

На правах рукописи

ТИХМЕНЕВ АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ

**МЕТОД ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПРОЕКТНОЙ
ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ СТРУКТУРНО-
СЛОЖНОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ**

05.13.12 «Системы автоматизации проектирования (промышленность)»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Волгоград, 2013 г.

Работа выполнена на кафедре «Радиоэлектроники и телекоммуникаций»
Московского института электроники и математики федерального
государственного автономного образовательного учреждения высшего
профессионального образования Национального исследовательского
университета «Высшая школа экономики»

Научный руководитель	кандидат технических наук, доцент Жаднов Валерий Владимирович.
Официальные оппоненты:	Кравец Алла Григорьевна, доктор технических наук, Волгоградский государственный технический университет, кафедра «Системы автоматизированного проектирования и поискового конструирования», профессор; Сальникова Наталия Анатольевна, кандидат технических наук, доцент, Российская академия народного хозяйства и государственной службы Волгоградский филиал, кафедра «Информационных систем и математического моделирования», доцент.
Ведущая организация	Открытое акционерное общество Научно-производственное объединение «Лианозовский электромеханический завод»

Защита состоится «24» декабря 2013 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.028.04, созданного на базе Волгоградского государственного технического университета по адресу: 400005, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, ауд. 209.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Волгоградского государственного технического университета.

Автореферат разослан «__» ноября 2013 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Водопьянов Валентин Иванович

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Развитие радиоэлектронной промышленности и средств САПР приводит к быстрому росту функциональности выпускаемых изделий и усложнению структуры радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) при одновременном повышении требований к их надежности, что требует развития методов анализа структурной безотказности, и, в первую очередь, автоматизированных средств, пригодных к использованию в САПР предприятий. На качество процесса проектирования отрицательно влияет недостаточное математическое обеспечение исследований надежности. Используемые модели и ПО имеют ряд недостатков, главным из которых является то, что они позволяют получить точную оценку показателей безотказности только в отдельных случаях. Для большинства применений, особенно для бортовой аппаратуры, требуется длительный анализ, не поддающийся автоматизации, результатом которого часто является только «нижняя» оценка показателей безотказности. Такая оценка пригодна для подтверждения требований технического задания (ТЗ), но не позволяет провести сравнительный анализ различных вариантов реализаций структуры РЭА по уровню безотказности. Это затрудняет принятие проектных решений и может привести к неоправданному применению дополнительных мер по повышению надежности, что влечет дополнительные затраты времени и средств на проектирование и негативно сказывается на себестоимости, массогабаритных характеристиках и на конкурентоспособности РЭА.

Тематика проектной оценки показателей надежности освещена во многих исследованиях, где рассматриваются как вопросы проектирования радиоэлектронной аппаратуры, так и методы теории надежности. К основным работам в этой области следует отнести труды И.А. Ушакова, Б.А. Козлова, Г.В. Дружинина, А.М. Половко, М.Р. Шура-Бура, А.Я. Резиновского, О.В. Абрамова, В.А. Каштанова, А.И. Медведева, В.В. Липаева, Ю.Н. Кофанова и др. В их работах разработаны общие вопросы оценки надежности восстанавливаемых и невосстанавливаемых систем, включая оценку надежности резервированных изделий. Для расчетов, как правило, используются аналитические методы, а расчетные формулы выводятся для ограниченного набора типовых структур и их комбинаций. Для случаев, не сводящихся к типовому набору структур, предлагается ряд методов по оценке нижних значений показателей надежности. При этом имитационное моделирование признается перспективным методом, применение которого ограничено недостаточным программным и математическим обеспечением (Ушаков, И.А.). Способы применения имитационного моделирования для решения задачи оценки показателей надежности рассматривались в работах Г.Н. Черкесова, Л.К. Горского, С.В. Гурова, И.Н. Коваленко, Н.Ю. Кузнецова и др. Однако в этих работах не приводятся модели, применимые к устройствам со сложными критериями отказов и изменяющимися режимами работы.

Это приводит к трудностям в оценке структурной надежности на этапах проектирования, что влияет на качество проектных решений и увеличивает

вероятность ошибок при проектировании. Поэтому актуальной задачей является разработка метода исследования надежности РЭА, позволяющего адекватно учесть алгоритмы реконфигурации и резервирования в оценке показателей безотказности.

Объект исследования: Типовая процедура расчетной оценки надежности РЭА.

Предмет исследования: Методы, модели и алгоритмы, применимые для анализа проектного уровня надежности структурно-сложной РЭА.

Цели и задачи работы: повышение качества проектных работ за счет разработки и внедрения нового автоматизированного метода анализа надежности структурно-сложной аппаратуры, учитывающего ее алгоритмы функционирования и реконфигурации.

Для достижения данной цели были поставлены и решены следующие задачи:

- Анализ современных процедур обеспечения надежности, применяемых при проектировании РЭА.
- Анализ методов и методик оценки проектной надежности структурно-сложной РЭА.
- Разработка математического обеспечения:
 - модели реконфигурируемого РЭА, применимой к широкому спектру структур и алгоритмов реконфигурации;
 - алгоритмов решения модели и оценки на ее основе показателей безотказности.
- Разработка лингвистического обеспечения в виде языка моделирования со встроенными средствами описания структуры, алгоритмов реконфигураций и критериев отказов РЭА.
- Разработка и реализация структуры программного обеспечения со следующим функционалом:
 - преобразование формальной модели РЭА в программную;
 - верификация программной модели на соответствие алгоритмам функционирования и реконфигурации исследуемого РЭА;
 - проведение имитационных экспериментов и обработка их результатов (оценка проектных показателей надежности РЭА).
- Разработка методического обеспечения процедуры расчетной оценки проектного уровня надежности РЭА:
 - инженерной методики создания и верификации моделей структурно-сложной РЭА;
 - инженерной методики анализа проектных решений схемы расчета надежности (СРН) и алгоритма реконфигурации РЭА.

При решении задач диссертационного исследования были получены следующие **новые научные результаты**:

1. разработана унифицированная модель элемента СРН РЭА, в отличие от известных не привязанная к конкретной реализации структуры и

позволяющая учитывать смену законов распределения наработки при формировании временной диаграммы состояний (ВДС);

2. создана модель структурно-сложной РЭА, которая отличается тем, что описывает алгоритмы реконфигурации, критерии отказов и не требует описания всех возможных комбинаций состояний компонентов;
3. предложен метод расчетной оценки показателей безотказности РЭА, который существенно повышает точность оценки за счет формирования ВДС с учетом реконфигураций;
4. разработана новая инженерная методика анализа проектных решений структуры и алгоритма реконфигурации РЭА с точки зрения обеспечения требуемого уровня безотказности, которая позволяет сократить сроки проведения сравнительного анализа альтернативных вариантов.

Теоретическая значимость заключается в разработанных моделях и методе оценки показателей безотказности, которые могут в дальнейшем использоваться в ПО САПР для совершенствования процесса анализа проектных решений и сокращения сроков проектирования радиоэлектронной аппаратуры, а также при верификации аналитических моделей и анализе влияния различных допущений в них на точность расчетной оценки.

Практическую значимость имеют результаты работы, предназначенные для использования в процессе проектирования структурно-сложной РЭА, а именно:

1. предложенный способ формализации описания СРН реконфигурируемой РЭА, в виде специализированного языка, что позволяет в сжатые сроки разрабатывать модели сложных РЭА;
2. разработанное программное обеспечение, реализующее создание и верификацию моделей реконфигурируемых РЭА и автоматизированную оценку показателей безотказности;
3. разработанное методическое обеспечение, которое значительно снижает трудозатраты на анализ проектных решений по обеспечению уровня безотказности.

Методология и методы исследования. В процессе решения поставленных задач использовались методы теории автоматизированного проектирования, математического моделирования, теории принятия решений, теории надежности, теории вероятности и математической статистики, теории множеств и методы реализации языков программирования и объектно-ориентированного программирования.

Основные результаты, выносимые на защиту:

1. унифицированная модель элемента СРН РЭА, предназначенная для формирования реализации его временной диаграммы состояний на основе распределений наработок;
2. модель РЭА, позволяющая сформировать реализацию временной диаграммы состояний на основе состава, алгоритмов функционирования и реконфигураций;
3. автоматизированный метод расчетной оценки показателей безотказности РЭА на основе имитационного моделирования;

4. инженерная методика анализа проектных решений по обеспечению безотказности структурно сложной и/или реконфигурируемой РЭА.

Достоверность работы основывается на использовании известных принципов имитационного моделирования, положений теории надежности, теории реализации языков программирования и подтверждается результатами численных экспериментов, демонстрирующих сходимость результатов моделирования при одинаковых исходных данных к аналитическим моделям и ожидаемые отклонения при учете дополнительных факторов.

Апробация работы осуществлялась в ходе докладов и обсуждений на Международном симпозиуме «Надежность и качество» (Пенза, 2010-2013), Международной конференции и Российской научной школе «Системные проблемы надёжности, качества, информационных и электронных технологий» – ИННОВАТИКА (Сочи, 2010-2011), Международной студенческой школе-семинаре «Новые информационные технологии» (Судак, 2010-2013), Всероссийской конференции «Современные проблемы радиоэлектроники» (Красноярск, 2011-2013), II Всероссийской научно-технической конференции «Радиовысотометрия» (г. Каменск-уральский, 2010), Научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ (Москва, 2010-2013), II Всероссийской научно-технической конференции «Системы управления беспилотными космическими и атмосферными летательными аппаратами» (Москва, 2012), Международной научно-практической конференции «Инновационные информационные технологии» (Прага, 2012), научном семинаре «Надежность и качество функционирования систем» (Москва, 2012), X Всероссийской научно-технической конференции «Научные чтения по авиации, посвященные памяти профессора Н.Е. Жуковского» (Москва, 2013), что подтверждает актуальность проведенного исследования и достоверность его результатов.

По теме диссертационной работы опубликовано 29 научных трудов, в том числе 17 статей, из них 3 в изданиях, рекомендованных ВАК, 12 тезисов докладов, и получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013613802.

Практическая значимость работы и эффективность разработанных средств САПР подтверждается внедрением в практику проектирования на ОАО «Научно-исследовательский институт точных приборов» (г. Москва), ОАО «Тамбовский завод Электроприбор» (г. Тамбов), ФГУП «СНПО «Элерон» (г. Москва), ООО «Вега-Газ» (г. Москва).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертационная работа содержит введение, четыре главы с выводами, заключение, список литературы и приложения, включающие в себя акты внедрения и программную документацию.

Во **введении** дано обоснование актуальности темы диссертационного исследования и определены практическая направленность результатов и логическая связь глав диссертационной работы.

В первой главе проведен анализ мероприятий по обеспечению надежности современной РЭА. Показано, что все они делятся на 3 группы: методы, направленные на повышение надежности составных частей (СЧ) РЭА (за счет изменения приемки, режимов работы и внешних воздействующих факторов), повышение надежности за счет восстановления в ходе эксплуатации (дополнение РЭА комплектом запасных частей, инструментов и принадлежностей (ЗИП)) и структурное повышение надежности (резервирование, реконфигурации). Эти методы могут применяться комплексно, но в случаях, когда техническое обслуживание затруднено или невозможно (например, для бортовой аппаратуры космических аппаратов), как правило, невозможно ограничиться только повышением надежности СЧ. Это обуславливает широкое использование метода структурного повышения надежности в проектировании РЭА. Для такой аппаратуры в силу отсутствия возможности ремонта контролируются показатели долговечности и безотказности.

Современная тенденция роста сложности структуры РЭА заметно затрудняет оценку показателей безотказности. С точки зрения процесса проектирования это приводит к трудностям в анализе решений по реализации структуры РЭА и алгоритма реконфигурации, так как невозможно в сжатые сроки численно оценить эффективность мер по повышению безотказности. Эта задача решается в рамках типовой проектной процедуры расчетной оценки показателей безотказности. При ее выполнении либо оцениваются показатели безотказности для проверки соответствия требованиям ТЗ, либо (на ранних этапах проектирования) генерируются требования по показателям безотказности в частных технических заданиях к СЧ, соблюдение которых позволит обеспечить выполнение требований ТЗ к РЭА в целом.

Меры по структурному повышению безотказности принимаются на ранних этапах проектирования, и для минимизации риска возвращения к этим этапам необходимо проводить сравнение различных вариантов реализации реконфигураций и резервирования.

В работе проведен анализ автоматизированных методов, которые могут применяться для выполнения процедуры оценки показателей безотказности. При анализе основное внимание уделялось возможностям учета в расчетах нестандартных алгоритмов резервирования, реконфигурации, изменения режимов работы СЧ и сложных критериев отказов. Показано, что это сильно усложняет создание модели, делает его по сути невозможным в приемлемые сроки. Обычно на практике в таких случаях переходят к оценке нижнего значения показателей, однако это неприменимо для сравнения альтернативных вариантов по уровню безотказности.

Для структурно-сложной РЭА перспективным является применение имитационного моделирования, что отражено научных работах и стандартах по управлению рисками. Его применение позволяет снять часть ограничений, присущих аналитическим методам в области учета особенностей структуры устройства и видов зависимости интенсивности отказов от времени. Анализ методов и средств имитационного моделирования показал, что применение

имитационного моделирования для проектного расчета надежности ограничено сложностью создания и верификации модели. Так как в модели необходимо отразить все особенности функционирования системы, то для каждой конкретной задачи требуется повторять разработку и верификацию.

Построение модели и ее верификация требует определенных навыков в области имитационного моделирования и представляет собой сложную и длительную работу. Анализ публикаций по данной теме показал, что применение имитационного моделирования как эффективного инструмента исследования сложных систем для оценки надежности широко используется в задачах, связанных с техническим обслуживанием (модели, основанные на теории массового обслуживания) и моделированием физических процессов (деформации, случайные нагрузки, производственные дефекты). Вопросы надежности сложных, резервированных и реконфигурируемых структур затрагиваются реже. Рассматриваются только частные случаи, строятся модели отдельных систем; при этом подходе повторно использовать результаты затруднительно. По сути, можно лишь повторить разработку моделей и средств верификации для другой системы, ориентируясь на общие подходы, предложенные авторами статей, поэтому на данный момент этот метод применяется для исследований и практически не используется в проектировании.

Несмотря на крайнее разнообразие инструментов имитационного моделирования (одних языков имитационного моделирования более 3 тысяч), неизвестны модели и ПО, обеспечивающие расчет структурно-сложной РЭА с приемлемым соотношением «время-точность». Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что существующее обеспечение проектной процедуры оценки безотказности имеет недостатки, негативно сказывающиеся на качестве проектирования. Для ее развития необходимо разработать метод исследования надежности на основе имитационного моделирования, включающий в себя специализированные модели, средства верификации, проведения имитационного моделирования и инженерные методики их применения.

На основе проведенных исследований в выводах по главе 1 была сформулирована цель и поставлены задачи диссертационной работы.

Во **второй главе** рассматриваются вопросы, посвященные разработке модели, применимой для описания разнообразной структурно-сложной РЭА с расчетом на наиболее сложные реализации. Для обеспечения адекватности результатов моделирования модель должна отражать действия реконфигурации на разных уровнях разукрупнения, учитывать зависимость интенсивности отказов от времени, историю функционирования РЭА и сложные критерии отказов. Для выполнения требования применимости модели к разнообразному классу структурно-сложной РЭА необходимо гибко описывать ее состав, структуру и критерии отказов. Такие требования можно обеспечить только при моделировании жизненного цикла исследуемого РЭА от ввода в эксплуатацию до отказа, с учетом всех изменений, происходящих в процессе функционирования.

На основе сформулированных требований была предложена форма представления РЭА как множества отдельных компонентов и возможных событий в системе. Параметрами модели компонента являются состояния и режим функционирования. Также модель независимо определяет время, которое компонент пробудет в исправном состоянии при неизменном режиме работы с учетом истории эксплуатации и информирует об изменениях своего состояния при перематке модельного времени. При этом разрешается смена режимов и состояний компонента как вследствие случайного процесса (характеризующегося интенсивностью), так и в результате реконфигурации в соответствии с алгоритмом функционирования. Наглядное представление модели одного компонента приведено на рис.1: это некоторая диаграмма возможных состояний, которые изменяются с определенной интенсивностью (показаны неразрывными стрелками) или вследствие событий (направления обозначены пунктиром).

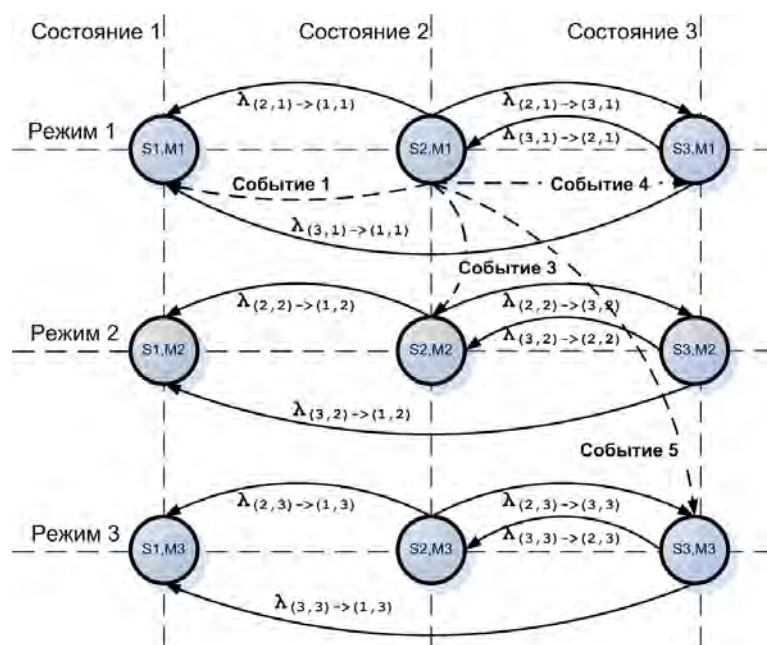


Рисунок 1 – Вид диаграммы переходов модели компонентов

Таким образом, можно представить множество состояний СЧ, образующих модель РЭА:

$$U_{R,\tau_0} = \{s_{1,\tau_0}, s_{2,\tau_0}, s_{3,\tau_0}, s_{4,\tau_0}, \dots, s_{n,\tau_0}\}, \quad (1)$$

где U_{R,τ_0} - множество состояний СЧ РЭА в момент времени τ_0 ;

s_{i,τ_0} представляет конкретное положение i -й СЧ на ее диаграмме режимов и состояний.

$$s_{i,\tau_0} \in S_i = \{s_{i0}, s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{im}\}, \quad (2)$$

где S_i - множество возможных состояний СЧ;

s_{i0}, s_{i1}, \dots - конкретные положения на диаграмме состояний (рис. 1).

При этом должно быть известно начальное состояние всех компонентов в модели и их интенсивности переходов в какое-либо другое состояние (как правило, состояние отказа). Тогда путем розыгрыша случайных величин можно

определить СЧ, которая первой изменит состояние, и ее новое состояние, то есть состояние РЭА в момент $\tau_{0,9}$:

$$U_{R,\tau_{0,9}} = \{s_{1,\tau_{0,9}}, s_{2,\tau_{0,9}}, s_{3,\tau_{0,9}}, s_{4,\tau_{0,9}}, \dots, s_{k,\tau_{0,9}}, \dots, s_{n,\tau_{0,9}}\}, \quad (3)$$

$$\Delta U_{R,\tau_0} = U_{R,\tau_{0,9}} \setminus U_{R,\tau_0} \cup U_{R,\tau_0} \setminus U_{R,\tau_{0,9}} = \{s_{k,\tau_{0,9}}, s_{k,\tau_0}\}, \quad (4)$$

где $U_{R,\tau_{0,9}}$ - множество состояний СЧ после смены состояния k -ой СЧ; $\Delta U_{R,\tau_0}$ - множество изменений в $U_{R,\tau_{0,9}}$;

$s_{k,\tau_{0,9}}, s_{k,\tau_0}$ - текущее и предыдущее состояние k -ой СЧ.

В силу того, что рассматривается реконфигурируемая РЭА, возможны взаимосвязи в отказах и/или реконфигурации в структуре, т.е. окончательно определить состояние РЭА после отказа (изменения состояния) одной из СЧ можно только через некоторую функцию вида:

$$U_{R,\tau_1} = f_{\Delta}(U_{R,\tau_0}, \Delta U_{R,\tau_0}), \quad (5)$$

где f_{Δ} - функция, преобразующая структуру РЭА и состояние СЧ в соответствии с алгоритмом функционирования на основе предыдущего состояния U_{R,τ_0} и произошедшего события $\Delta U_{R,\tau_0}$.

Функция f_{Δ} должна однозначно определить состав множества U_{R,τ_1} , т.е. состояние всех составных частей РЭА после изменения состояния одной из них. На основе этого множества можно определить состояние РЭА в целом, задав для него аналогичную область определения:

$$s_{R,\tau_1} \in S_R = \{s_{R0}, s_{R1}, s_{R2} \dots s_{Rm}\}, \quad (6)$$

$$s_{R,\tau_1} = f_s(U_{R,\tau_1}), \quad (7)$$

где S_R - множество возможных состояний РЭА в целом;

f_s - функция, определяющая состояние РЭА s_{R,τ_1} на основе множества состояний СЧ U_{R,τ_1} в соответствии с критериями отказов РЭА.

В общем случае набор состояний для РЭА может быть вида: «отказало», «работоспособно», «исправно». Однако для реконфигурируемой РЭА в отдельных случаях целесообразно введение другого набора состояний, более четко описывающего специфику функционирования конкретной РЭА. Иногда необходимо учитывать историю отказов. Это легко можно проиллюстрировать на примере электромеханического компонента – релейного переключателя, отказы которого напрямую связаны с количеством переключений. В случае, если он осуществляет переключение компонентов и его использование связано с действиями реконфигураций, при моделировании его отказов необходимо учитывать полную историю действий реконфигурации. Это приводит к необходимости учета всего жизненного цикла модели РЭА. Для соблюдения этого требования функции (6) и (7) записываются в следующем виде:

$$U_{R,\tau_{i+1}} = f_{\Delta}(U_{R,\tau_i}, \Delta U_{R,\tau_i}, U_{R,\tau_{i-1}}, U_{R,\tau_{i-2}} \dots U_{R,\tau_0}), \quad (8)$$

$$s_{R,\tau_{i+1}} = f_s(U_{R,\tau_{i+1}}), \quad (9)$$

где U_{R,τ_i} - множество состояний СЧ в i -ый промежуток времени;

s_{R,τ_i} - состояние РЭА в i -ый промежуток времени.

Таким образом, можно последовательно определить состояние РЭА в каждый момент времени, сформировать временную диаграмму состояний и использовать ее для определения показателей надежности, таких, как интенсивность отказов, вероятность безотказной работы, наработка на отказ, коэффициент готовности и др.

Для улучшения восприятия модели предложено объединение компонентов в группы с индивидуальными критериями отказов (рис 4). При этом группа компонентов будет описываться теми же параметрами, что и отдельный компонент (режим, состояние), но без задания интенсивности переходов – ее роль исполняют критерии состояния группы, аналогично функции f_s для РЭА (рис. 2). Такая организация модели позволяет наиболее точно и близко к действительности отразить структуру исследуемой РЭА, а также разбить функцию f_s на подфункции и тем самым ее упростить без потери точности моделирования реконфигураций.

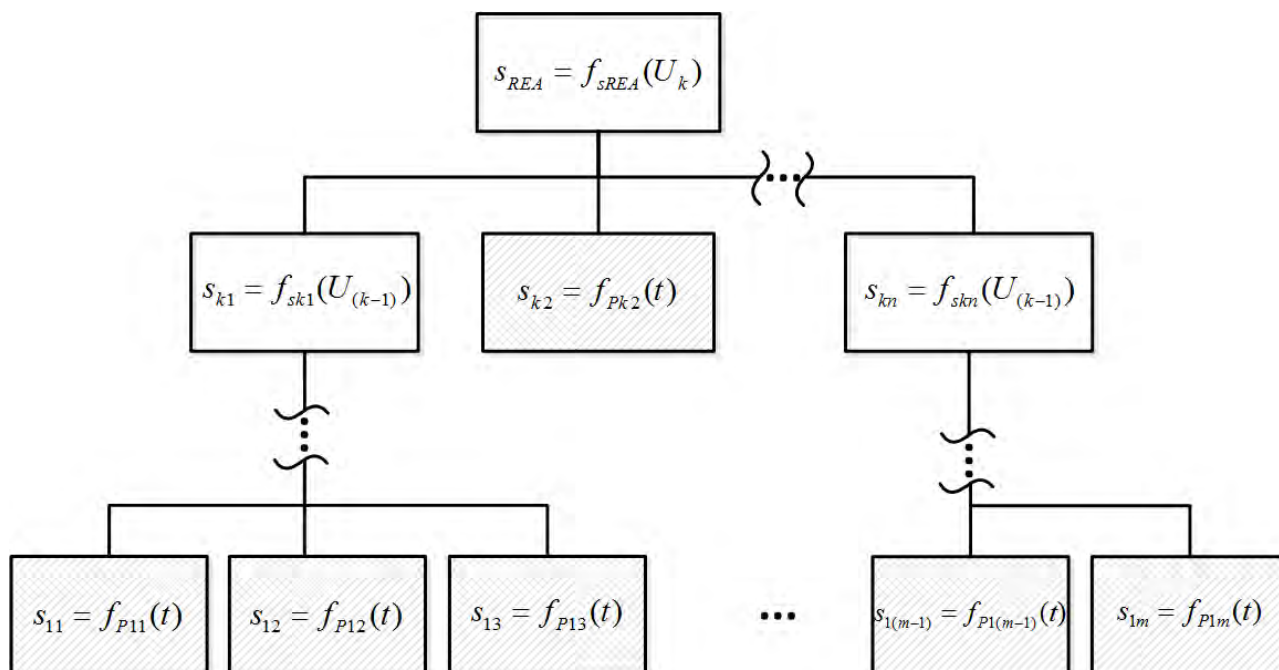


Рисунок 2 – Представление структуры РЭА в модели

В качестве решения задачи преобразования действий реконфигураций и критериев отказов в формальный вид, пригодный для автоматизированной обработки и расчета, был предложен специализированный язык моделирования. Его функцией в разработанном методе является однозначное создание формального описания СРН РЭА, по которому синтезируется программная модель для проведения имитационных экспериментов.

В **третьей главе** описывается способ формализации моделей в виде специализированного языка описания отказов и реконфигураций РЭА. Язык моделирования содержит средства для описания моделей компонентов в текстовом виде, определяющие вид диаграммы и интенсивности переходов (в соответствии с моделью, представленной на рис. 1). При этом каждый компонент в модели определяется уникальным именем, с помощью которого

можно использовать его состояние в вычислительных операциях. В язык вводится несколько основных конструкций: действие реконфигурации в виде конструкции условие-действие и критерий отказа в виде вычислительной процедуры над локальными и глобальными переменными, а также встроенными операторами, определяющими состояние компонентов СРН.

В условиях событий реконфигурации и в критериях отказов можно использовать стандартный набор логико-арифметических операций совместно, как над состояниями компонента, так и над переменными, локальными и глобальными. Это позволяет учитывать не только текущее состояние модели, но и историю возникавших в ходе моделирования событий, т.е. формально задать функции f_{Δ} (8) и f_s (9) и реализовать определение ВДС РЭА. Также в условиях событий реконфигурации возможно определять момент перехода компонента из состояния в состояние; такой оператор позволяет более удобно описывать алгоритм функционирования и реконфигурации РЭА.

Для выполнения имитационных экспериментов применена концепция дискретно-событийного моделирования, т.е. функционирование РЭА представляется как набор событий, между которыми состояние РЭА и СЧ остается неизменным, а изменения происходят скачкообразно и вызываются изменением состояния одной из СЧ. Для этого был разработан алгоритм имитационного эксперимента (рис. 3), который определяет последовательность вызовов процедур и событий языка, учитывает возможность каскадного выполнения событий, критериев отказа и позволяет осуществить корректный перевод модели из одного состояния в другое, т.е. программно реализовать функции f_{Δ} (8) и f_s (9). Результатом выполнения алгоритма является реализация ВДС РЭА и всех СЧ, включая и группы компонентов.

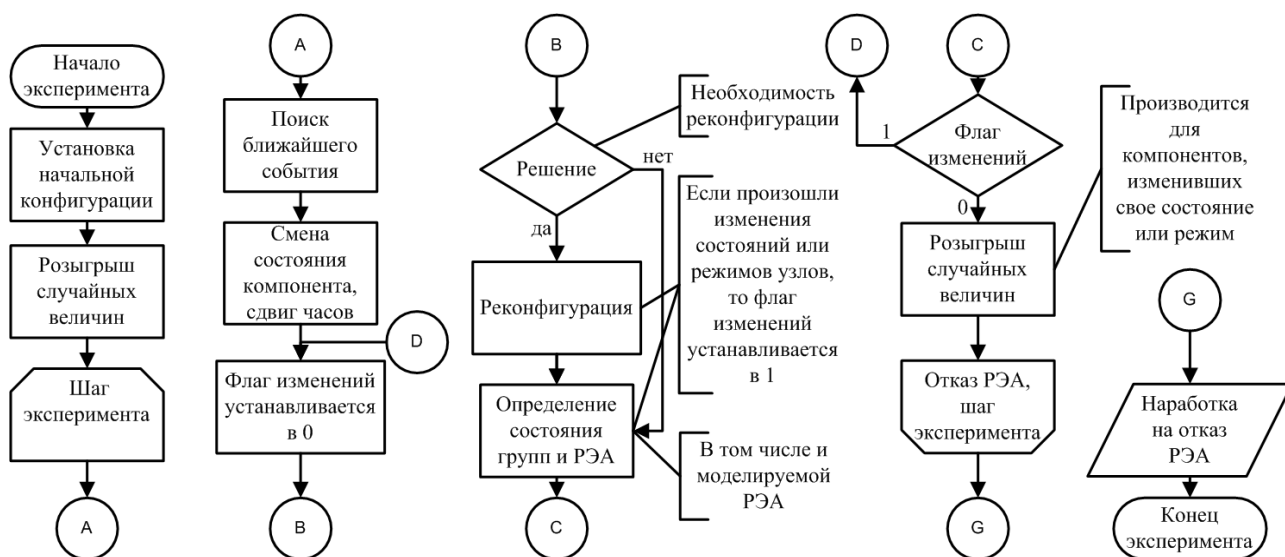


Рисунок 3 – Алгоритм имитационного эксперимента

Для работы с формальными моделями разработана подсистема АСОНИКА-К-РЭС. В главе отражены вопросы анализа основных требований к программному комплексу, разработки структуры и алгоритма функционирования, а также его программной реализации.

В основе подсистемы лежат разработанные и описанные во второй главе модели и алгоритмы. Основными модулями АСОНИКА-К-РЭС является компилятор формальной модели, блок верификации и блок выполнения имитационных экспериментов. Таким образом, подсистема АСОНИКА-К-РЭС автоматизирует разработанный метод расчетной оценки показателей безотказности РЭА (рис. 4), объединяющий в себе разработанные в ходе диссертационного исследования модели, алгоритмы и язык моделирования отказов и реконфигураций.



Рисунок 4 – Схема автоматизированного метода расчетной оценки показателей безотказности РЭА

Подсистема (П/С) АСОНИКА-К-РЭС реализовалась на объектно-ориентированном языке программирования *Visual C++* и использует библиотеки платформы *.Net*. Пользователь вводит формальную модель исследуемого РЭА, которая преобразуется в программную модель в виде множества объектов. В соответствии с принятой практикой имитационного моделирования необходимо перед началом имитационного эксперимента провести верификацию модели на соответствие описанию РЭА. Для верификации модели в П/С предусмотрена и возможность проведения управляемого эксперимента. В этом случае пользователь сам определяет последовательность отказов компонентов и контролирует состояние модели после каждого отказа. В случае несоответствия реакции модели описанию работы поиск ошибки можно осуществить при помощи анализа лог-файла выполнения шага эксперимента, в котором содержится информация о том, какие условия каких событий реконфигурации были выполнены и какие именно действия с компонентами модели ими были проведены.

В четвертой главе разрабатываются инженерные методики для реализации проектной процедуры оценки показателей безотказности структурно-сложной РЭА. Создана методика оценки показателей безотказности, включающая действия по разработке формальной модели, ее верификации и анализу результатов моделирования, а также методика анализа проектных решений по обеспечению безотказности (рис. 5).

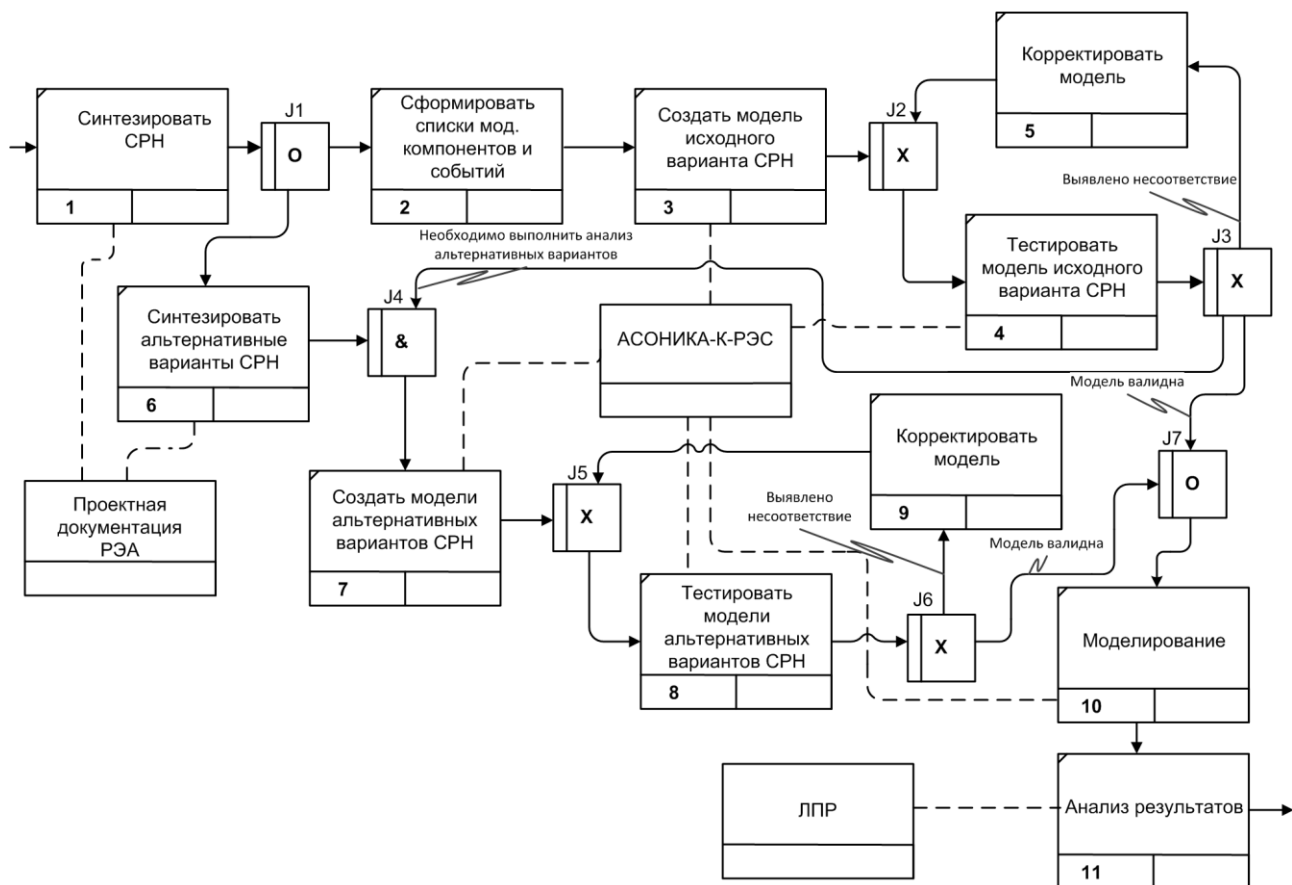


Рисунок 5 – Методика анализа проектных решений по обеспечению безотказности РЭА (IDEF3)

Исходными данными для применения методики являются описания текущего варианта структуры РЭА и алгоритма ее функционирования. В блоке 1 проводится анализ текущего варианта и синтезируется СРН РЭА, а в блоке 6 синтезируются СРН для альтернативных вариантов реализации алгоритмов реконфигурации. В случае применения методики на ранних стадиях проектирования, когда еще генерируются требования к надежности СЧ, необходимо задаться некоторыми значениями интенсивности отказов СЧ; при этом наиболее важным является соотношение интенсивностей отказов в различных режимах работы.

По результатам синтеза СРН в блоке 2 формируются данные, необходимые для построения формальной модели: списки моделируемых СЧ, списки вводимых групп СЧ, критерии отказов для каждой группы и РЭА в целом, а также действия реконфигурации в формате «условие-действие». На

основе этих данных в блоке 3 создается формальная модель РЭА, которая преобразуется в программную и подвергается верификации.

Верификация (блок 4) производится с использованием программного модуля управляемых экспериментов и представляет собой проверку различных сценариев отказов в составе РЭА, на каждый из которых модель должна среагировать в соответствии с описанием. При обнаружении несоответствия производится коррекция формальной модели (переход к блоку 5) и повторная верификация. После успешной верификации исходного варианта на его основе строятся модели альтернативных реализаций СРН (блок 7) и проводится их верификация (блоки 8 и 9).

После верификации переходят непосредственно к моделированию (блок 10), результатом которого являются статистические данные по реализациям отказов РЭА и статистика по группам СЧ. Выходные данные АСОНИКА-К-РЭС анализируются в блоке 11; по ним можно определить, какие группы являются проблемными в составе РЭА с точки зрения надежности и какие, наоборот, обладают избыточной надежностью. После анализа результатов моделирования можно дать обоснованные рекомендации по реализации структуры и алгоритмов реконфигурации РЭА.

Проверка разработанных методов, моделей, алгоритма моделирования и программно-методических средств проводилась в два этапа. На первом проводилось моделирование стандартных структур, для которых известны аналитические формулы без допущений. По результатам моделирования были получены значения с ошибкой менее 1% относительно аналитических моделей, обусловленной погрешностью конечного числа экспериментов. На втором этапе проводился расчет показателей надежности структурно-сложной РЭА, в том числе бортового интегрированного вычислительного комплекса (БИВК), который состоит из двух полуккомплектов со сложным алгоритмом подключения резерва. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты расчетов РЭА

Объект	Источник	ОСТ4Г.012.242-84		Г.Н. Черкесов	НИИ АРГОН		ИКИ РАН
	Название	Обл. рез.	Маж. гр.	Изделие-ЗИП	АС31	БИВК	БУСОТР
	СЧ	7	4	5	36	54	124
Аналитическая модель		ОСТ4Г.012.242-84		Г.Н. Черкесов	Формула полной вероятности		Метод мин. путей и сечений
Тип оценки	без допущений					Нижняя	
Оцениваемый показатель	T0		K _r		ВБР		
Рез. по аналит. мод.	557538	783469	0,99985		0,9867	0,9273	0,9929
Рез. АСОНИКА-К-РЭС	553993	784411	0,99684		0,9871	0,9883	0,9997
Взаимная погрешность, %	0,64	0,12	0,23		0,04	6,58	0,7

Для построения точной аналитической модели расчета показателей безотказности БИВК необходимо проанализировать 2^{54} возможных состояний системы с учетом последовательности отказов, поэтому была проведена оценка только нижнего значения ВБР. Разработанные модели позволили полностью описать алгоритмы реконфигурации и критерии отказов. Для верификации моделей привлекались специалисты с предприятий-разработчиков РЭА, которые экспертно подтверждали соответствие модели алгоритму функционирования.

Во всех случаях при моделировании были получены ожидаемые результаты, которые можно считать ближе к истинным в сравнении с аналитическими моделями, где заведомо были внесены допущения, приводящие к занижению показателей безотказности. Для БИВК при оценке ВБР была получена разница в 6%, что близко к эффекту от дублирования по аналитической оценке. Также было отмечено существенное понижение трудозатрат на выполнение оценки безотказности РЭА: так, на примере БИВК, на выполнение расчетной оценки аналитическим методом было затрачено примерно 320 человеко-часов, тогда как разработка модели, верификация и моделирование разрабатываемыми средствами потребовало около 24 человеко-часов.

Заключение

В работе предложен метод проектной оценки показателей безотказности, а также модели для анализа проектных решений. Полученные в ходе работы результаты повышают качество процесса проектирования структурно-сложной РЭА, а именно: понижают трудозатраты на проектную процедуру расчетной оценки уровня надежности и в отдельных случаях позволяют повысить точность расчетной оценки за счет более полного учета алгоритма реконфигурации.

Достоверность результатов работы подтверждена рядом численных экспериментов, а ее практическая значимость и ценность - опытом внедрения на предприятия отечественной радиоэлектронной промышленности, результаты которого свидетельствует о достижении поставленной в работе цели.

В целом работа ориентирована на дальнейшее практическое применение результатов при проектировании структурно-сложной РЭА, но также возможно использование в исследовательской деятельности. В работе продемонстрирована полезность применения подсистемы АСОНИКА-К-РЭС как высокоточного инструмента для оценки показателей безотказности при разработке или исследованиях аналитических моделей структурно-сложной РЭА. Также разработанные модели могут быть развиты для использования в задачах оценки показателей надежности систем «Изделие-ЗИП» с многоуровневой структурой ЗИП и/или структурно-сложным изделием. Возможными направлениями дальнейшего развития моделей и средств, предложенных в работе, являются автоматизация синтезирования требований по надежности СЧ, оптимизация структуры изделия, так как данные задачи в рамках работы не рассматривались.

Основные публикации по теме диссертации

1. Тихменев А.Н. Имитационное моделирование в задачах оценки надежности отказоустойчивых электронных средств [Текст] / В.В. Жаднов, А.Н. Тихменев // Надежность. – 2013. – № 1 (44). – с. 32-43. – 0,8 п.л. (личный вклад 0,3 п.л.)
2. Тихменев А.Н. Прогнозирование надежности структурно-сложных радиоэлектронных средств методами имитационного моделирования [Текст] / В.В. Жаднов, А.Н. Тихменев // Качество. Инновации. Образование. – 2013. – № 3. – с. 50-56. – 0,65 п.л. (личный вклад 0,3 п.л.)
3. Тихменев А.Н. Проблемы расчета показателей достаточности и оптимизации запасов в системах ЗИП [Текст] / Д.К. Авдеев, В.В. Жаднов, А.Н. Тихменев // Надежность. – 2011. – № 3 (38). – с. 53-60. – 0,5 п.л. (личный вклад 0,1 п.л.)
4. Тихменев А.Н. Информационная технология обеспечения надежности сложных электронных средств военного и специального назначения [Текст] / Д.К. Авдеев, В.В. Жаднов, В.Н. Кулыгин, С.Н. Полесский, А.Н. Тихменев // Компоненты и технологии. – 2011. – № 6. – с. 168-174. – 0,9 п.л. (личный вклад 0,05 п.л.)
5. Тихменев А.Н. Применение языка описания отказов реконфигурируемых электронных средств для моделирования систем «Изделие-ЗИП» [Текст] / В.В. Жаднов, А.Н. Тихменев // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. / Сиб. федер. ун-т, Красноярск – Красноярск, 2012. – с. 236-239. – 0,21 п.л. (личный вклад 0,1 п.л.)
6. Тихменев А.Н. Имитационное моделирование в оценке надежности электронных систем с реконфигурируемой структурой для космических аппаратов [Текст] / А.Е. Абрамешин, В.В. Жаднов А.Н. Тихменев // Электромагнитная совместимость и проектирование электронных средств: сб. науч. тр. // Под ред. Л.Н. Кечиева. – М.: МИЭМ, 2012. – с. 13-23. – 0,65 п.л. (личный вклад 0,2 п.л.)
7. Тихменев А.Н. Методика проектных исследований надежности структурно-сложной радиоэлектронной аппаратуры // Надежность и качество-2013: труды Международного симпозиума: в 2-х т. // Под ред. Н.К. Юркова. - Пенза: Изд-во ПГУ, 2013 – 1 т. – с. 122-125. – 0,35 п.л.
8. Тихменев А.Н. Современные подходы к исследованию безотказности электронных средств циклического применения [Текст]/ В.В. Жаднов, С.Н. Полесский, А.Н. Тихменев // Надежность и качество-2012: труды Международного симпозиума: в 2-х т. // Под ред. Н.К. Юркова. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2012 – 1 т. – с. 70-74. – 0,725 п.л. (личный вклад 0,2 п.л.)
9. Тихменев А.Н., Имитационная модель системы «изделие - система ЗИП» с многоуровневой структурой ЗИП [Текст] / А.Н. Тихменев, В.Ж. Маркитан // Надежность и качество-2012: труды Международного симпозиума: в 2-х т. // Под ред. Н.К. Юркова. – Пенза: Изд-во ПГУ – 2012 – 1 т. – с. 201-202. – 0,225 п.л. (личный вклад 0,15 п.л.)
10. Тихменев А.Н. Применение языка GPSS WORLD для моделирования

- отказов электронных средств со сложной структурой резервирования [Текст] / Надёжность и качество: Труды международного симпозиума в 2-х т. // Под ред. Н.К. Юркова. - Пенза: Изд-во ПГУ 2011 – 1 т. – с. 333-335. – 0,25 п.л. (личный вклад 0,15 п.л.)
11. Тихменев А.Н. Моделирование компонентов электронных средств с реконфигурируемой структурой [Текст] / В.В. Жаднов А.Н. Тихменев // Надёжность и качество: Труды международного симпозиума в 2-х т. // Под ред. Н.К. Юркова. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2010 – 1 т. – с. 330-331. – 0,3 п.л. (личный вклад 0,15 п.л.)
 12. Тихменев А.Н. Применение имитационного моделирования для исследования надежности электронных средств со сложной структурой [Текст] / Инновационные информационные технологии: Материалы международной научно-практической конференции. // Под ред. С.У. Увайсова; Отв. за вып. И.А. Иванов, Л.М. Агеева, Д.А. Дубоделова, В.Е. Еремина. – М.: МИЭМ, 2012. – с. 326-331. – 0,35 п.л.
 13. Тихменев А.Н. Оценка надежности бортовых реконфигурируемых электронных средств [Текст] / Системы управления беспилотными космическими и атмосферными летательными аппаратами: тез. докладов II Всероссийской научно-технической конференции. – М.: МОКБ «МАРС», 2012. – с. 181-183. – 0,075 п.л.
 14. Тихменев А.Н. Методы и средства расчетной оценки надежности электронных средств с реконфигурируемой структурой [Текст] / В.В. Жаднов А.Н. Тихменев // Радиовысотометрия-2010: Сб. трудов Третьей Всероссийской научно-технической конференции. // Под ред. А.А. Иофина, Л.И. Пономарева. – Екатеринбург: Изд-во «Форт Диалог-Исеть», 2010. – с. 202-205. – 0,2 п.л. (личный вклад 0,05 п.л.)
 15. Тихменев А.Н. Разработка моделей надежности для проектных исследований надежности радиоэлектронной аппаратуры [Текст] / В.В. Жаднов, С.Н. Полесский, А.Н. Тихменев // Радиовысотометрия-2010: Сб. трудов Третьей Всероссийской научно-технической конференции. // Под ред. А.А. Иофина, Л.И. Пономарева. – Екатеринбург: Изд-во «Форт Диалог-Исеть», 2010. – с. 200-201. – 0,12 п.л. (личный вклад 0,04 п.л.)
 16. Тихменев А.Н. Модели и методика для анализа надежности отказоустойчивой бортовой радиоэлектронной аппаратуры [Текст] / Материалы Всероссийской научно-технической конференции «X Научные чтения по авиации, посвященные памяти профессора Н.Е. Жуковского». Сборник докладов. – М.: Издательский дом ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2013. – с. 495-498. – 0,2 п.л.
 17. Тихменев А.Н. Метод оценки безотказности структурно-сложных РЭУ [Текст] / Новые информационные технологии в автоматизированных системах: материалы шестнадцатого научно-технического семинара // Под общ. ред.: С.Р. Тумковский. – М.: Московский государственный институт электроники и математики, 2013. – С. 116-123. – 0,5 п.л.