

Королева Анна Николаевна

**Разработка научно-методических основ
управления качеством базовых технологий, используемых при
проектировании и производстве сверхбольших интегральных схем**

Специальность 05.27.06 - Технология и оборудование для производства
полупроводников, материалов и приборов электронной техники

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук



Москва-2021

Работа выполнения в акционерном обществе «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники» (АО «НИИМЭ»).

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор
Панасюк Виталий Николаевич
Научно-исследовательский институт
молекулярной электроники

Официальные оппоненты

Киреев Валерий Юрьевич
доктор технических наук,
старший научный сотрудник

Крымко Михаил Миронович
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник, акционерное
общество «Научно - производственное
предприятие «Пульсар», главный научный
сотрудник 4-го отделения

Ведущая организация

Акционерное общество
Научно-исследовательский институт
точного машиностроения (АО «НИИТМ»)

Защита диссертации состоится «___» _____ 2021 г. в ___ часов на заседании диссертационного совета Д212.141.18 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д.5, стр.1.

Ваш отзыв на автореферат, заверенный печатью организации, просим выслать в двух экземплярах по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана и на официальном сайте www.bmstu.ru.

Телефон для справок: 8 (499) 267-09-63.

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.141.18
кандидат технических наук, доцент



Мешков С.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Уровень развития современной микроэлектронной промышленности является одним из важнейших факторов, определяющих развитие перспективных направлений экономики передовых стран: цифровизации, систем искусственного интеллекта, а также космической, оборонной, транспортной, медицинской техники. Высокие требования к качеству и надежности изделий микроэлектроники, в первую очередь, сверхбольших интегральных микросхем (СБИС) в этих отраслях, невозможно реализовать без применения специализированных высокоразвитых систем менеджмента качества (СМК) с использованием комплекса специализированных стандартов MIL STD 883 в США, стандартов «Климат -7» в РФ. Основные положения этих стандартов, разработанные в 90 - х годах, получили в последние годы дальнейшее развитие. Применяемые на большинстве микроэлектронных предприятий СМК обеспечивают управляемые условия выполнения технологических процессов, жесткую систему контроля и испытаний при разработке и производстве продукции.

Дальнейшее развитие и совершенствование полупроводниковых технологий и электронного машиностроения позволили достичь высокой воспроизводимости физической структуры элементов на пластинах. На рубеже конца 90-х и начала 2000-х годов в мире начал формироваться новый подход к созданию перспективных сверхбольших интегральных схем (СБИС), ключевым этапом которого стала разработка базовых технологий (БТ) в комплекте с соответствующими средствами проектирования (КСП), включающими широкий набор программных инструментов проектирования, которые дают возможность разработчику СБИС применять их в различных комбинациях и условиях. Данный подход существенно расширил как возможности проектировщиков СБИС, так и состав участников процесса проектирования и изготовления – появились цепочки создания ценности (ЦСЦ). Основопологающим фактором, позволяющим успешно реализовывать процессы проектирования и производства СБИС высокой степени интеграции, с проектными нормами на уровне нескольких десятков нанометров и менее, является качество разработки базового технологического процесса. Обеспечение при этом высокой стабильности создаваемой физической структуры библиотечных элементов позволяет получать и использовать при проектировании СБИС их spise-модели, характерные для конкретной производственной линии.

В РФ данный подход начал активно развиваться по определенным историческим и экономическим причинам с некоторой задержкой, в других условиях и с существенными ограничениями по доступным ресурсам, что в свою очередь обостряет проблему снижения количества итераций вариантов конструкции СБИС и, соответственно, снижения количества запусков партий пластин для их изготовления. При этом существенной особенностью реализации данного подхода в РФ является значительное количество внешних факторов, влияющих на воспроизводимость параметров физической структуры на

пластинах, что может влиять на адекватность моделей библиотечных элементов и требует проведения анализа для подтверждения их адекватности.

Таким образом, анализ опыта разработки и применения базовых технологий при интегрированном рассмотрении процесса проектирования СБИС с использованием БТ, позволяет сформулировать ряд нерешенных актуальных системных проблем, а именно:

1. Сложные и длительные процессы разработки БТ, КСП и конструкции СБИС, содержащие большое количество этапов, каждый из которых имеет высокий внутренний потенциал изменчивости в совокупности с неочевидным характером влияния отклонений на конечный результат, требуют выделения критичных изменяемых частей процесса и их адекватной верификации.

2. Значительные объемы информации, генерируемые на различных этапах разработки БТ, КСП, конструкции СБИС в сочетании с многообразием семейств БТ создают риски неполноты выполнения верификационных процедур различными исполнителями и требуют ее структурирования и формализованного подхода к управлению, не зависящего от конкретного исполнителя.

3. Влияние таких внешних факторов, как необходимость смены поставщиков материалов из-за ресурсных ограничений, а также временные ограничения по разработке схем специального назначения в условиях опытно-конструкторских работ, создают необходимость разработки и использования оперативных и более экономичных методов оценки адекватности моделей.

4. В связи с отсутствием отраслевой нормативной базы и единых критериев для верификации и квалификации как частей процесса, так и процесса в целом требуется разработка специализированных системных процедур для управления качеством этих процессов.

Цель работы. Разработка научно-методических основ управления качеством процессов разработки и изготовления СБИС, включая разработку базовых технологий для проектирования и производства изделий с топологическими нормами менее 250 нм.

Для достижения поставленной цели требуется решение следующих **задач**:

1. Определить и структурировать основные элементы, связи между ними и риски данного макропроцесса.

2. Обеспечить управление изменениями данного макропроцесса и его устойчивости к воздействию внешних факторов в условиях ограниченных ресурсов.

3. Разработать методологию, обеспечивающую в условиях больших объемов данных контролируемые условия при реализации наиболее критичных элементов: БТ, КСП, конструкции СБИС. Установить критерии их верификации, а также предложить инструменты оперативной квалификации всего процесса в целом.

4. Создать информационно-аналитическую модель данных, обеспечивающую возможность проведения анализа условий проектирования и производства СБИС с использованием элементов БТ, определить методологию ее применения для оценки результативности макропроцесса.

5. Разработать предложения по эффективному применению БТ при проектировании и производстве СБИС в условиях ограниченных ресурсов.

Объектом исследования являются базовые технологии микроэлектроники для проектирования и производства СБИС с проектными нормами менее 250 нм.

Предметом исследования являются методы и способы управления качеством разработки базовых технологий, комплектов средств проектирования и конструкции СБИС, реализуемые в условиях ограниченных ресурсов.

Методы исследования. В работе применялись методы процессного и системного анализа статистических данных по 18 базовым технологиям, 246 кристаллам различных СБИС, разработанных и произведенных на их основе за период 2014-2020 г. Использовались методы корреляционного анализа, математической статистики, а также отдельные элементы теории оптимизации.

Научная новизна работы:

1. Предложена концепция расширенного рассмотрения понятия «базовой технологии микроэлектроники» как единого макропроцесса, включающего не только разработку базовых технологий, но и разработку комплектов средств проектирования и конструкции СБИС, позволяющая выявлять критически важные связи между его составляющими, которые оказывают существенное влияние на конечный результат макропроцесса в целом.

2. Сформулированы требования к управлению качеством основных компонентов макропроцесса, определены его критичные элементы, имеющие значительный потенциал изменчивости под воздействием различных внешних и внутренних факторов, для которых необходимо проведение как начальной, так и последующей квалификации.

3. Определена методика квалификации базовых технологий и их конструктивно-технологических опций, которая, в зависимости от конечного результата, позволяет оценивать степень соответствия требованиям базовых технологий с присвоением соответствующего квалификационного статуса базовых технологий, комплектов средств проектирования и снизить риски их применения разработчиками СБИС.

4. Предложен метод ускоренной оценки влияния планируемых технологических изменений производственной линии на адекватность моделей библиотечных элементов и характерных для производственной линии угловых моделей.

5. Предложен метод многофакторного корреляционного анализа влияния на результативность макропроцесса фактических отклонений при проектировании конструкции СБИС от требований правил проектирования.

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов.

Достоверность результатов работы подтверждается применением метрологически поверенного измерительного оборудования с использованием утвержденных методик выполнения измерений. А также корректным использованием методов статистического анализа при обработке достоверного объема данных за длительный период, внедрением полученных результатов, положительной оценкой на научных и отраслевых конференциях.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Структура и состав документации СМК (процедуры и квалификационные реестры), необходимых для разработки, внедрения, поддержания и управления изменениями составляющих макропроцесса проектирования и производства СБИС с использованием базовых технологий.

2. Результаты анализа и классификация источников изменений базовых технологий и комплекта средств проектирования с точки зрения влияния изменений на параметры формируемой физической и топологической структуры.

3. Результаты системного анализа основных целевых функций качества предприятий разработчиков СБИС, базовых технологий и производителей интегральных схем, их роль в совместном управлении рисками.

4. Методология управления изменениями в макропроцессе проектирования и производства СБИС для снижения рисков разработчиков СБИС, разработчиков базовых технологий, изготовителей кристаллов СБИС, способы формализации такого управления.

5. Информационно-аналитическая модель данных для мониторинга и анализа условий проектирования и производства СБИС, а также методология оценки результативности макропроцесса.

Практическая значимость.

1. Разработанные в диссертации научно-методические основы управления качеством базовых технологий реализованы в специализированных документах СМК, которые создают контролируемые условия выполнения макропроцесса, инструменты верификации и квалификации элементов базовых технологий, определяют ответственность в управлении изменениями и снижении рисков при ее применении. Основные положения документов применимы для перспективных базовых технологий с проектной нормой менее 65 нм.

2. Предложена методика анализа условий проектирования и производства СБИС с использованием базовых технологий с проектными нормами менее 250 нм на основе информационно-аналитической базы данных с возможностью ее расширения для перспективных технологий без потери целостности системы.

Реализация и внедрение результатов работы.

Комплект документов модели управления качеством, описывающий процессы разработки базовых технологий, разработки комплекта средств проектирования, проектирования СБИС, квалификационные Реестры, управление изменениями внедрены в АО «НИИМЭ» и ПАО «Микрон». Специализированное программное обеспечение для формирования базы данных по условиям проектирования и производства каждого проекта (шифр «Интеграция-1») внедрено в АО «НИИМЭ».

Апробация результатов работы

Результаты работы докладывались на научно-технических конференциях: XVIII Международной научно-практической конференция «Опыт и проблемы реформирования системы менеджмента на современном предприятии: тактика и стратегия» (г. Пенза, февраль 2019), Всероссийской конференции «Управление качеством» (г. Москва, МАИ, март 2019), Российская научно-техническая

конференция с международным участием «Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике» (г. Москва, МИРЭА, апрель 2019 г.). Международный форум «Микроэлектроника» (г. Ялта, сентябрь 2020 г., г. Алушта, октябрь 2021г.).

Публикации по теме диссертации. Основные результаты диссертационного исследования и практические результаты изложены в 8 научных публикациях, из них 4 - в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, получено 1 свидетельство о регистрации базы данных.

Личный вклад

Автором самостоятельно выбрано направление исследования на основании теоретических знаний по базовым технологиям микроэлектроники и практического опыта реализации на отечественной производственной линии, сформулированы основные научные положения. Предложенная структура базы данных разрабатывалась и внедрялась под непосредственным руководством автора. Подготовка и внедрение процедур и инструкций, содержащих верификационные и квалификационные требования к элементам базовых технологий, проводилась при непосредственном участии автора в составе группы руководителей профильных направлений АО «НИИМЭ» и ПАО «Микрон».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка использованной литературы и приложений. Объем диссертации 123 страницы машинописного текста, содержит 20 рисунков, 22 таблицы, приложения и список литературы из 97 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы проблемы, цели, задачи, научная новизна и практическая значимость основных научных результатов. Приведены основные положения и результаты, выносимые на защиту.

В первой главе приведены результаты анализа требований к качеству разработки базовых технологий в действующих нормативных документах с точки зрения соответствия практике применения и отражения принципиально новых требований при использовании базовых технологий для проектирования СБИС.

Выявлено, что как действующие отраслевые документы (ОСТ В 11 0999-99), так и ряд перспективных документов по контролю качества («Климат-8»), определяют требования только к операционному контролю техпроцесса и испытаниям готовой продукции и не учитывают современный технологический уровень и последовательность этапов проектирования и производства современных СБИС. Выделены составляющие этих этапов, которые влияют на конечный результат проектирования и производства изделий, к которым не определены требования к их верификации и квалификации, такие как правила проектирования, spice-модели, комплект средств проектирования. С другой стороны, зарубежная нормативная база сосредоточена внутри предприятий и является закрытой, а существенные отличия при реализации базовых технологии в РФ не позволяют полностью применить доступные зарубежные стандарты

серии JEDEC и SEMI. На основании анализа специфики целевого применения отечественных технологий, ресурсных ограничений, неполноты отраслевой нормативной базы сформулированы цель и основные задачи диссертационной работы.

Во второй главе определена структура и последовательность реализации процессов проектирования и производства СБИС с использованием базовых технологий, обобщены основные риски и способы реализации этого процесса в цепочке предприятий, определены требования, необходимые для управления качеством этих процессов на этапе их разработки, внедрения и поддержания на производственной линии. Предложен механизм квалификационной оценки базовой технологии, методологии мониторинга изменений и ускоренной оценки их влияния на адекватность моделей.

Фундаментальным свойством БТ является достаточно высокая стабильность создаваемой физической и топологической структуры библиотечных элементов, что позволяет получать их модели, характерные для конкретной производственной линии (Рис.1). Такое представление существенно расширяет структуру информации, содержащую требования к базовой технологии только как к технологическому процессу с комплектом технологической документации, обеспечивающей управление качеством при формировании физической структуры элементов в кремнии.

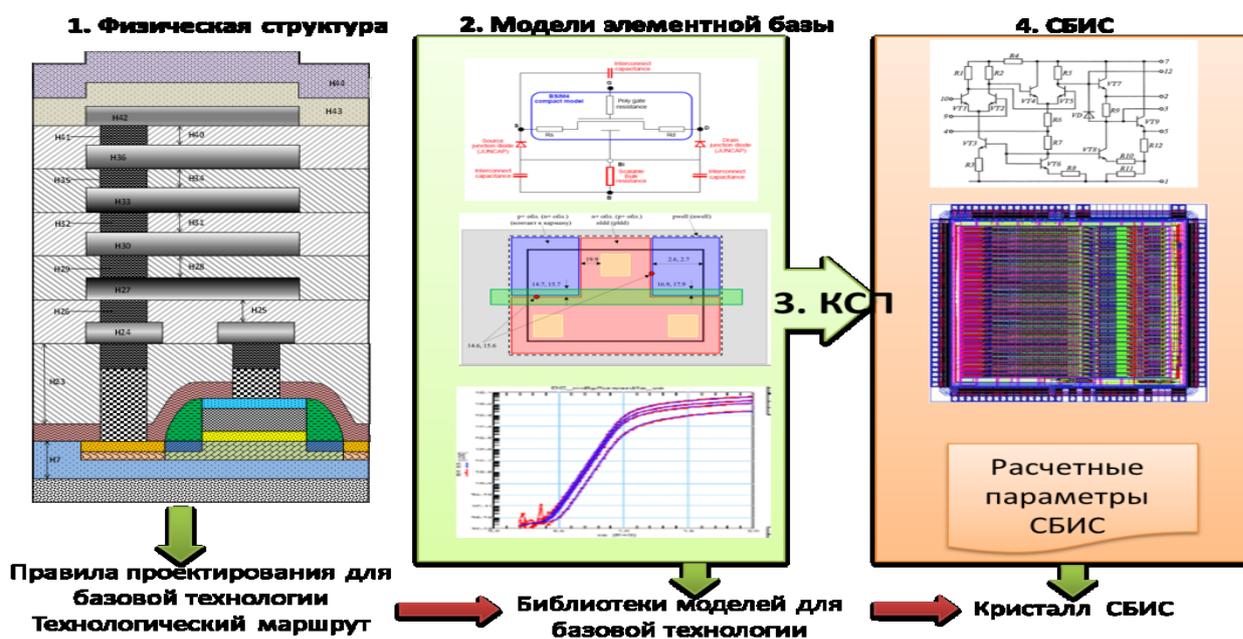


Рис. 1. Основные составляющие элементы базовых технологий для разработки СБИС

В результате процессного анализа определены ключевые составляющие базовых технологий, которые являются входными данными для проектирования конструкции СБИС, требующие их идентификации и процедур контроля:

- Правила проектирования (DRM) для базовых технологий
- SPICE-модели библиотечных элементов
- Model Guide (MG) – отчет о результатах экстракции параметров моделей
- Комплект средств проектирования PDK (PDK - Process Design Kit)

Перечисленные элементы используются в качестве входных данных не только для разработки конструкции СБИС, но и для разработки служебной технологической информации (СТИ) для изготовления фотошаблонов (ФШ), тестовых кристаллов контроля топологических и электро-физических параметров физической структуры элементов в производстве (параметрического монитора). Таким образом, при разработке базовой технологии, необходимо установить дополнительные требования к управлению качеством таких процессов как:

- разработка базовых технологий (включая разработку правил проектирования (DRM), структур параметрического монитора);
- разработка комплекта средств проектирования (КСП), включая модели библиотечных элементов и программные инструменты проверки топологий СБИС на соответствие правилам проектирования;
- разработка конструкции СБИС с использованием базовых технологий;
- разработка СТИ для изготовления фотошаблонов ФШ.

При формировании требований к качеству этих процессов выявлены их критически важные элементы, влияющие на характеристики конечных изделий и обладающие при этом повышенным потенциалом изменчивости (Рис.2), что накладывает необходимость их идентификации и контроля.

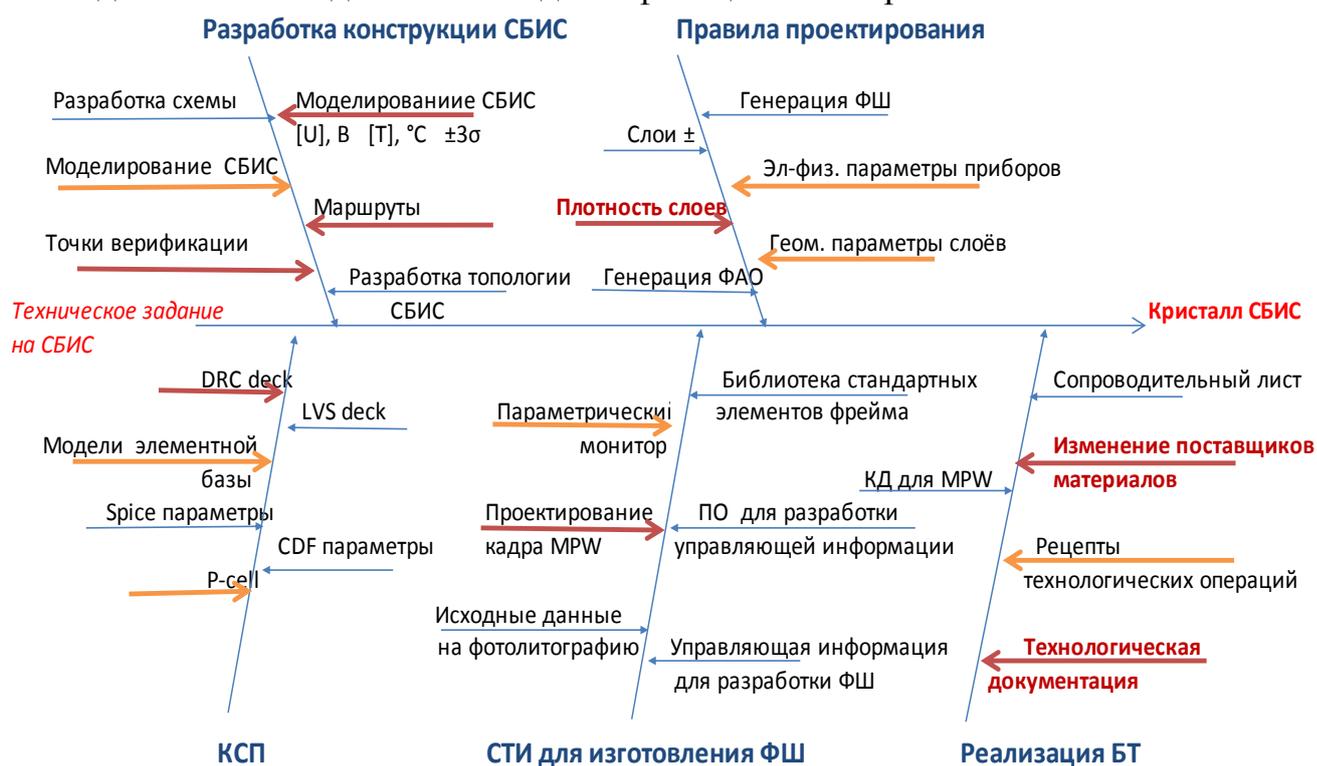


Рис. 2 Диаграмма Исикавы составляющих процесса проектирования и производства СБИС с использованием базовых технологий

В результате сочетания таких факторов, как отсутствие требований к качеству отдельных процессов при реализации базовых технологий и их изменчивость, появляются риски, которые могут привести к снижению эффективности применения базовых технологий, возникающие в цепочке предприятий, реализующие отдельные элементы базовых технологий (Таблица 1).

Таблица 1.

Перечень основных рисков, возникающих при разработке
и применении базовых технологий.

Наименование риска	Тип предприятия – владелец риска/уровень риска*.		
	Разработчик СБИС	Разработчик БТ и КСП	Произв. линия
Риски, связанные с гибкой методологией использования элементов БТ при разработке конструкции СБИС	В	С	
Риски, связанные с неполнотой верификации функциональной схемы, электрической схемы и топологической информации	В	С	
Риски, связанные с пропуском топологических и схемотехнических несоответствий.	В	В	
Риски, связанные с потерей воспроизводимости базовой технологии	В	С	В
Риски, связанные с некорректностью КСП и его изменениями	В	С	С
Риски, связанные с неполнотой аттестации базовой технологии и опций	В	В	В
Риски, связанные с изменениями базовой технологии и опций.	В	С	В
Риски, связанные с организацией и исполнением заказа на изготовление пластин.	В	В	В

* С – средний уровень риска, В – высокий уровень риска

В Таблице 1 показано, что последствия реализации рисков, связанных с недостаточностью процедур контроля элементов базовых технологий, влияют прежде всего на предприятия – разработчиков СБИС, вследствие чего необходимо устанавливать дополнительные требования к квалификации отдельных процессов не с локальных позиций, а с учетом конечных результатов их применения при проектировании и производстве СБИС.

В результате анализа определена взаимосвязь процессов при разработке и реализации базовых технологий, которая является основой для расширенного построения их структуры как макропроцесса (Рис.3), и позволяет определить его целевую функцию качества, заключающуюся в количестве итераций при проектировании конструкции и изготовлении СБИС с использованием БТ.

Данная структура макропроцесса предложена в качестве основы для разработки процедур и инструкций системы управления качеством базовых технологий, содержащих алгоритмы управления и снижения рисков, а также дополнительные требования к верификации и валидации существующих процессов.

Для управления качеством макропроцесса на этапе разработки базовых технологий установлены дополнительные организационные и технические требования к:

– правилам идентификации базовых технологий с указанием проектной нормы, количества уровней металлизации, напряжения питания и опций (SOI_250_6M_3.3V_MIM)

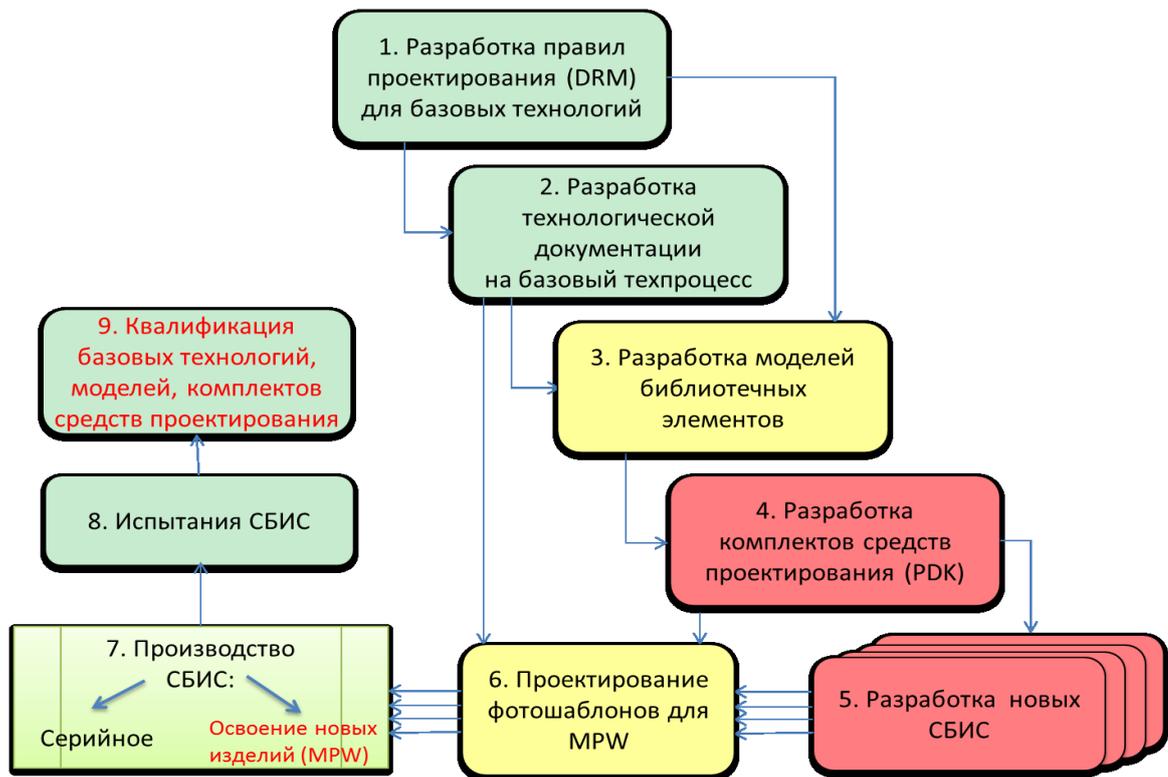


Рис. 3 Структура макропроцесса проектирования и производства СБИС с использованием базовых технологий

– матрице ответственности, содержащей перераспределение функций, связанных с расширением структуры базовой технологии (Рис.3)

– выходным данным для последующих этапов, включающих разработку тестового кристалла экстракции параметров, управляющей информации для фотошаблонов

– к выбору демонстрационной схемы для проведения квалификации базовой технологии в условиях ограниченных ресурсов

– квалификации и правилам присвоения квалификационного статуса БТ по результатам проектирования и производства демонстрационной схемы СБИС.

В структуре КСП выделены критические составляющие, влияющие на процессы проектирования СБИС, в результате разработаны дополнительные процедуры, устанавливающие требования к:

– правилам идентификации КСП и SPICE-моделей библиотечных элементов, отражающих значительные изменения их характеристик (при переэкстракции или изменениях угловых моделей базовых библиотечных элементов (транзисторов) вследствие изменения технологии), которые могут привести с необходимости перепроектирования конструкции СБИС, планируемых к изготовлению

– формату входных данных для разработки параметризованных ячеек, которые используются при расчете схемы электрической и топологии СБИС

– тест-плану верификации составляющих КСП, необходимых для выполнения маршрута проектирования и проведения физической верификации топологии СБИС

– квалификации КСП и основных его составляющих (библиотек spice-моделей, правил проектирования, инструментов проверки топологии СБИС на соответствие правилам проектирования) в зависимости от результатов квалификации БТ с использованием демонстрационной схемы СБИС.

На этапе разработке конструкции СБИС с использованием КСП для базовых технологий установлены дополнительные контрольные процедуры:

– маршруты проектирования СБИС и контрольные формы подтверждения соответствия каждого этапа

– чек-лист проекта, подтверждающий соответствие конструкции СБИС параметрам технического задания, подтвержденными результатами моделирования с использованием Spice-моделей библиотечных элементов, и расчетами в диапазоне температур, напряжений, угловых значений, установленными в документации КСП для базовых технологий

– техническое заключение, содержащее требования к сравнению параметров, полученных при моделировании с результатами измерений кристаллов после производства.

Однако, определенная изменчивость элементов базовых технологий при их разработке и реализации, влияет как на проектирование конструкции кристалла (топологии), так и на изготовление кристалла СБИС. Таким образом формируется конкретная конфигурация составляющих элементов базовых технологий, характерная для каждого из возможных разрабатываемых вариантов конструкции (топологии) кристалла СБИС (Рис.4).



Рис.4. Конфигурация элементов базовых технологий, используемых при проектировании конструкции (топологии) кристалла СБИС (пример)

Проектирование СБИС начинается с выбора базовой технологии из нескольких семейств БТ, предоставляемых разработчику в форме доступа к комплектам средств проектирования, что в условиях отсутствия нормативной базы приводит к рискам применения базовых технологий, не прошедших все этапы верификации в условиях макропроцесса. Для управления такими рисками предложена методика квалификации базовых технологий в форме квалификационного Реестра, представленного на Рис.5, которая позволяет в

форме присвоения статуса оперативно ранжировать базовые технологии по степени их соответствия заданным критериям.

Семейство базовых технологий	Базовая технология	Опции	Правила проектирования	КСП	Фотошаблоны	Технологическая документация на базовую технологию для производства кристаллов СБИС	Статус базовой технологии/ базового маршрута
СЕМЕЙСТВО ТЕХНОЛОГИЙ SOI 250							
SOI250	SOI250_4 M_3.3V	H M	3.0	2.1	7	№ контрольного плана № сопроводительного листа № технологических маршрутов FEOL (активная область) BEOL (металлизация)	Серийный

Рис.5. Структура квалификационного реестра базовых технологий и опций

Квалификационный статус «серийный» базовая технология получает по результатам приемки СБИС, при этом фиксируется версия основных элементов БТ, заложенных в конфигурацию квалификационной СБИС (Правила проектирования, КСП). Таким образом, предоставление доступа разработчикам СБИС к базовым технологиям, осуществляется после проведения внутренней квалификации на конкретном изделии, что снижает риски их применения.

Однако, как показывает реальный опыт эксплуатации, элементы базовых технологий, как до-, так и после присвоения квалификационного статуса могут быть подвержены постоянному воздействию внешних изменений. Одним из наиболее существенных изменений, связанных с ограниченным доступом к ресурсам, являются изменения, связанные с заменой поставщиков основных материалов (Рис.6).

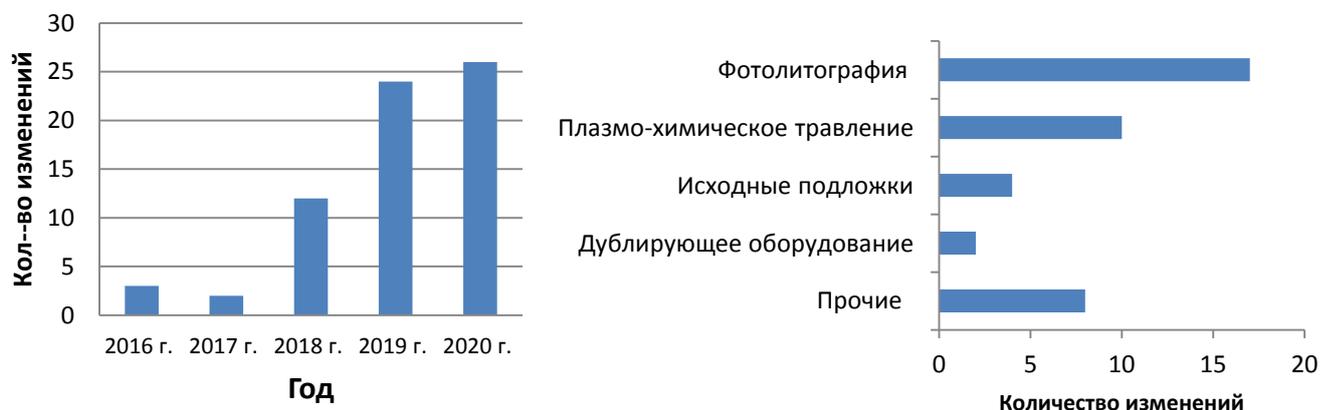


Рис.6 Данные по изменению поставщиков материалов за 2016-2020 гг.

На Рис.6 показан количественный рост таких изменений, а также представлены данные, показывающие, что изменения касались критически важных процессов с точки зрения формирования физической структуры

кристаллов – это фотолитография, процессы плазмо-химического травления, исходных кремниевых подложек.

Обычным способом оценки возможности замены поставщика материала является оценка влияния нового материала на процент выхода годных и надежность изделий. Однако для проведения изменений в базовой технологии со статусом «Серийный» указанных критериев недостаточно. Требуется подтверждение адекватности моделей, которое должно базироваться на оценке изменения воспроизводимости физической структуры.

Сравнение параметров распределения тестовых структур (Таблица 2) показывает, что в случае массовой замены поставщиков ранее разработанные модели могут быть не адекватными текущему распределению параметров на производственной линии. В первую очередь это касается «угловых» значений моделей, ранее рассчитанных в диапазоне $\pm 3\sigma$, закладываемых в расчет при проектировании конструкции и моделировании параметров СБИС.

Таблица 2 .

Таблица изменений порогового напряжения записи ячейки памяти EEPROM при смене поставщиков

Параметр порогового напряжения записи ячейки памяти	Требования, установленные в ТД на базовую технологию	2013-2016 гг. (до массовой замены поставщиков)	2017-2020 гг. (после массовой замены поставщиков)
Математическое Ожидание, <i>V</i>	1,15	1,023	1,046
Среднее отклонение, <i>V</i>	Допуск [0,85 ; 1,45]	0,072	0,087
Индекс Срк ($\pm 3\sigma$)	1,33	1,468 (> 1,33)	1,183 (< 1,33)
Процент выхода годных серийных изделий	92%	91,8%	91,4%

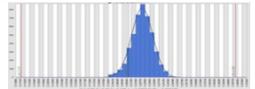
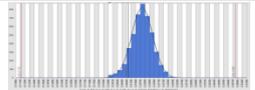
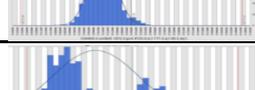
Ввиду того, что физическая структура характеризуется большим количеством параметров вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик, на измерение и обработку которых требуется значительное время, предложен метод ускоренной оценки влияния планируемых технологических изменений на параметры физической структуры и адекватность моделей.

Основой метода является применение для такой оценки интегрированных тестовых структур типа ячеек памяти или кольцевых генераторов и использование существенно меньшего количества параметров этих структур для оценки изменений воспроизводимости физической структуры. Для анализа влияния изменений предложен алгоритм, особенность которого заключается в том, что помимо нормированных значений параметров тестовых структур, установленных и контролируемых в технологической документации на базовую технологию, в качестве критериальной базы дополнительно рассматриваются параметры партии пластин, на которых производилась экстракция параметров моделей, так называемых «Золотых образцов» и устанавливаются критерии

расхождения для математического ожидания ($\bar{x}_{pi}^3; \bar{x}_{pi}^{ТП}$) и средне-квадратичного отклонения ($\sigma_{pi}^3; \sigma_{pi}^{ТП}$) между партиями пластин с заменяемым материалом и «золотого образца» (Таблица 3).

Таблица 3

Метод ускоренной критериальной оценки элементов БТ и набор необходимых действий по их изменению

Варианты соответствия результатов критериям	Гистограмма распределения парам. тестовой структуры	Изменения элементов базовой технологии			
		Режимы технологическ их операций	Spice- модели	Правила проектирования	Комплект средств проектирования
$Cpk > 1,33$		Параметры ВАХ «золотого образца» партии для экстракции параметров моделей			
$\begin{cases} \Delta \bar{x}_{pi} < \varepsilon_i \\ \Delta \sigma_{pi} < \Delta_i \end{cases}$		Не требуется			
$\begin{cases} \Delta \bar{x}_{pi} < \varepsilon_i \\ \Delta \sigma_{pi} > \Delta_i \end{cases}$		Настройка техпроцесса (Cpk)	Не требуется		Уточнение угловых значений моделей ($\pm 3\sigma$)
$\begin{cases} \Delta \bar{x}_{pi} > \varepsilon_i \\ \Delta \sigma_{pi} < \Delta_i \end{cases}$		Не требуется	Уточнение целевых значений Spice - моделей		
$\begin{cases} \Delta \bar{x}_{pi} > \varepsilon_i \\ \Delta \sigma_{pi} > \Delta_i \end{cases}$		Требует изменений режимов технологического процесса и повторной экстракции моделей с производственной линии			

Где: ε_i – критерий допустимого расхождения для математического ожидания параметра; Δ_i - критерий допустимого расхождения для среднеквадратичного отклонения.

Из этого следует, что оценка параметров распределения по предложенному методу дает возможность оценить степень соответствия базовой технологии ранее заявленным при первичной квалификации параметрам не только в части технологического процесса, но и правил проектирования, моделей и комплектов средств проектирования и привести их в соответствие. Такой метод дает возможность подтвердить и сохранить ранее заявленный квалификационный статус технологии через подтверждение соответствия параметров физической структуры текущему состоянию техпроцесса и прибегать к повторной экстракции моделей только при наихудшем сочетании критериальных параметров.

В третьей главе предложена структура информации, содержащей необходимые данные для анализа условий проектирования и производства СБИС и предложена методология оценки результативности макропроцесса в целом.

После того как все элементы базовой технологии разработаны и прошли квалификацию, которая поддерживается в условиях изменений, она применяется широким кругом разработчиков СБИС, которые по разному используют одни и те же элементы при проектировании схем различного назначения, при этом топология каждой схемы перед проектированием фотошаблонов проходит обязательный этап входного контроля на соответствие правилам проектирования

для базовых технологий. Анализ результатов такого контроля показал существенную разницу культур и методологии проектирования, которая выражается прежде всего в разной степени соответствия проектов правилам проектирования (Рис.7), и разным количеством итераций до получения положительных результатов по изделиям.

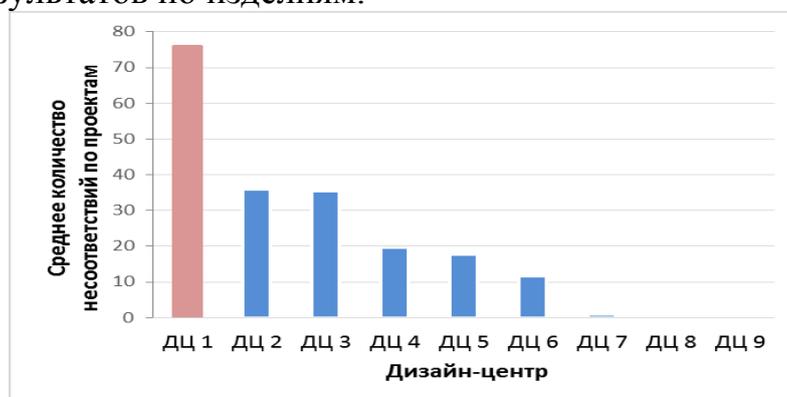


Рис.7. Распределение средней частоты несоответствий топологий кристаллов СБИС правилам проектирования для БТ за период 2016-2019г.

Результаты анализа более 200 проектов по базовым технологиям с проектными нормами 250 и 180 нм, подтверждают прямое влияние степени соответствия правилам проектирования на количество итераций (Таблица 4).

Таблица 4.

Значения параметров корреляционной связи		
Базовая технология	КНИ 250_6М_3.3.V (250 нм)	НСМО8D_6М_3.3V (180 нм)
Параметры корреляционной связи:		
Коэффициент ранговой корреляции Спирмена при сопоставлении количества итераций СБИС и отклонений топологии от правил проектирования БТ	0.411	0.303
Тип связи	Прямая	Прямая
Сила связи (по шкале Чеддока)	Умеренная	Умеренная
Статистическая значимость	+	+

Для проведения регулярного мониторинга и анализа с целью управления качеством макропроцесса, содержащего большие объемы данных, предложена и реализована зарегистрированная в Роспатенте база данных, структура которой представлена Рис.8. База данных формируется при помощи специализированного программного обеспечения и позволяет аккумулировать, хранить информацию по идентификационным признакам топологий кристаллов интегральных схем (дизайн-центр, разработчик, имя топологического файла, базовый маршрут, версия КСП, библиотеки моделей) и результатов проверки на соответствие правилам проектирования для базовых технологий с расшифровкой кодов несоответствия и возможностью поиска по любому заданному параметру. Использование базы данных позволяет проводить многофакторный анализ между элементами базовых технологий, закладываемых в конфигурацию конструкции

кристалла СБИС и показателями целевой функции качества - количеством итераций конструкции кристалла в производство.

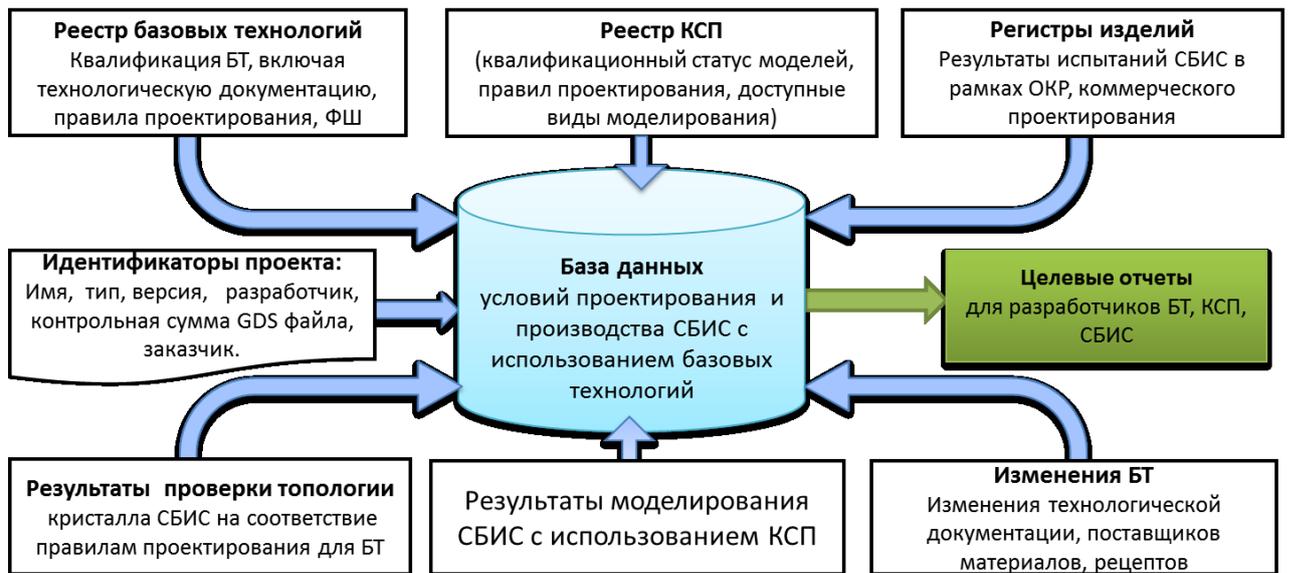


Рис.8. Структура базы данных для анализа условий проектирования, производства СБИС

В четвертой главе предложена структура специализированной СМК, обеспечивающая управление качеством макропроцесса проектирования и производства СБИС с использованием базовых технологий, управления рисками и изменениями (Рис.9).



Рис. 9. Система управления качеством базовых технологий

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы
В приложениях приведены акты внедрения системы менеджмента качества и базы данных для анализа результативности процесса проектирования и производства СБИС, разработанные при участии автора.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Проведен анализ и выявлены особенности реализации базовых технологий в РФ, касающиеся проектирования производства СБИС в условиях мелкосерийного производства с применением технологии MPW (мульти-проектных пластин) и ресурсных ограничений, которые делают невозможным применение зарубежного опыта и требуют развития собственной нормативной базы по управлению качеством процессов проектирования и производства СБИС с использованием БТ.

2. Обоснована структура процессов проектирования и производства СБИС как единого макропроцесса, определены критически важные элементы и связи между ними, влияющие на результативность. Предложены инструменты квалификации макропроцесса в целом и его составных элементов.

3. Выявлены основные факторы изменчивости, которые оказывают влияние на воспроизводимость моделей библиотечных элементов БТ. Предложена методика ускоренной оценки влияния изменений на воспроизводимость базовой технологии, обеспечивающая соответствие базовой технологии квалификационному статусу при воздействии внешних факторов.

4. Проведены статистические исследования и корреляционный анализ влияния условий проектирования на количество корректировок конструкции СБИС и последующих итераций в производство. Выявлена зависимость количества итераций от степени соблюдения правил проектирования для базовых технологий, статистически подтвержденная для различных базовых технологий (250 нм, 180 нм) и различных дизайн-центров.

5. Предложена специализированная система управления качеством БТ, которая создает контролируемые условия для разработки элементов базовой технологий, включая КСП и СБИС, инструменты оценки квалификационного статуса этих элементов, определяет ответственность в управлении и санкционировании изменений, управлении и снижении рисков. Квалифицированы 18 базовых технологий с 64 опциями.

6. Результаты работы внедрены в научно-исследовательском институте молекулярной электроники (АО «НИИМЭ») и АО «Микрон». Применение разработанных процедур СМК и квалифицированных БТ и КСП позволило снизить среднее количество несоответствий топологий правилам проектирования перед запуском изготовления партий прототипов разрабатываемых СБИС на 15 - 20% по сравнению с периодом до их внедрения. В свою очередь, анализ базы данных процесса проектирования СБИС показывает возможность уменьшения количества запускаемых партий прототипов СБИС на 5-10% вследствие такого уменьшения несоответствий топологий правилам проектирования.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК «Минобрнауки» России:

1. Проблемы и задачи развития системы менеджмента качества процессов проектирования СБИС / Королева А.Н. [и др.] // Электронная техника. Серия 3 «Микроэлектроника». 2019. №3. С. 61-66. (0,6 п.л./ 0,4 п.л.)
2. Проблемы и задачи системы управления изменениями базовых технологий микроэлектроники / Королева А.Н. [и др.] // Электронная техника. Серия 3 «Микроэлектроника». 2020. №2. С. 26-34. (0,7 п.л./ 0,5 п.л.)
3. Системы взаимодействия различных типов организаций разработчиков и изготовителей СБИС и проблемы создания результативных организационно-технических интерфейсов / Королева А.Н. [и др.] // Наноиндустрия. 2020. Т. 13. №S5(102). С. 201-205. (0,7 п.л./ 0,5 п.л.)
4. Королева А.Н. Информационно-аналитическое обеспечение процессов проектирования и производства СБИС с использованием базовых технологий // Электронная техника. Серия 3 «Микроэлектроника. 2021. №1. С. 31-36. (0,6 п.л.)

В других изданиях:

1. База данных результатов контроля топологий кристаллов интегральных схем на соответствие требованиям правил проектирования для базовых технологий («Интеграция-1»). Свидетельство государственной регистрации №RU2021620466. / Королева А.Н. [и др.]; опублик. 11.03.2021.
2. Роль и проблемы стандартизации в управлении рисками при взаимодействии разработчиков и изготовителей ЭКБ / Королева А.Н. [и др.] // Сборник докладов. Российская научно-техническая конференция с международным участием «Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике» (г. Москва, МИРЭА, апрель 2019 г.), Т.2, С. 440-446. (0,4 п.л./ 0,2 п.л.)
3. Системы взаимодействия различных типов организаций разработчиков и изготовителей СБИС и проблемы создания результативных организационно-технических интерфейсов / Королева А.Н. [и др.] // Сборник трудов конференции «Микроэлектроника» // Наноиндустрия.-2020.Т. 13 №S4(99). С. 166-168. (0,4 п.л./ 0,2 п.л.)
4. Панасюк В.Н. Королева А.Н. Управление процессами СМК компании при корпоративных изменениях. Труды Всероссийской конференции «Управление качеством» (г. Москва, МАИ, март 2019). С.154-156 (0,3 п.л./ 0,1 п.л.)