

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 нанoeлектроники;
- 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.

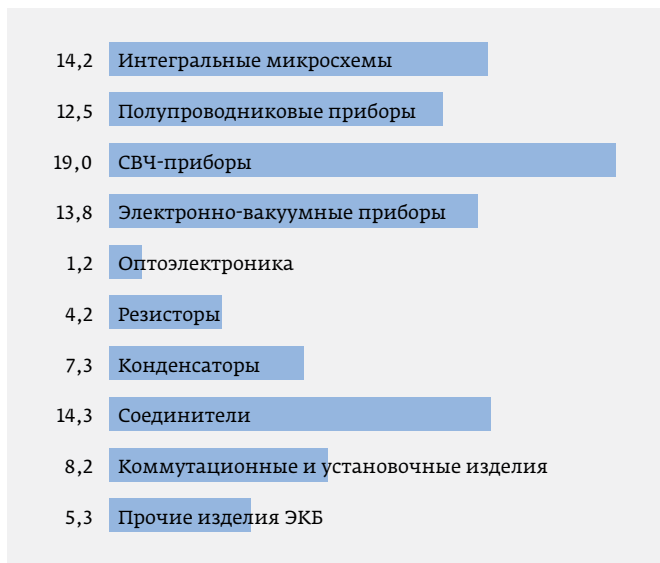


Рис. 1. Выпускаемые изделия ЭКБ различных видов (%)

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

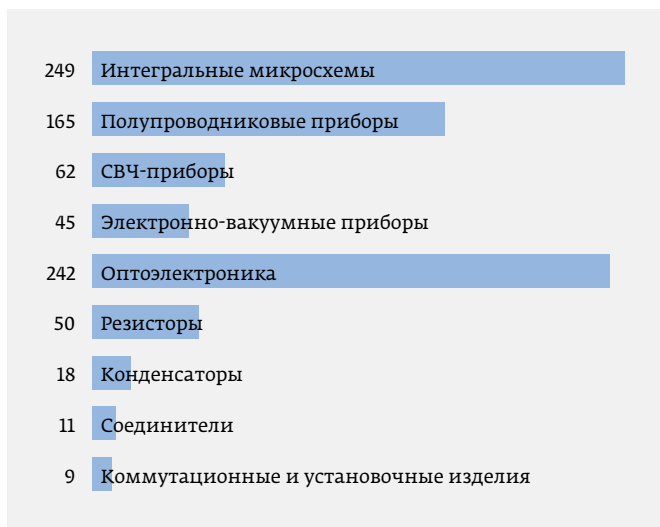


Рис. 2. Общее количество параметров и характеристик, подлежащих инструментальному контролю

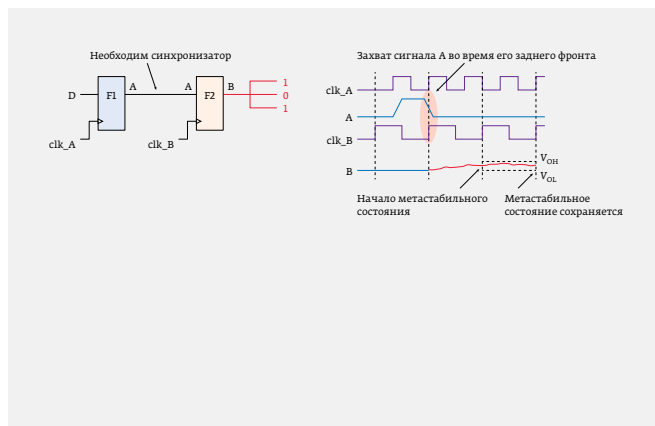


Рис. 3. Количество параметров и характеристик, подлежащих инструментальному контролю в различных видах интегральных микросхем

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

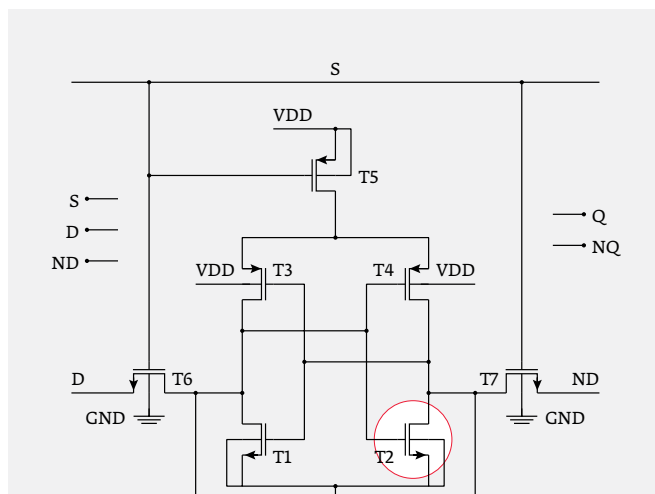


Рис. 4. Количество параметров и характеристик, подлежащих инструментальному контролю в различных видах полупроводниковых приборов

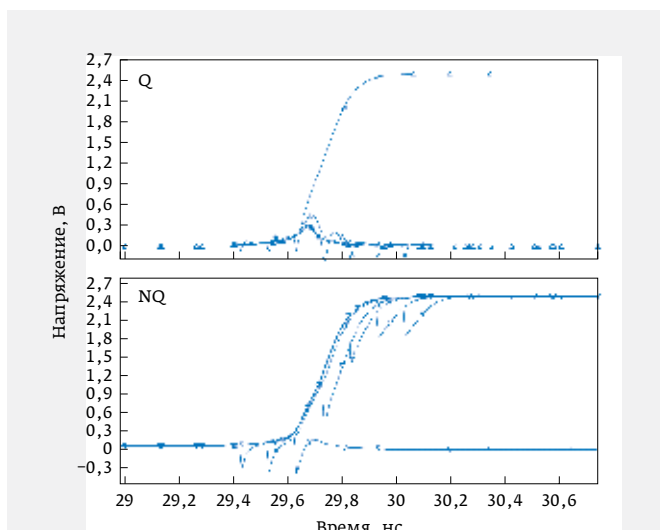


Рис. 5. Количество параметров и характеристик, подлежащих инструментальному контролю в различных видах изделий оптики и оптоэлектроники

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.

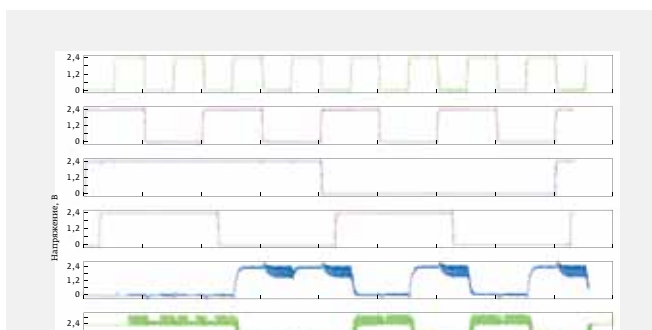


Рис. 6. Количество параметров и характеристик, подлежащих инструментальному контролю в дискретных элементах ЭКБ

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.