

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Национальный исследовательский университет  
«Высшая школа экономики»

*На правах рукописи*

Увайсова Светлана Сайгидовна

**ГЕНЕРАЦИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ТЕСТОВ ПРИ  
АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОННЫХ  
СРЕДСТВ**

**Резюме**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор, лауреат  
Премии Правительства РФ в области науки и  
техники Тумковский Сергей Ростиславович

Москва – 2022

## **Актуальность темы**

Конец 70-х - начало 80-х годов прошлого века характеризуется резким ростом сложности электронных средств (ЭС). Это связано с появлением микропроцессорной техники и ее широким и повсеместным внедрением. Появилась возможность проектирования т.н. программно-определяемых устройств самого разного функционального назначения.

Как следствие, кардинально возросли трудности контроля качества, прежде всего, выходного контроля технического состояния ЭС. Техническая диагностика, как наука, получила мощный импульс к своему дальнейшему развитию. Именно в этот период разработаны основные государственные стандарты в области технической диагностики.

Усилиями отечественных и зарубежных ученых было разработано множество методов неразрушающего контроля и диагностирования. Результаты исследований в этой области имели универсальный характер и стали применяться практически во всех отраслях промышленности.

Однако, особенности электронных средств таковы, что в большинстве случаев невозможно одним методом или способом поставить диагноз и установить причины и место неисправности. В отличие от большинства технических изделий в электронных средствах одновременно протекают разные взаимосвязанные физические процессы.

Электрические процессы, закономерно вызывают тепловые процессы, которые, в свою очередь, изменяя физико-механические параметры влияют на прочностные характеристики конструкций. Существует и обратное влияние механических процессов через диссипацию энергии на тепловые процессы, а те, через температурно-зависимые параметры электрорадиоэлементов, влияют на электрические процессы в ЭС. Любая неисправность, так или иначе будет отражаться на электрических, тепловых или механических характеристиках электронных средств.

На современном этапе сложность ЭС возросла настолько, что практически не представляется возможным их проектирование без применения самых современных систем автоматизированного проектирования, основанных на математическом моделировании и компьютерных технологиях.

Несмотря на автоматизацию большинства этапов стадии проектирования, без учета последствий возможных отказов ЭС на стадиях производства и эксплуатации, невозможна эффективная организация жизненного цикла электронных средств. Диагностическое обеспечение современных электронных средств должно разрабатываться непосредственно в процессе их автоматизированного проектирования. В противном случае, возникнут непреодолимые трудности на этапах выходного контроля и испытаний ЭС на стадии производства и, соответственно, при обслуживании, ремонте и восстановлении на стадии применения по назначению.

Прогресс науки Электроника как одной из самых интенсивно развивающихся областей знаний позволяет создавать все более и более сложные ЭС. Методы и средства диагностирования, которые были эффективны еще вчера недостаточно эффективны сегодня. Поэтому проблема технической диагностики перманентно развивается и всегда актуальна.

Одной из главных научных и практических задач технической диагностики является задача синтеза или генерации тестовых воздействий. В связи с этим настоящее исследование посвящено разработке методов и средств формирования эффективных диагностических тестов, которые позволят идентифицировать неисправности электронных средств на заданной глубине и с требуемой полнотой.

### **Степень разработанности темы**

Проблемам автоматизации проектирования электронных средств посвящено достаточно много работ отечественных и зарубежных ученых. В

частности, работы Кофанова Ю.Н., направлены на комплексное моделирование взаимосвязанных физических процессов в ЭС, работы Тумковского С.Р. связаны с идентификацией первичных параметров комплектующих электрорадиоэлементов (ЭРЭ), обеспечению электромагнитной совместимости и помехоустойчивости посвящены работы Кечиева Л.Н., повышению стойкости аппаратуры к воздействию электростатических разрядов посвящены работы Пожидаева Е.Д. и Саенко В.С., проблемы диагностического моделирования и контролепригодного проектирования ЭС исследованы в работах Увайсова С.У. и Иванова И.А., а работы школы Петросянца К.О. направлены на обеспечение радиационной стойкости в процессе автоматизированного проектирования микроэлектронных средств.

Анализируя же степень разработанности темы данного исследования необходимо отметить, что методы и средства диагностирования аналоговых и цифровых устройств существенно отличаются. Принципиально отличаются и методы синтеза тестовых воздействий. Если для вторых тесты представляют собой набор двоичных кодовых комбинаций определенной разрядности, ограничивающей предельную длину теста, то для первых это теоретически бесконечное множество значений уровней сигналов.

Реализация тестового диагностирования цифровых устройств ограничивается вычислительными и временными ресурсами. Стало очевидным, что тестирование современных цифровых устройств выливается в колоссальные временные затраты даже при использовании суперкомпьютерных скоростей вычислений. Практическое решение задач диагностирования, применительно к цифровым ЭС стало возможным благодаря новым технологиям и, в частности, технологии периферийного сканирования JTAG.

Вопросам тестирования аналоговых устройств или цифровых устройств в аналоговом представлении посвящены также много научных работ. Тем не менее, известные на сегодня методы генерации тестов при

автоматизированном проектировании аналоговых ЭС не всегда достаточно эффективны и требуют дальнейшего развития и обобщения.

Таким образом **проблема**, заключается в противоречии между непрерывным ростом сложности ЭС и требований к их надежности и качеству с одной стороны и, с другой стороны, недостаточной эффективностью существующих методов и средств генерации диагностических тестов при автоматизированном проектировании, необходимых для поиска неисправностей устройств при их производстве и эксплуатации.

**Объектом исследования** является процесс автоматизированного проектирования контролепригодных электронных средств.

**Предметом исследования** являются метод, модели, алгоритмы и методическое обеспечение для формирования эффективных тестов при автоматизированном проектировании электронных средств.

### **Цель и задачи исследования**

Целью исследования является повышение эффективности процесса генерации диагностических тестов в процессе автоматизированного проектирования ЭС для определения технического состояния электронных средств.

Цель достигается последовательным решением следующих логически увязанных задач:

- Анализ предметной области и постановка задачи исследования;
- Разработка метода генерации диагностических тестов при автоматизированном проектировании аналоговых ЭС;
- Разработка алгоритма расчета отбраковочных допусков на первичные параметры ЭРЭ;
- Разработка алгоритмов синтеза тестовых сигналов аналоговых ЭС в статическом и динамическом режимах и в частотной области;

- Разработка архитектуры программного комплекса для автоматизированного синтеза диагностических тестов;
- Разработка инженерной методики формирования эффективного набора тестовых воздействий при автоматизированном проектировании ЭС;
- Апробация и внедрение результатов исследования.

### **Методология и методы исследования**

Диссертационное исследование базируется на методологии системного анализа и на методах и теории систем автоматизации проектирования, теориях математического моделирования, чувствительности, надежности, теории вероятностей и математической статистики, методах неразрушающего контроля и диагностирования.

### **Соответствие результатов исследования паспорту специальности**

Результаты исследования соответствуют пп. 1-7 паспорта специальности 05.13.12 – Системы автоматизации проектирования, а также паспорту области науки «Инженерные науки и прикладная математика» по специальности «Электроника, радиотехника и телекоммуникации» (Engineering, Electrical & Electronic; Telecommunications) в части пунктов тематики 1, 3, 16-18.

### **Личный вклад автора**

Все результаты и положения, выносимые на защиту, получены автором лично. На основе глубокого и всестороннего обзора и анализа предметной области, изучения литературных источников и особенностей схемотехнической и конструкторско-технологической реализации современных электронных средств автором выявлена проблема генерации эффективных диагностических тестов в процессе проектирования электронных средств как порождение противоречия между необходимостью

обеспечения контролепригодности ЭС и отсутствием специализированных средств в существующих САПР.

Автором лично сформулирован объект исследования как процесс, в котором выявлена проблема и раскрыт предмет исследования как спецификация средств для решения научной задачи генерации тестов при автоматизированном проектировании электронных средств.

Поставлена цель работы и определен логически увязанный комплекс задач для ее достижения при решении которых автором лично получены новые научные результаты, имеющие важное прикладное и практическое значение для электронной отрасли.

Личный вклад также отражен в достаточном числе публикаций в рецензируемых и индексируемых изданиях, в которых соискатель является основным автором.

#### **Основные результаты работы:**

1. На основе обзора литературных источников и анализа современного состояния проблемы диагностирования вообще и синтеза диагностических тестов, в частности, на предприятиях электронной отрасли проведен анализ предметной области, что позволило сформулировать научную задачу диссертационного исследования;

2. Разработан метод генерации диагностических тестов. В основе метода лежит математическое моделирование взаимосвязанных физических процессов, протекающих в схемах и конструкциях электронных средств с применением современных САПР. Моделирование осуществляется на этапах схемотехнического проектирования ЭС. Моделирование проводится с целью выявления эффективных входных тестовых электрических сигналов, позволяющих обнаруживать и идентифицировать неисправности устройств в виде недопустимых отклонений параметров комплектующих элементов;

3. На основе физических законов зависимости параметров ЭРЭ от возмущающих факторов, в частности, температуры и старения, получены

математические выражения и разработан алгоритм расчета отбраковочных допусков на первичные параметры элементов, отличающиеся от технологических допусков;

4. С учетом особенностей математического моделирования электрических процессов в схемах ЭС по постоянному току, в частотной области и в динамическом режиме предложен алгоритм синтеза диагностических тестовых сигналов, достаточных для локализации неисправности до уровня параметра элемента схемы. При этом, также учитываются метрологические возможности диагностического оборудования;

5. Разработаны архитектура программного комплекса, включающего в себя современные САПР электронных средств и инженерная методика синтеза эффективных тестовых сигналов для практического использования разработанных метода и алгоритмов в процессе автоматизированного проектирования ЭС;

6. Проведены численные и натурные экспериментальные исследования, подтверждающие правильность теоретических предположений, достоверность полученных результатов и эффективность практического применения метода генерации диагностических тестовых сигналов в процессе автоматизированного проектирования современных ЭС;

7. Основные результаты исследования широко апробированы на многих значимых научно-практических симпозиумах и конференциях и нашли поддержку среди ученых и специалистов в области автоматизации проектирования, неразрушающего контроля и технической диагностики электронных средств.

**Достоверность и обоснованность** полученных результатов подтверждается корректностью постановки задачи и применяемых методов исследования, согласованностью данных большого объема численных экспериментов с применением современных и широко апробированных



программных средств математического моделирования физических процессов в электронных средствах с данными, полученными в ходе натурных экспериментов с использованием поверенных контрольно-измерительных приборов.

Достоверность также подтверждается апробацией основных результатов работы на протяжении ряда лет на многих всероссийских и международных конференциях и публикациями в общедоступных рецензируемых изданиях, индексируемых в международных и отечественных базах цитирования WoS, Scopus и РИНЦ, а также внедрением результатов исследования в практику проектирования ЭС на предприятиях отрасли и в учебный процесс вузов по профильным направлениям подготовки студентов.

**Научная новизна** исследования заключается в том, что:

1. Разработан метод генерации тестовых воздействий, который отличается от известных последовательным математическим моделированием электрических процессов в ЭС в статическом режиме, в частотной и временной областях с учетом ограничений, накладываемых техническими условиями на комплектующие элементы к допустимым режимам их работы.

2. Предложен алгоритм расчета допусков на внутренние параметры комплектующих элементов, отличающийся от известных введением информации о рабочих температурах ЭРЭ и требуемого срока службы устройства, что позволяет в процессе схмотехнического проектирования вычислять предельные значения границ допусков.

3. Разработаны алгоритмы генерации тестов, отличающиеся от известных учетом особенностей проектируемого ЭС и метрологических характеристик контрольно-измерительного и диагностического оборудования, что позволяет целенаправленно подбирать эффективные значения тестовых сигналов для диагностирования ЭС как в режиме

постоянного тока, так и в динамическом режиме, и в малосигнальном режиме для частотной области.

4. Создано программно-методическое обеспечение, которое в отличие от известных дополняет схемотехнические САПР модулями и процедурами, позволяющими в процессе автоматизированного проектирования электронных средств сформировать необходимый для контроля технического состояния набор диагностических тестов.

### **Теоретическая значимость и практическая полезность**

Теоретическая значимость исследования состоит в развитии теории систем автоматизации проектирования электронных средств и методов неразрушающего контроля и технической диагностики ЭС, а ее практическая полезность заключается в том, что:

- Применение предложенного метода и средств при проектировании электронных средств позволят автоматизировать процесс генерации тестовых сигналов и, тем самым, повысить эффективность процесса диагностирования технического состояния ЭС при их производстве, выходном контроле, испытаниях и эксплуатации;

- Генерация эффективных воздействий обеспечат возможность обнаружить и локализовать неисправности электронных средств с требуемой полнотой на заданной глубине поиска;

- Разработанное программно-методическое обеспечение позволяет целенаправленно обеспечить контролепригодность ЭС при их автоматизированном проектировании.

Большое прикладное значение имеют результаты работы при внедрении новых технологий производства электронных средств, особенно при внедрении технологии 3D-печатных узлов.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Разработанный метод генерации диагностических тестов позволяет на этапах автоматизированного схемотехнического

проектирования электронных средств решить научную задачу по синтезу набора входных электрических сигналов, обеспечивающих необходимую контролепригодность ЭС с требуемой глубиной и заданной полнотой оценки технического состояния;

2. Предложенный алгоритм позволяет в процессе схемотехнического проектирования рассчитать величины отбраковочных допусков на значения параметра комплектующих ЭРЭ с учетом их рабочих температур и общего срока службы устройства;

3. Разработанные алгоритмы генерации тестов позволяют в статическом и динамическом режимах и в частотной области сформировать набор входных электрических сигналов, необходимых для выявления и локализации латентных неисправностей электронных средств;

4. Созданное программно-методическое обеспечение позволяет разработчику в процессе и на этапах схемотехнического и конструкторско-технологического проектирования обеспечить безусловную контролепригодность ЭС.

### **Апробация результатов**

Основные результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на всероссийских и международных конференциях:

1. 2020 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT), Москва, Россия, 11-13 марта 2020 г., доклад «Event-based Cooperation of Functional Networking Components in Distributed Technological Systems»

2. 2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT, Москва, Россия, 14-16 марта 2018г., доклад «Real-time sorting and lossless compression of data on FPGA»

3. International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON, Moscow, May 12-14, 2016; тема докладов: "The algorithm for battery

charge control of renewable energy sources — Wind turbine and solar panel", "Lossless compression algorithm for use in telecommunication systems".

4. Межвузовская научно-технической конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов им. Е.В. Арменского, г. Москва, Россия, 16 - 29 февраля 2016 г., доклад «Анализ особенностей формирования тестов для диагностики аппаратуры методом справочников неисправностей»;

5. Межвузовская научно-технической конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов им. Е.В. Арменского, г. Москва, Россия, 17 февраля - 1 марта 2017 г. доклад «Уточнение отбраковочных допусков на электрические параметры элементов схемы с учетом температурного режима»;

6. International scientific-practical conference "Information Innovative Technologies", Prague, Czech Republic, April 24-26, 2016, April 24-28, 2017; International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED), April 23-24 апреля 2019 г., доклады: «Intelligent Power Electronic Converter For Wired and Wireless Distributed Applications» и «The System of Automated Circuit Simulation of Electronic Devices»

7. Международная научно-практическая конференция "Инновационные, информационные и коммуникационные технологии", г. Сочи, 1-10 октября 2016, 2017, 2018 гг. доклады на тему: «Оптимизация параметров БИХ-фильтров с помощью алгоритма роя частиц», «Применение подхода Сешу-Уоксмана для формирования эффективных тестовых воздействий», «Метод проектирования аналоговых фильтров УКВ диапазона на сосредоточенных постоянных элементах»;

По теме диссертации опубликовано 24 работы, в том числе, 14 в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science.

**Список опубликованных статей, отражающих основные результаты диссертации**

Работы, опубликованные автором в рецензируемых научных изданиях, входящих в международные системы цитирования Scopus и WoS:

1. Event-based Cooperation of Functional Networking Components in Distributed Technological Systems». Valery A. Kokovin; Alexander A. Evsikov ; Saygid U. Uvaysov ; Svetlana S. Uvaysova. Publication Year: 2020, Page(s): 1 – 5, 2020 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT).
2. Petr Bushmelev, P., Uvaysov, S., Bushmeleva, K., Romaniuk, R., Wojcik, W., Uvaysova, S. "Model of a telecommunication system for monitoring gas leaks from gas pipelines", Conference Paper, March 2019, DOI: 10.1117/12.2522417, Conference: on Optical Fibers 18th Conference and Their Applications, At <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/11045/110450P/Model-of-a-telecommunication-system-for-monitoring-gas-leaks-from/10.1117/12.2522417.short.short?SSO=1>, Volume: Proceedings SPIE 110045.
3. Gurov, E., Uvaysova, S., Uvaysov, S., Wojcik, W. "Evaluation of the minimum necessary order of a passive analog low-pass filter in VHF band using untunable SMD components". Conference Paper March 2019, DOI: 10.1117/12.2522416, Conference: 18th Conference on Optical Fibers and Their Applications.
4. Valery A. Kokovin, Vladimir I. Diagilev, Jaroslav Halik, Svetlana S. Uvaysova "Intelligent Power Electronic Converter For Wired and Wireless Distributed Applications", 2019 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED) 978-1-5386-6525-1/19/\$31.00 ©2019 IEEE.
5. Kiya Bushmeleva, Svetlana Uvaysova, Oksana Avdeuk, Aida Uvaysova "The System of Automated Circuit Simulation of Electronic Devices", 2019 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED) 978-1-5386-6525-1/19/\$31.00 ©2019 IEEE.
6. Kokovin V.A., Uvaysov S.U., Uvaysova S.S. «Real-time sorting and lossless compression of data on FPGA». Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2018 - Proceedings 1. 2018. C. 1-5.
7. Timchenko L.I., Petrovskiy M.S., Kokryatskay N.I., Stepanikuk D.S., Barylo A.S., Dembitska S.V., Suleimenov B., Zyska T., Uvaysova S., Shedreyeva

I. «Algorithm of parallel: hierarchical transformation and its implementation on FPGA» Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering Cep. "Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2017" 2017. C. 104451Z.

8. Kupershtein L.M., Martyniuk T.B., Krencin M.D., Kozhemiako A.V., Bezsmertnyi Y., Bezsmertna H., Kolimoldayev M., Smolarz A., Weryska-Bieniasz R., Uvaysova S. «Neural expert decision support system for stroke diagnosis». Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering Cep. "Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2017" 2017. C. 104453I.

9. Oliynyk A., Oliynyk E., Pyptiuk O., Dzierlak R., Szatkowska M., Uvaysova S., Kozbekova A. «The human body metabolism process mathematical simulation based on lotka-volterra model». Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering Cep. "Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2017" 2017. C. 104453L.

10. Timchenko L.I., Kokryatskaya N.I., Poplavska A.A., Pavlov S.V., Kobylyanska I.M., Burdenyuk I.I., Wójcik W., Uvaysova S., Orazbekov Z., Kashaganova G. «Bio-inspired approach to multistage image processing». Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering Cep. "Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2017" 2017. C. 104453M.

11. Antonenko Y.A., Mustetsov T.N., Hamdi R.R., MaŁecka-Massalska T., Dzierlak R., Orshubekov N., Uvaysova S. «Double-compression method for biomedical images». Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering Cep. "Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2017" 2017. C. 104453P.

12. Petruk, v., Kvaternyuk, s., Uvaysova, s. et al. Assessment of the validity of the diagnosis of damage of tissues by multispectral method using neural network //Przegląd Elektrotechniczny. – 2017. – Т. 3. – №. 7. – С. 1.

13. Ivanov O.A., Uvaysov S.U., Ivanov I.A., Uvaysova S.S. "The algorithm for battery charge control of renewable energy sources—Wind turbine and solar panel" //2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – IEEE, 2016.

14. Kokovin V. A., Uvaysova S. S., Uvaysov S. U. Lossless compression algorithm for use in telecommunication systems //2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – IEEE, 2016.

Работы, опубликованные автором в научных журналах входящих в подготовленный в НИУ ВШЭ список журналов высокого уровня:

15. Дягилев В.И., Коковин В.А., Увайсов С.У., Увайсова С.С. «Компьютерное моделирование работы силового преобразователя с выходным синусоидальным напряжением» Информационные технологии. 2016. Т. 22. № 4. С. 261-266.

Публикации соискателя в других изданиях:

16. Ковалев В.В., Увайсова С.С., Увайсов С.У. "Применение LED спектроэллипсометрии в мониторинге состояния водных сред". Инновационные, информационные и коммуникационные технологии: сборник трудов XV Международной научно-практической конференции/ под.ред. С.У.Увайсова - Москва: Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА им. проф. Жуковского, 2018, с.652 ISSN 2500-1248.

17. Ivanov O.A., \*Uvaysov S.U., Uvaysova S.S. «Clarification of rejection tolerances for electrical parameters of scheme elements with regard to temperature regime». pp. 558-561. Information Innovative Technologies: Materials of the International scientific-practical conference. / Ed/ Uvaysov S.U., Ivanov I.A. - M.: Association of graduates and employees of AFEA named after prof. Zhukovsky, 2017, 700p. ISSN 2542-1824.

18. Гуров Е.В., Увайсова С.С., Шедреева И.Б., Карнакова Г.Ж. "Метод проектирования аналоговых фильтров УКВ диапазона на сосредоточенных постоянных элементах". Инновационные, информационные и коммуникационные технологии: сборник трудов XIV Международной научно-практической конференции/ под.ред. С.У.Увайсова - Москва: Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА им. проф. Жуковского, 2017, 720с. ISSN 2500-1248.

19. Diagilev V.I., Kokovin V.A., Uvaysov S.U., Uvaysova S.S. «Computer simulation of the power converter with harmonic wave output». International Journal of Information Technologies and Systems Approach. 2016. Т. 22. № 4. С. 261.

20. С.М. Лышов, И.А. Иванов, А.С. Увайсова, С.С. Увайсова "Расчет разбросов резонансных частот печатных узлов электронных средств", Вестник Кибернетики, том 32, 2018 г. №4, Тюмень: Изд-во ИПОС СО РАН, 2003-, ISSN 1811-7430.

### **Структура и содержание работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения, списка цитируемых источников и приложения с актами внедрения результатов исследования.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы объект и предмет исследования, определена цель работы и задачи для ее достижений и кратко представлены содержание и основные результаты диссертационного исследования.

**Первая глава** посвящена обзору и анализу предметной области на основе изучения литературных источников и современного опыта автоматизированного проектирования ЭС. Выявлены недостатки существующих подходов к синтезу тестов при проектировании электронных средств.



Проанализированы схемотехнические и конструкторско-технологические особенности современных электронных средств как объектов диагностирования.

Проведен сопоставительный анализ существующих САПР электронных средств на предмет их использования в процессе формирования необходимого набора диагностических тестовых сигналов, достаточных для локализации латентных дефектов в процессе производства, выходного контроля, испытаний и применения ЭС по назначению.

Сформулирована постановка задачи научного исследования и представлены краткие выводы по главе.

**Во второй главе** определены требования к методу генерации диагностических тестов на этапах схемотехнического проектирования электронных средств.

В соответствии с заданными требованиями разработан метод, который основан на компьютерном моделировании электрической схемы электронного средства при наличии в нем как катастрофических, так и параметрических неисправностей комплектующих ЭРЭ. Предложенный в работе подход позволяет формировать необходимый набор тестовых сигналов при использовании метода справочника неисправностей и метода параметрической идентификации.

Диагностическими признаками при идентификации неисправностей являются первичные параметры элементов схемы ЭС. Для вычисления значений отбраковочных допусков на эти параметры получены математические выражения и соответствующий алгоритм для учета температурного фактора и старения.

Разработанный алгоритм диагностического моделирования позволяет синтезировать эффективные тестовые сигналы при исследовании ЭС в статическом режиме, в частотной и временной областях.

**Третья глава** посвящена разработке программно-методического обеспечения процесса генерации диагностических тестовых сигналов на этапах схемотехнического проектирования ЭС.

Предложена архитектура программного комплекса, который с использованием современных САПР схемотехнического и конструкторско-технологического проектирования позволяет автоматизировать процесс генерации диагностических тестов.

Для использования в практике автоматизированного проектирования электронных средств разработана инженерная методика формирования необходимого набора тестовых сигналов, которые позволят на этапах производства, испытаний и эксплуатации оперативно обнаруживать и идентифицировать неисправности ЭС.

**Четвертая глава** содержит данные численных и натуральных экспериментальных исследований, подтверждающих обоснованность и достоверность результатов диссертационной работы.

Численные исследования проведены с применением современных систем автоматизированного проектирования, а натурные эксперименты, с использованием поверенных контрольно-измерительных приборов.

Приведены практические результаты применения метода при автоматизированном проектировании аналоговых схем.

**В заключении** перечислены основные результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы и обозначены перспективные направления для продолжения дальнейших исследований.