гг. | После 2025 г. | После 2025 г. |

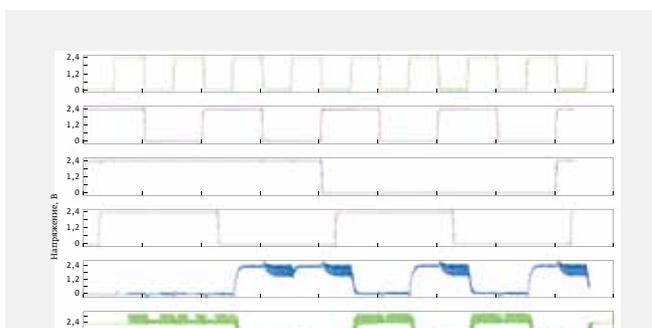


Рис. 6. Количество параметров и характеристик, подлежащих инструментальному контролю в дискретных элементах ЭКБ

Следует отметить, что пока не в полной мере решены проблемы комплексного измерения параметров РЭА и ЭКБ, работающих в СВЧ-диапазоне, особенно в диапазоне частот до 178 ГГц. Состояние метрологического обеспечения в СВЧ-диапазоне отражено в табл. 1.

Таким образом, к приоритетным направлениям создания средств метрологического обеспечения ЭКБ СВЧ-диапазона относятся:

- разработка базовых технологий создания элементов и модулей технологических цепочек производства СВЧ-приборов и структур с использованием перспективных электронных и квазиоптических методов передачи информации;
- разработка базовых технологий, конструкций и подготовка серийного производства задающего генератора и анализатора фазоманипулированных сигналов в диапазоне частот от 9 кГц до 40 ГГц на основе цифровой обработки сигналов специальными методами;
- разработка комплекта детекторных модулей для первичной обработки наносекундных СВЧ-радиоимпульсов в диапазоне частот 0,5–50 ГГц

в системах контроля параметров импульсных приемо-передающих устройств систем радиолокации, связи;

- разработка комплекта детекторных модулей для первичной обработки наносекундных СВЧ-радиоимпульсов в диапазоне частот 37,5–118,1 ГГц в системах контроля параметров импульсных приемо-передающих устройств систем радиолокации и связи.

Аналогичные приоритетные направления важны и при создании средств метрологического обеспечения фотоприемных устройств, средств измерений статистических и динамических параметров РЭА, ЭКБ и измерений магнитных характеристик материалов, при создании средств измерений содержания газообразных примесей и вредных выбросов.

Для решения вопросов по развитию контрольно-измерительной аппаратуры и средств их метрологического обеспечения, при разработке, производстве, испытаниях современных и перспективных изделий РЭА и ЭКБ целесообразно [5]:

- производство свыше 35 типов современных эталонов, автоматизированных комплексов, систем и средств измерений параметров перспективной РЭА, ЭКБ, в том числе стандартов частоты и времени на основе технологии по использованию медленных атомов цезиевого «фонтана», отличающихся высокой стабильностью воспроизведения частоты, аппаратуры квантовых стандартов частоты на основе фемтосекундного лазера, средств измерений и средств их метрологического обеспечения в диапазоне частот до 178 ГГц и более;
- разработка комплекта из девяти нормативных, технических и методических документов по обеспечению единства измерений на предприятиях радиоэлектронной и электронной промышленности, обеспечивающих соблюдение метрологических правил и норм при разработке и производстве высокотехнологичной РЭА и ЭКБ;

- создание пяти новых стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов, применяемых в технологии производства РЭА, ЭКБ и при соблюдении санитарных и экологических требований;
- внедрение трех новых базовых технологий создания унифицированных модулей контрольно-измерительной аппаратуры параметров РЭА и ЭКБ;
- формирование при Минпромторге России единого центра сертификационных испытаний новейших элементов и модулей оптоэлектронной РЭА и ЭКБ;
- составление единого перечня ЭКБ для приборостроительных организаций;
- формирование образцового испытательного центра на базе безэховых камер с оборудованием, реализующим все известные методы измерений антенн и радиолокационных характеристик перспективных образцов радиоэлектронных средств.

На сегодняшний день во исполнение поставленных целей совершенствования метрологического обеспечения испытаний, производства и разработки модифицированной продукции РЭА и ЭКБ подготовлено и представлено на утверждение в Минпромторг России «Руководство о порядке проведения обязательной метрологической экспертизы технической документации на изделия РЭА и ЭКБ».

Разработаны предложения по созданию 30 типов современных эталонов, систем и средств измерений параметров РЭА и ЭКБ, по десяти из которых тематические карточки проходят стадию согласования.

В целях устранения существующих проблем и противоречий в области испытаний ЭКБ и РЭА ФГУП «МНИИРИП» приступил к организации передового интегрированного испытательного комплекса.

Таким образом, общая динамика развития в заданном направлении имеет положительный, позитивный характер.

ЛИТЕРАТУРА

1. Приказ Министерства промышленности и энергетики от 7 августа 2007 года № 311 «Об утверждении стратегии развития электронной промышленности России на период до 2025 года».
2. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 20 октября 2015 года № РД-П7-7140.
3. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 15 декабря 2012 года № 2396.
4. ФЦП «Развитие электронной компонентной базы и электроники на период 2008–2015 годов».
5. **Булгаков О. Ю.** Состояние и направления развития метрологического обеспечения испытаний при производстве электронной компонентной базы // Тезисы докладов «Микроэлектроника-2018». 2018. С. 573–577.