

На правах рукописи



Рыбаков Илья Михайлович

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА СИНТЕЗА ЦИФРОВЫХ
ДВОЙНИКОВ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ
НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ МЕЖМОДЕЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ**

**Специальность 2.2.9. Проектирование и технология
приборостроения и радиоэлектронной аппаратуры**

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пензенский государственный университет».

Официальные оппоненты: **Львов Алексей Арленович**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Саратовский государственный
технический университет имени Гагарина
Ю. А.», заведующий кафедрой
«Радиоэлектроника и телекоммуникации»;

Пиганов Михаил Николаевич,
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Самарский национальный ис-
следовательский университет имени акаде-
мика С. П. Королева», профессор кафедры
«Конструирование и технология электрон-
ных систем и устройств»;

Ахобадзе Гурами Николаевич,
доктор технических наук, старший научный
сотрудник, «Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки Институт
проблем управления им. В.А.Трапезникова»
РАН, ведущий научный сотрудник лаборато-
рии № 69 «Телекоммуникационные
системы»

Ведущая организация – ФГБУН Институт радиотехники и электро-
ники имени В. А. Котельникова РАН

Защита диссертации состоится «___» _____ 2026 г. в __ часов на засе-
дании диссертационного совета 24.2.331.16 в Московском государственном
техническом университете им. Н. Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, ул.
2-я Бауманская, д. 5 стр. 1.

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

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим
направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного
совета.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.
Телефон для справок 8 (499) 263-66-33 *3628.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.331.16,
кандидат технических наук, доцент



Сырицкий А. Б.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Инновации в проектировании и технологии радиоэлектронной аппаратуры, развитие методологических баз анализа, решение вопросов теории проектирования и технологии приборостроения, прогнозирование надежности сложных электронных устройств – все это в современных технических устройствах лежит в основе развития и дает импульс для перехода на новый уровень реализации систем радиоэлектронной аппаратуры нового поколения. В современной теории проектирования и технологии радиоэлектронной аппаратуры появилась новая тенденция роста производительности за счет увеличения количества самих устройств и их объединения, что требует развития межмодельного взаимодействия для эффективного управления и контроля сложными системами. В связи с этим особо актуальной становится проблема создания адекватных и реалистичных моделей цифровых двойников (ЦД) для прогнозирования надежности сложной радиоэлектронной аппаратуры на ранних этапах проектирования, что также требует межмодельного взаимодействия. В связи с этим предлагается создание новой фундаментальной и теоретической базы, основанной на моделировании сложных технических систем с учетом межмодельного взаимодействия. При этом анализ устойчивости при внешних дестабилизирующих факторах путем применения информационно-измерительных систем и математического моделирования является первым и главным средством для проектирования и производства высоконадежной электронной аппаратуры. Широкий спектр существующих информационно-измерительных систем позволяет проводить измерения параметров и моделировать работу радиоэлектронной аппаратуры, но в большинстве случаев модели, используемые при исследованиях, имеют упрощенную структуру из-за потребности в больших вычислительных мощностях, что отрицательно отражается на точности получаемых результатов и требует совершенствования межмодельного взаимодействия относительно существующих систем.

Межмодельное взаимодействие сложных систем подразумевает несколько этапов создания различного рода моделей (концептуальная, информационная, тепловая, электрическая, физическая, математическая и т.д.). Серьезной проблемой в создании единого изделия (системы) является переход передачи информации между этими этапами. Затраты на моделирование сложной системы становятся соизмеримыми с затратами на создание реальной системы, во многих случаях в ходе моделирования создаются реальные прототипы систем. На них отрабатываются (оптимизируются) параметры и передаются на предыдущие этапы для внесения корректировок. И таких переходов может быть множество, в работе решается проблема снижения количества циклов создания реальных прототипов за счет снижения погрешности передачи информации между моделями, повышения информационной точности на основе теории межмодельного взаимодействия, что позволяет существенно снизить затраты на создание новой техники.

Основной концептуальной идеей в работе является проектирование детализированных моделей конструкции радиоэлектронной аппаратуры, которые позволяют в процессе проектирования изделия проводить имитационные испытания точных цифровых двойников с учетом межмодельного взаимодействия. Создание базы имитационных и информационных моделей позволит в дальнейшем с помощью быстрого прототипирования проводить экспериментальные исследования образцов с получением обратной связи. Это позволит оперативно вносить требуемые изменения в конструкцию и технологию изготовления, что существенно повлияет на степень достоверности определения надежности и качества получаемых сложных электронных устройств с учетом межмодельного взаимодействия. При этом детализированность имитационных и информационных моделей можно варьировать для снижения вычислительной мощности и адаптации под текущий уровень проектирования, что улучшит межмодельное взаимодействие. Решение поставленной проблемы для технических систем позволит создать новую теорию расширенного анализа выявления сложно детектируемых факторов и улучшит межмодельное взаимодействие. В будущем это позволит получить качественно новые условия анализа характеристик электронных устройств и развить теоретические основы создания интеллектуального прогнозирования надежности радиоэлектронной аппаратуры. Потребность данных исследований обусловлена высоким уровнем миниатюризации и применением быстродействующей цифровой радиоэлектронной аппаратуры, что в стратегических отраслях техники является решающим фактором, влияющим на надежность всего комплекса изделия. Также актуальность исследований обусловлена необходимостью создания программно-аппаратного комплекса для разработки имитационных и информационных моделей, которые являются их электронными копиями и имитируют различные режимы работы при заданных внешних воздействующих факторах, что улучшит межмодельное взаимодействие.

Анализ современного состояния проблем проектирования информационно-измерительных и управляющих систем показывает реальную потребность в создании таких систем измерения и управления высшего уровня, а также решения проблем управления такими системами. При проектировании сложных электронных блоков и систем бортовой радиоэлектроники использование имитационных и информационных моделей высокой детализации позволит учитывать составляющие внешних воздействующих факторов, таких как вибрационные и тепловые воздействия для точного описания комплексной вибрационно-тепловой картины при работе и эксплуатации таких систем на ранних стадиях проектирования, которые ранее на данном этапе учесть было невозможно. Следовательно, создание детализированной конструкции электронной аппаратуры для ее исследования при различных внешних воздействующих факторах и развитие теоретических основ расширенного анализа выявления сложно детектируемых факторов с учетом использования системы измерения и управления высшего уровня является важной и актуальной задачей. Создание метода передач моделей конструкции электронной аппаратуры

с адаптивным выбором ее детализации и применяемых компонентов подчеркивает актуальность и является основой развития математического аппарата систем имитационного моделирования, путем экспериментальных, аналитических и математических методов анализа, которые лягут в основу программной базы данных для прогнозирования надежности сложных электронных устройств радиоэлектронной аппаратуры.

Теоретические основы проведения научных исследований базируются на трудах отечественных и зарубежных ученых: Е. Н. Маквецова, А. М. Тартаковского, В. М. Шляндина, Е. А. Ломтева, Е. А. Мокрова, Э. К. Шахова, А. Л. Шестакова, В. И. Батищева, В. Н. Белолипецкого, В. А. Грановского, А. А. Данилова. Среди зарубежных ученых следует отметить Т. М. Алиева, Я. Е. Беленького, А. А. Брагина, Е. Т. Володарского, Э. Вошни, М. Крауса, А. А. Тер-Хачатурова, Ю. М. Туза, Maurice Cox, Alistair Forbes.

Развитие методов вибрационного и теплового анализа для создания единого подхода к надежности-ориентированному проектированию радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) осуществлено в работах Ю. Н. Кофанова, Л. Н. Кечиева, В. А. Шахнова, А. С. Шалумова.

Анализ особенностей применения натурного эксперимента при исследовании прототипов конструкций проведен в работах С. У. Увайсова.

Исследование вопросов информативности электрофизических параметров (Л. Г. Дубицкий, Г. Б. Сердюка и др.) показало принципиальную возможность индивидуального прогнозирования состояния работоспособности РЭА. В работе В. Н. Воронцова предполагается, что среди множества математических параметров, характеризующих РЭА, имеются параметры, чувствительные к зарождению отказа.

Вопросам оценки надежности и остаточного ресурса посвящены работы отечественных ученых Н. К. Юркова, Н. А. Северцева, Г. С. Садыхова, В. П. Савченко и др. Среди зарубежных ученых наиболее интересные результаты получили А. Wald, J. Wolfowitz, L. Weiss, T. Anderson, G. Lorden и др. Также среди зарубежных ученых следует отметить работы М. Pecht, D. Goodman, P. Mawby, связанные с мониторингом показателей надежности. В трудах R. B. Chinnam, Z. Bosnic рассматриваются вопросы, связанные с созданием систем индивидуального прогнозирования надежности.

Целью работы является создание методов и средств проектирования радиоэлектронной аппаратуры с применением теории межмодельного взаимодействия на основе имитационного и информационного моделирования.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Провести анализ методов и средств создания современных систем проектирования радиоэлектронной аппаратуры с многокритериальной параметрической зависимостью свойств исследуемой конструкции и поиском путей адекватного решения задач повышения точности имитационного моделирования.
2. Предложить новый подход к измерению параметров и характеристик радиоэлектронной аппаратуры на основе имитационных и информационных

моделей, позволяющий расширить базу теоретических знаний по прогнозированию надежности информационно-измерительных и управляющих систем.

3. Создать математические модели для расчета и анализа надежностных характеристик радиоэлектронной аппаратуры на основе корреляционной оценки адекватности имитационных и информационных моделей с экспериментальными результатами.

4. Разработать метод анализа и прогнозирования надежности радиоэлектронной аппаратуры при адаптивном выборе детализации конструкции и расширенном анализе выявления сложно детектируемых факторов.

5. Создать алгоритм проектирования, реализующий процесс передачи моделей по уровням конструирования с применением имитационных и информационных моделей радиоэлектронной аппаратуры в информационно-измерительных и управляющих системах.

6. Создать программно-аппаратный комплекс, реализующий возможность интеллектуального прогнозирования конструкторско-технологических данных имитационных и информационных моделей радиоэлектронной аппаратуры с возможностью адаптивного выбора детализации конструкции.

7. Разработать структуру информационно-измерительной и управляющей системы анализа и прогнозирования надежности на этапах жизненного цикла радиоэлектронной аппаратуры с учетом имитационных и информационных моделей.

8. Экспериментально подтвердить теоретические положения создания информационно-измерительных и управляющих систем на основе внедрения методов и средств имитационного и информационного моделирования радиоэлектронной аппаратуры для проектирования систем нового поколения.

Научная новизна работы:

1. Предложен новый метод анализа конструкций радиоэлектронной аппаратуры, отличающийся учетом многокритериальной параметрической зависимости свойств исследуемой конструкции, позволяющий повысить эффективность решения исследовательских задач, учесть межмодельное взаимодействие и провести оптимизацию исследуемой конструкции.

2. Впервые предложены усовершенствованные математические модели расчета, отличающиеся использованием имитационных и информационных моделей радиоэлектронной аппаратуры, позволяющие расширить оценку влияния негативных воздействующих факторов на конструкцию.

3. Разработана методика прогнозирования надежности радиоэлектронной аппаратуры на этапах жизненного цикла, отличающаяся адаптивным выбором детализации конструкции, позволяющая ускорить выявление сложно детектируемых факторов.

4. Разработан алгоритм передачи моделей радиоэлектронной аппаратуры по уровням конструирования, отличающийся применением программно-аппаратного комплекса расширенного анализа сложно детектируемых факторов в информационно-измерительной и управляющей системе, реализующий про-

цесс корректировки конструкции получаемой аппаратуры с оценкой надежных характеристик, что обеспечивает снижение срока проектирования в зависимости от сложности конструкции.

5. Разработана информационно-измерительная и управляющая система прогнозирования надежности радиоэлектронной аппаратуры, отличающаяся внедрением автономного блока имитации работы изделия с предварительным имитационным моделированием ЦД, позволяющая повысить степень выявления дефектов при высокой степени корреляции экспериментального образца и имитационной модели.

6. Обоснован новый подход к измерению параметров и характеристик радиоэлектронной аппаратуры, отличающийся применением комплексного анализа, базы данных, имитационных и информационных моделей, позволяющий развить теоретические основы прогнозирования надежности радиоэлектроники и повысить достоверность результатов измерения в информационно-измерительной и управляющей системе.

Практическая значимость и результаты внедрения

1. Полученные в диссертации теоретические и практические результаты внедрены в АО «ЦНИРТИ имени академика А. И. Берга» (входит в состав концерна воздушно-космической обороны «Алмаз-Антей») путем применения в производственном процессе методики прогнозирования надежности радиоэлектронной аппаратуры на этапах жизненного цикла с адаптивным выбором детализации конструкции.

2. Предложенный в диссертации алгоритм передачи моделей радиоэлектронной аппаратуры по уровням конструирования с применением программно-аппаратного комплекса внедрен в рамках программы совместных исследований и разработок в АО НТЦ «Атлас».

3. В практике работы ООО «НПО НаукаСофт» в ходе НИР применены имитационные модели для комплексного анализа надежности радиоэлектронной аппаратуры.

4. На базе АО «НИИФИ» экспериментально продемонстрирована и внедрена информационно-измерительная и управляющая система прогнозирования надежности радиоэлектронной аппаратуры, повышающая степень выявления дефектов при высокой степени адекватности экспериментального образца и имитационной модели электронной аппаратуры.

5. Полученные математические модели, метод и комплекс программ использованы в учебном процессе кафедры «Конструирование и производство радиоаппаратуры» ФГБОУ ВО «ПГУ».

Методы исследований. Для решения поставленных задач в работе использованы методы статистической обработки данных, теории измерений, математические методы создания функциональных зависимостей. Методы, основанные на использовании теории вибрационной устойчивости и теплопроводности для разработки методики исследования, методы математического и имитационного моделирования, методы планирования эксперимента. Методы

объектно-ориентированного программирования и создания баз данных для реализации компьютерного программного комплекса.

Достоверность полученных научных результатов, выводов и рекомендаций диссертационной работы подтверждена экспериментально в ходе выполнения совместных исследований ФГБОУ ВО «ПГУ» и АО «НИИФИ». Измерения и расчеты, представленные в работе, выполнены с помощью поверенного оборудования и по стандартизованным методикам.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Метод анализа конструкций радиоэлектронной аппаратуры, позволяющий повысить эффективность решения исследовательских задач, межмодельное взаимодействие и оптимизацию исследуемой конструкции ориентировочно на 25 % (**п. 1 паспорта специальности 2.2.9**).

2. Математические модели расчета, позволяющие расширить не менее чем в 2 раза оценку влияния негативных воздействующих факторов на конструкцию радиоэлектронной аппаратуры (**п. 3 паспорта специальности 2.2.9**).

3. Методика прогнозирования надежности радиоэлектронной аппаратуры на этапах жизненного цикла, позволяющая ускорить проведение анализа выявления сложно детектируемых факторов в среднем на 15 % (**п. 7 паспорта специальности 2.2.9**).

4. Алгоритм взаимодействия моделей радиоэлектронной аппаратуры по уровням конструирования, реализующий процесс корректировки конструкции получаемой аппаратуры с оценкой надежностных характеристик для обеспечения снижения срока проектирования в зависимости от сложности конструкции от 10 до 40 % с кратным экономическим эффектом (**п. 5 паспорта специальности 2.2.9**).

5. Информационно-измерительная и управляющая система прогнозирования надежности радиоэлектронной аппаратуры, позволяющая повысить выявляемость дефектов в пределах 25–30 % при высокой степени корреляции экспериментального образца и имитационной модели ЦД (**п. 8 паспорта специальности 2.2.9**).

6. Новый подход «Имитационно-информационный анализ» к измерению параметров и характеристик электронной аппаратуры, позволяющий развить теоретические основы прогнозирования надежности радиоэлектронной аппаратуры и в пределах 10 % повысить достоверность результатов измерения в информационно-измерительной и управляющей системе (**п. 2 паспорта специальности 2.2.9**).

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы были представлены на международных, всероссийских и межвузовских научно-практических и научно-технических конференциях, семинарах, симпозиумах, электронных ресурсах: International Conference «Actual Issues of Mechanical Engineering» (AIME) (Россия, г. Новосибирск, 2018); International Symposium «Intelligent Systems» (INTELS) (Россия, г. Санкт-Петербург, 2018); XXI Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM) (Россия, г. Санкт-Петербург, 2016, 2018); «Ural Symposium on

Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology» (USBREIT) (Россия, г. Екатеринбург, 2018); «International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering» (APEDE) (Россия, г. Саратов, 2018); «Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies» (MWENT) (Россия, г. Москва, 2018); Международной научно-технической конференции «ПромИнжиниринг» (ICIE) (Сочи, 2022–2025); XX Научно-технической конференции «Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н. Е. Жуковского» (Москва, 2022–2023); Международном симпозиуме «Надежность и качество» (Пенза, 2013–2025) и др.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 39 работ, в том числе 1 монография, 18 статей в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК при Минобрнауки России, 10 статей в изданиях, индексируемых Scopus и Web of Science, 2 патента, 8 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Личный вклад Рыбакова И. М. заключается в создании новых методов расширенного анализа конструкций радиоэлектронной аппаратуры для выявления сложно детектируемых факторов и повышения точности результатов анализа в информационно-измерительной и управляющей системе прогнозирования надежности. Кроме того, развит аппарат имитационного моделирования для изучения нового класса исследовательских задач по объяснению различных явлений и эффектов возникновения дефектов с помощью моделей. Решены задачи прогнозирования надежности радиоэлектронной аппаратуры с применением моделей радиоэлектронной аппаратуры для выявления сложно детектируемых факторов и повышения точности результатов анализа в информационно-измерительной и управляющей системе. Также создана унифицировано-адаптивная программа имитационного моделирования параметров электронной аппаратуры с применением нового метода расширенного анализа конструкций радиоэлектронной аппаратуры для выявления сложно детектируемых факторов, которая зарегистрирована в качестве результатов интеллектуальной деятельности.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из перечня сокращений, введения, 6 глав, общих выводов и заключения, списка литературы, включающего 186 наименований. Общий объем работы 304 страниц, включая 87 рисунков и 14 таблиц.

Выражаю благодарность профессору Юркову Николаю Кондратьевичу за поддержку работы и консультирование по 3 главе диссертации.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность, своевременность, целесообразность постановки задач диссертационного исследования и практическая потребность в их решении. Сформулированы цель и основные направления исследований, выбраны объект и предмет исследований, охарактеризована научная новизна и практическая значимость результатов, выделены основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации.

В Главе 1 автором проведен анализ состояния и поиск путей решения проблемы повышения точности имитационного и информационного моделирования радиоэлектронной аппаратуры. Обобщены теоретические основы прогнозирования надежности радиоэлектронной аппаратуры с помощью информационно-измерительных и управляющих систем.

Контроль и измерение параметров радиоэлектронной аппаратуры в основе своей строятся на принципах поиска наилучших технических решений и управления информационными потоками данных уже на ранних этапах разработки. Поэтому создание высоконадежной электроники требует разработки адекватных моделей ЦД, способных с высокой точностью имитировать реальный объект создаваемого оборудования. Данное условие ставит современный процесс разработки радиоэлектронной аппаратуры на пути повышения точности имитационных моделей ЦД с возможностью интеграции их в информационно-измерительные и управляющие системы. Осуществив данную интеграцию, разработчики радиоэлектронной аппаратуры получают существенный прирост не только в эффективности и скорости ее разработки, но и обеспечат развитие научного и теоретического потенциала перспективных высокотехнологичных образцов электроники ракетно-космической техники.

В связи с этим возникает проблема обеспечения регулирования процесса взаимодействия информационно-измерительных и управляющих систем с имитационными и информационными моделями радиоэлектронной аппаратуры. Решением является применение процесса интеллектуального взаимодействия и оптимизации исследуемой конструкции средствами моделирования ЦД с учетом многокритериальной параметрической зависимости свойств исследуемой конструкции и адаптивным выбором детализации применяемых компонентов. Общая концепция интеллектуального взаимодействия и оптимизации исследуемой конструкции в информационно-измерительных и управляющих системах представлена на Рисунке 1.

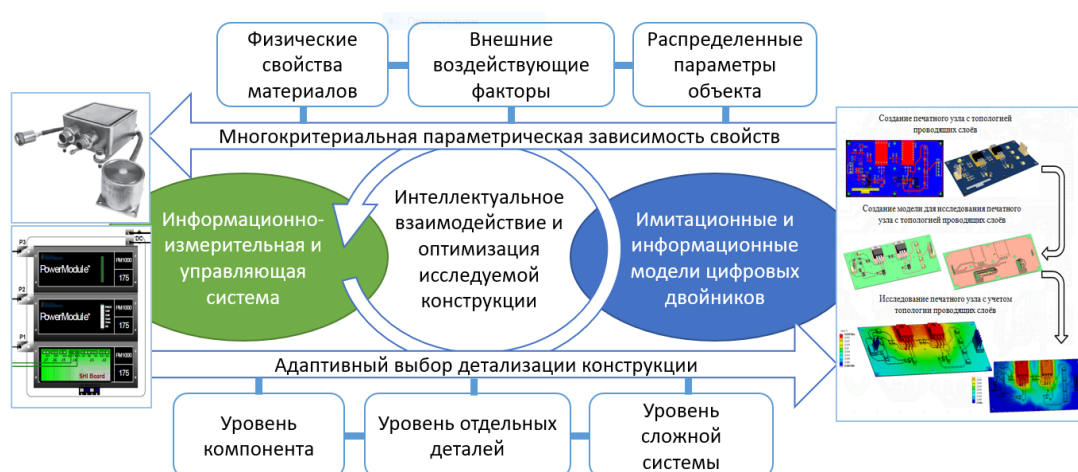


Рисунок 1 Общая концепция интеллектуального взаимодействия и оптимизации исследуемой конструкции РЭА в информационно-измерительных и управляющих системах с применением имитационных и информационных моделей

Соответственно глобальной проблемой является обеспечение наилучшей связи между составляющими информационно-измерительной и управляющей системы и имитационными и информационными моделями для обеспечения требуемых надежностных характеристик.

В работе также решается частная проблема улучшения измерительной структуры датчик – вторичный преобразователь. В структуре информационно-измерительной системы объектом исследования являются датчик и объект управления, между которыми происходит контроль и измерение требуемых параметров. Обработка измерительной информации с датчика происходит во вторичном преобразователе, под которым понимается электронный блок. В качестве датчика будем рассматривать измерительный преобразователь в виде акселерометра, который работает в связке с электронной аппаратурой вторичного преобразователя. Данная структура характеризуется сложными процессами преобразования измерительной информации во вторичном преобразователе и постоянным усовершенствованием самого детектора, который воспринимает измеряемую величину. Так, в работе предложен метод анализа конструкций электронной аппаратуры, в котором происходит анализ с помощью имитационных и информационных моделей ЦД. Так как современный процесс разработки электроники не обходится без включения в этапы разработки имитационного моделирования, требуется оценка полученных результатов моделирования. В связи с этим актуальным является усовершенствование методов анализа конструкции электронной аппаратуры путем внедрения в процесс многокритериальной параметрической зависимости свойств исследуемой конструкции, представленной на Рисунке 2.



Рисунок 2 Метод анализа конструкций радиоэлектронной аппаратуры с учетом многокритериальной параметрической зависимости свойств исследуемой конструкции

Разработанный метод основывается на многокритериальной параметрической зависимости свойств структуры объекта исследования, который заключается в следующем. Процесс разработки электронной аппаратуры на первом этапе сопровождается сбором данных об уже созданных образцах и определением требуемых параметров. В современном представлении данного процесса сбор данных характеризуется не только анализом уже созданных образцов, но и обращением к базам данных ЦД аналогичных конструкций. Данный процесс позволяет нам уже на этапе анализа технического задания более точно определить концепцию вновь создаваемого устройства. На следующем этапе создается модель конкретного устройства, но в качестве улучшения предлагается создавать параметрически адаптированную модель, где внедряется не только имитационная модель конструкции, но и вводятся изменяемые параметры, влияющие на обеспечение высоких надежностных характеристик, которые являются критически важными для работоспособности разрабатываемой электроники.

В Главе 2 представлен новый способ анализа конструкции радиоэлектронной аппаратуры с помощью имитационных и информационных моделей, позволяющий повысить надежностные характеристики радиоэлектронной аппаратуры при использовании многокритериальной параметрической зависимости свойств исследуемой конструкции. Несмотря на широкое применение средств автоматизированной разработки в процессе современного создания электронной аппаратуры, началом разработки является анализ технического задания человеком, имеющим достаточную квалификацию, опыт и знание технологических процессов. На рисунке 3 представлена схема разработки электронной аппаратуры традиционными методами, в которой имеется ряд недостатков.

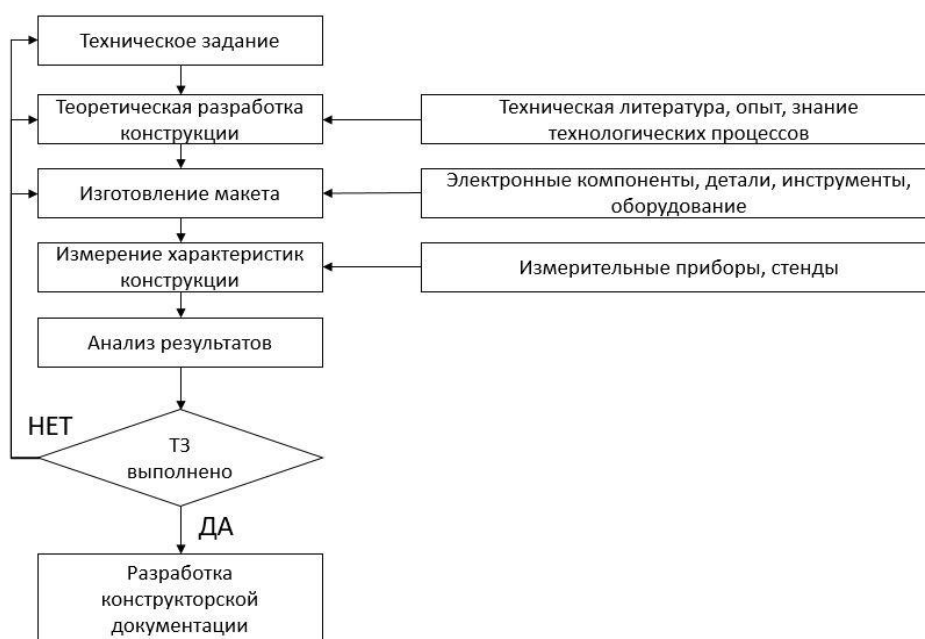


Рисунок 3 Схема процесса разработки радиоэлектронной аппаратуры традиционными методами

В связи с этим данная схема разработки электронной аппаратуры была усовершенствована путем включения блока применения современных информационных технологий. Применение автоматизированных процессов синтеза процессов компоновки, размещения, трассировки и составления имитационно-информационных моделей позволяет не только повысить скорость разработки электроники, но и отработать слабые места готовой конструкции. На Рисунке 4 представлена усовершенствованная схема разработки электронной аппаратуры.

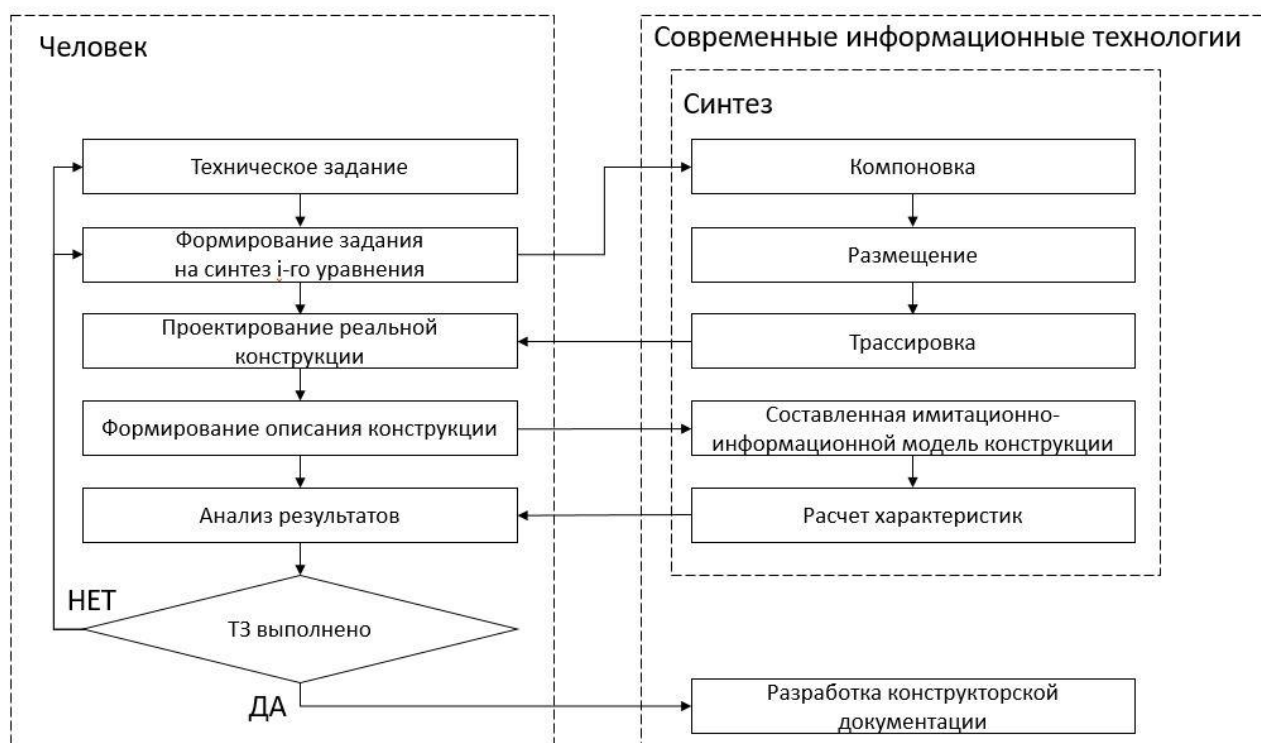


Рисунок 4 Усовершенствованная схема разработки радиоэлектронной аппаратуры с использованием средств автоматизированного проектирования

Из Рисунка 4 следует, что применение современных информационных технологий для разработки электронной аппаратуры является актуальной задачей анализа конструкции электронной аппаратуры с помощью имитационных и информационных моделей радиоэлектронной аппаратуры. Таким образом, в работе предложено усовершенствовать структуру путем внедрения в нее многокритериальной параметрической зависимости свойств исследуемой конструкции. На Рисунке 5 представлена структура имитационных и информационных моделей радиоэлектронной аппаратуры с параметрической зависимостью свойств исследуемой конструкции.

Структура, представленная на Рисунке 5, позволяет провести углубленный анализ материалов, который включает в себя подбор оптимальных физических свойств, сравнение с реальными свойствами завода-изготовителя и выявление зависимостей характеристик материала от внешних воздействующих

факторов. Анализ на уровне компонента электрической цепи включает в себя проведение предварительного моделирования электрической схемы с учетом электрических свойств с дальнейшим анализом электрической цепи в составе печатной платы и готовой составной части на уровне детали. Далее по возрастающей проводится анализ полученной конструкции на уровне сборки, где имеется возможность внести требуемые изменения в результате проведенного имитационного моделирования и отладить отдельные сборки разрабатываемой конструкции. Высшим этапом является анализ полученной системы электроники в существующих информационно-измерительных управляющих системах и выявление критических параметров работы радиоэлектронной аппаратуры. Анализ существующих информационно-измерительных и управляющих систем приведен в тексте диссертации. Таким образом, положение 1 считаем доказанным.

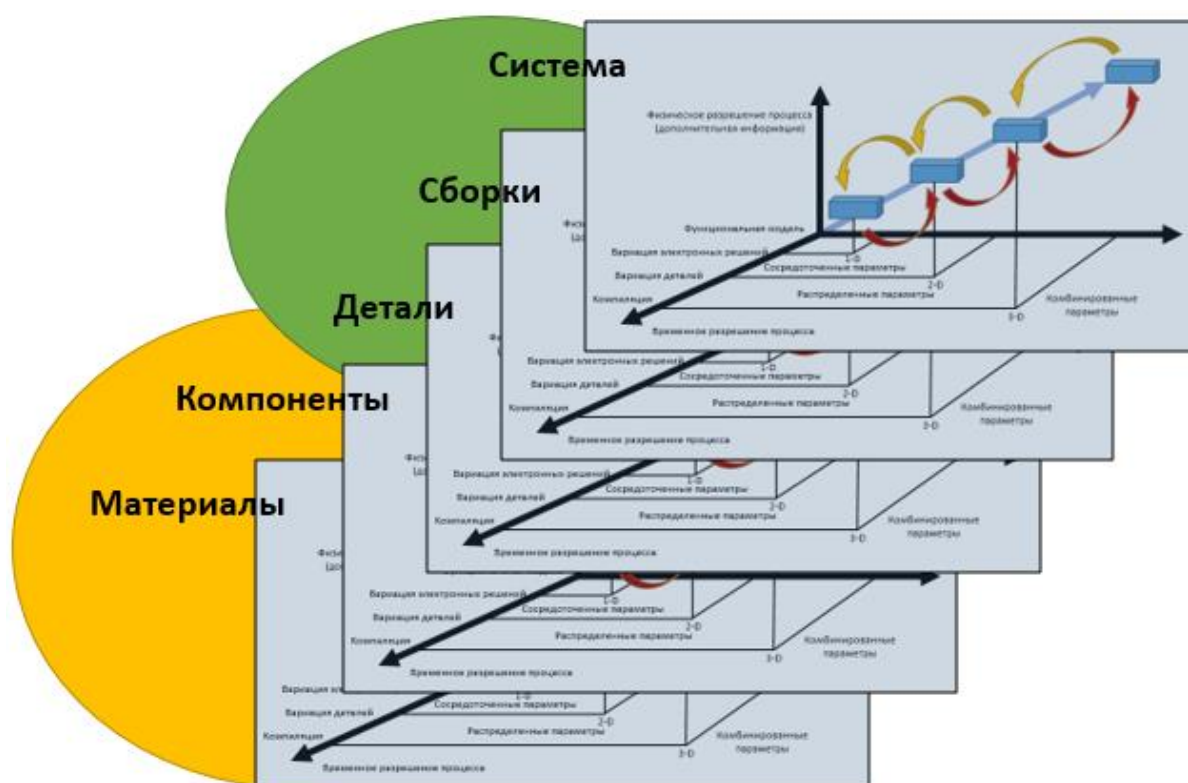


Рисунок 5 Структура имитационных и информационных моделей радиоэлектронной аппаратуры

В Главе 3 представлены усовершенствованные математические модели расчета для создания имитационных и информационных моделей радиоэлектронной аппаратуры, обеспечивающие выявление негативных воздействующих факторов с применением расширенного анализа выявления сложно детектируемых факторов. В моделях ЦД механических и гидроаэродинамических процессов должны быть отражены свойства упругости и вязкости среды. По-

тери энергии на внутреннее трение в твердых телах, которые необходимо учитывать во многих случаях, при моделировании удобнее всего учитывать также в виде вязкости твердого тела. В классической физике применяются два подхода к описанию движения вещества: дифференциальный и интегральный. Законы, выраженные в дифференциальной форме, определяют движение в элементарном, бесконечно малом объеме. Цифровая модель представляет собой описание взаимодействия во времени элементов модели, достаточно малых для того, чтобы можно было считать все величины, характеризующие движение линейно, изменяющимися в пределах объема элемента. Поэтому для вывода усовершенствованной математической модели при моделировании следует в качестве исходных уравнений выбрать законы, выраженные в дифференциальной форме.

В случае малых деформаций обобщенный закон Гука предполагает прямую пропорциональную зависимость между деформациями и напряжениями:

$$\varepsilon_{ij} = \sum_{ijkl} C_{ijkl} \sigma_{kl}, \quad (1)$$

где ε_{ij} – компоненты деформаций; σ_{kl} – компоненты напряжений; C_{ijkl} – коэффициенты пропорциональности, образующие тензор коэффициентов упругости; i, j, k и l – индексы, принимающие значения индексов координатных осей.

В общем случае тензор C_{ijkl} содержит несколько коэффициентов. Различные свойства симметрии среды уменьшают это число. Например, для изотропных тел число независимых коэффициентов становится равным двум, и обобщенный закон Гука принимает вид

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ii} &= \frac{1}{E} \sigma_{ii} - \frac{\nu}{E} \sigma_{jj} - \frac{\nu}{E} \sigma_{kk}; \\ \varepsilon_{ij} &= \frac{1}{\mu} \sigma_{ij}, \end{aligned} \quad (2)$$

где E – модуль Юнга; ν – коэффициент Пуассона; μ – коэффициент Ламэ (модуль сдвига), $i \neq j \neq k$.

При моделировании требуется обратная зависимость – напряжений от деформации:

$$\begin{aligned} \sigma_{ii} &= (\lambda + 2\mu) \varepsilon_{ii} + \lambda \varepsilon_{jj} + \lambda \varepsilon_{kk}; \\ \sigma_{ij} &= \mu \varepsilon_{ij}, \end{aligned} \quad (3)$$

где λ и μ – коэффициенты Ламэ, которые можно выразить через модуль Юнга и коэффициент Пуассона:

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}. \quad (4)$$

Аналогично записываются выражения для закона Гука в случае жидких и газообразных тел. Чтобы избежать недоразумений, будем обозначать все модели и коэффициенты, относящиеся к жидким и газообразным телам, индексом l , например модуль Юнга E_l , коэффициент Пуассона ν_l , коэффициенты Ламэ λ_l и μ_l .

В случае жидких и газообразных тел связь между напряжениями и скоростями деформаций выражается обобщенным законом Стокса:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \sum_{ijkl} D_{ijkl} \sigma_{kl}, \quad (5)$$

где $\dot{\epsilon}_{ij}$ – компоненты скоростей деформаций; D_{ijkl} – тензор коэффициентов вязкости.

В процессе моделирования разделение деформаций необходимо производить в каждом шаге вычислений, что требует дополнительных затрат времени. Поэтому в данном случае нужно пренебречь или всеми упругими, или всеми вязкими напряжениями. И только когда неизвестно соотношение между этими напряжениями, следует производить разделение.

Разделение связано с интегрированием уравнения, учитывающего равенство напряжений в уравнении Максвелла, которое для случая одномерного растяжения или сжатия можно записать в виде

$$(\lambda + 2\mu)\epsilon_H = (\zeta + 2\eta)\epsilon_N, \quad (6)$$

где ϵ_H – упругие деформации; ϵ_N – вязкие деформации.

Интегрирование уравнения (6) при условии $\epsilon_H + \epsilon_N = \epsilon$, где ϵ – известные нам в каждом шаге вычислений полные деформации, возможно только при условии, что закон изменения полных деформаций во времени заранее известен. Поскольку рассматривается один шаг по времени, можно считать, что скорость полных деформаций изменения во времени вычисляется по линейному закону:

$$\epsilon = \frac{\epsilon_\tau}{\tau} t,$$

где ϵ_τ – средняя для данного шага величина скорости полной деформации.

Интегрируя уравнения (6), можно выделить величину вязких деформаций, которую они достигнут в течение шага вычислений:

$$\epsilon_N = \epsilon_{N_0} e^{-\frac{\lambda+2\mu}{\epsilon+2\eta}\tau} + \frac{\epsilon_\tau}{2}\tau, \quad (7)$$

где ϵ_{N_0} – величина деформаций в конце предыдущего шага вычислений.

Сравнивая величину вязких деформаций с величиной упругих деформаций, можно судить о том, какие деформации преобладают, и в соответствии с этим строить расчет или по напряжениям упругих, или по напряжениям вязких

деформаций. Расчет по преобладающим деформациям повысит его точность. Наконец, сравнивая ε_H и ε_N , можно пренебречь теми или иными деформациями. Расчет по формулам (7) осложняется тем, что его необходимо производить для всех видов деформаций. При построении цифровых двойников моделей физических процессов нам потребуются, кроме законов Гука и Стокса, еще принцип Даламбера и закон сохранения вещества (закон непрерывности).

Отражение в ЦД законов движения может быть произведено или непосредственной записью их в расчетные соотношения, или способом эквивалентного алгоритма. Поскольку эквивалентный алгоритм может только дополнять расчетные соотношения, в качестве основных уравнений можно выбрать уравнения движения жестко-вязкого тела, для которого такое дополнение не требуется.

Для составления расчетной части модели она разбивается на элементы, действие соседних элементов заменяется внешними силами или напряжениями, к элементу прикладываются массовые силы или силы инерции и составляются уравнения проекций всех сил на координатные оси. Рассмотрим случай прямоугольной системы координат для неоднородного тела.

В качестве искомых функций выберем перемещения U, V и W узлов сетки. Выразим деформации ε и скорости деформации $\dot{\varepsilon}$ через перемещения узлов. Например, деформации связи между узлами $(x + h_x, y, z)$ и (x, y, z) в направлении x (Рисунок 6) определяются разностным соотношением

$$\varepsilon_{xx} = \frac{1}{h_x} [U(x + h_x, y, z, t) - U(x, y, z, t)], \quad (8)$$

где h_x – шаг сетки в направлении x .

Для сравнения приведем условные обозначения разностных соотношений и сдвигов, принятые в теории разностных систем:

– разность «вперед»:

$$U_x = U(x + h_x, y, z, t) - U(x, y, z, t); \quad (9)$$

– разность «назад»

$$U_{\bar{x}} = U(x, y, z, t) - U(x - h_x, y, z, t); \quad (10)$$

– центральная разность:

$$U_{\circ x} = U(x + h_x, y, z, t) - U(x - h_x, y, z, t); \quad (11)$$

– сдвиг «вперед»:

$$U^{+x} = U(x + h_x, y, z, t); \quad (12)$$

– сдвиг «назад»:

$$U = U(x - h_x, y, z, t). \quad (13)$$

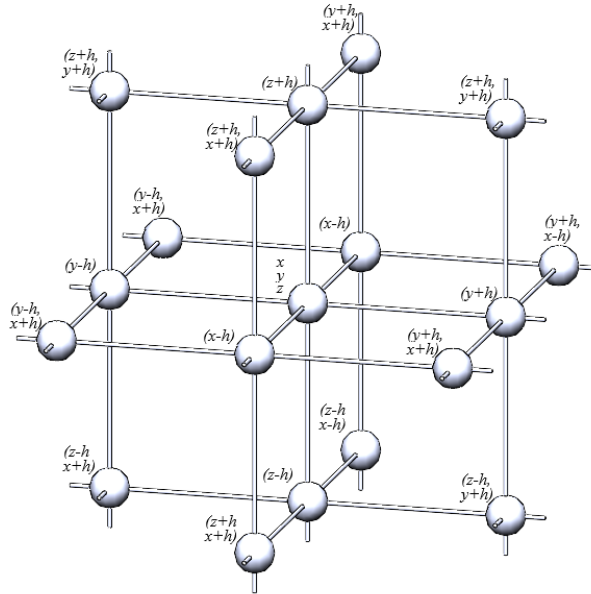


Рисунок 6 Обозначение расположения узлов в прямоугольной сетке

Аналогично определяются разностные соотношения и сдвиги по времени. Чтобы не путать индексы, обозначающие разности, с индексами, обозначающими направление, последние будем брать в квадратные скобки. Например, соотношение (8) теперь запишется в виде

$$\varepsilon_{[xx]}^{+\frac{x}{2}} = \frac{1}{h_x} U_x. \quad (14)$$

Сдвиг по координате на половину шага взят потому, что деформация вычислена для передней грани элемента. Аналогично для задней грани имеем

$$\varepsilon_{[xx]}^{-\frac{x}{2}} = \frac{1}{h_x} U_{\bar{x}}. \quad (15)$$

Для определения скоростей деформаций разностные соотношения будем записывать в виде

$$\dot{\varepsilon}_{[xx]}^{+\frac{x}{2}} = \frac{1}{h_x \tau} [U_x - U_{\bar{x}}^{\frac{t}{2}}]. \quad (16)$$

Сумма сил от нормальных упругих и вязких напряжений в направлении x , выраженная через перемещения в соответствии с (3) и (6), будет иметь вид

$$\begin{aligned}
& \varepsilon[\delta_{[xx]}^{+\frac{x}{2}} - \delta_{[xx]}^{-\frac{x}{2}}]h_y h_z = \\
& = \{h_y h_x [\frac{1}{h_x}(\lambda_x + 2\mu_x)U_x + \lambda_x \frac{1}{4h_y}(V_y^{+x} + V_y^\circ) + \\
& + \lambda_x \frac{1}{4h_y}(W_y^{+x} + W_y^\circ)] + \\
& + h_y h_z \frac{1}{\tau}[\frac{1}{h_x}(\zeta_x + 2\eta_x)U_x + \\
& + \frac{1}{4h_y}\zeta_x(V_y^{+x} + V_y^\circ) + \\
& + \frac{1}{4h_z}\zeta_x(W_z^{+x} + W_z^\circ)]\}_-.
\end{aligned} \tag{17}$$

Аналогично записывается сумма сил от касательных напряжений. После суммирования всех сил в направлении x и представления ускорений в разностной форме получим уравнения равновесия в виде

$$\begin{aligned}
& \{(A_x + A\eta_x)U_x - A\eta_x U_x^{-t} + (B_x + B\eta_x)[V_y^{+x} + V_y^\circ] - \\
& - B\eta_x[V_y^{+x-t} + V_y^{-t}] + (C_x + C\eta_x)[W_z^{+x} + W_z^\circ] - \\
& - C\eta_x[W_z^{+x-t} + W_z^{-t}]\}_- + \\
& + \{(D_x + D\eta_x)U_y - D\eta_x U_y^{-t} + (H_x + H\eta_x)[V_x^\circ + V_x^{+y}] - \\
& - H\eta_x[V_y^{-t} + V_y^{+y-t}]\}_- + \\
& + \{(F_x + F\eta_x)U_z - F\eta_x U_z^{-t} + (G_x + G\eta_x)[W_x^\circ + W_x^{+z}] - \\
& - G\eta_x[W_z^{-t} + W_z^{+z-t}]\}_- = U^{+t} - 2U + U^{-t},
\end{aligned} \tag{18}$$

где безразмерные коэффициенты определяются следующим образом:

$$\begin{aligned}
A_x &= \frac{(\lambda_x + 2\mu_x)\tau^2}{\rho h_x^2}, A_{\eta x} = \frac{(\zeta_x + 2\mu_x)\tau}{\rho h_x^2}, \\
B_x &= \frac{\lambda_x \tau^2}{4\rho h_x h_y}, B_{\eta x} = \frac{\zeta_x \tau}{4\rho h_x h_y}, \\
C_x &= \frac{\lambda_x \tau^2}{4\rho h_x h_z}, C_{\eta x} = \frac{\zeta_x \tau}{4\rho h_x h_z}, \\
D_x &= \frac{\mu_y \tau^2}{\rho h_y^2}, D_{\eta x} = \frac{\eta_z \tau}{\rho h_y^2}, \\
H_x &= \frac{\mu_z \tau^2}{4\rho h_x h_y}, H_{\eta x} = \frac{\eta_z \tau}{4\rho h_x h_y}, \\
F_x &= \frac{\mu_y \tau^2}{\rho h_z^2}, F_{\eta x} = \frac{\eta_y \tau}{\rho h_z^2}, \\
G_x &= \frac{\mu_y \tau^2}{4\rho h_x h_y}, G_{\eta x} = \frac{\eta_y \tau}{4\rho h_x h_z},
\end{aligned} \tag{19}$$

где ρ – плотность среды.

В силу принципа симметрии уравнения для двух других направлений получаются из (18) циклической перестановкой индексов осей. Если перейти к пределам $h_x \rightarrow 0, h_y \rightarrow 0, h_z \rightarrow 0$ и $\tau \rightarrow 0$, то из уравнения (18) легко получить систему уравнений равновесия в частных производных. Для однородной среды она имеет вид

$$\begin{aligned}
&(\lambda + 2\mu) \frac{d^2 U}{dx^2} + (\zeta + 2\eta) \frac{d^3 U}{dx^2 dt} + \\
&+ (\lambda + \mu) \left(\frac{d^2 V}{dx dy} + \frac{d^2 W}{dx dz} \right) + (\zeta + \eta) \left(\frac{d^3 V}{dx dy dt} + \frac{d^3 W}{dx dz dt} \right) + \\
&+ \mu \left(\frac{d^2 U}{dy^2} + \frac{d^2 U}{dz^2} \right) + \eta \left(\frac{d^3 U}{dy^2 dt} + \frac{d^3 U}{dz^2 dt} \right) = \rho \frac{d^2 U}{dt^2}.
\end{aligned} \tag{20}$$

Цифровая модель, построенная с использованием соотношений (18), будет обладать следующими критериями качества: $N_h = 48, N_\tau = 708$.

Поскольку в число элементарных операций входят сложение и умножение, которые являются операциями различной сложности, будем считать, что одно умножение эквивалентно десяти сложениям. Для вычисления безразмерных коэффициентов (19) в процессе подготовки задачи необходимо знать значения коэффициентов Ламэ и коэффициентов вязкости для всех материалов

конструкции. Коэффициенты Ламэ могут быть вычислены по значениям модуля Юнга и коэффициента Пуассона (4), которые легко получаются экспериментально. Что же касается вычисления коэффициентов вязкости, то их экспериментальное определение весьма сложно. Коэффициент динамической вязкости еще может быть получен по известным значениям логарифмического коэффициента затухания. Для определения коэффициента второй вязкости в твердых телах сколько-нибудь приемлемого метода не разработано.

Можно было бы пренебречь второй вязкостью твердых материалов, но гораздо эффективнее придать ей некоторое значение с тем, чтобы упростить расчетные соотношения. Эвристические соображения и анализ соотношений (2), (3), (4) и (6) показывают, что можно записать равенство

$$\frac{(3\frac{\zeta}{\eta} - 2)}{(6\frac{\zeta}{\eta} + 2)} = \nu. \quad (21)$$

Равенство (21) и использование принципа расчленения позволяют представить уравнения движения в виде

$$U(t + \tau) = (1 + A_\eta)U - A_\eta U(t - \tau) + 2U - U(t - \tau)^*, \quad (22)$$

где U и $U(t - \tau)$ – функции, выражаемые через напряжения упругих деформаций, вычисленные для двух моментов времени t и $(t - \tau)$; A_η – коэффициент пропорциональности между вязкими и упругими напряжениями

$$A_\eta = \frac{2\eta(1 + \nu)}{E\tau}. \quad (23)$$

Выражения становятся более удобными для программирования. Эта форма записи будет использована в дальнейшем, за исключением тех случаев, когда операторы сумм и разностей будут раскрыты. Модель, построенная с использованием (22), будет обладать следующими критериями качества: $N_h = 30$, $N_\tau = 480$.

При выводе уравнений движения для моделей гидро- и аэродинамики возможны три принципиально различных способа. Первый способ целесообразно применять, когда напряжения упругих деформаций преобладают и процесс протекает достаточно быстро. В этом случае можно целиком использовать методику расчета для твердых тел.

Второй способ применяется, когда преобладают силы вязкости, а силами упругости можно пренебречь. В этом случае в качестве искомых величин следует выбрать компоненты скоростей, расчетная схема получится двухслойной. В уравнениях движения нужно учесть, что, помимо напряжений, создаваемых вязкими силами, в гидроаэродинамических процессах существенную роль играют давления и изменение плотности. Применяя принцип расчленения уравнений, можно записать уравнения движения для этого случая в виде

$$V_x^*(t + \tau) = A_p[V_x - P_x] + Q_x + V_x(t - \tau), \quad (24)$$

где V_x^* – компонент скорости в направлении x , вычисленный в подвижной системе координат; A_p – коэффициент, учитывающий изменение плотности, о чем будет сказано ниже; V_x – функция, зависящая от вязких напряжений; P_x – функция, зависящая от градиента давления, которую следует привести к безразмерному виду путем деления на начальные давления в задаче; Q_x – функция, зависящая от удельных массовых сил (считывается заданной). Функции V и Q в уравнении (24) должны иметь размерность скоростей.

Функция напряжений вычисляется с помощью уравнения проекции напряжений на оси неподвижной системы координат:

$$\begin{aligned} V_x &= A(\delta_{xx}^+ - \delta_{xx}^-) + B(\delta_{xy}^+ - \delta_{xy}^- + \delta_{xz}^+ - \delta_{xz}^-), \\ V_y &= A(\delta_{yy}^+ - \delta_{yy}^-) + B(\delta_{yx}^+ - \delta_{yx}^- + \delta_{yz}^+ - \delta_{yz}^-), \\ V_z &= A(\delta_{zz}^+ - \delta_{zz}^-) + B(\delta_{zx}^+ - \delta_{zx}^- + \delta_{zy}^+ - \delta_{zy}^-), \end{aligned} \quad (25)$$

где A и B – безразмерные коэффициенты,

$$A = \frac{(\xi 2\eta)\tau}{\rho_0 h^2}, \quad B = \frac{\eta\tau}{\rho_0 h^2}; \quad (26)$$

ρ_0 – начальная плотность вещества; h – шаг регулярной сетки.

На практике встречаются задачи, в которых рассматривается конструкция, частично погруженная в жидкость, а частично – в газообразную среду, или погруженная в слоистую жидкость. В этом случае уравнения движения для элементов жидкости и газа или различных жидкостей будут отличаться только величиной коэффициентов (26) и начальными плотностями. Напряжения могут быть вычислены в соответствии с формулами (26):

$$\begin{aligned} \delta_{xx}^+ &= \wedge_x^- \vee_x + B(\wedge_y^- \vee_y + \wedge_z^- \vee_z), \\ \delta_{yx}^+ &= \wedge_x^- \vee_y + \wedge_y^- \vee_x. \end{aligned} \quad (27)$$

В моделях гидродинамики жидкости можно считать несжимаемыми. В этом случае можно исключить из уравнений (24) искомую функцию A_p , считая ее равной единице. В этом случае отпадает надобность в уравнении неразрывности, и функция давления P_x будет зависеть только от глубины погружения элементов модели в жидкость.

В случае сжимаемых жидкостей или газов компоненты функции давления P зависят от градиентов давления в направлении координатных осей. При

вычислении этой зависимости можно воспользоваться связью между давлением и плотностью вещества.

Для идеальных газов зависимость давления от плотности считается линейной во всем диапазоне давлений. Для реальных газов и жидкостей эта зависимость нелинейна и определяется в зависимости от величины давления.

Путем линеаризации этой зависимости в пределах изменения плотности и давления в задаче можно упростить вычисления и исключить давления из расчетных соотношений. Тогда функция давления будет выражаться непосредственно через градиент плотности:

$$P_x = B \wedge_{\bullet}^{-} \left[P_0 + \frac{h}{\eta\beta} \frac{\rho - \rho_0}{\rho} \right], \quad (28)$$

где P_0 и ρ_0 – начальные значения давления и плотности; β – коэффициент сжимаемости жидкости или газа.

Для вычисления плотностей необходимо еще одно уравнение, связывающее поле плотностей с полем скоростей. Такое уравнение может быть получено из закона сохранения вещества (закона непрерывности). Закон непрерывности говорит о том, что сумма градиентов потоков пропорциональна изменению плотности вещества в элементарном объеме (Рисунок 7).

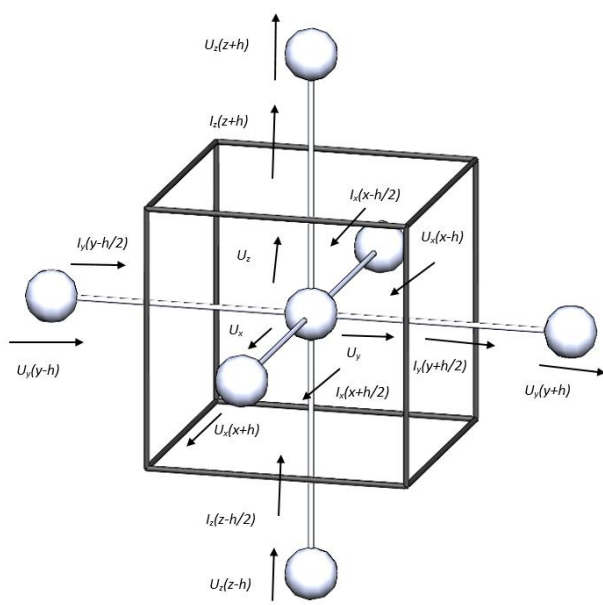


Рисунок 7 К выводу закона сохранения вещества

Суммируя потоки, проходящие через грани элемента, можно получить закон сохранения вещества в виде

$$\begin{aligned}
& \wedge_x^- \vee_x \wedge_x^+ \rho - \wedge_x^- \vee_x \wedge_x^+ \rho + \\
& + \wedge_y^- \vee_y \wedge_y^+ \rho - \wedge_y^- \vee_y \wedge_y^+ \rho + \\
& + \wedge_z^- \vee_z \wedge_z^+ \rho - \wedge_z^- \vee_z \wedge_z^+ \rho = -\frac{h}{\tau} \wedge_t^- \rho.
\end{aligned} \tag{29}$$

При выводе уравнения (29) использован принцип симметрии и принцип осреднения. Поэтому уравнение записано для трех временных слоев $(t - \tau)$, t и $(t + \tau)$. Оно позволяет последовательно вычислять значения плотности во всех узлах сетки в момент времени $(t + \tau)$. Раскрывая оператор центральной разности в правой части уравнения (29) и решая его относительно плотности в момент времени $(t + \tau)$, получим

$$A_p(t + \tau) = A_p(t - \tau) - \frac{1}{2B} H(VA_p), \tag{30}$$

где $H(VA_p)$ – разностный оператор, соответствующий левой части уравнения (29); A_p – плотности, приведенные к безразмерному виду путем деления на ρ_0 .

Если подставить значения функций в уравнения (24) и устремить шаги сетки по координатам и времени к нулю, учитывая операцию коррекции скоростей, можно получить известные уравнения гидро- и аэродинамики – уравнения Навье – Стокса:

$$\begin{aligned}
& \frac{dV_x}{dt} + V_x \frac{dV_x}{dx} + V_y \frac{dV_x}{dy} + V_z \frac{dV_x}{dz} = \\
& = Q_x - \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dx} + \frac{\eta}{\rho} \left(\frac{d^2 V_x}{dx^2} + \frac{d^2 V_x}{dy^2} + \frac{d^2 V_x}{dz^2} \right) + \\
& + \left(\frac{\zeta}{\rho} + \frac{\eta}{3\rho} \right) \frac{d}{dx} \left(\frac{dV_x}{dx} + \frac{dV_y}{dy} + \frac{dV_z}{dz} \right).
\end{aligned} \tag{31}$$

При устремлении шагов сетки к нулю уравнение (30) преобразуется в уравнение неразрывности:

$$\frac{d\rho}{dt} + \frac{d}{dx}(\rho V_x) + \frac{d}{dy}(\rho V_y) + \frac{d}{dz}(\rho V_z) = 0. \tag{32}$$

Модель, в которой реализуются полученные уравнения, будет обладать следующими критериями качества: $N_h = 9$, $N_\tau = 1100$.

Самым сложным является третий способ, когда формулы (6) и (7) дают соизмеримые значения величин упругих и вязких деформаций. В этом случае можно рекомендовать следующий алгоритм вычислений. В каждом очередном шаге вычислений для каждого вида деформаций в каждом узле производится с помощью формул (7) выделение той части деформаций, которая определяется

вязкостью. Затем по величинам этих деформаций непосредственно вычисляются напряжения (27) и коэффициенты плотности (30). Далее расчет производится в том же порядке, что и в случае только вязких деформаций. Таким образом, была получена усовершенствованная математическая модель расчета для создания имитационно-информационных моделей ЦД, что доказывает положение 2.

В Главе 4 представлены методика прогнозирования надежности радиоэлектронной аппаратуры с применением цифрового двойника имитационно-информационной модели при адаптивном выборе детализации конструкции (Рисунок 8), а также алгоритм передачи моделей радиоэлектронной аппаратуры по уровням конструирования с расширенным анализом сложно детектируемых факторов и применением имитационных и информационных моделей электронной аппаратуры в информационно-измерительной и управляющей системе.



Рисунок 8 Методика прогнозирования надежности радиоэлектронной аппаратуры ракетно-космической техники

Методика прогнозирования надежности радиоэлектронной аппаратуры на этапах жизненного цикла с адаптивным выбором детализации конструкции заключается в параллельном анализе и применении на отдельных ее этапах ЦД имитационных и информационных моделей с адаптивным выбором детализации конструкции. Разработанный метод заключается в следующем. На первом этапе метода проводится сбор данных об объекте исследования и математическое моделирование конструкции. На втором этапе в процессе проведения имитационного моделирования и выявления критических мест возможного возникновения дефектов или адаптации модели к новым условиям работы предлагается создать детализированную имитационную модель той части конструкции, которая требует усовершенствования.

Отмечается, что создание детализированной модели возможно и для полной конструкции исследуемого объекта, модель ограничивается только вычислительными возможностями применяемой аппаратной части. Детализированная имитационная модель путем последовательного разложения на составные части приобретает набор информационных свойств, перебором которых, в частности и экспертным методом, достигаются оптимальные параметры конструкции. После этапа 2 получаем модель конструкции с оптимизированными параметрами, что позволяет нам изготовить экспериментальный образец. На этапе 3 проводятся экспериментальные исследования созданного образца по нужным критериям. На этапе 4, получив модель конструкции с оптимизированными параметрами, проводится расчет надежности с выявлением критических показателей. На этапе 5 получаем возможность проведения корреляционного анализа свойств исследуемой конструкции. Имея данные, полученные в ходе имитационного моделирования, и экспериментальные данные, получаем возможность более точной доработки конструкции и получения модели конструкции с выводом информации о ее надежности характеристиках и полной имитации работы как цифрового двойника. Таким образом, была разработана методика прогнозирования надежности электронной аппаратуры ракетно-космической техники на этапах жизненного цикла с адаптивным выбором детализации конструкции, который позволил ускорить проведение анализа выявления сложно детектируемых факторов в среднем на 15 %, что доказывает положение 3.

На основе метода прогнозирования надежности электронной аппаратуры ракетно-космической техники был реализован алгоритм передачи моделей ЦД радиоэлектронной аппаратуры по уровням конструирования (Рисунок 9), отличающийся применением имитационных и информационных моделей с адаптивным выбором детализации конструкции, позволяющий проводить расширенный анализ выявления сложно детектируемых факторов.

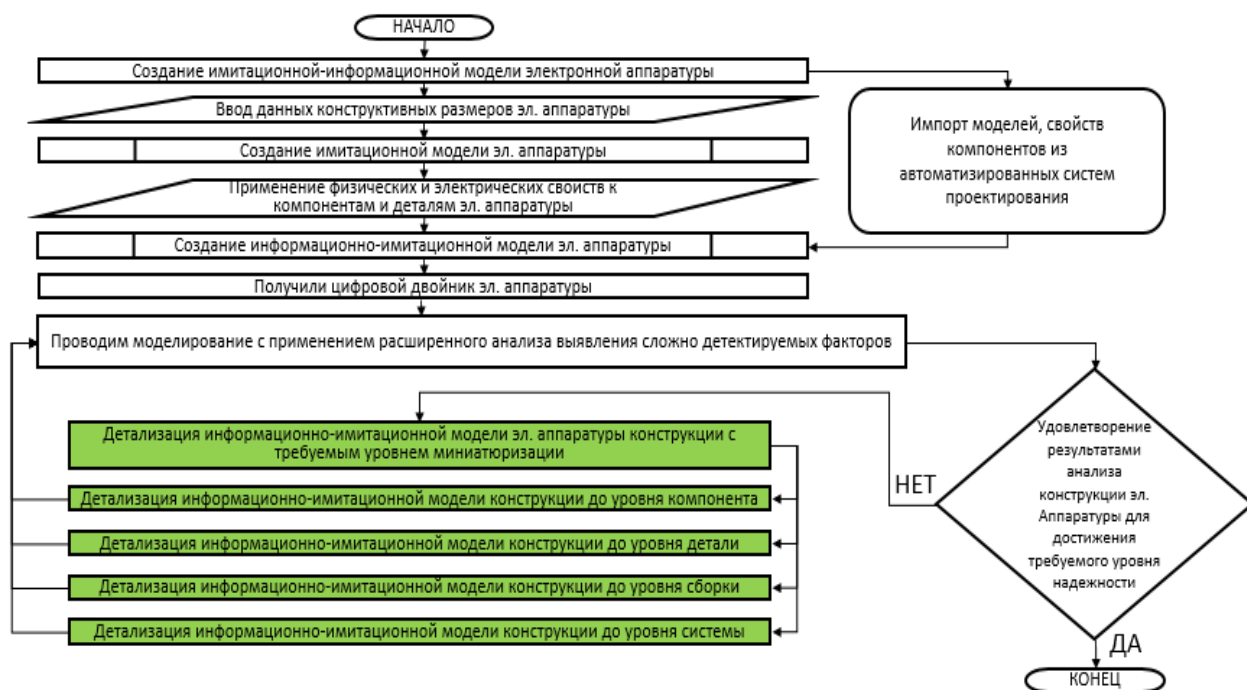


Рисунок 9 Алгоритм передачи моделей радиоэлектронной аппаратуры по уровням конструирования

Алгоритм отличается проведением имитационного моделирования с возможностью расширенного анализа и выявления возможных дефектов электронной аппаратуры на каждом этапе ее создания в программно-аппаратном комплексе. Известно, что дефект зарождается в критически нестабильном месте конструкции. Следовательно, предложенный вид анализа позволит выявить данное место и избежать его появления. Данная возможность реализуема с помощью построения уже на этапах разработки конструкции детализированных информационных и имитационных моделей с расширением анализируемых свойств на каждом уровне. Так, на уровне компонента имеется возможность отработать принцип действия; например, подвесная часть чувствительного элемента акселерометра. Или создать топологию резистивной части компонента сопротивления с многофакторным тепловым анализом. На уровне детали предлагается расчет деформируемой части подвесного механизма акселерометра с возможностью оптимизации конструкции и повышения стабильности ее работы. В электронной части блока вторичного преобразователя возможен комплексный вибрационно-тепловой расчет сборки печатного узла с детализацией печатной платы до уровня анализа дефектов печатных проводников.

Уровень сборки предполагает выявление степени и качества сопрягаемых деталей, анализ конструкции в части совместимости отдельных ее деталей по показателям теплового расширения, химического влияния металлов друг на друга, вибрационного взаимопоглощения и другие факторы. Самый сложный уровень – система, которая предполагает выявление критически нестабильных

связей в процессе передачи информации по коммутирующим элементам конструкции. На данном уровне существует возможность получить не только метрологическую модель отдельной связки «датчик – вторичный преобразователь»,

но и адаптивно трансформируемую модель, позволяющую расширить или оптимизировать преобразование информации от чувствительного элемента к преобразующей части электроники. Таким образом, был создан алгоритм передачи моделей цифровых двойников по уровням конструирования с применением программно-аппаратного комплекса расширенного анализа сложно детектируемых факторов в информационно-измерительной и управляющей системе, который позволяет корректировать конструктив получаемой аппаратуры с оценкой надежностных характеристик и обеспечивает снижение срока проектирования в зависимости от сложности конструкции от 10 до 40 % с кратным экономическим эффектом. Следовательно, положение 4 считаем доказанным.

Ярким примером в работе является модель акселерометра (Рисунок 10), применяемого в ракетно-космической технике. При создании детализированной информационно-имитационной модели чувствительного элемента существует возможность определения отклонения чувствительной части подвешенного элемента (инерционной части) с определением ее конкретной величины и характера прогиба.

При разработке нового устройства получение данной информации без создания экспериментальных образцов позволяет существенно сократить время проектирования, определиться с нужной технологией и заранее отбросить ошибочные варианты исполнения конструкции с положительным экономическим эффектом. В условиях космического пространства, ограниченного доступа к ремонту и высокой стоимости резервирования создание высоконадежной электронной части является основной задачей при ее проектировании.

В Главе 5 после обобщения ранее полученных в работе положений в виде методов, математических моделей и алгоритмов разработана информационно-измерительная и управляющая система прогнозирования надежности радиоэлектронной аппаратуры с внедрением автономного блока имитации работы изделия с предварительным имитационным моделированием на основе ЦД и программа в виде базы данных унифицированных имитационно-информационных моделей радиоэлектронной аппаратуры. На Рисунке 11 представлена сама система, в основу которой входят описанные далее блоки.

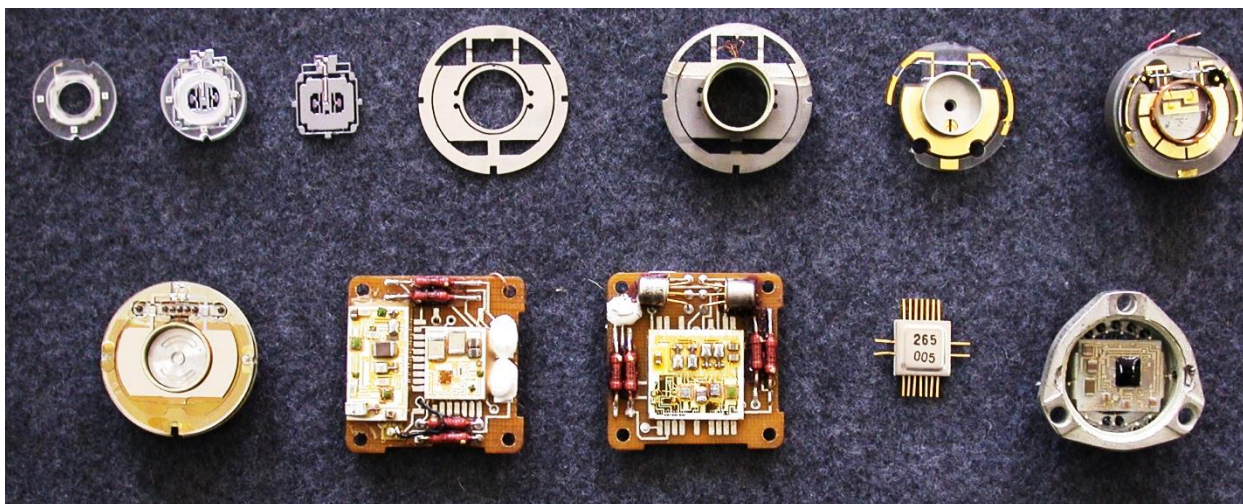


Рисунок 10 Экспериментальные образцы акселерометра, на основе которых строится цифровой двойник

В блоке сбора и анализа данных о разрабатываемой электронной аппаратуре на первоначальных этапах проектирования собираются данные о конструкции, аналогах и прототипах создаваемого устройства, о его назначении, элементной базе и других требуемых параметрах, что в итоге формирует начальную информационную модель устройства. Данный блок реализован в виде программной части, в которую возможно добавлять новые данные и актуализировать имеющиеся. Он является составным компонентом созданного программно-аппаратного комплекса.

Совместно с блоком сбора и анализа данных работает блок формирования имитационной и информационной модели ЦД.

В блоке путем прямого построения и обмена информацией с базой данных и блоком сбора данных происходит создание имитационной модели ЦД с требуемой степенью детализации для текущего уровня разработки. После формирования будущего концепта электронной аппаратуры в блоке сбора и анализа данных с учетом имитационной и информационной моделей происходит разработка экспериментального образца в блоке создания электронной аппаратуры. Отличительной особенностью данного блока является использование данных, сформированных в блоке имитационных и информационных моделей, что подтверждает ранее доказанное положение 4. В итоге, пройдя все стадии создания экспериментального образца, получаем прототип реального устройства или несколько устройств, которые передаются на экспериментальные испытания в блок экспериментальных исследований.

Одновременно с этим созданная ранее имитационная модель, которая в процессе создания экспериментального образца могла претерпеть изменения, передается в блок анализа электронной аппаратуры с помощью имитационных и информационных моделей. Данный блок является ключевым в созданной информационно-измерительной и управляющей системе, так как в данном блоке реализуется концепция интеллектуального взаимодействия и оптимизации исследуемой конструкции, где созданные имитационные и информационные модели ЦД дорабатываются, что в совокупности приближает их к реальным устройствам, с помощью которых появляется возможность обосновать новый подход к измерению параметров и характеристик электронной аппаратуры в совокупности с информационно-измерительной системой и позволяет управлять выходными показателями надежности разрабатываемой электронной аппаратуры.

Работа блока экспериментальных исследований тесно сопряжена с блоком чувствительных элементов и детекторов. Экспериментальный образец электронной аппаратуры проходит ряд испытаний на воздействие основных дестабилизирующих факторов, таких как температура, вибрация, повышенная влажность, электромагнитная совместимость и др. Метрологическая модель блока чувствительных элементов и детекторов реализуется применяемыми анализатором спектра, электронным микроскопом и датчиками температуры, вибрации, влажности. В свою очередь блок экспериментальных исследований имеет свой набор оборудования в виде камеры тепла и холода, вибростенда и камеры влажности. После экспериментальных исследований данные передаются в блок сбора данных испытаний, где имеется возможность сравнения результатов испытаний с базой данных уже созданных типовых конструкций, а также в блок корреляционной оценки результатов испытаний и имитационного моделирования. Данный блок позволяет сравнить полученные результаты и внести корректировки как в реальную конструкцию, так и в имитационную модель устройства. Но если в случае реального устройства на реальном производстве создание нового экспериментального образца является дорогостоящим процессом, а повторяемость результатов эксперимента может отличаться в широком диапазоне, то заменив дальнейшие испытания реального образца улучшенной имитационной моделью цифрового двойника с высокой степенью детализации, можно создать электронную аппаратуру с требуемыми характеристиками надежности, что прямо влияет на качество выявления дефектов. Таким образом, была разработана информационно-измерительная и управляющая система прогнозирования надежности электронной аппаратуры, в которую внедрен блок имитации работы изделия с предварительным имитационным моделированием ЦД, благодаря чему повышается степень выявления дефектов в пределах 25–30 % при высокой степени корреляции экспериментального образца и имитационной модели электронной аппаратуры.

В Главе 6 представлены экспериментальные исследования на примере систем, состоящих из датчика и блока электроники, создана программа в виде базы данных унифицированных имитационно-информационных моделей ЦД

электронной аппаратуры, теоретически обоснован подход к прогнозированию надежности электронной аппаратуры с помощью информационно-измерительных и управляющих систем с учетом концепции «Имитационно-информационный анализ».

Все выводы, полученные ранее обосновывают новый подход к измерению параметров и характеристик электронной аппаратуры, позволяющий развить теоретические основы прогнозирования надежности электронной аппаратуры и повысить достоверность результатов измерения в информационно-измерительных и управляющих системах подобного класса. Таким образом, положение 6 считаем доказанным.

В приложении представлены документы о внедрении результатов работы и объекты интеллектуальной собственности.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложен метод анализа конструкций радиоэлектронной аппаратуры с учетом многокритериальной параметрической зависимости свойств исследуемой конструкции, позволяющий повысить эффективность решения исследовательских задач, учесть межмодельное взаимодействие исследуемой конструкции ориентировочно на 25 %.

2. Предложены усовершенствованные математические модели расчета для создания имитационных и информационных моделей радиоэлектронной аппаратуры, которые позволили расширить не менее чем в 2 раза оценку влияния негативных воздействующих факторов на конструкцию радиоэлектронной аппаратуры.

3. Разработана методика прогнозирования надежности радиоэлектронной аппаратуры на этапах жизненного цикла с адаптивным выбором детализации конструкции, которая позволяет ускорить проведение анализа выявления сложно детектируемых факторов в среднем на 15 %.

4. Разработан алгоритм передачи моделей радиоэлектронной аппаратуры по уровням конструирования с применением программно-аппаратного комплекса расширенного анализа сложно детектируемых факторов в информационно-измерительной и управляющей системе, реализующий процесс корректировки конструкции получаемой аппаратуры с оценкой надежностных характеристик и обеспечивающих снижение срока проектирования в зависимости от сложности конструкции от 10 до 40 % с кратным экономическим эффектом.

5. Разработана информационно-измерительная и управляющая система прогнозирования надежности радиоэлектронной аппаратуры, в которую внедрен блок симуляции работы изделия с предварительным имитационным моделированием радиоэлектронной аппаратуры, благодаря чему повышается степень выявления дефектов в пределах 25–30 % при высокой степени корреляции экспериментального образца и имитационной модели электронной аппаратуры.

6. Разработан программно-аппаратный комплекс, реализующий возможность интеллектуального прогнозирования конструкторско-технологических данных имитационно-информационных моделей радиоэлектронной аппаратуры.

7. Обоснован новый подход к измерению параметров и характеристик электронной аппаратуры, позволяющий применить комплексный анализ, базы данных ЦД, имитационные и информационные модели для развития теоретических основ прогнозирования надежности радиоэлектронной аппаратуры, что в совокупности повышает в пределах 10 % достоверность результатов измерения в информационно-измерительных и управляющих системах нового поколения.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Рыбаков И.М. Модели проектирования радиоэлектронной аппаратуры с применением теории межмодельного взаимодействия: монография Пенза.: Изд-во ПГУ, 2026. 174 с.

2. Определение амплитуды резонансных частот датчика температуры при воздействии синусоидальной вибрации / Рыбаков И.М. [и др.] Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль, 2025. № 1 С. 53-58. (0,61 п.л./0,20 п.л.).

3. Методы расчета численных характеристики тензорезисторов для информационно-измерительных и управляющих систем / Рыбаков И.М. [и др.] Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки, 2024. № 2. С. 83-97. (2,00 п.л./0,57 п.л.).

4. Рыбаков И.М., Юрков Н.К., Вершинин Е.А. Оптимизация тепловой системы радиоэлектронной аппаратуры с помощью теплоотвода из арсенида бора // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024. № 3. С. 64-77. (0,39 п.л./0,18 п.л.).

5. Моделирование высокотемпературных датчиков давления на базе технологических структур "поликремний - диэлектрик / Рыбаков И.М. [и др.] Надежность и качество сложных систем. 2024. № 4. С. 85-95. (0,75 п.л./0,35 п.л.).

6. Математическое и программное обеспечение информационно-измерительной системы повышения надежности конструкций электронной аппаратуры / Рыбаков И.М. [и др.] Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки, 2023. № 2 С. 90-106. (1,12 п.л./0,51 п.л.).

7. Оптимизация моделей объектов информационно-измерительных и управляющих систем мобильных роботов / Рыбаков И.М. [и др.] Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль, 2023. № 2 С. 28-38. (0,93 п.л./0,42 п.л.).

8. Рыбаков И.М. Модели и методы измерения электрических параметров в сложных системах электроники. Надежность и качество сложных систем, 2023. № 2. С. 44-50. (0,53 п.л./0,53 п.л.).

9. К проблеме повышения надежности самовосстанавливающихся предохранителей / Рыбаков И.М. [и др.] Надежность и качество сложных систем, 2023. № 4. С. 111-118. (1,25 п.л./0,32 п.л.).
10. Рыбаков И.М., Данилова Е.А., Алмашкина Н.С. Применение статистических методов оценки надежности печатных плат // Надежность и качество сложных систем, 2023. № 4. С. 119-129. (0,61 п.л./0,19 п.л.).
11. Информационно-измерительная и управляющая система теплофизического моделирования параметров электронной аппаратуры / Рыбаков И.М. [и др.] Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки, 2022. № 2. С. 36-45. (0,84 п.л./0,22 п.л.).
12. Рыбаков И.М., Куатов Б.Ж., Юрков Н.К. К проблеме создания цифровых моделей теплонагруженных элементов радиоэлектронной системы // Надежность и качество сложных систем, 2022. № 1. С. 9-19. (0,68 п.л./0,14 п.л.).
13. Рыбаков И.М. Лапшин Э.В., Гришко А.К. Методы аппроксимации функций многих переменных применительно к авиационным тренажерам // Надежность и качество сложных систем, 2018. № 1. С. 3-9. (0,47 п.л./0,09 п.л.).
14. Rybakov I.M. Information System for Measuring Thermophysical Parameters of Electronic Appliances Based on Temperature Field Models Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского. 2022. № 10. С. 165-168. (0,27 п.л./0,27 п.л.).
15. Цифровое моделирование нестационарных механических процессов в круговых цилиндрических оболочках при ударном возбуждении модели / Рыбаков И.М. [и др.] Радиотехника, 2025. № 12. С. 123-134. (0,72 п.л./0,3 п.л.). Предложена методика построения алгоритма нестационарного процесса с учетом межмодельного взаимодействия. (0,59 п.л./0,14 п.л.).
16. Патент «Способ изготовления тонкопленочного прецизионного резистора и устройство его реализации. Комбинация материалов 2» Рыбаков И.М. [и др.] зарегистрирована в Роспатенте. Регистрационный номер заявки 2026102479; дата регистрации 02.02.2026.
17. Патент «Способ изготовления тонкопленочного прецизионного резистора и устройство его реализации. Комбинация материалов 3» Рыбаков И.М. [и др.] зарегистрирована в Роспатенте. Регистрационный номер заявки 2026102539; дата регистрации 02.02.2026.

Научное издание

Рыбаков Илья Михайлович

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА СИНТЕЗА ЦИФРОВЫХ
ДВОЙНИКОВ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ
НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ МЕЖМОДЕЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ**

**Специальность 2.2.9. Проектирование и технология
приборостроения и радиоэлектронной аппаратуры**

Редактор *А. Г. Темникова*
Технический редактор *Р. Б. Бердникова*
Компьютерная верстка *Р. Б. Бердниковой*

Подписано в печать 0.03.2026. Формат 60×84¹/₁₆.
Усл. печ. л. 0. Заказ № 0. Тираж 100.

Издательство ПГУ.
440026, г. Пенза, ул. Красная, 40.
Тел./факс: (8412) 66-60-49, 66-67-77; e-mail: iic@pnzgu.ru